

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

Indirizzo Geotecnica



Tesi di Laurea Magistrale

**OTTIMIZZAZIONE DELLO SCAMBIO TERMICO
DI CONCI ENERGETICI PER LE GALLERIE**

Relatore:

Barla Marco

Zerbinatti Marco

Palmero Paola

Insana Alessandra

Candidato:

Salomone Lorenzo

*“Io devo studiare sodo e preparare me stesso
perché prima o poi verrà il mio momento”*

Abraham Lincoln

SOMMARIO

INTRODUZIONE E OBIETTIVI.....	7
1. GEOTERMIA.....	9
1.1. Energia geotermica.....	10
1.1.1. Storia della geotermia.....	11
1.1.2. Natura delle risorse geotermiche.....	21
1.1.3. Proprietà termiche del suolo.....	29
1.1.4. Sistemi geotermici.....	33
1.1.5. Classificazione delle risorse geotermiche.....	39
1.2. Energia geotermica a bassa entalpia.....	44
1.2.1. Pompe di calore.....	46
1.2.2. Tipi di sistemi di geoscambio.....	57
1.3. Geostrutture energetiche.....	65
1.3.1. Fondazioni energetiche.....	68
1.3.1.1. Pali energetici.....	72
1.3.1.2. Diaframmi energetici.....	81
1.3.1.3. Ancoraggi energetici.....	87
1.4. Gallerie energetiche.....	92
1.5. Concio energetico.....	102
2. MATERIALE GEOPOLIMERICO INNOVATIVO DA FANGHI DA LAVORAZIONE LAPIDEA.....	119
2.1. Estrazione della pietra ornamentale.....	120
2.2. Produzione e composizione dei fanghi di segazione.....	125
2.3. Geopolimeri.....	132

2.3.1.	Definizione e cenni storici.....	132
2.3.2.	Materiali costituenti e chimica del processo	133
2.3.3.	Proprietà e applicazioni dei geopolimeri.....	143
3.	PROVE SPERIMENTALI IN LABORATORIO: CONDUCIBILITA', MODULO ELASTICO DINAMICO E STATICO	153
3.1.	Descrizione generale piano sperimentale.....	154
3.2.	Preparazione campione a base cementizia	155
3.3.	Preparazione campione geopolimerico a base di polvere lapidea.....	156
3.3.1.	Costruzione cassero	156
3.3.2.	Composizione percentuale di base	157
3.3.2.1.	Fase solida	158
3.3.2.2.	Fase liquida	167
3.3.3.	Test sul nuovo dosaggio dei reagenti.....	168
3.3.4.	Risoluzione problemi di ritiro volumetrico e stati di coazione durante la stagionatura	170
3.3.4.1.	Studio curva granulometrica di progetto	182
3.4.	Descrizione apparato sperimentale e test in laboratorio.....	192
3.4.1.	Termoflussimetro: conducibilità termica.....	192
3.4.2.	Camera climatica	201
3.4.3.	Prova ad ultrasuoni: modulo elastico dinamico.....	204
3.4.4.	Prove di flessione e compressione: carico a rottura e modulo elastico statico	210
4.	ANALISI NUMERICHE DELLO SCAMBIO TERMICO DI CONCI ENERGETICI PER LE GALLERIE.....	223
4.1.	Introduzione a Flac3d.....	224

4.1.1.	Caratteristiche generali	225
4.1.2.	Modellazione processo fisico e interazioni	226
4.1.3.	Nomenclatura.....	227
4.1.4.	Convezione dei segni	232
4.1.5.	Sistema di unità di misura.....	234
4.1.6.	Approccio generale per la risoluzione di analisi numeriche.....	236
4.2.	Analisi termica	241
4.2.1.	Convenzioni e definizioni	241
4.2.2.	Conduzione	242
4.2.2.1.	Equazione di bilancio dell'energia	243
4.2.2.2.	Legge di trasporto di calore	244
4.2.3.	Avvezione	245
4.2.3.1.	Equazione di bilanciamento per il trasporto di calore per diffusione e convezione	245
4.2.3.2.	Legge di trasporto.....	247
4.2.4.	Formulazione numerica.....	248
4.2.4.1.	Conduzione	248
4.2.4.2.	Avvezione	258
4.3.	Modellazione numerica	261
4.3.1.	Definizione degli obiettivi per l'analisi del modello.....	261
4.3.2.	Modellazione test in laboratorio: termoflussimetro	261
4.3.2.1.	Dominio e discretizzazione	262
4.3.2.2.	Scelta delle variabili, condizioni al contorno e condizioni iniziali	264
4.3.2.3.	Modello costituente	265
4.3.2.4.	Validazione modello numerico.....	265

4.3.2.5. Campione a base cementizia	270
4.3.2.6. Campione a base geopolimerica	272
4.3.3. Studio dell'ottimizzazione termica dei conci di galleria	274
5. CONCLUSIONI.....	291
6. ALLEGATI	297
6.1. Allegato 1: diario di laboratorio	298
6.2. Allegato 2: scheda tecnica campione a base cementizia	301
6.3. Allegato 3: composizione granulometrica e vuoti apparenti sabbie di laboratorio	302
6.4. Allegato 4: scheda tecnica NaOH	308
6.5. Allegato 5: certificato di analisi e conformità Sol. Sodio Silicato	311
6.6. Allegato 6: composizione campioni miscela n.1	312
6.7. Allegato 7: composizione campioni miscela n.2.....	313
6.8. Allegato 8: composizione campioni miscela n.3.....	314
6.9. Allegato 9: composizione granulometrica fase solida FG4/FGN	315
6.10. Allegato 10: definizione delle curve di progetto	316
6.11. Allegato 11: studio granulometrico curve di progetto	321
6.12. Allegato 12: composizione campioni miscela n.4.....	327
6.13. Allegato 13: composizione campioni miscela n.5.....	328
6.14. Allegato 14: composizione campioni miscela n.6.....	329
6.15. Allegato 15: scheda tecnica camera climatica Challenge 250.....	330
6.16. Allegato 16: scheda tecnica Sirio RP 4000 CSM	333
6.17. Allegato 17: MODULO ELASTICO DINAMICO	335
6.18. Allegato 18: COMPORTAMENTO A FLESSIONE	336
6.19. Allegato 19: metodo B normativa UNI EN 12390 - 13	338

6.20.	Allegato 20: MODULO ELASTICO SECANTE.....	339
6.21.	Allegato 21: OUTPUT ANALISI NUMERICHE	349
	INDICE DELLE FIGURE	355
	INDICE DELLE TABELLE	363
	BIBLIOGRAFIA.....	365
	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	374
	SITOGRAFIA.....	375

INTRODUZIONE E OBIETTIVI

L'aumento della concentrazione di anidride carbonica, correlato al riscaldamento del pianeta e ai conseguenti mutamenti del clima, è diventato, nel corso del novecento, argomento di grande attualità. Con lo sviluppo industriale si è rilevato un rapido aumento della concentrazione del gas serra CO₂, passando da 200 ppm misurati negli anni '60 a 410 ppm attuali (Mercalli L. 2018) portando all'instabilità climatica globale. Per impedire ulteriori aumenti del surriscaldamento globale e invertirne il trend, parallelamente ai negoziati internazionali, dove si innovano strategie e accordi sul clima, si rendono necessari continui sviluppi delle tecnologie per lo sfruttamento di nuove risorse energetiche. Oltre alle risorse solari, eoliche e idriche si stanno progettando nuove soluzioni per lo sfruttamento geotermico, quindi il recupero e l'utilizzo del calore della terra. Dagli anni '70, oltre ai classici impianti geotermici, si è osservata una diffusione sempre maggiore delle cosiddette geostrutture energetiche, così definite poiché associano al loro principale ruolo strutturale la funzione di scambiatore di calore. In particolare le gallerie energetiche offrono una potenziale superficie per lo scambio termico maggiore rispetto ad altre geostrutture. In questo contesto lo scavo meccanizzato per la realizzazione delle gallerie rappresenta le condizioni ideali ai fini geotermici, sono stati infatti sviluppati nuovi conci che, integrati con un sistema di tubi scambiatori, permettono lo sfruttamento energetico del rivestimento. Inoltre per l'abbattimento della produzione dei gas serra risulta fondamentale abbattere gli sprechi e trovare nuove forme di applicazione di materiale considerato scarto e valorizzarlo come fonte di guadagno per mantenere il bilancio energetico della produzione in positivo.

L'obiettivo del progetto di tesi è proprio questo trovare nuove applicazioni di un innovativo materiale geopolimerico derivante da polvere lapidea nella composizione della struttura delle gallerie energetiche e lo studio delle proprietà

termiche dei conci e la possibile ottimizzazione del loro comportamento termico modificando la stratigrafia con l' utilizzo di analisi numeriche.

Quindi si è reso necessario lo studio e le misurazioni, attraverso test di laboratorio, delle proprietà termiche di conducibilità (conduttività) e resistenza termica del materiale geopolimerico. A completamento del progetto sono state inoltre studiate le proprietà meccaniche per valutare l'effettiva possibilità di impiego.

1. GEOTERMIA

1.1. Energia geotermica

Il nostro Pianeta emette costantemente energia sotto forma di calore, che dalle zone più profonde si propaga verso la superficie: si tratta del cosiddetto flusso di calore, o flusso geotermico.

Il flusso di calore è maggiore nelle aree dove lo spessore della litosfera è ridotto, come, per esempio, lungo le dorsali oceaniche o nelle zone di rifting continentale, oppure in aree vulcaniche, dove diversi processi geologici portano alla fusione delle rocce, o in aree dove siano presenti magmi in lento raffreddamento nel sottosuolo.

Il calore del Sole riscalda la superficie terrestre con un flusso che è quasi 6.000 volte superiore a quello prodotto dall'interno della Terra, tuttavia il flusso geotermico, costante e continuo, rappresenta un'importante fonte di riscaldamento per il nostro Pianeta: con una media di 0,06 watt per m², dall'intera superficie terrestre si irradia una quantità di calore pari a circa 30.000 miliardi di watt.

Il gradiente geotermico (cioè l'aumento di temperatura con la profondità), a causa dei diversi spessori della crosta terrestre e delle diverse situazioni geologiche, non è uguale in tutta la Terra: in media la temperatura aumenta di 2-3° C ogni 100 m di profondità, ma l'aumento può variare da 1 fino a 5° C/100 m.

L'energia termica della Terra è quindi enorme, ma soltanto una parte di essa può essere sfruttata. Sino a oggi, l'utilizzo di questa energia è stata limitata a quelle aree nelle quali le condizioni geologiche permettono a un vettore (acqua in fase liquida o vapore) di "trasportare" il calore dalle formazioni calde profonde alla superficie o vicino a essa, formando quelle che sono chiamate risorse geotermiche. Nuovi modi per estrarre e sfruttare tale risorsa potrebbero però essere aperte in un futuro prossimo grazie a metodi innovativi e tecnologie d'avanguardia, alcuni già in fase di sperimentazione. Un esempio è rappresentato dal campo sperimentale installato con l'occasione del prolungamento della

linea 1 della metro nella città di Torino, nel quale si osserveranno e quantificheranno le prestazioni energetiche di un tratto della prima galleria energetica italiana (Barla M. et al. 2017).

In passato in numerosi settori, come ad esempio quello termale nell'antichità o più recentemente nelle industrie chimiche e di produzione di energia geotermica italiane, la pratica ha spesso preceduto la teoria. Molte risorse sono state sfruttate inizialmente senza conoscerne esattamente la natura e solo in un secondo momento sono state studiate scientificamente per sviluppare una conseguente tecnologia.

1.1.1. Storia della geotermia

L'inizio del rapporto uomo-geotermia può essere individuato nella fase medio superiore del Neolitico, tra il quarto e il terzo millennio a. C., periodo di cui si hanno prove sulla frequentazione di località termali e uso di minerali, fluidi e rocce ignee.

Questo rapporto meramente funzionale basato su balneologia termale e uso dei sottoprodotti del calore terrestre, insieme a quello religioso-spirituale, rimase per molto tempo l'unico tipo di rapporto e conobbe una fase di decadenza, coincidente con il declino dell'Impero di Roma.

Alla fine del Medio Evo, a partire dal 1400, si verificò, in Toscana, in particolare nella zona nota come Regione Boracifera, una nuova fioritura di pratiche termali e estrazioni di minerali idrotermali. Pur non arrivando ai livelli raggiunti ai tempi di Roma, acquisirono localmente una significativa importanza sul piano commerciale e sociale. Con il progredire dell'industrializzazione, prodotti borici e idrotermali divennero indispensabili per il settore tessile portando Firenze a una posizione in primo piano in Europa fino alla fine del 1700 quando subì, a causa del forte depauperamento delle materie prime, un rallentamento e una nuova fase di accentuato declino per oltre un secolo.

L'uso dei prodotti idrotermali risorse nei primi decenni del XIX secolo e andò incontro a un nuovo forte sviluppo con la nascita dell'industria chimica di Larderello e la fondazione delle prime società di produzione dell'acido borico.

In pochi anni, insieme all'acido borico, iniziarono a essere estratti nuovi composti chimici di largo uso nell'industria farmaceutica e utili a una diversificazione della produzione, la quale crebbe per oltre un secolo raggiungendo, nel 1850, 1000 tonnellate/anno, grazie soprattutto a successive innovazioni tecnologiche (lagoni artificiali, lagoni coperti, lagoni a cascata e caldaia adriana), perforazioni sempre più profonde (da 25-30 m nel 1842 a 250-300 nel 1900) e miglioramenti organizzativi nei cicli per l'utilizzo e il trasporto dei fluidi (Barbier et al. 2007).

Mentre questo accadeva in Italia, anche in altri paesi si sviluppava lo sfruttamento industriale dell'energia geotermica: nel 1892 a Boise (Idaho, USA) veniva inaugurato il primo sistema di riscaldamento urbano; nel 1928 l'Islanda, un altro paese all'avanguardia nell'utilizzazione di questa fonte energetica in Europa, cominciò a sfruttare i flussi geotermici, soprattutto per la produzione di acqua calda e per il riscaldamento di edifici.

Alla fine del XIX secolo gli stabilimenti di Larderello furono affidati al Principe Piero Ginori Conti (genero del nipote di François de Larderel). Egli avviò un programma di innovazione tecnologica volto ad ammodernare i processi produttivi dell'industria, ampliando gli interessi verso altri settori della geotermia. Fu così che nel 1903 iniziarono le prime ricerche e prove di laboratorio finalizzati allo studio di fattibilità per l'utilizzo del vapore naturale per produrre al tempo stesso acido borico ed energia di tipo meccanico.

Nel 1904 egli mise in funzione il primo laboratorio geochimico mobile per campionare e analizzare fluidi e gas nel sottosuolo. Il 4 di luglio dello stesso anno venne eseguito con successo il primo esperimento di produzione elettrica con energia geotermica. Con una dinamo da 10 kW accoppiata da un motore a

pistoni alternato utilizzando il vapore endogeno, Piero Ginori Conti riuscì ad accendere cinque lampadine (Luzzini F. 2012). Nasceva l'energia geotermica.

L'anno successivo Ginori Conti riuscì a ottenere una potenza di circa 20 kW_e (kilowatt elettrici) adoperando un motore a vapore, rendendo così possibile l'illuminazione dell'intero stabilimento.

Per potenza si intende il lavoro compiuto nell'unità di tempo. Occorre fare la distinzione tra potenza elettrica e potenza termica espresse rispettivamente con le unità di misura di kilowatt elettrici kW_e e kilowatt termici kW_t, si utilizza quest'ultima unità di misura quando si intende che il calore non è convertito in altre forme di energia ma è utilizzato come tale ed equivale a circa tre volte la potenza elettrica. Non è vero il contrario in quanto l'energia elettrica si può convertire quasi totalmente in calore senza perdite.

Il successo di questo esperimento e successivi studi consentirono nel 1913 la realizzazione della prima centrale elettrica al mondo (Larderello 1) in grado di soddisfare il fabbisogno di elettricità degli stabilimenti per l'estrazione dell'acido, dello stabilimento per l'estrazione del sale presso Saline di Volterra, del paese di Pomarance e della città di Volterra. Fece seguito nel 1914 la prima linea elettrica al mondo alimentata da fonti geologiche di calore, che collegava Larderello a Volterra, coprendo una distanza di circa 25 Km.

L'impianto di produzione sperimentale rimase in funzione fino al 1916, anno in cui fu realizzato un impianto costituito da 2 alternatori accoppiati ciascuno con una turbina a vapore e dotati di una potenza individuale di 3500 kW_e, dando così inizio alla produzione su scala industriale di elettricità.

Queste innovazioni furono emulate, in seguito, in altri Paesi. In particolare in quelle zone in cui vi erano evidenti manifestazioni superficiali della presenza nel sottosuolo di elevate quantità di fluidi geotermici ad alta temperatura. Nel 1921 negli USA, in un centro turistico termale denominato The Geysers, presso una valle situata a nord di San Francisco, entrò in funzione una centrale elettri-

ca geotermica dotata di 250 kW_e di potenza e in grado di soddisfare il fabbisogno di energia elettrica del centro turistico stesso. Nel 1924 in Giappone, presso l'isola di Kyushu, nell'area di Beppu, erano stati già perforati vari pozzi che consentivano di estrarre più di 16000 tonnellate di vapore al giorno, corrispondenti a una potenza pari a 43 MW_e. (Lund J. W. 2009)

In Italia, intanto, si passò alle sperimentazioni su gruppi geotermoelettrici a ciclo diretto, che portarono, nel dicembre del 1930, la potenza geotermoelettrica installata nella regione a valori complessivi di 11.9 MW, dei quali 7 a ciclo indiretto e 4,9 a ciclo diretto. In una decina d'anni la produzione si decuplicò: vennero installati diversi gruppi geotermoelettrici a ciclo diretto e non, dislocati nei paesi di Castelnuovo Val di Cecina, Serrazzano e Sasso Pisano; entrò in vigore Larderello 2, centrale geotermica a ciclo indiretto e si raggiunse una potenza geotermoelettrica, alla fine del 1943, di 123,9 MW.

Solo gli eventi bellici della II Guerra Mondiale bloccarono la crescita ammirevole dell'industria geotermoelettrica italiana. Vennero rase al suolo tutte le centrali e gli impianti di produzione chimica della Regione Boracifera con eccezione del gruppo pilota installato a Serrazzano, dal quale ripartirono i lavori di ricostruzione e di recupero della produzione. In pochi anni la potenza installata raggiunse di 260 MW_e, per arrivare nel 1960 a 300 MW_e. Dopo la guerra in tutto il mondo venne riconosciuta la potenzialità dell'energia geotermica per la produzione.

Alla fine del 2009, la capacità mondiale di energia geotermica installata è stata di circa 10,7 GW_e per la produzione di elettricità e 50,6 GW_{th} per uso diretto. Inoltre quasi 440 PJ di calore diretto sono stati utilizzati con pompe di calore geotermiche (GSHP) (Buona G. et al. 2007). L'energia geotermica rappresentava una quota significativa della totale domanda di energia elettrica in Islanda (25%), El Salvador (22%), Kenya e Filippine (17% ciascuno) e Costa Rica (13%). In cifre assolute, sono stati gli USA i maggior produttori di elettricità a partire da energia geotermica: circa 16603 GWh da una potenza installata di 3093 MWe

(Tabella 1.1). Oltre 70 paesi utilizzavano l'energia geotermica per usi non elettrici, ovvero per applicazioni dirette del calore geotermico. Gli utilizzi più diffusi nel mondo erano rappresentati da: pompe di calore geotermiche (GSHP) per il 32%, balneazione per il 30% (incluso il riscaldamento di piscine e balneoterapia), riscaldamento di ambienti per il 20%, riscaldamento di serre e suoli coltivabili per il 7,5%, processi industriali a caldo per il 4%, acquacoltura per il 4%, e il restante 2,5% era rappresentato dal raffreddamento ed essiccazione di prodotti agricoli e decongelamento delle strade (Lund J. W. et al. 2015).

produzione elettrica		uso diretto	
stato	GWh/anno	stato	GWh/anno
U.S.A.	16606	Cina	20932
Filippine	10311	U.S.A	15710
Indonesia	9600	Svezia	12585
Messico	7047	Turchia	10247
Italia	5520	Giappone	7139
Islanda	4597	Norvegia	7000
Nuova Zelanda	4055	Islanda	6768
Giappone	3064	Francia	3592
Kenya	1430	Germania	3546
El Salvador	1422	Olanda	2972
Costa Rica	1131	Italia	2762
Turchia	490	Ungheria	2713
Papua Nuova Guinea	450	Nuova Zelanda	2654
Russia	441	Canada	2465
Nicaragua	310	Finlandia	2325

Tabella 1.1: produzione di energia geotermoelettrica (International energy agency OECD, 2010)

L'energia termica totale consumata nel 2009 è stata essere pari al 60% in più rispetto al 2005. Questo è significativo di una notevole crescita nel mercato GSHP, continua in tutto il mondo, con circa 2,9 milioni di unità installate, più di 35 GWth di capacità e più di 214 PJ di calore prodotto.

Nel 2009 è stato dato un nuovo impulso alla produzione di energia rinnovabile. In seguito all'adesione al Protocollo di Kyoto è entrata in vigore nel 2009 la Direttiva Europea 2009/29/CE. Tra i punti fondamentali è definito il "Progetto

Europeo 20-20-20” e pone come obiettivi, da raggiungere nel 2020: la riduzione delle emissioni del gas serra del 20%, l’incremento del 20% della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili con il 20% di risparmio energetico. Legato a questa direttiva ogni Stato membro ha dovuto redigere “Piano d’Azione Nazionale per l’Energia Rinnovabile” (NREAP, DE 2009/28/CE) con il quale vengono definiti gli obiettivi e gli stadi di avanzamento degli sviluppi di fonti rinnovabili e tra questi anche le fonti di energia geotermica.

Con riferimento al Joint Research Centre Science for Policy Report (2014) è possibile osservare una contingente raccolta di dati che riguarda il 2012. Nel documento viene considerata come classificazione delle risorse e della produzione di calore geotermico la suddivisione proposta da Antics (2013). Questa classificazione, utilizzata anche dell’Ufficio dell’Unione Europea (Eurostat), fa riferimento ai valori di produzione geotermica profonda (calore diretto), geotermica superficiale (soprattutto ground source heat pump) e capacità di produzione di energia geotermica installata.

Dalle Tabella 1.2 Tabella 1.4 si evince un andamento positivo e i dati sembrano essere favorevoli a una continua e fiduciosa crescita, sebbene i fondi europei stanziati per lo sviluppo di progetti per l’estrazione e lo sfruttamento di energia termica siano stati decisamente inferiori rispetto a quelli dedicati alle altre forme di energia rinnovabile. Fino al 2012 sono stati destinati € 1.7 miliardi per le fonti rinnovabili ma solo una piccola parte è stata concessa per l’energia geotermica per un ammontare di € 29.4 milioni.

Nel 2012, per quanto riguarda la produzione di calore geotermico a bassa entalpia (Tabella 1.2), si sono distinti con risultati esemplari Austria e Svezia e solo Inghilterra e Francia hanno raggiunto valori molto distanti da quelli prefissati.

Country	2012				2020
	NREAP target	Reported values ¹	Difference	% difference	NREAP target
	GWh _{th}	GWh _{th}	GWh _{th}		GWh _{th}
AT	128	1440	1312	1026	302
BE	442	335	-107	-24	1710
DE	3710	4200	490	13	6059
DK	1570	695	-875	-56	2314
EL	105	135	30	29	582
ES	187	210	23	12	471
FR	3954	2775	-1179	-30	6629
HU	70	110	40	58	1244
IT	779	472	-307	-39	6071
NL	1372	880	-492	-36	2814
RO	12	32	20	175	93
SE	4431	15200	10769	243	9478
SI	151	96	-55	-37	442
SK	12		-12	-100	47
UK	2024	500	-1524	-75	11083

Tabella 1.2: produzione di calore geotermico a bassa entalpia per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)

Leggermente al di sotto delle previsioni sono risultati i valori relativi alla produzione di energia geotermica profonda come presentato nella Tabella 1.3.

Country	2012				2020
	NREAP target	Reported values ¹	Difference	% difference	NREAP target
	GWh _{th}	GWh _{th}	GWh _{th}		GWh _{th}
AT	256	184	-72	-28	465
BE	41	18	-23	-56	66
BG	28	16	-12	-44	105
CZ	0	25	25	0	174
DE	1326	729	-597	-45	7978
EL	244	504	260	106	593
ES	44			0	110
FR	2268	1316	-952	-42	5815
HU	1396	2849	1453	104	4152
IT	2780	2368	-412	-15	3489
LT	35	93	58	167	58
NL	872	202	-670	-77	3012
PL	337	187	-151	-45	2070
PT	163	96	-67	-41	291
RO	407	362	-45	-11	930
SE		270	270	0	
SI	209	164	-45	-22	233
SK	35			0	1047
UK		21	21	0	

Tabella 1.3: produzione di energia geotermica profonda per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)

Infine la Tabella 1.4 presenta la capacità energetica degli impianti geotermici. Il maggior contributo è dato dall'industria italiana e grazie a essa è stato possibile superare i target del NREAP.

Country	2012				2020 target
	NREAP target	Reported values ¹	Difference	% difference	
	MW	MW	MW		
AT	1	1.4	0.4	40	1
BE	0		0	0	3.5
CZ	0		0	0	4.4
DE	27	11.9	-15.1	-56	298
EL	0		0	0	120
ES	0		0	0	50
FR	37	17	-20	-54	80
HU	0		0	0	57
IT	787	875.5	88.5	11	920
PT	25	28.5	3.5	14	75
RO	0	0.05	0.05	0	0
SK	4		-4	-100	4

Tabella 1.4: capacità energetica degli impianti geotermici per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)

In generale, osservando i dati nella Tabella 1.5 dove i dati fanno riferimento alla produzione europea, si osservano buoni risultati. Rispetto al target del Piano Nazionale prefissati del 2012, si è osservato un superamento del 40% della produzione di energia a bassa entalpia (soprattutto GSHP), il raggiungimento del 90% della produzione del calore per uso diretto e l'11% in più in termini di potenza installata.

Tipo	Valori 2012	NREAP target 2012	NREAP target 2020
Geotermia superficiale (GSHP)	GWh _{th} 27080	18946	49340
Risorse geotermiche profonde (uso diretto)	GWh _{th} 9409	10440	30589
Capacità potenza geotermica	GWh _{th} 876	787	1612

Tabella 1.5: produzione e capacità di energia geotermica installata per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)

In generale occorre puntualizzare che miglioramenti delle tecnologie di perforazione per raggiungere profondità maggiori e nuove tecniche di estrazione del calore geotermico sono il punto fondamentale per un aumento della produzione di energia e possibile uso diretto del calore geotermico. Le potenzialità di questa forma di energia è infatti altissima. Utilizzata per la produzione di energia elettrica, garantirebbe il fabbisogno interno per diversi Stati.

Per comprendere meglio le potenzialità dell'energia geotermica si utilizza un parametro economico, il costo ammortato dell'energia geotermica (LCOE, leveled cost of electricity €/MWh). Alcuni autori hanno proposto alcuni prospetti economici ipotizzando una continua innovazione e progresso nelle tecniche di estrazione di energia e si osserva come in 20 anni, per un LCOE di 100 €/MWh, la produzione media europea potrebbe arrivare a 2570 TWh, pari al 50 % di elettricità prodotta nel continente. Nelle Figura 1.1/Figura 1.3 è indicato l'evoluzione dei costi suggerita da Van Wees ribadendo il fatto che le tecniche di perforazione e le tecnologie legate alla produzione geotermica devono ancora dimostrare progressi adeguati.

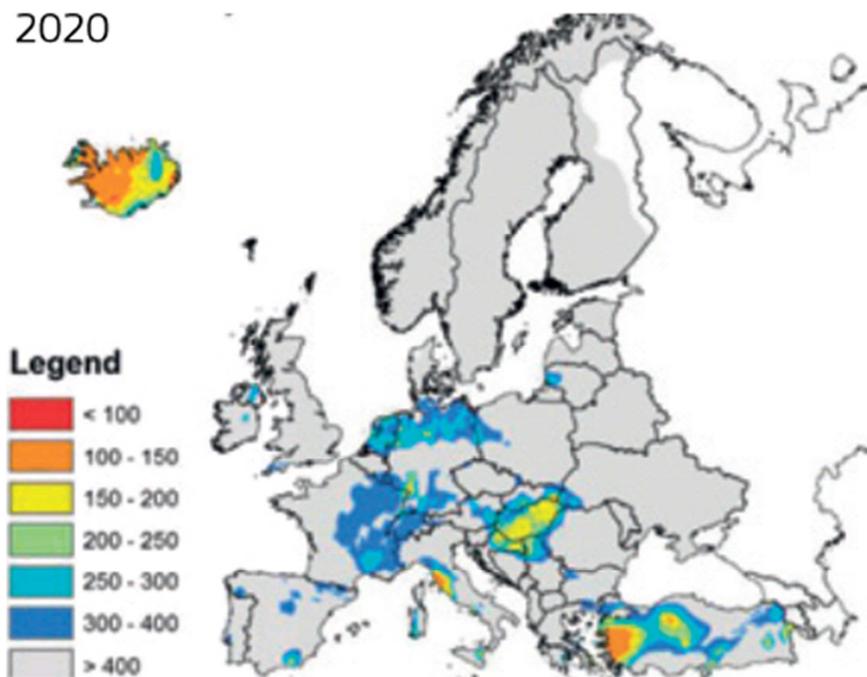


Figura 1.1: minimo LCOE nel 2020 per la produzione di 21.2 TWh (Van Wees et al., 2013)

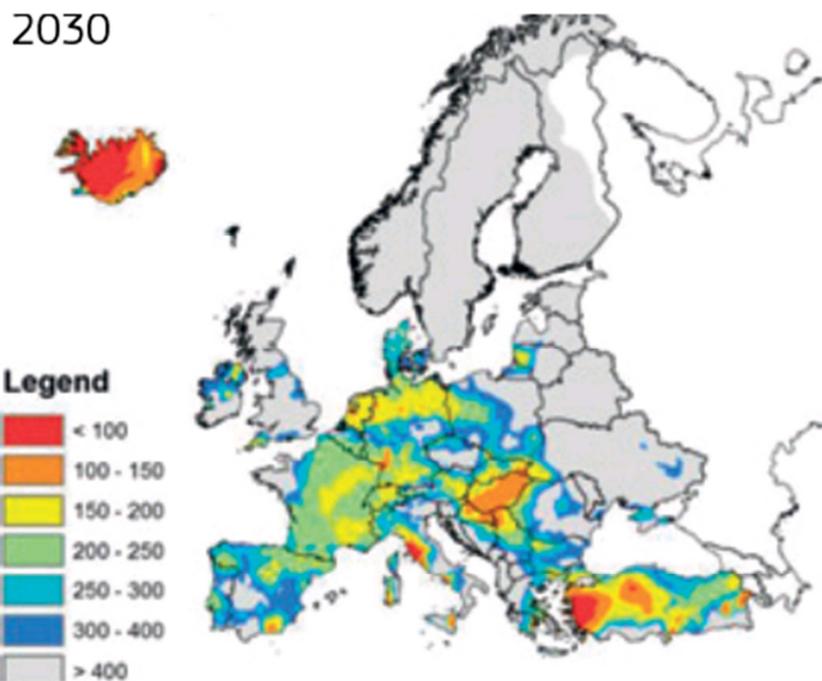


Figura 1.2: minimo LCOE nel 2030 per la produzione di 34 TWh (Van Wees et al., 2013)

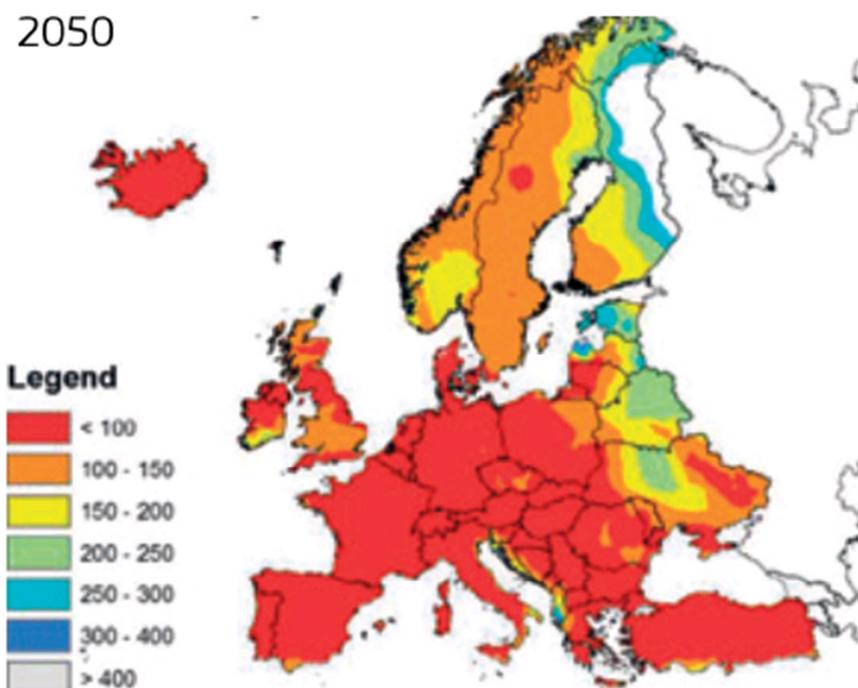


Figura 1.3: minimo LCOE nel 2050 per la produzione di 2750 TWh (Van Wees et al., 2013)

1.1.2. Natura delle risorse geotermiche

Sebbene le prime misure dirette con termometri risalgono alla prima metà dell'800 in una miniera vicino Belfort in Francia, i primi studi sul bilancio energetico della terra sono nati agli inizi del XX secolo quando si è scoperto il ruolo fondamentale del comportamento radiogenico del calore.

Tutti i moderni modelli termici della Terra devono tener conto del calore prodotto in continuazione dal decadimento degli isotopi radioattivi a lunga vita dell'uranio (U^{238} , U^{235}), del torio (Th^{232}) e del potassio (K^{40}), presenti all'interno del globo terrestre. A quella radiogenica, si aggiungono, in proporzioni non esattamente definite, altre fonti di calore, come il calore primordiale del pianeta.

Le conoscenze dirette della composizione del pianeta sono limitate alla crosta terrestre per uno spessore relativamente esiguo rispetto alla lunghezza del raggio terrestre. Le informazioni riguardanti le parti più profonde sono note per via indiretta, per mezzo di indagini geofisiche, in particolare tramite la sismologia.

La Terra al suo interno è formata da 3 involucri principali concentrici: crosta, mantello e nucleo delineati da superfici ideali dette "di discontinuità", in corrispondenza di queste si riconoscono significativi cambiamenti dello stato fisico della materia.

La crosta terrestre si divide in oceanica e continentale che si differenziano per la presenza o meno dello strato granitico-gneissico superiore. La crosta continentale infatti presenta spessori che variano da 30 a 70 Km mentre la crosta oceanica più sottile arriva a soli 10 Km. Nella zona sottostante si identifica il mantello delimitato dalla crosta tramite una zona di discontinuità. La parte superiore del mantello e la crosta formano insieme la litosfera che presenta caratteristiche omogenee di densità e rigidità. Al di sotto della litosfera fino alla profondità di 250 km vi è l'astenosfera, formata in parte del mantello allo stato altamente vi-

scoso con comportamento meno rigido e più plastico rispetto quelli superiori. Al di sotto l'astenosfera segue una zona di transizione con rigidità da 2 a 3 volte quella dell'acciaio alla pressione ordinaria. A 2900 km di profondità si attesta il nucleo esterno il quale, fluido o semifluido, è costituito da leghe di ferro e nichel. Dai 5000 km circa fino ai 6370 km del centro del nocciolo la composizione mineralogica è la medesima del nucleo esterno differenziandosi però per il suo stato solido ad altissima densità (Figura 1.4).

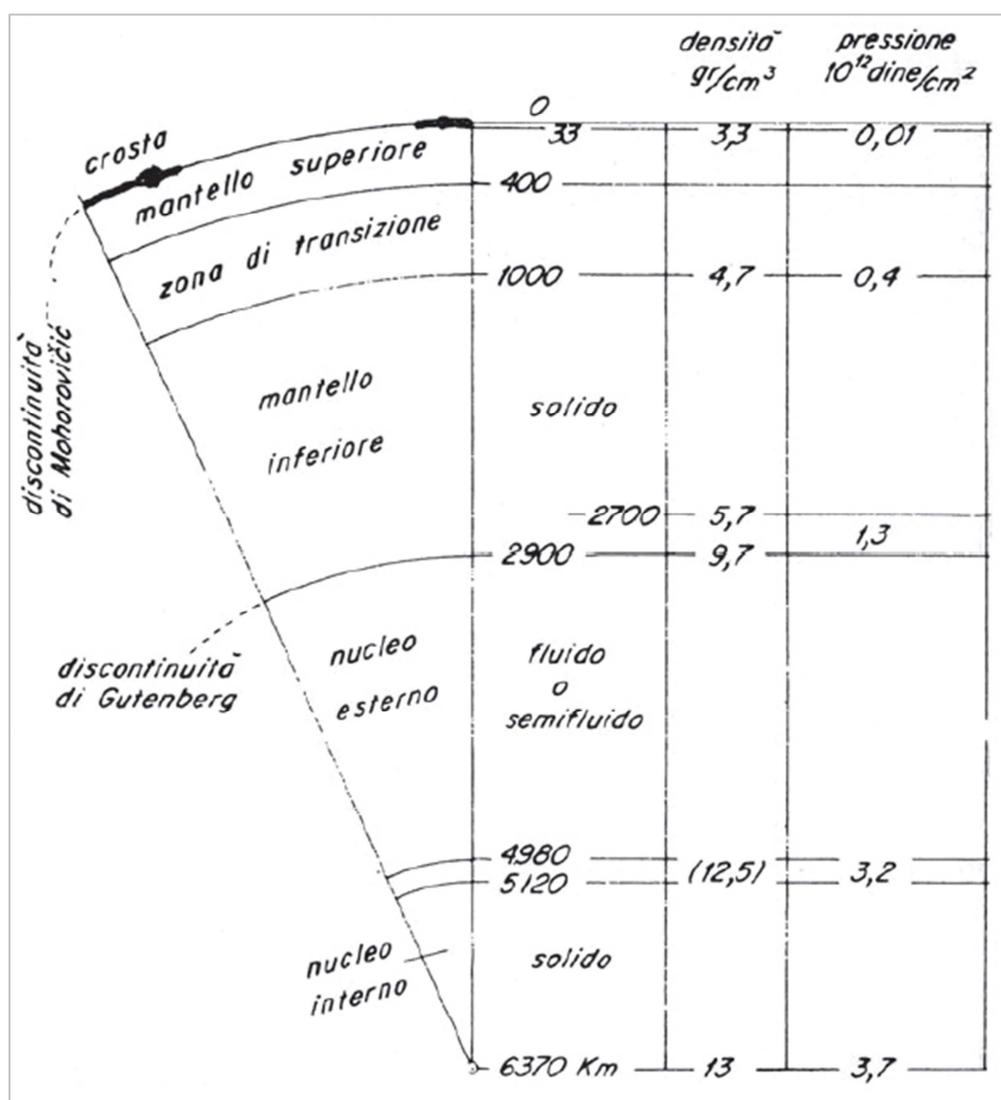


Figura 1.4: stratificazione, densità e pressioni all'interno della Terra secondo Bullen (1967)

Una prima idea dei fenomeni legati al trasporto di calore può fare riferimento al bilancio termico di Stacey e Loper (1988), nel quale il flusso di calore totale dalla superficie terrestre è valutato 42×10^{12} W trasmesso per conduzione, convezio-

ne e radiazione. Di questa grandezza, 8×10^{12} W provengono dalla crosta terrestre, che rappresenta soltanto il 2% del volume totale della Terra, ma è ricca di isotopi radioattivi, $32,3 \times 10^{12}$ W derivano dal mantello, che è l'82% del volume totale della Terra, e $1,7 \times 10^{12}$ W provengono dal nucleo, che costituisce il 16% del volume totale del pianeta e non contiene isotopi radioattivi. Poiché il calore radiogenico del mantello è stimato in 22×10^{12} W, il raffreddamento di questa parte della Terra è $10,3 \times 10^{12}$ W. Calcoli più recenti, basati su un numero maggiore di dati, hanno portato a un valore del flusso di calore totale dalla superficie del 6% più alto di quello utilizzato da Stacey e Loper, modificando leggermente le conclusioni di questi ultimi. Il raffreddamento del pianeta, comunque, è molto lento. La temperatura del mantello è scesa, al più, di 300-350 °C in tre miliardi di anni e, alla sua base, è di circa 4000 °C. E' stato stimato che il calore totale contenuto nella Terra, assumendo una temperatura superficiale media di 15°C, sia dell'ordine di $12,6 \times 10^{24}$ MJ e che quello contenuto nella crosta sia dell'ordine di $5,4 \times 10^{21}$ MJ.

Si parla di temperatura media poiché il sottosuolo, per profondità relativamente esigue, risente delle variazioni stagionali di temperatura dell'atmosfera. L'influenza del calore, che arriva direttamente dal sole, si attenua fino a un livello, definito come lo strato neutro, in corrispondenza del quale la temperatura è costante. Nel globo questo strato non è determinato univocamente, la sua profondità varia in base alla zona considerata. Nelle regioni equatoriali si attesta a pochi decimetri sotto la superficie mentre in altre regioni come la Siberia si trova a 120 m di profondità. In Italia lo strato neutro è a profondità variabili fra 15 e 20 m. Oltre lo strato neutro la temperatura cresce in modo direttamente proporzionale alla profondità, questo comportamento definisce il gradiente termico.

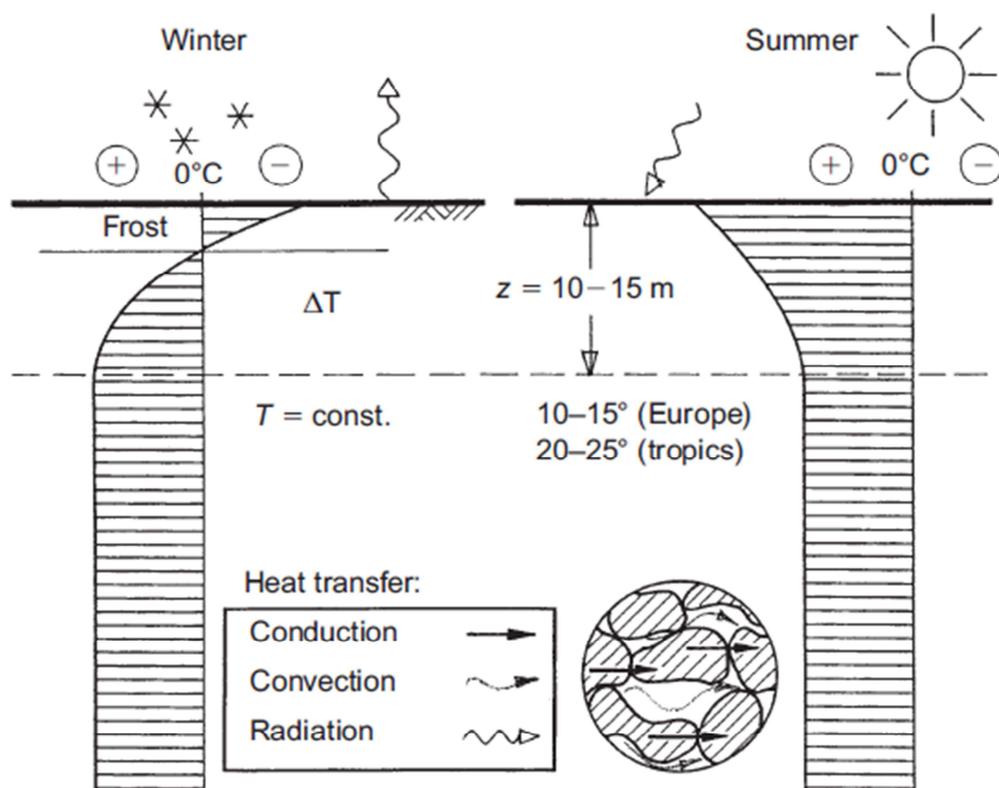


Figura 1.5: andamento nel sottosuolo fino allo strato neutro della temperatura nelle fasi stagionali (Brandl H. 2009)

Mediamente la temperatura cresce di 3 °C ogni 100 metri ma in base alla regione ci possono essere degli scostamenti sensibili. In aree in cui il basamento rigido sprofonda e forma un bacino che si riempie di sedimenti geologicamente giovani il gradiente geotermico può essere inferiore a 1 °C/100 m, viceversa in zone dove vi sono coperture laviche di formazione recente il gradiente può arrivare a 14 °C. Nella maggior parte delle regioni europee, caratterizzate da un clima temperato, questa temperatura varia tra 10 e 15 °C e rimane costante fino a una di profondità di circa 50 m.

Questo andamento della temperatura è stato accertato per le profondità direttamente accessibili, per le quali è stato possibile eseguire misurazioni termometriche con le moderne tecniche di perforazione. Se si applicasse la stessa teoria per profondità più alte si riscontrerebbero valori poco attendibili, corrispondenti a 3000 °C a 100 Km e 70000 °C o 180000 °C relativamente a base del mantello e centro del nucleo; se fossero tali il nostro pianeta dovrebbe essere tutto allo sta-

to fuso. Tenuto conto dei dati sismologici e delle leggi della termodinamica, le temperature ritenute verosimili sarebbero di 3700 °C al limite tra mantello e nucleo e di 4300 °C nella parte più profonda, al centro del nucleo terrestre, definendo una variazione della temperatura come mostrato in Figura 1.6.

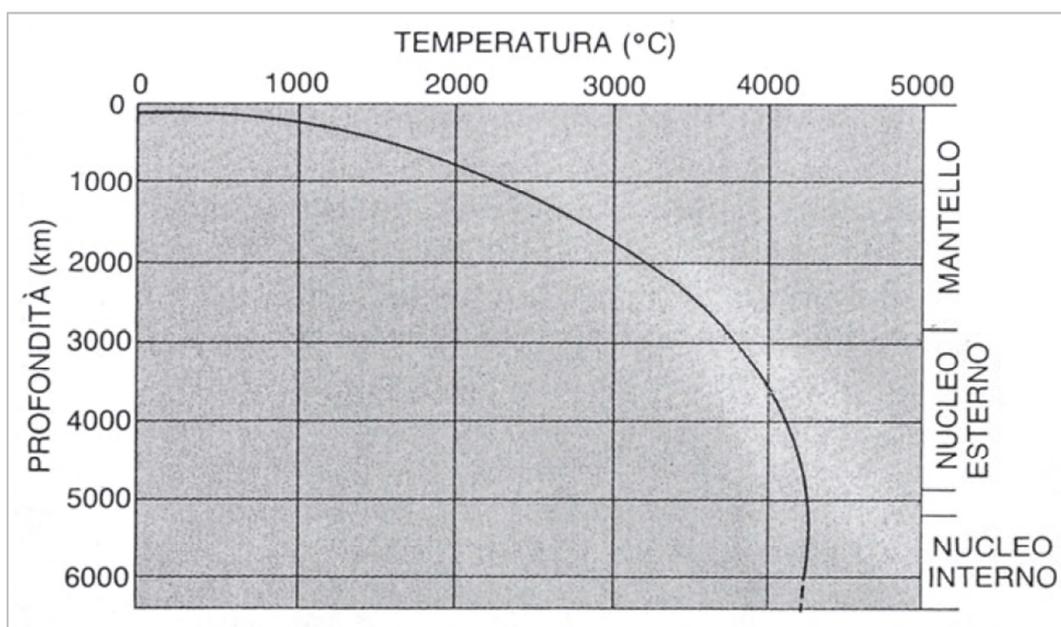


Figura 1.6: variazioni di temperatura all'interno della terra secondo Marchetti (1986) (Venzo G.A. 2006)

Queste differenze di temperatura tra le diverse parti dell'astenosfera hanno prodotto moti convettivi nei materiali che la costituiscono, e, qualche decina di milioni di anni fa, potrebbero essersi innescate vere e proprie celle di convezione, fenomeni alla base della teoria della tettonica a zolle, il cui movimento è in accordo con lo stato fisico del mantello e con i tempi geologici di persistenza delle sollecitazioni geodinamiche.

Il loro lentissimo movimento (pochi centimetri l'anno) è sostenuto dal calore prodotto in continuazione dal decadimento degli isotopi radioattivi e da quello che proviene dalle parti profonde del pianeta. Enormi volumi di rocce profonde, allo stato fuso o semifuso, più calde, meno dense e più leggere dei materiali sovrastanti, risalgono verso la superficie, mentre le rocce più vicine alla superficie, più fredde, più dense e più pesanti, tendono a scendere per riscaldarsi e risalire di nuovo.

Nelle zone dove è più sottile, e soprattutto nelle aree oceaniche, la litosfera è spinta verso l'alto e fratturata dal materiale molto caldo e parzialmente fuso, che risale dall'astenosfera in corrispondenza dei rami ascendenti delle celle convettive. È questo meccanismo che ha formato, e tuttora forma, le dorsali, che si estendono per oltre 60000 km sotto gli oceani, emergendo in alcune zone (Azzorre, Islanda) e talvolta insinuandosi tra i continenti come nel Mar Rosso. Le dorsali sono tagliate perpendicolarmente da enormi fratture, talvolta lunghe qualche centinaio di chilometri, chiamate faglie trasformi. Una frazione relativamente piccola di rocce fuse, che risale dall'astenosfera, emerge dalla cresta delle dorsali e, a contatto con l'acqua marina, solidifica e forma nuova crosta oceanica. La maggior parte del materiale che risale dall'astenosfera, tuttavia, si divide in due rami, che scorrono in direzioni opposte sotto la litosfera. La continua formazione di nuova crosta e l'effetto di trascinamento dovuto ai due flussi, che scorrono in direzioni opposte, fanno in modo che i fondali oceanici, posti sui due lati delle dorsali, si allontanino l'uno dall'altra.

La formazione di una nuova litosfera lungo le dorsali e l'espansione dei fondi oceanici dovrebbero portare a un aumento della superficie della Terra nel tempo ma non vi sono osservazioni di tale fenomeno, questo presuppone necessariamente che in altre zone del pianeta ci sia una riduzione o un assorbimento della litosfera di pari entità. In effetti, questo è quello che avviene nelle zone di subduzione, le maggiori delle quali si trovano in corrispondenza delle grandi fosse oceaniche, come quelle che si estendono lungo il margine occidentale dell'Oceano Pacifico e lungo la costa occidentale dell'America Meridionale. Nelle zone di subduzione la litosfera si inflette verso il basso, si immerge sotto la litosfera adiacente e scende nelle zone profonde molto calde. Una rappresentazione di modelli di circolazioni convettive del modello terrestre sono rappresentati in Figura 1.7.

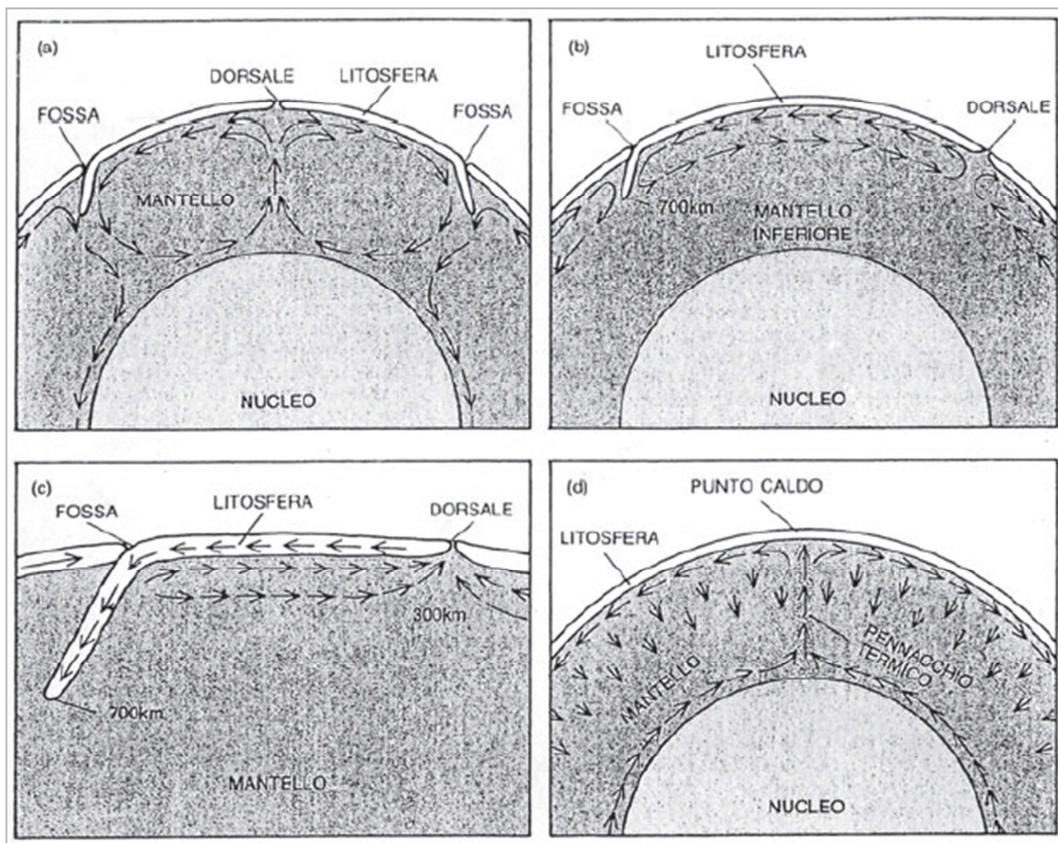


Figura 1.7: modelli teorici di circolazione convettiva nel mantello terrestre secondo Marchetti (1986)

Durante la discesa, parte del materiale litosferico ritorna allo stato fuso e può risalire alla superficie attraverso fratture della crosta. Come risultato, parallelamente alle fosse, dal lato opposto a quello in cui si allungano le dorsali, si sono formati archi magmatici con molti vulcani. Laddove le fosse si trovano nell'oceano aperto, come nel Pacifico occidentale, gli archi magmatici sono formati da catene di isole vulcaniche; lungo i margini dei continenti, gli archi formano di catene montuose con numerosi vulcani, come le Ande.

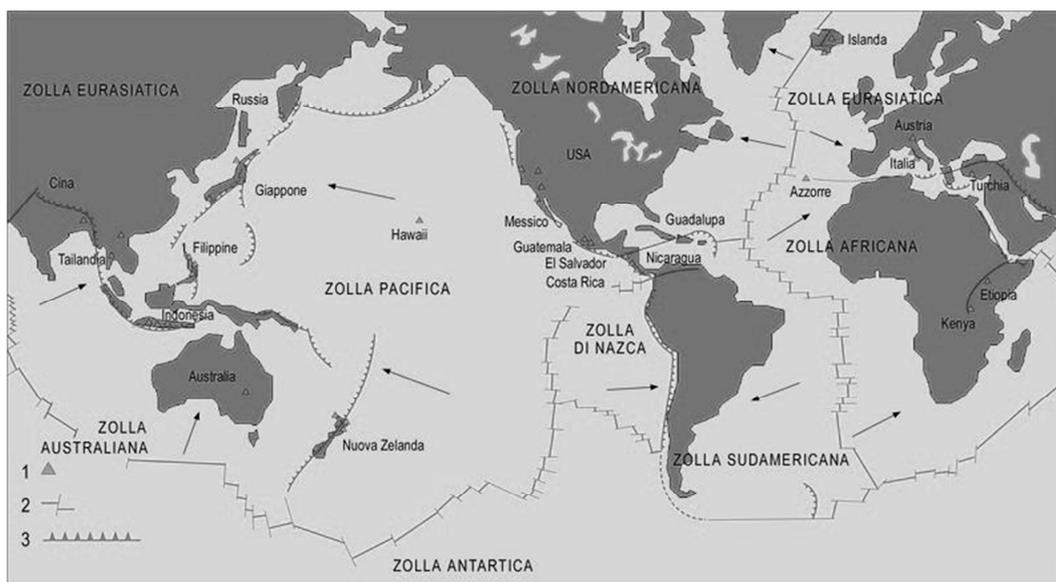


Figura 1.8: zolle crostali, dorsali, fosse oceaniche, zone di subduzione e campi geotermici (Dickson M. H. et al. 2004)

Le dorsali, le faglie trasformi e le zone di subduzione formano un enorme reticolato, che divide la Terra in placche litosferiche o zolle, sei di grandi dimensioni e numerose altre più piccole. A causa delle grandi tensioni prodotte dai fenomeni descritti precedentemente, le zolle si muovono, scivolano lentamente l'una contro l'altra, collidono e cambiano continuamente la loro reciproca posizione. I margini delle zolle corrispondono a zone di fragilità e di forte fratturazione della crosta, caratterizzate da un'elevata sismicità, dalla presenza di molti vulcani e, a causa della risalita di materiali fusi molto caldi verso la superficie, da un flusso di calore terrestre elevato. Come si vede nella Figura 1.8, le più importanti aree geotermiche si trovano nei pressi dei margini delle zolle crostali. Le frecce indicano la direzione del movimento delle zolle; (1) i campi geotermici che producono elettricità; (2) dorsali interrotte dalle faglie trasformi (fratture trasversali); (3) zone di subduzione, nelle quali la litosfera volge in basso verso l'astenosfera, dove fonde.

1.1.3. Proprietà termiche del suolo

Le proprietà che maggiormente influenzano il comportamento termico del sottosuolo sono il contenuto d'acqua, le caratteristiche fisiche e le proprietà termiche della componente solida. La presenza di acqua determina un miglioramento delle proprietà termiche: influisce sulla densità dei materiali e garantisce la continuità del mezzo per la trasmissione del calore. L'effetto benefico è determinato dalla riduzione del volume dei vuoti e della sostituzione dell'aria con l'acqua che è caratterizzata da una conducibilità termica 20 volte superiore a quella dell'aria.

Occorre quindi studiare i parametri fisici fondamentali per descrivere la suscettibilità di una roccia all'acqua: la porosità apparente e la permeabilità. La porosità totale di una roccia viene misurata dal coefficiente di porosità corrispondente a n , percentuale dei pori (spazi vuoti) della roccia, il quale è definito come rapporto in centesimi fra il volume dei vuoti e quello totale.

$$n = 100 \cdot \frac{V_v}{V} = 100 \cdot \frac{V - V_s}{V}$$

Eq. 1

La porosità può essere definita anche utilizzando l'indice dei pori ε , cioè il rapporto tra il volume dei pori e il volume della parte solida della roccia.

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_s}$$

Eq. 2

$$n = 100 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1}$$

Eq. 3

Per una risorsa geotermica è importante la cosiddetta porosità apparente n' , ovvero il rapporto fra il volume dei pori che possono essere riempiti d'acqua alla

pressione atmosferica e il volume totale dei pori espressa in percentuale. Essa viene misurata dal coefficiente di inibizione riferito al volume della roccia C_t' definito dalla seguente legge

$$C_t' = 100 \cdot \frac{P' - P_s}{V_{sc}}$$

Eq. 4

In cui P' è il peso della roccia impregnata d'acqua, P_s peso della roccia allo stato secco e V_{sc} volume della roccia allo stato secco. La permeabilità di una roccia invece fornisce una misura della sua capacità di lasciarsi attraversare da un fluido. Essa dipende essenzialmente dalle dimensioni dalla forma, dalla frequenza e dall'intercomunicabilità dei pori esistenti nella roccia.

Le proprietà termiche che descrivono il comportamento di un materiale: sono la conduttività termica λ (W/mK), detta anche conducibilità, la densità la capacità termica c (MJ/m³K) e la diffusività termica α (m²/s). La diffusività termica descrive la profondità e la velocità di propagazione della temperatura nel terreno; rappresenta una misura di quanto velocemente un materiale riesce a diffondere il calore al suo interno. Essa è data dal rapporto tra conducibilità e capacità termica

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

Eq. 5

Tali parametri sono dipendenti dalle proprietà fisiche e litologiche dei materiali, quindi anche dai componenti mineralogici e dalle proprietà chimiche dell'acqua dei pori: all'aumentare della densità dei materiali si riduce il volume complessivo occupato dalle cavità vuote, il contatto tra i grani migliora e la conduttività termica del mezzo poroso aumenta.

La conduttività termica rappresenta l'attitudine di un materiale a trasmettere calore; essa aumenta al crescere del contenuto d'acqua. La conduttività termica di un terreno a grana grossa è minore di quella di un terreno a grana fine a parità di contenuto d'acqua e la conduttività dei suoli rocciosi è superiore a quella dei terreni sabbiosi e argillosi.

La capacità termica c rappresenta la quantità di calore che bisogna cedere o togliere a un volume unitario di una sostanza per innalzarne (o diminuirne) la temperatura di 1 K; anch'essa aumenta fortemente al crescere del contenuto d'acqua ma non dipende dalla microstruttura. È possibile nella maggior parte dei casi calcolare la capacità termica dei suoli dalle capacità termiche specifiche (c_i) dei diversi costituenti in base ai loro rapporti volumetrici (Brandl H. 2006)

$$c = c_s x_s + c_w x_w + c_a x_a$$

Eq. 6

Dove:

- x_i è il volume specifico: quindi per la fase solida $x_s = 1 - n$, per la fase liquida $x_w = n \cdot S$ e per la fase gassosa $x_a = n \cdot (1 - S)$ con S pari al grado di saturazione e n la porosità del terreno;
- c_s è il calore specifico degli elementi minerali solidi, la maggior parte dei quali presentano valori pari a 1000 Ws/kgK a una temperatura di 10 °C;
- c_w è il calore specifico dell'acqua pari a 4186 J/ kgK.

Nell'Eq. 6 le capacità termiche dei componenti solidi e liquidi possono essere considerate costanti e la capacità termica della fase gassosa trascurabile. Si osserva inoltre che la capacità termica complessiva aumenta con il contenuto di acqua e diminuisce in caso di congelamento. La capacità termica specifica del ghiaccio è di soli 1884 J/kgK rispetto a 4186 J/ kgK dell'acqua. Dalla capacità termica e dalla densità è possibile ricavare la capacità volumetrica C_v che rappresenta la media aritmetica ponderata dei componenti del suolo

$$C_v = \rho_s \cdot \left(c_s + c_w \frac{w}{100} \right)$$

Eq. 7

Dove w è il contenuto d'acqua relativo alla massa secca espresso in percentuale.

Il parametro termico più importante è la conducibilità termica. Per la progettazione preliminare di fondazioni energetiche complesse o per la progettazione dettagliata di sistemi geotermici standard, può essere eseguita con sufficiente accuratezza dai diagrammi riportati in Figura 1.9, considerando il contenuto di acqua, lo stato dell'acqua, la densità di saturazione e la consistenza del suolo (Brandl H. 2006).

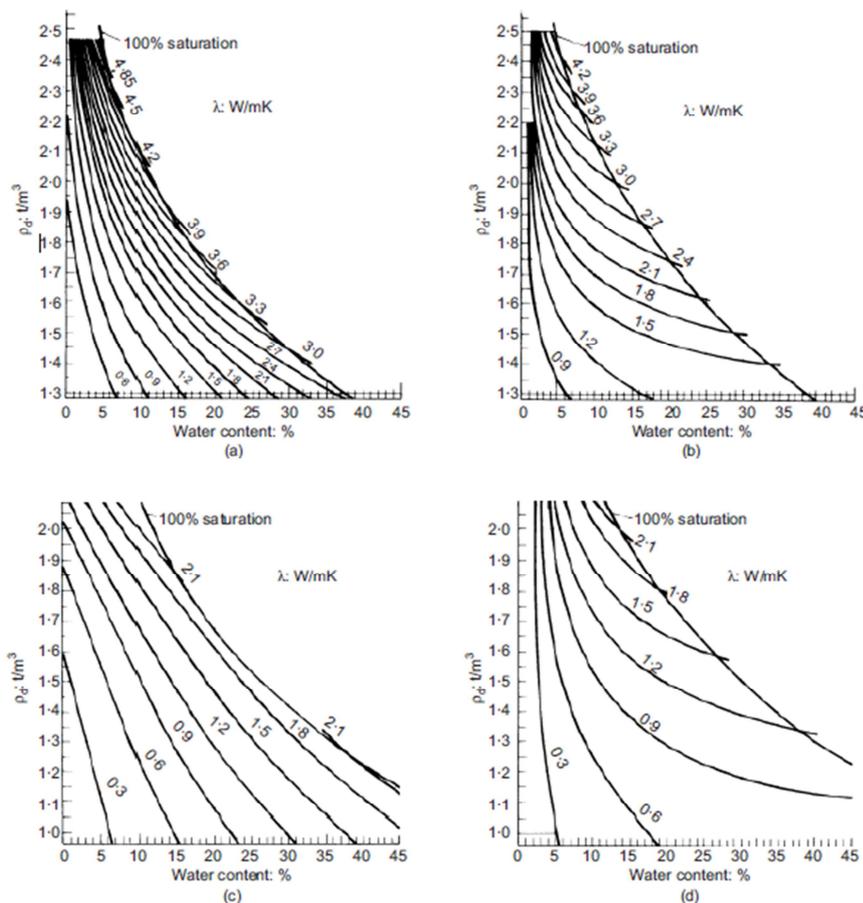


Figura 1.9: diagrammi di predimensionamento per fondazioni energetiche (Brandl H. 2006)

Per progetti complessi di grandi dimensioni o devono essere determinati da prove di laboratorio o prove sul campo, per cui un corpo del terreno deve esse-

re esposto a un gradiente di temperatura. In situ i test possono essere eseguiti direttamente con scambiatori di calore a terra verticali, ovvero con pozzi di estrazione/stoccaggio di calore, fondazioni energetiche o pozzi di energia. In laboratorio l'utilizzo del metodo del filo caldo è indicato come il più valido. In questo metodo un filo elettrico è impiantato nel terreno da monitorare con una corrente costante. Una termocoppia misura in seguito l'aumento e la caduta della temperatura da cui si può derivare la conducibilità termica del terreno.

La capacità termica specifica può essere determinata in laboratorio mescolando acqua e terreno a diverse temperature. In condizioni stabili, quando entrambi i componenti presentano energia termica costante, si conosce la capacità termica specifica di un componente (acqua), è possibile ottenere la capacità specifica del terreno.

1.1.4. Sistemi geotermici

Non esiste ancora una terminologia standard adottata in campo internazionale da scienziati e tecnici geotermici. Quelle che seguono sono alcune delle definizioni e classificazioni più diffusamente usate nel settore delle risorse geotermiche.

Per quanto riguarda un sistema geotermico la definizione fa riferimento a "un sistema acqueo convettivo, che in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo, generalmente superficiale, dove il calore stesso è assorbito, disperso o utilizzato" (Hochstein, 1990). I sistemi geotermici possono formarsi in regioni con gradiente geotermico normale o poco più alto e, soprattutto, nelle regioni prossime ai margini delle zolle crostali, dove il valore del gradiente geotermico può essere anche notevolmente superiore a quello medio. Nel primo caso, questi sistemi hanno temperature basse, di solito non più di 100 °C a profondità economicamente utili, mentre nel secondo caso, si può avere una vasta gamma di tempe-

rature, da basse sino a oltre 400 °C. Un sistema geotermico è formato da tre elementi: la sorgente di calore, il serbatoio e il fluido, che è il mezzo che trasporta il calore. La sorgente di calore può essere una intrusione magmatica a temperatura molto alta (>600 °C), che si è posizionata a profondità relativamente piccola (5-10 km), oppure, come in certi sistemi a bassa temperatura, il normale calore della Terra. Il serbatoio è un complesso di rocce calde permeabili nel quale i fluidi possono circolare assorbendo il calore. Generalmente è ricoperto da rocce impermeabili e connesso a zone di ricarica superficiali dalle quali le acque meteoriche possono sostituire, totalmente o parzialmente, i fluidi perduti attraverso vie naturali, ad esempio sorgenti o estratti artificialmente mediante pozzi. Il fluido geotermico, nella maggioranza dei casi, è acqua meteorica in fase liquida o vapore, in base alla temperatura e alla pressione. Quest'acqua spesso trascina con se sostanze chimiche e gas, come CO₂, H₂S e altri. La Figura 1.10 molto schematica e semplificata potrebbe rappresentare un sistema geotermico.

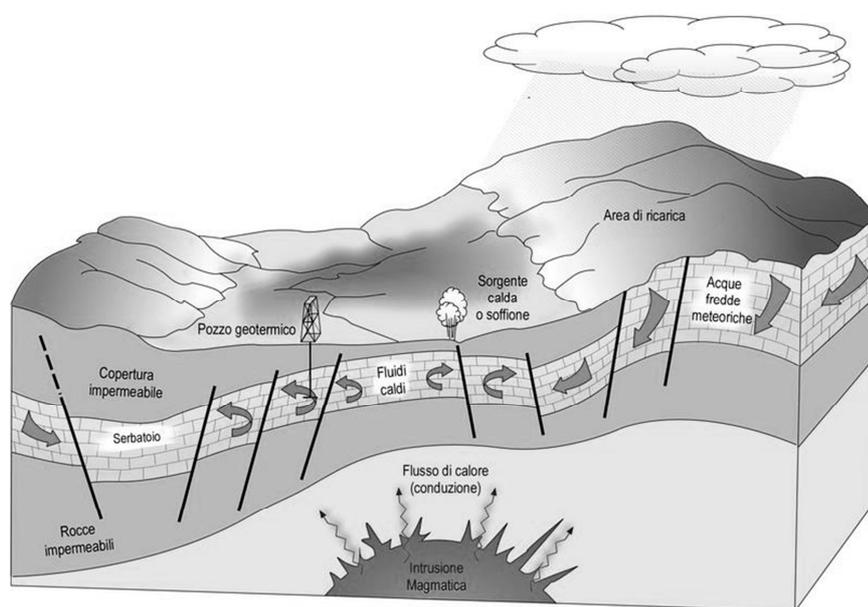


Figura 1.10: rappresentazione schematica di un sistema geotermico (Dickson M. H. et al. 2004)

La sorgente di calore è l'unico dei tre elementi che deve essere naturale. Gli altri due elementi, se esistono le condizioni adatte, possono essere artificiali. Per esempio, i fluidi geotermici estratti dal serbatoio per alimentare la turbina di una centrale elettrica o per la produzione di calore, dopo averne sfruttato

l'energia, possono essere immessi di nuovo nel serbatoio attraverso appositi pozzi di reiniezione. In questo modo la fonte naturale del serbatoio è integrata dalla ricarica artificiale. Da diversi anni, inoltre, la reiniezione dei fluidi sfruttati è stata adottata per ridurre drasticamente l'impatto ambientale degli impianti geotermici o riattivare campi geotermici vecchi o esauriti. Un esempio è rappresentato dal 'Southeast Geysers Effluent Recycling Project', sistema di ricarica che ha permesso di riattivare alcune centrali elettriche, messe fuori servizio, di uno dei campi geotermici più grandi del mondo, The Geysers, in California.

Nel Progetto Rocce Calde Secche (HDR Project), avviato negli Stati Uniti nei primi anni '70, invece, sia il fluido che il serbatoio sono artificiali. Attraverso un pozzo appositamente perforato, viene pompata acqua ad alta pressione in una formazione di roccia calda compatta, provocando la sua fratturazione idraulica. L'acqua penetra e circola nelle fratture prodotte artificialmente ed estrae il calore dalle rocce all'intorno, che funzionano come un serbatoio naturale. Questo serbatoio è poi raggiunto e intercettato da un secondo pozzo usato per estrarne l'acqua, che ha acquistato calore. Questo sistema, quindi, consiste di due pozzi e un serbatoio artificiale. Il primo pozzo è usato per la fratturazione idraulica e attraverso esso l'acqua è iniettata nel serbatoio artificiale mentre il secondo pozzo è utilizzato per l'estrazione dell'acqua calda. L'intero sistema, comprendente anche l'impianto di utilizzazione in superficie, forma un circuito chiuso, evitando ogni contatto tra il fluido e l'ambiente esterno.

Dopo gli Stati Uniti, altri progetti basati su concetti simili al HDR, sono stati sviluppati in Australia, Francia, Germania, Giappone e Gran Bretagna. Dopo un periodo di relativo abbandono, questi progetti hanno avuto nuovo impulso a seguito del riconoscimento che le rocce profonde posseggono un certo grado di fratturazione naturale e che le metodologie e le tecnologie, di volta in volta, applicate sono strettamente dipendenti dalle condizioni geologiche locali. Diversi sono i progetti in Giappone che, iniziati negli anni '80 (a Hijiori, Ogachi e Yunomori), hanno dato risultati molto interessanti sia dal punto di vista scienti-

fico che industriale. Anche nell'ambito del Progetto Europeo, sono state condotte alcune ricerche, le più avanzate sono state svolte in Alsazia (Francia), raggiungendo profondità anche di 5000 metri. Dalla prospezione geofisica e dalle prove idrauliche sono stati ottenuti risultati molto incoraggianti, e il progetto europeo sembra essere quello più promettente.

Tra sistemi geotermici frequentemente viene fatta una suddivisione ad acqua dominante e sistemi geotermici a vapore dominante (o a vapore secco). Nei sistemi ad acqua dominante (Figura 1.11), l'acqua liquida è la fase continua che definisce la pressione nel sistema. Questi sistemi geotermici, la cui temperatura può andare da valori inferiori a 125 °C fino a superare 225 °C, sono i più diffusi nel mondo. Essi possono produrre, in funzione dalla loro temperatura e pressione, acqua calda, una miscela di acqua e vapore, vapore umido e, in alcuni casi, vapore secco. Nei sistemi a vapore dominante normalmente coesistono nel serbatoio acqua liquida e vapore, che è la fase continua e controlla la pressione (Figura 1.12). Sono sistemi ad alta temperatura e normalmente producono vapore secco o surriscaldato. I sistemi geotermici di questo tipo sono piuttosto rari; i più conosciuti sono Larderello in Italia e The Geysers in California (Tabella 1.6) (Lund J. W. 2009).

Tipo di risorsa	Temperatura °C
Risorsa convettiva idrotermale	
a vapore dominante	≈ 240
a acqua dominante	20 - 350
Altre risorse idrotermali	
Bacini sedimentari	90 - 150
Geopressurizzati	90 - 200
Radiogenetici	30 - 150
Risorse hot rock	
HDR	90 - 650
Magma	> 600

Tabella 1.6: suddivisione sistemi geotermici (White D. E., Williams D. L. 1975)

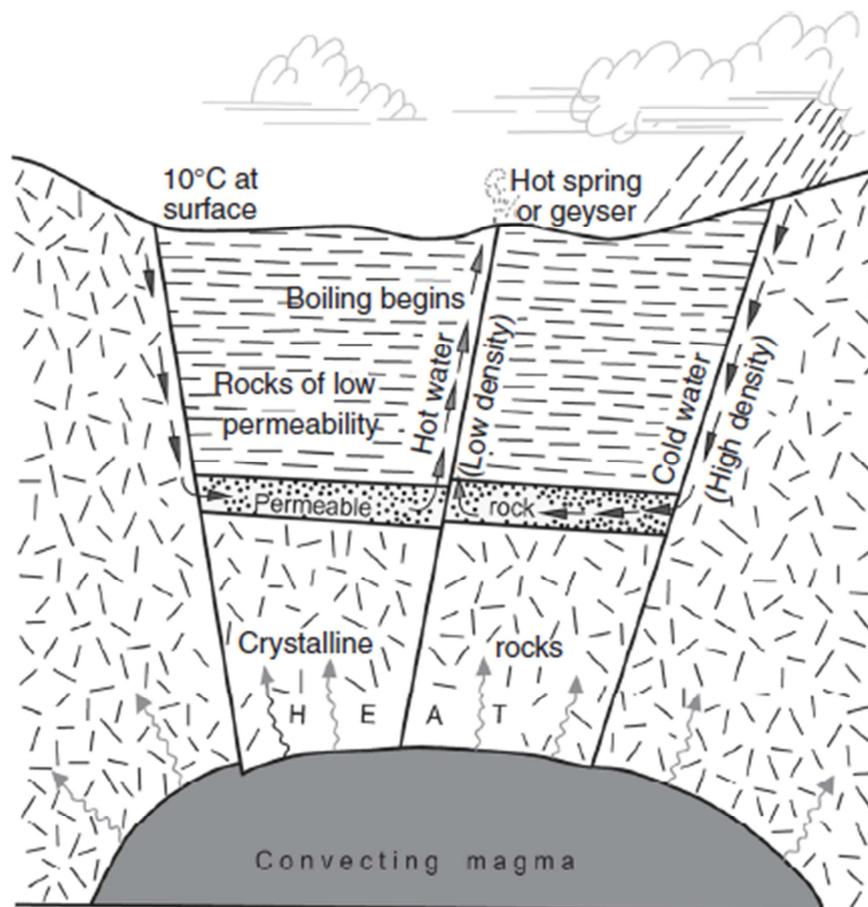


Figura 1.11: sistema geotermico ad acqua dominante (Lund J. W. 2009)

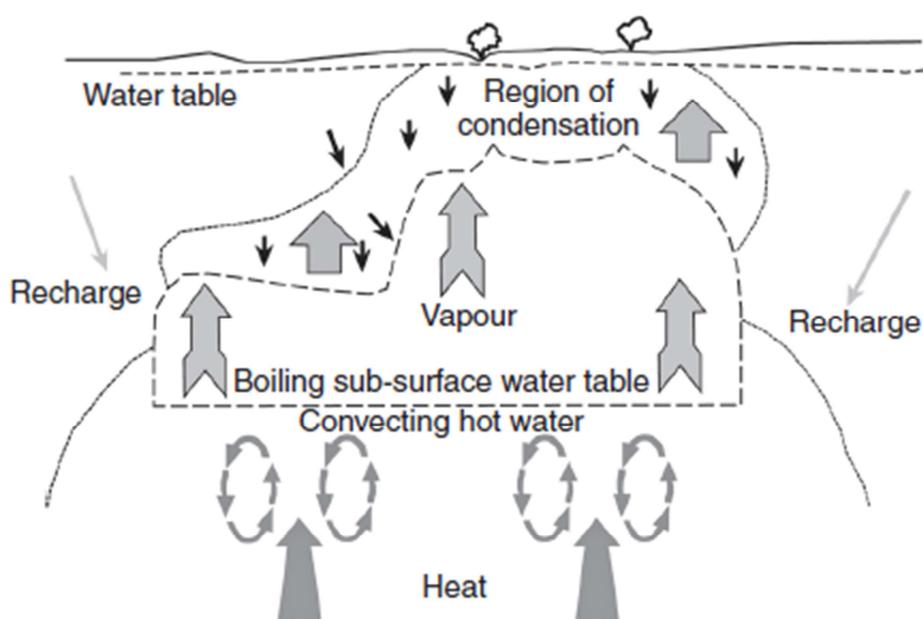


Figura 1.12: sistema geotermico a vapore dominante (Lund J. W. 2009)

Un'altra suddivisione dei sistemi geotermici è basata sullo stato di equilibrio del serbatoio. Si tiene conto della circolazione dei fluidi e dello scambio termico nel serbatoio e si distinguono i sistemi dinamici e sistemi statici. Nei sistemi dinamici l'acqua ricarica in continuazione il serbatoio, si riscalda ed è poi scaricata in superficie o nel sottosuolo penetrando le formazioni rocciose permeabili limitrofe. Nei sistemi statici la ricarica del serbatoio è molto ridotta o nulla e lo scambio termico avviene soltanto per conduzione. Questa categoria comprende sistemi a bassa temperatura e i sistemi geopressurizzati. I sistemi geopressurizzati possono formarsi nei grandi bacini sedimentari a profondità di 3-7 km. Formati da rocce sedimentarie permeabili, inglobate entro strati impermeabili a bassa conduttività, contengono acqua calda pressurizzata, che è rimasta intrappolata al momento della deposizione dei sedimenti. La pressione dell'acqua calda è vicina alla pressione litostatica, superando largamente la pressione idrostatica.

I sistemi geopressurizzati potrebbero produrre energia termica e idraulica (acqua calda in pressione) e gas metano ma, sebbene sia stati fatti diversi studi, le

applicazioni per lo sfruttamento industriale della risorsa sono ancora in via di sviluppo.

1.1.5. Classificazione delle risorse geotermiche

Sebbene la risorsa geotermica sia inestimabile la percentuale potenzialmente utilizzabile è ridotta. Per valutare l'usufruibilità viene adottata una terminologia basata su due indicatori: grado di sicurezza geologica e fattibilità economica. Per grado di sicurezza geologica si intende il grado di incertezza relativo alla conoscenza della geologia del sistema mentre la fattibilità economica rappresenta il tempo necessario per avviare lo sfruttamento commerciale. Secondo lo schema presentato in Figura 1.13 l'energia geotermica sfruttabile presente tra la superficie terrestre e le profondità accessibili con le perforazioni, 5-10 km, costituisce la risorsa di base accessibile. Non tutta la risorsa è sfruttata, in base alla fattibilità economica, si distingue la risorsa utile, cioè quella parte delle risorse accessibili che potrebbe essere estratta, economicamente vantaggiosa e in accordo con la legislazione locale, entro un periodo di tempo definito (meno di 100 anni). Quest'ultima categoria comprende le risorse economiche definite riserve: la parte di risorsa la cui presenza è confermata da perforazioni o dai risultati dell'esplorazione geologica, geochimica e geofisica e può essere estratta a costo competitivo con altre fonti energetiche.

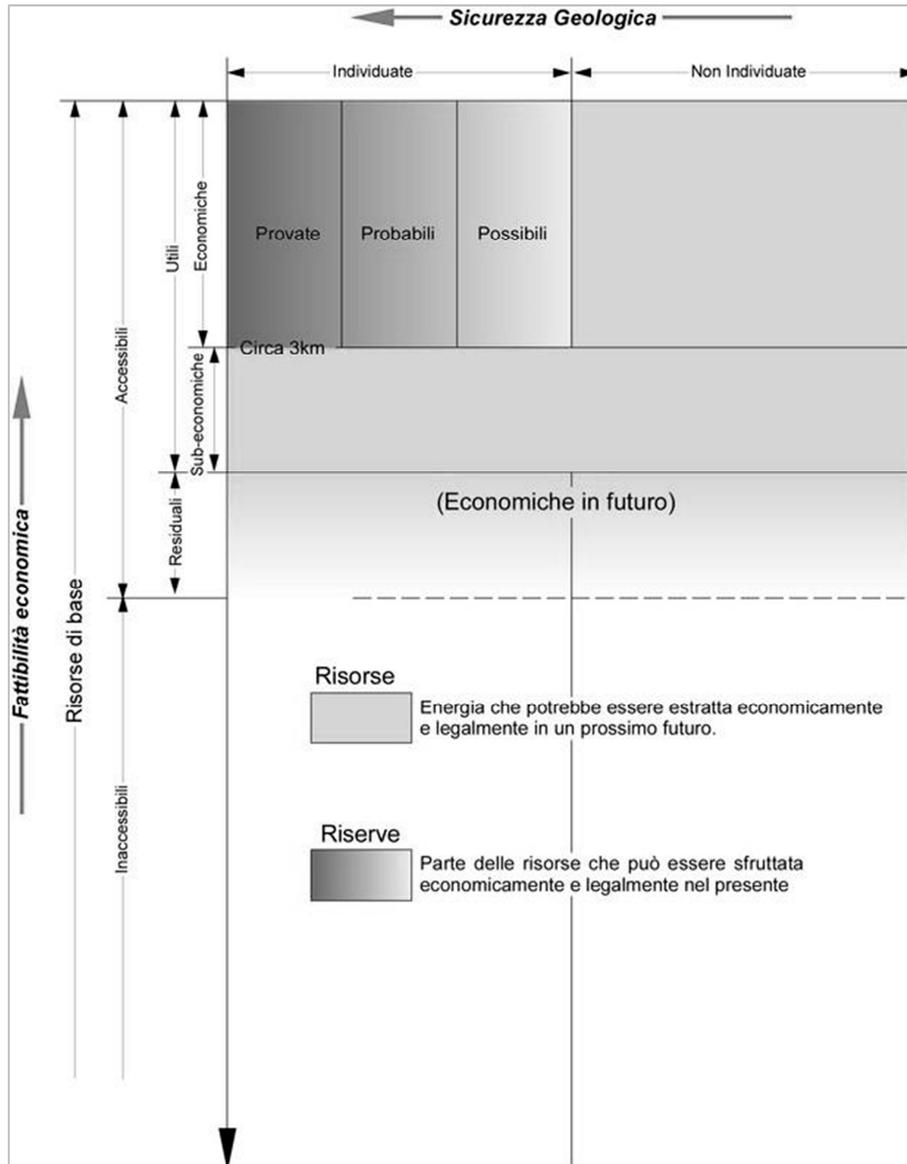


Figura 1.13: diagramma con le diverse categorie di risorse geotermiche (Dickson M. H. 2004)

A prescindere dalla fattibilità economica e geologica, il più comune criterio di classificazione delle risorse geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi, che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde alla superficie. L'entalpia esprime la quantità di energia potenzialmente trasferibile con l'ambiente circostante. L'entalpia specifica, h , è definita nel seguente modo:

$$h = u + p \cdot v$$

Eq. 8

Come si evince dalla legge esposta l'entalpia è data dalla somma dell'energia interna, u , con il prodotto della pressione interna assoluta, p , con il volume specifico, v . Nei gas perfetti, l'energia interna, come dimostrato matematicamente e sperimentalmente da Joule, è fornita dalla sola temperatura. Per cui se indichiamo con T la temperatura assoluta in gradi Kelvin possiamo scrivere che:

$$u = u(T)$$

Eq. 9

Inoltre nei gas perfetti vige la nota relazione di stato in cui si introduce la costante dei gas perfetti R :

$$p \cdot v = n \cdot R \cdot T$$

Eq. 10

Nei solidi e nei liquidi, il cui volume specifico v risulta praticamente costante durante i processi termodinamici, l'energia connessa alla variazione di volume è sostanzialmente trascurabile nei confronti delle altre forme di energia. In essi il calore specifico a volume costante, c_v , e a pressione costante, c_p , sono praticamente identici, $c_v = c_p = c$, e dipendono solo dalla temperatura, $c(T)$, del sistema; anche in questo caso come nei gas perfetti, l'energia interna, u , è proporzionale alla temperatura, così come la variazione infinitesima, du , durante un processo termodinamico:

$$du = c(T)dT$$

Eq. 11

Integrando l'espressione appena scritta si ottiene che:

$$\Delta u = c_{\text{medio}}\Delta T$$

Eq. 12

Pertanto per i solidi e per i liquidi si può scrivere l'espressione dell'entalpia specifica come segue:

$$\Delta h = \Delta u + v \cdot \Delta p$$

Eq. 13

Poiché il termine $v \cdot \Delta p$ è generalmente piccolo rispetto al primo termine della somma, è possibile trascurarlo senza significativi errori comprendendo come l'entalpia nei solidi e nei liquidi dipende ancora più strettamente, rispetto ai gas perfetti, dalla temperatura. Quindi sia per i gas perfetti che per i solidi e i liquidi è la temperatura la variabile fisica fondamentale che definisce l'entalpia del sistema termodinamico e per tale ragione si tende a classificare le risorse geotermiche in bassa, media e alta entalpia in funzione della temperatura del fluido sfruttato.

Diversi sono gli autori che hanno proposto una suddivisione delle risorse geotermiche in base al grado di entalpia (Tabella 1.7). Motivo per il quale quando si parla di fluidi geotermici è bene, comunque, indicare la loro temperatura, o almeno un intervallo di temperatura, perché i termini bassa, media o alta possono avere significati diversi e creare errori di interpretazione.

	Risorse a bassa entalpia	Risorse a media entalpia	Risorse a alta entalpia
Muffler e Cataldi (1978)	< 90	90-150	>150
Hocstein (1990)	<125	125-225	>225
Benderitter and Cormy (1990)	<100	100-200	>200
Nicholson (1993)	≤150	-	>150
Axelsson and Gunnlaugsson (2000)	≤190	-	>190

Tabella 1.7: classificazione delle risorse geotermiche in base all'entalpia (Dickson M. H. 2004)

In base al livello entalpico gli usi e le applicazioni della risorsa sono differenti. La produzione di energia elettrica è la forma di utilizzazione principale e più importante delle risorse geotermiche ad alta temperatura (maggiore di 150 °C). Le risorse a temperatura medio - bassa (inferiori a 150 °C) sono adatte, oltre che alla generazione di elettricità con impianti a ciclo binario, a una molteplicità di

altri usi, che vanno dal riscaldamento di ambienti alla refrigerazione, agli usi agricoli, all'acquacoltura, all'impiego nei processi industriali a caldo.

I fluidi con temperatura inferiore a 20 °C (entalpia molto bassa) sono usati raramente e in casi particolari oppure per il funzionamento di pompe di calore. È possibile estendere lo sfruttamento delle risorse con progetti a cascata o combinati.

In Figura 1.14 sono elencati gli esempi di applicazione delle risorse geotermiche rapportati alla temperatura dei fluidi.



Figura 1.14: applicazioni della risorsa geotermica in base al livello entalpico (Lindal B. 1973)

1.2. Energia geotermica a bassa entalpia

Gli impianti geotermici a bassa entalpia consentono il riscaldamento, il raffreddamento di edifici e la produzione di acqua calda per scopi sanitari e industriali. La produzione di calore tramite questo tipo di impianti è più economica dell'utilizzo dei combustibili fossili e determina una riduzione delle emissioni di inquinanti in aria. Gli impianti geotermici a bassa entalpia permettono lo sfruttamento a fini energetici del sottosuolo anche in assenza di anomalie termiche; la porzione di sottosuolo generalmente interessata da questo tipo di impianti va da qualche metro fino non oltre 200 m di profondità. Un impianto geotermico a bassa entalpia è composto da un sistema di scambio termico (terreno, acqua, aria), da un sistema di produzione del calore e da un sistema di climatizzazione (Figura 1.15).

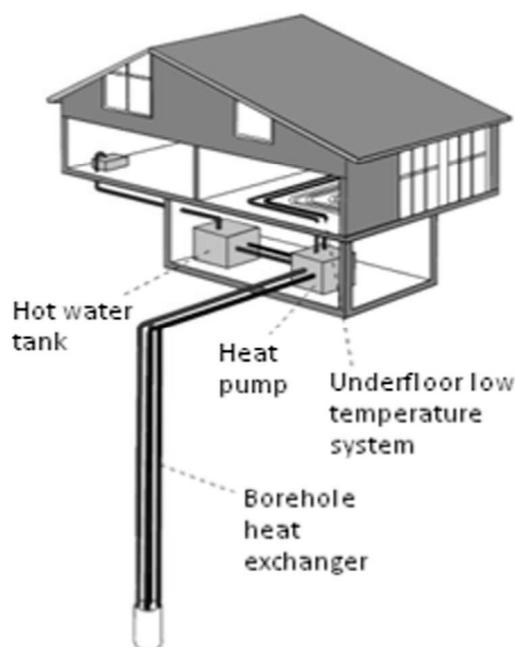


Figura 1.15: componenti di un impianto geotermico a bassa entalpia (Karytsas S. 2017)

Il sistema di produzione del calore dell'impianto geotermico è costituito dalla sorgente termica, dagli scambiatori e dalla pompa di calore.

Solitamente, se il livello termico a cui si trova il sottosuolo non è sufficiente a garantire delle temperature adeguate al soddisfacimento del fabbisogno termico

lato utenza, occorre un apporto di energia aggiuntiva (elettrica o gas) che permetta alla Pompa di Calore di trasferire il caldo o il freddo dal sottosuolo all'abitazione innalzando il livello termico dell'energia prelevata. La Pompa di Calore è accoppiata alla sorgente termica mediante scambiatori detti "sonde geotermiche"; la sorgente termica può essere il suolo o l'acqua (superficiale o sotterranea).

Durante il periodo invernale viene estratto calore dalla sorgente termica mediante la circolazione di un fluido termovettore all'interno dello scambiatore. Il fluido all'entrata del sistema presenta temperature più basse rispetto al terreno. Il fluido termovettore si riscalda e acquisisce energia termica che viene in seguito ceduta alla Pompa di Calore e ai terminali di riscaldamento. Al contrario, nella fase di raffrescamento dell'edificio, il fluido termovettore preleva energia termica dall'ambiente esterno surriscaldandosi; grazie all'attività della Pompa di Calore tale calore è trasmesso al sottosuolo durante il passaggio del fluido attraverso le sonde geotermiche. La temperatura del sottosuolo durante il funzionamento dell'impianto si assesta a un livello più basso se il calore assorbito è maggiore di quello ceduto; se invece il calore ceduto al terreno è maggiore dell'energia termica assorbita la temperatura del sottosuolo aumenta.

Il sistema di distribuzione è composto dalle tubazioni necessarie a trasportare il fluido termovettore ai terminali di utilizzo mentre il sistema di erogazione è composto dai terminali di riscaldamento (radiatori, ventil-convettori, pannelli radianti).

I costi di realizzazione di un impianto geotermico a bassa entalpia sono principalmente legati alla perforazione, installazione, cementazione e collaudo delle sonde geotermiche; essi possono variare a seconda della tipologia di sottosuolo su cui è realizzato l'impianto geotermico. I costi di manutenzione e di funzionamento sono minori rispetto i costi di realizzazione dell'impianto. Questo genere di impianti geotermici è utilizzato, oltre che per il riscaldamento/raffrescamento domestico, per processi industriali, essiccamento, riscalda-

mento di serre, acquacoltura, produzione di acqua calda sanitaria, scioglimento della neve, terme e piscine.

1.2.1. Pompe di calore

La Pompa di Calore (PdC), sviluppata dall'ingegnere minerario Peter Ritter Von Ritinger nel 1855 in Austria è una macchina che permette il trasferimento di energia termica da un corpo caratterizzato da basso livello termico a un altro a temperatura superiore con l'assorbimento di una quota parte di lavoro esterno, come mostrato schematicamente nella Figura 1.16; ciò non può avvenire in maniera spontanea perché il flusso naturale del calore tende ad passare dal corpo più caldo al corpo più freddo e comporterebbe una violazione del secondo principio della termodinamica. Il funzionamento delle pompa di calore è basato sulla capacità dei fluidi di assorbire o cedere calore quando vaporizzano o condensano.

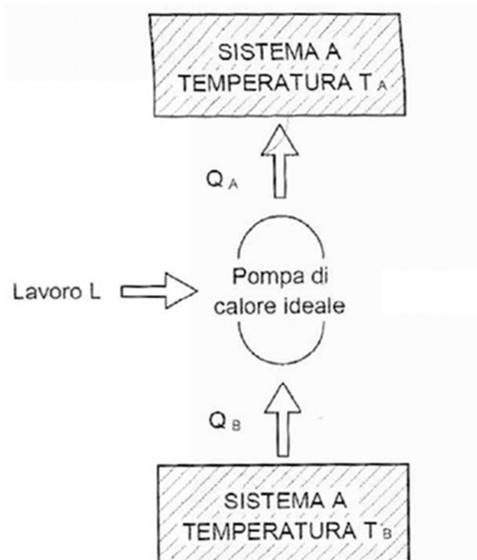


Figura 1.16: trasmissione del calore in una pompa di calore (Geotermia a bassa entalpia, (appunti di) Ing. Olivieri T.)

La Pompa di calore è costituita da un circuito chiuso percorso da un fluido termovettore che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato liquido o di vapore.

I componenti che costituiscono il circuito sono (Figura 1.18):

- **Evaporatore:** è uno scambiatore di calore che permette lo scambio termico tra refrigerante interno e fluido esterno; durante il passaggio attraverso l'evaporatore il fluido refrigerante acquisisce calore dalla sorgente esterna evaporando; la temperatura è costante e l'entalpia aumenta.
- **Compressore:** il fluido, in fase vapore proveniente dall'evaporatore, è portato ad alta pressione e a maggior temperatura. Nella fase di compressione assorbe ulteriore quantità di calore grazie al lavoro del compressore; il vapore si trova perciò a una temperatura più elevata di un vapore saturo alla stessa pressione.
- **Condensatore:** è uno scambiatore di calore che permette lo scambio termico tra refrigerante interno e fluido esterno; durante il passaggio attraverso il Condensatore il fluido cede energia termica al fluido dell'impianto di riscaldamento, si raffredda e passa dallo stato vapore a liquido condensando (trasformazione isoterma con perdita di entalpia). Il fluido in uscita dal condensatore è allo stato liquido.
- **Valvola di espansione (o Valvola di laminazione):** per completare il ciclo il liquido deve tornare alla pressione di evaporazione. La valvola di espansione permette un'espansione e un raffreddamento del fluido; tale valvola è posizionata tra il Condensatore e l'Evaporatore e permette di abbattere la pressione del fluido condensato prima del raggiungimento dell'Evaporatore. La sua attività (apertura e chiusura) è controllata dalla presenza di un bulbo termostatico che misura temperatura e pressione dell'evaporatore. Nel passaggio attraverso la valvola di espansione si ha una caduta di pressione e la trasformazione è isoentalpica.
- **Valvola di inversione:** è una valvola a quattro vie che consente il doppio funzionamento della pompa grazie all'inversione del ciclo; si può ottenere perciò riscaldamento nel periodo invernale e raffrescamento in estate.

In Figura 1.17 è schematizzato il flusso di calore nel terreno e attraverso una sonda geo termica nel periodo invernale ed estivo.

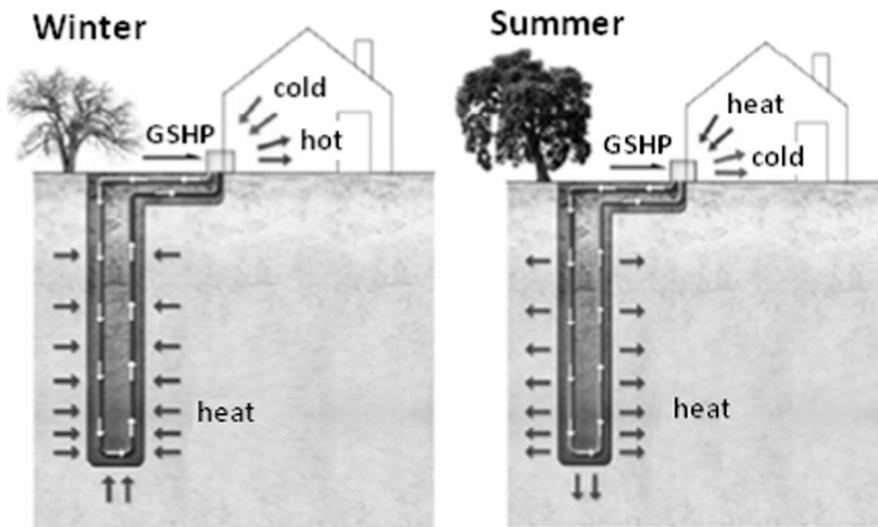


Figura 1.17: schematizzazione flusso di calore, funzionamento nel periodo invernale e estivo (Karytsas S. 2017)

Quando la pompa funziona in riscaldamento, l'effetto utile si esplica nel condensatore e, quando funziona in raffreddamento nell'evaporatore. In entrambi i casi, l'energia necessaria per il funzionamento della pompa è quella richiesta per azionare il motore elettrico del compressore (Figura 1.18).

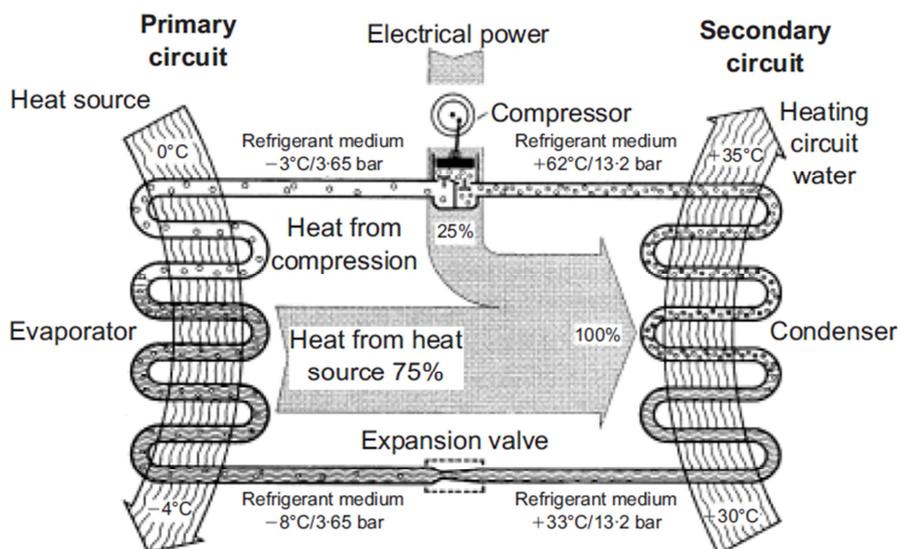


Figura 1.18: schema funzionale pompa di calore (Brandl H. 2006)

Idealmente, il ciclo termodinamico di riferimento è il ciclo inverso di Carnot, il quale lavora tra temperature costanti T_1 (calda) e T_2 (fredda) e origina la più elevata efficienza energetica. In Figura 1.19 è rappresentato schematicamente il ciclo inverso di Carnot, evidenziando le quattro trasformazioni termodinamiche, avendo trascurato l'energia cinetica e l'energia potenziale.

- Trasformazione A-B: espansione adiabatica (scambio nullo di calore con l'esterno) e reversibile (entropia costante), il fluido passa da un punto sulla curva di liquido saturo a un punto nella zona a tenore costante di vapore. Si produce lavoro grazie alla variazione di entalpia originata dal abbassamento di pressione con riduzione della temperatura;

$$L_{\text{esp}} = h_A - h_B$$

Eq. 14

- trasformazione B-C: evaporazione a pressione e temperatura costante. Il fluido assorbe calore dall'esterno:

$$Q_E = h_C - h_B$$

Eq. 15

- trasformazione C-D: compressione adiabatica e reversibile, il fluido è compresso grazie all'apporto di energia elettrica dall'esterno con innalzamento della pressione e temperatura:

$$L_{\text{comp}} = h_D - h_C$$

Eq. 16

- trasformazione D-A: condensazione a pressione e temperatura costante. Il fluido condensa erogando calore all'esterno:

$$Q_C = h_D - h_A$$

Eq. 17

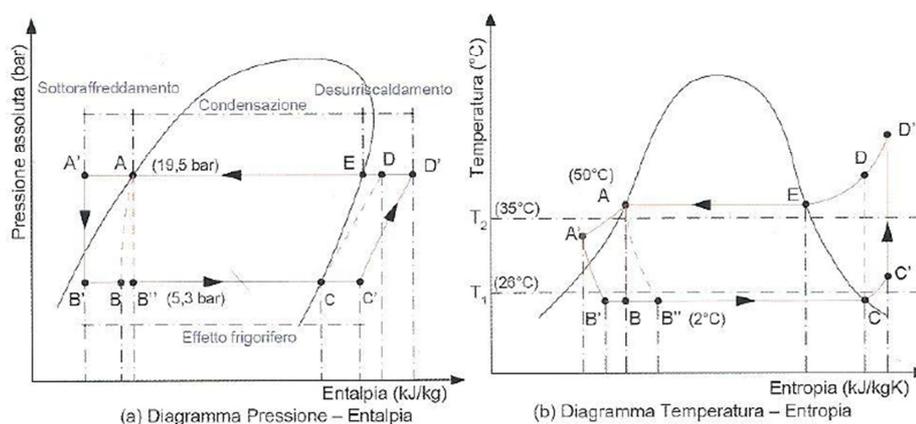


Figura 1.19: ciclo inverso di Carnot

Nella realtà, le trasformazioni termodinamiche non sono reversibili e, per la natura dei processi stessi, sono ineliminabili. Quindi, causano una riduzione dell'efficienza energetica. Le seguenti irreversibilità assumono importanza rilevante:

- espansione nella valvola di laminazione, che determina una trasformazione adiabatica isoentalpica (senza produzione di lavoro verso l'esterno) e irreversibile (non isoentropica);
- perdite per attrito nel deflusso del fluido lungo gli scambiatori (nell'evaporatore e nel condensatore) che danno origine a trasformazioni non isobare;
- perdite di carico nei circuiti di collegamento tra i vari componenti del ciclo che originano cadute di pressione rappresentate con differenza di temperatura tra l'ingresso del compressore e quello del condensatore;
- compressione non isoentropica, caratterizzata da un suo rendimento isoentropico dato dal rapporto tra il lavoro necessario per la compressione ideale e quello necessario per la compressione reale. A seconda della tipologia di compressore, del fluido frigorifero e dalle condizioni di lavoro, il rendimento è tra 0.65 e 0.85. Questa è la causa di irreversibilità che incide di più nel calcolo dell'efficienza della pompa di calore.

Il funzionamento della Pompa di calore permette perciò l'estrazione di calore da una sorgente termica e la cessione all'utenza del calore prelevato; grazie al passaggio del fluido attraverso l'evaporatore viene prelevata l'energia termica che viene in un secondo momento ceduta all'ambiente da riscaldare durante il passaggio attraverso il condensatore.

La classificazione delle pompe di calore può avvenire sulla base del tipo di alimentazione (elettrica o a gas), sulla base del tipo di ciclo termodinamico (a compressione di vapore o a compressione termica) o sulla base del tipo di sorgente termica: aria (Pompa di calore ad aria), acqua (Pompa di calore ad acqua) e terreno (Pompa di calore geotermiche - GSHP).

L'aria esterna è la sorgente maggiormente utilizzata grazie alla sua disponibilità e ai bassi costi di investimento per la realizzazione di un impianto di climatizzazione con Pompa di calore ad aria; nello uso dell'aria esterna come sorgente termica vi sono però alcune limitazioni legate alla variabilità della temperatura e allo sfasamento dei periodi di massima disponibilità termica rispetto ai periodi di massima richiesta energetica.

Le Pompa di calore ad acqua sono meno suscettibili alle variazioni delle condizioni ambientali esterne poiché estraggono calore dall'acqua superficiale (fiumi, laghi) o sotterranea; gli svantaggi legati all'utilizzo dell'acqua come sorgente termica sono legati alla generazione di incrostazioni all'interno delle tubazioni e alla possibilità di sfruttamento sono in determinate zone. Lo sfruttamento del terreno come sorgente termica garantisce una maggiore stabilità e inerzia termica; lo svantaggio dello sfruttamento del calore geotermico risiede nella complessità e nel costo di realizzazione dell'impianto di scambio termico.

Le GSHP (Ground Source Heat Pump) sono Pompa di calore abbinata a una o più sonde geotermiche all'interno delle quali scorre il fluido termovettore che scambia energia con il terreno; il terreno possiede infatti un livello termico elevato e costante (o con oscillazioni sfasate e smorzate rispetto le variazioni della

temperatura in superficie). Un impianto geotermico a bassa entalpia è composto da una o più Pompa di calore, da un insieme di sonde geotermiche e da una rete di distribuzione del calore (impianto secondario), come è schematizzato in Figura 1.20.

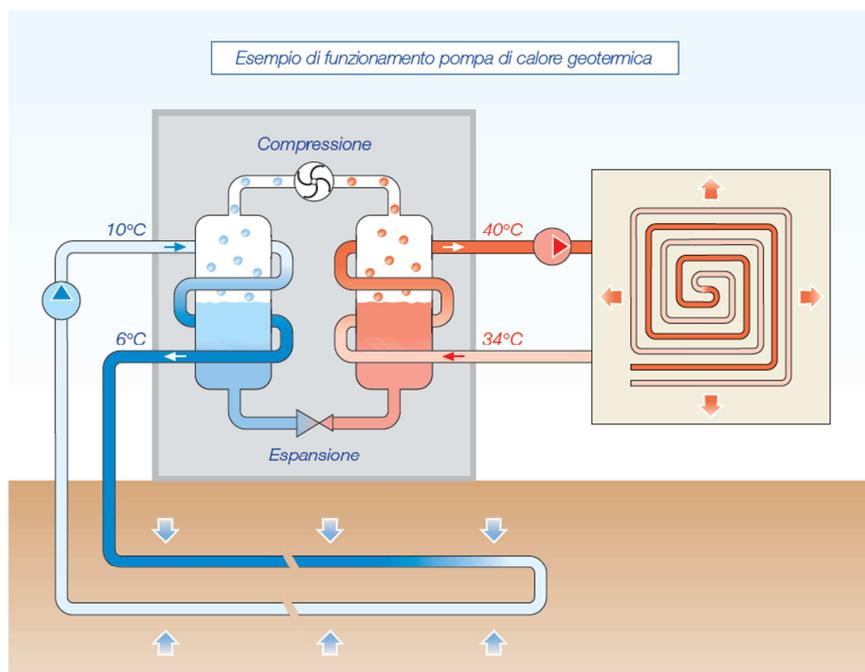


Figura 1.20: funzionamento di una pompa di calore geotermica (Doninelli M. 2007)

Negli impianti che funzionano sia in modalità di riscaldamento che in modalità di raffrescamento il calore è ciclicamente prelevato e stoccato nel terreno: quando i fabbisogni energetici estivi e invernali sono bilanciati il bilancio energetico complessivo del terreno è pari a zero.

Il fluidi termo vettori più comunemente utilizzati nell'industria delle Pompa di calore sono i refrigeranti naturali come l'ammoniaca (R717), il propano (R290), il propilene (R1270), l'isobutano (R600), l'acqua (R718) e l'anidride carbonica (R744); in passato sono state utilizzate miscele contenenti cloro e fluoro che hanno generato impatti ambientali e il loro utilizzo è stato pertanto vietato. I prodotti refrigeranti sono identificati tramite una sigla in cui la lettera R (Refrigerano) è seguita da un codice numerico che indica la composizione della molecola.

Sono diversi i coefficienti utilizzati da esperti e costruttori per valutare l'efficienza di una pompa di calore uno di questi è il coefficiente di prestazione COP (Coefficient of Performance); definito come rapporto tra la potenza termica fornita dalla pompa e la potenza spesa per farla funzionare.

Per una pompa a compressione meccanica, il COP identifica il rapporto fra il calore fornito dalla pompa di calore stessa (kW) e il lavoro fornito dal compressore grazie alla potenza elettrica che esso assorbe (kW).

$$\text{COP}_{\text{reale}} = \frac{|Q_C|}{|L_{\text{comp}}|} = \frac{|Q_C|}{|Q_C| - Q_E}$$

Eq. 18

Dove:

- Q_C è il calore scambiato al condensatore (kJ/kg);
- L_{comp} è il lavoro elettrico esterno di compressione;
- Q_E è il calore scambiato all'evaporatore (kJ/kg).

Nel caso di una pompa di calore ideale reversibile e, quindi, per un fluido frigorigeno che evolve secondo un ciclo di Carnot inverso esattamente tra le temperature della sorgente calda T_C e del serbatoio termico esterno T_E , il COP risulta essere il massimo ottenibile, dato che le trasformazioni (2 isoterme e 2 adiabatiche) richiedono la minore possibile quantità di lavoro e ne producono il massimo possibile.

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{|Q_C|}{|L_{\text{comp}}|} = \frac{|Q_C|}{|Q_C| - Q_E} = \frac{T_C}{T_C - T_E}$$

Eq. 19

Nella realtà per le condizioni operative tipiche delle pompe di calore è molto difficile raggiungere la metà di questo valore ideale. Tuttavia, per ragioni co-

struttive, si realizzano alcune diversificazioni dal ciclo base in modo da aumentare l'effetto utile della pompa (Figura 1.19):

- l'evaporatore è dimensionato in modo tale da terminare la trasformazione in condizione di vapore surriscaldato, in modo da non avere presenza di liquido nella miscela per evitare di comprimere la fase liquida;
- prima di entrare nel condensatore, la miscela viene desurriscaldata con trasformazione isobara;
- si prolunga la condensazione della miscela oltre la curva di liquido saturo, sottoraffreddandola. Si ottiene, quindi, liquido sotto raffreddato che entrando nella valvola di laminazione, sposta il ciclo con una diminuzione del valore di entropia

Comunque, a seconda del tipo di impianto e delle condizioni effettive di funzionamento il valore del COP si colloca generalmente tra 2 e 4. Un valore di COP = 4 significa che per produrre 1 Joule occorre solo $\frac{1}{4}$ di energia elettrica mentre la restante parte deriva interamente da fonte geotermica (Brandl H. 2013). L'efficienza di una pompa di calore è fortemente influenzata dalla differenza tra la temperatura a cui il calore è estratto e quella effettivamente a cui si utilizza. Una temperatura elevata lato utenza (temperatura di ingresso al sistema di riscaldamento del circuito secondario) e una bassa temperatura di estrazione (dovuta a una temperatura di ritorno troppo bassa) nello scambiatore di calore (circuito primario) ne riducono l'efficienza. Per motivi economici dovrebbe essere raggiunto un valore di COP > 4. Pertanto la temperatura utilizzabile nel circuito secondario non deve superare 35-45 °C e la temperatura di estrazione nei tubi dell'assorbitore non deve scendere al di sotto di 0-5 °C. (Brandl H. 2013).

Queste osservazioni derivano dalla formulazione del COP del ciclo di Carnot che dimostra analiticamente come le migliori prestazioni si ottengono quanto più vicine sono le temperature delle due sorgenti. Da qui l'importanza di questo coefficiente che permette di identificare la misura quantitativa del salto di

temperatura che il sistema produce, ovvero la differenza tra la temperatura della sorgente di calore e la temperatura di uscita del calore dal dispositivo stesso. Quando la pompa di calore è impiegata anche per raffrescare, allora si parla di pompa di calore reversibile e il parametro che è assunto per stimare il rendimento del processo assume il nome di EER (Energy Efficiency Ratio). La sua formulazione è analoga a quella COP con l'unica differenza che l'EER pone l'attenzione sul calore asportato dalla sorgente fredda. Esso è quindi dato dall'effetto refrigerante prodotto dalla pompa diviso dall'energia in ingresso alla pompa stessa:

$$\text{EER}_{\text{Carnot}} = \frac{|Q_C|}{|L_{\text{comp}}|} = \frac{|Q_E|}{|Q_C| - Q_E} = \frac{T_E}{T_C - T_E}$$

Eq. 20

$$\text{EER}_{\text{reale}} = \frac{|Q_C|}{|L_{\text{comp}}|} = \frac{|Q_E|}{|Q_C| - Q_E}$$

Eq. 21

Il clima della località in cui si installa una pompa di calore riveste quindi un ruolo fondamentale nella scelta della sorgente con la quale essa deve lavorare. L'efficienza di una pompa di calore, in un dato periodo di reale funzionamento è espressa dalla "cifra di lavoro" definita come rapporto tra il calore utile prodotto e l'energia consumata durante il periodo stesso. Questa, a differenza del COP, tiene in considerazione il funzionamento effettivo del sistema, descrivendone le prestazioni. Sono stati introdotti i coefficienti SPS (Seasonal Performance Factor) e ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio). Il Seasonal Performance Factor è definito come il rapporto tra l'energia complessivamente fornita dalla pompa di calore e l'energia elettrica consumata, compresi i consumi per i sistemi ausiliari a servizio del funzionamento della pompa stessa:

$$\text{SPF} = \frac{Q_{\text{out,g,h}} + Q_{\text{out,g,DHW}}}{E_{\text{in,g}} + W_g}$$

Eq. 22

Dove:

- $Q_{out,g,h}$ è l'energia termica in riscaldamento (J);
- $Q_{out,g,DHW}$ è l'energia termica per la produzione di Acqua Calda Sanitaria (J);
- $E_{in,g}$ è l'energia elettrica assorbita dalla pompa di calore (J);
- W_g è l'energia elettrica assorbita dagli ausiliari a servizio della pompa di calore (J).

Allo stato attuale, i valori di SPF = 3.8-4.3 sono raggiunti con pompe di calore elettriche standard; dispositivi speciali con vaporizzazione diretta aumentano l'SPF del 10-15% (Brandl H. 2013).

Il secondo coefficiente invece l' European Seasonal Energy Efficiency Ratio si riferisce alla media pesata dei valori dei singoli EER a diverse condizioni operative, ponderati per i relativi tempi di funzionamento in funzione della tipologia della macchina:

$$ESEER = \frac{1}{\frac{a}{EER_1} + \frac{b}{EER_2} + \frac{c}{EER_3} + \frac{d}{EER_4}}$$

Eq. 23

Con:

- a, b, c, d sono i tempi di funzionamento convenzionali fissati per i diversi carichi della macchina frigorifera;
- EER_1 , EER_2 , EER_3 , EER_4 sono gli indici di efficienza misurati alle condizioni operative 1, 2, 3 e 4.

Tutti questi indici misurano quanto calore viene prodotto fornendo in ingresso una certa quantità di energia. Questa energia in ingresso, però, potrebbe essere ottenuta da fonti responsabili di emissioni di anidride carbonica come le centra-

li termoelettriche. Per questo motivo, si introduce un ulteriore indice, noto come “indice di energia primaria” (Primary Energy Ratio, PER), il quale valuta l’impatto globale della pompa di calore sull’ambiente, andando a considerare il combustibile che è stato usato per produrre l’energia elettrica richiesta dalla pompa stessa.

1.2.2. Tipi di sistemi di geoscambio

Sono molte le tipologie legate alle pompe di calore geotermiche ma in generale i sistemi di geoscambio sono composti da una Pompa di Calore accoppiata a una sorgente termica che può essere costituita dal suolo o dall'acqua (superficiale o sotterranea). Ciò che crea delle differenze tra un sistema e la altro è la modalità di assorbimento del calore geotermico.

Lo scambio di calore tra sorgente e Pompa di calore può essere effettuato con:

- Sistemi a circuito aperto (in cui l'acqua è utilizzata come sorgente di scambio termico)
- Sistemi a circuito chiuso (il sottosuolo è utilizzato come sorgente di scambio termico)

I sistemi a circuito chiuso possono essere a loro volta suddivisi in tre principali sottosistemi:

- Sonde geotermiche verticali
- Sonde geotermiche orizzontali
- Strutture energetiche

Il tipo di sistema viene definito e progettato di volta in volta in funzione della stratificazione e del tipo di terreno, della posizione della falda e della sua accessibilità, della possibilità o meno di trivellazione dell’area e in base alle necessità di climatizzazione dell’edificio.

I sistemi a circuito aperto (open loop) sfruttano l'acqua come mezzo di trasmissione del calore. Essa costituisce una buona sorgente per lo scambio termico, poiché risente poco delle fluttuazioni stagionali, è caratterizzata da un'elevata capacità e inerzia termica e può accumulare calore.

Le acque intercettate potrebbero essere acqua di falda (Figura 1.21) o vere e proprie superfici di acqua come laghi sotterranei o superficiali (Figura 1.22) o ancora acque reflue di precipitazione ma anche derivanti dall'industria.

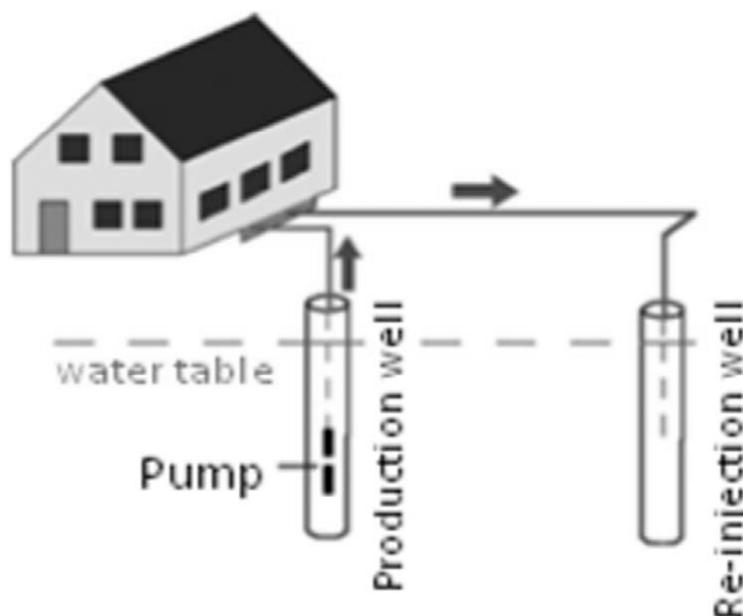


Figura 1.21: sistema open loop con sfruttamento di acqua di falda (Karytsas S. 2017)



Figura 1.22: sistema open loop con sfruttamento di laghi sotterranei (Karytsas S.2017)

Essi sono costituiti da un sistema di prelievo e di restituzione dell'acqua, da una o più pompe di calore e da un sistema di distribuzione. Il prelievo è effettuato mediante un pozzo di estrazione (o di produzione). Lo scarico invece può avvenire in superficie, in fogna o nello stesso bacino di prelievo mediante un pozzo di iniezione. Per la movimentazione dell'acqua sono necessarie pompe idrauliche; nel caso in cui lo scambio termico avvenga con le acque sotterranee, i costi di pompaggio per l'estrazione dell'acqua aumentano all'aumentare della soggiacenza della falda.

In un'analisi preliminare per la realizzazione di un sistema open loop è necessario valutare la qualità e le caratteristiche chimiche dell'acqua, le caratteristiche della falda e le caratteristiche idrogeologiche dell'area. Nei casi in cui il chimismo dell'acqua in ingresso possa provocare incrostazioni o intasamenti dei circuiti della Pompa di calore viene inserito un ulteriore circuito; quando invece la qualità dell'acqua è tale da garantire un corretto funzionamento dell'impianto, la Pompa di calore è direttamente collegata allo scambiatore.

Lo sfruttamento di acque superficiali per lo scambio termico minimizza i costi di pompaggio ma, a causa della tendenza delle acque superficiali a formare incrostazioni e corrosioni, è essenziale l'utilizzo di una Pompa di calore con il circuito separato.

Nei sistemi a circuito chiuso il serbatoio termico da cui viene estratto il calore è il sottosuolo; in questo tipo di impianti si genera lo scambio termico grazie alla circolazione di un fluido termovettore attraverso una o più sonde geotermiche ("Borehole Heat Exchangers"-BHE). Questo tipo di soluzione è preferibile a quello precedente nel momento in cui ci possano essere rischi di inquinamento della falda; uno tra gli aspetti fondamentali per la scelta del tipo di impianto. La sonda geotermica consiste in un circuito chiuso, composto da uno o più tubi, che viene inserito nel terreno a seguito della realizzazione di una perforazione (o di uno scavo) di profondità variabile a seconda dei criteri progettuali.

Le sonde geotermiche possono essere distinte in due principali categorie:

- sonde geotermiche "ad U" (Figura 13): sono composte da due tubazioni diritte unite da una giunzione "ad U" al piede della sonda; all'interno di un foro possono essere inserite una o più sonde geotermiche "ad U" (singola, doppia e tripla U).
- sonde geotermiche coassiali (o concentriche); sono composte da due tubazioni di diverso diametro inserite una all'interno dell'altra. (Figura 1.23)

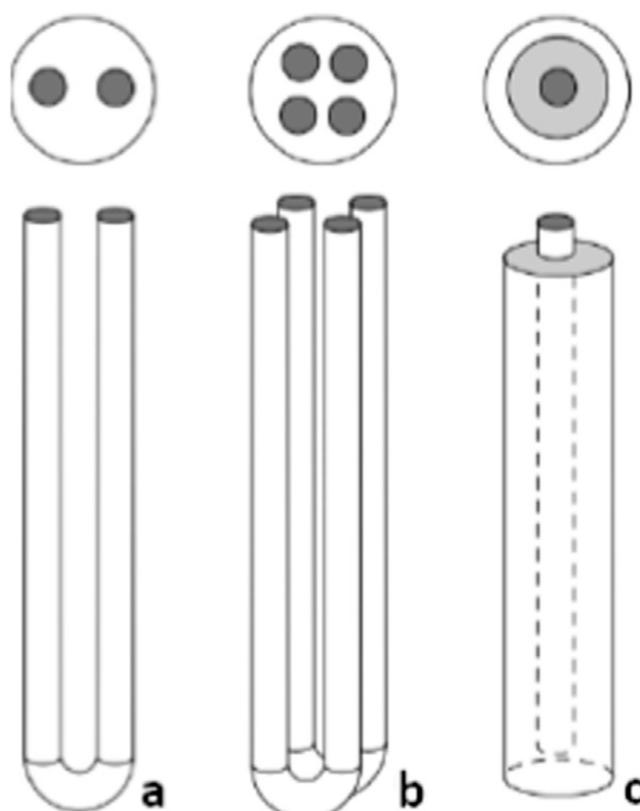


Figura 1.23: sonde geotermiche a singola U, doppia U e coassiali (Karytsas S.2017)

Il materiali con cui sono solitamente fabbricate le sonde geotermiche sono il polietilene ad alta densità o il polietilene reticolato ad alta densità; tali materiali sono caratterizzati da una buona resistenza e flessibilità. Prima di essere collegate alla pompa di calore le sonde sono riempite con il fluido termovettore che genera lo scambio termico.

Il diametro e lo spessore delle tubazioni devono essere tali da garantire lo scambio termico e da assicurare un regime di flusso turbolento all'interno della tubazione. Durante il passaggio attraverso la Pompa di Calore, il fluido termovettore cede/acquista l'energia termica e dopo essersi raffreddato/riscaldato rientra all'interno del circuito delle sonde geotermiche. Il fluido termovettore può essere acqua nel caso in cui le temperature del fluido stesso non scendano al di sotto della temperatura di congelamento; nel caso in cui le temperature siano molto basse, il fluido termovettore viene addizionato con anticongelanti che abbassano la temperatura di congelamento.

L'attività di un impianto a circuito chiuso non genera il problema di smaltimento di fluidi (che si ha invece nel caso degli impianti a circuito aperto) poiché dal terreno viene estratto solo il calore e non vi è trasferimento di massa, motivo per il quale questi tipi di sistemi di geoscambio possono essere installati praticamente ovunque.

I sistemi a circuito chiuso possono avere diverse configurazioni a seconda della tipologia di sonde geotermiche utilizzate.

I sistemi a circuito chiuso con sonde geotermiche verticali sfruttano la proprietà del sottosuolo di mantenere una temperatura costante durante l'anno a partire da una profondità di 15-20 m. In questo tipo di impianti vengono realizzati dei fori (con profondità di circa 100 m) all'interno dei quali sono inserite le sonde geotermiche (Figura 1.24).



Figura 1.24: sistema di geoscambio close loop, sonde geotermiche verticali (Karytsas S. 2017)

Una volta realizzato il foro e calate le sonde geotermiche all'interno dello stesso, viene iniettata a partire dalla base del foro fino al piano campagna, mediante un tubo di iniezione (a perdere), una miscela cemento-bentonitica (in questo modo si evita la presenza di interstizi vuoti e si garantisce il contatto termico tra sottosuolo e sonda). La circolazione del fluido termovettore all'interno delle sonde permette lo scambio termico con il terreno circostante.

Gli impianti che utilizzano le sonde geotermiche verticali, se paragonati con impianti che utilizzano scambiatori di tipo superficiale, permettono una resa più elevata, consentono la realizzazione dell'impianto in spazi ristretti, se correttamente realizzati e collaudati non richiedono manutenzione e i rischi di danneggiamento successivi alla realizzazione sono limitati.

I sistemi a circuito chiuso con sonde geotermiche orizzontali funzionano secondo lo stesso principio dei sistemi a sonde geotermiche verticali ma si differenziano per il fatto di essere costituiti da sonde installate poco al di sotto del piano campagna e per il fatto di avere uno sviluppo orizzontale.

Le sonde geotermiche orizzontali possono avere uno sviluppo lineare ed essere connesse "in serie", "in parallelo" (Figura 1.25) o possono avere uno sviluppo a spirale e in trincea (Figura 1.26).



Figura 1.25: sistema di geoscambio close loop, sonde geotermiche orizzontali parallele (a) e in serie (b) (Karytsas S.2017)

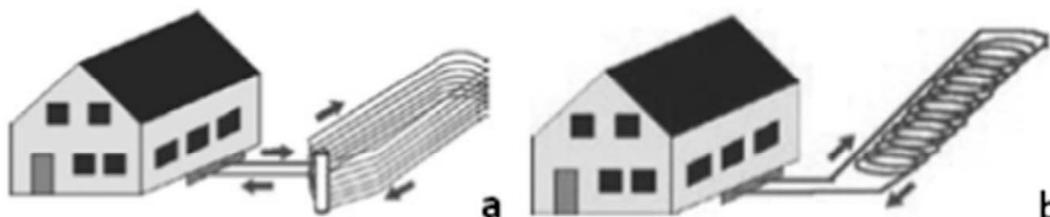


Figura 1.26: sistema di geoscambio close loop, sonde geotermiche orizzontali a spirale (a) e in trincea (b) (Karytsas S. 2017)

La ricarica energetica del terreno che scambia calore con le sonde orizzontali è dovuta principalmente dall'energia proveniente dalla radiazione solare; di questo bisogna tener conto nella progettazione dell'impianto e quindi prevedere che le aree al di sopra delle sonde non siano ricoperte o rese impermeabili.

Le sonde orizzontali sono generalmente posate a profondità tali da risentire dell'onda termica stagionale (variabili tra 1,5 m e 2,5 m di profondità); l'escursione termica risulta però essere attenuata e traslata nel tempo. La disposizione orizzontale delle sonde permette di evitare costose perforazioni ma necessita della disponibilità di ampi spazi per effettuare lo scavo che può essere realizzato mediante sbancamento o mediante la realizzazione di una trincea. Nel caso dello sbancamento, viene movimentata un'ampia superficie di terreno per una profondità di circa 1 m; dopo il posizionamento delle sonde viene posato uno strato di sabbia e il tutto è ricoperto con il terreno scavato precedentemente. Nel caso della posa delle sonde all'interno di trincee si ha una notevole riduzione del materiale di scavo e dell'impatto di cantiere: vengono realizzate trincee larghe generalmente 60 cm e profonde fino a 3 m al cui interno sono posizionati gli scambiatori. Al fine di minimizzare l'effetto di interferenza termica tra trincea e trincea è necessario che queste siano adeguatamente distanziate tra loro (circa 2,5 m).

In generale i sistemi con sonde orizzontali non sono favorevoli in molte zone urbane per la ristretta superficie libera e l'efficienza risente molto delle variazioni della temperatura da zona a zona ma i costi di installazioni rispetto altri sistemi sono molto ridotti e ciò rende comunque questo tipo di impianto conveniente se sono verificate le giuste condizioni.

1.3. Geostrutture energetiche

Negli ultimi anni, oltre ai classici impianti geotermici, si è osservata una diffusione sempre maggiore delle cosiddette geostrutture energetiche, così definite poiché associano al loro principale ruolo strutturale la funzione di scambiatore di calore.

Queste nuove soluzioni di impianti geotermici sono state studiate con l'intento di abbattere i costi dell'installazione del sistema geotermico. Non sono necessari lavori di perforazione o scavi aggiuntivi per le sonde energetiche poiché i tubi scambiatori sono inglobati direttamente negli elementi in calcestruzzo. La struttura diventa essa stessa il circuito primario del sistema, il quale è collegato ai sistemi di riscaldamento e raffrescamento (circuito secondario) degli edifici da climatizzare tramite una pompa di calore. In analogia con gli impianti classici a bassa entalpia, questa tecnologia richiede una temperatura costante tutto l'anno in modo da rendere possibile il duplice scambio di calore nel periodo estivo e invernale rispettivamente per il raffrescamento e riscaldamento (Barla et al. 2015).

A rigore qualsiasi struttura geotecnica può essere attivata termicamente (Figura 1.27) ma la maggior parte delle applicazioni fa riferimento a fondazioni superficiali e profonde (pali energetici) o strutture di contenimento (diaframmi), pochi sono gli esempi documentati di gallerie energetiche. Tale applicazione potrebbe comunque ricoprire un ruolo importante per lo sfruttamento del calore del terreno, infatti, rispetto alle fondazioni, le gallerie coinvolgono un volume di terreno molto più ampio e di conseguenza una risorsa termica maggiore. In ogni caso occorre considerare due aspetti tecnici fondamentali durante la progettazione: studiare l'effettiva efficienza energetica dell'impianto e osservare gli effetti indotti dalle variazioni di temperatura. Da un punto di vista geotecnico le variazioni di temperatura potrebbero indurre tensioni e spostamenti aggiuntivi o influenzare le proprietà del terreno e il comportamento all'interfaccia terreno-struttura. Sebbene siano operative diverse applicazioni pratiche di questa tecno-

logia (Adam D. et al. 2009, Webb P. B. et al. 2016, Brandl H. 2009, Brandl H. 2006, Brandl H. 1998), all'inizio il loro dimensionamento era basato su considerazioni empiriche e lo studio del comportamento termo-meccanico era ancora limitato: per tenere in considerazione gli effetti sulla struttura dei flussi termici e idraulici si aumentava in modo considerevole i fattori di sicurezza. L'approccio meramente meccanico non è più sufficiente per descrivere il comportamento della struttura energetica. E' possibile e doveroso studiare le variazioni termiche e tensionali della struttura e del sito intorno a essa tramite modellazione numerica termo-idraulica e termo-meccanica e confrontare tali risultati con evidenze sperimentali per la validazione dei modelli così da determinare le effettive deformazioni e tensioni aggiuntive, ottimizzare l'efficienza energetica con conseguenti benefici economici e ambientali (Laloui L et Di Donna A. 2011, Barla et al. 2015).

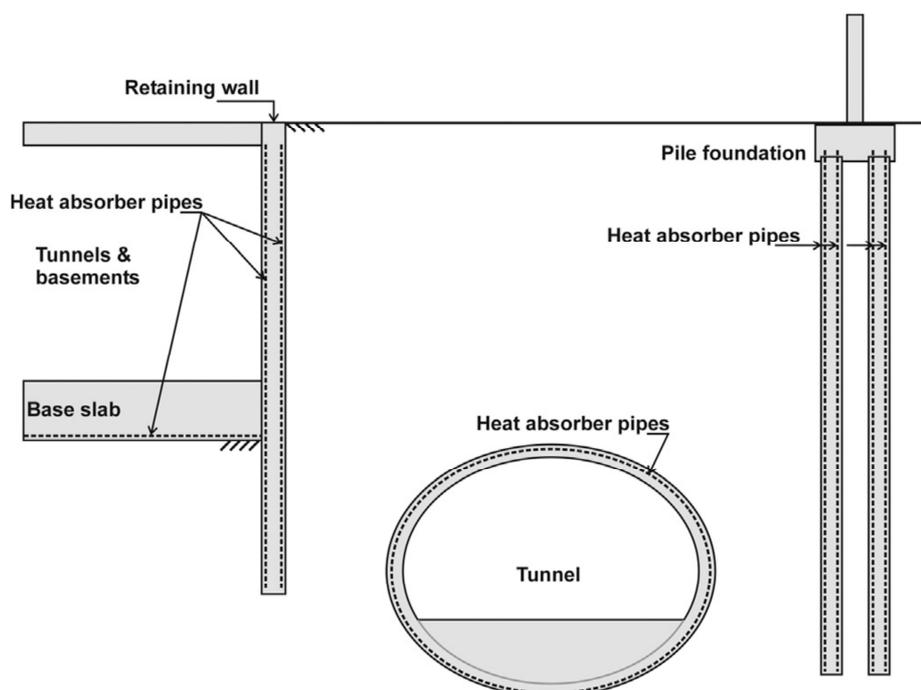


Figura 1.27: esempi di geostrutture energetiche (Bourne-Webb P. et al. 2016)

La storia delle geostrutture energetiche è relativamente recente. Le prime strutture termo attive sono state costruite a partire dagli anni '80 in Austria, Svizzera, Germania e Inghilterra, diffondendosi in pochi anni anche in altri stati dell'Europa: Italia, Scozia, Olanda e del mondo come Giappone (Sekine et al.

2007), Cina e Canada. Ad esempio nelle Figura 1.28 e Figura 1.29 si osserva la crescita del numero di pali di fondazioni attivati energeticamente installati in Austria e Inghilterra, sottolineando il fatto che tale crescita è rappresentativa anche per altre strutture geotermiche come le platee o travi di fondazione, muri di ritenuta o di vani interrati ecc.

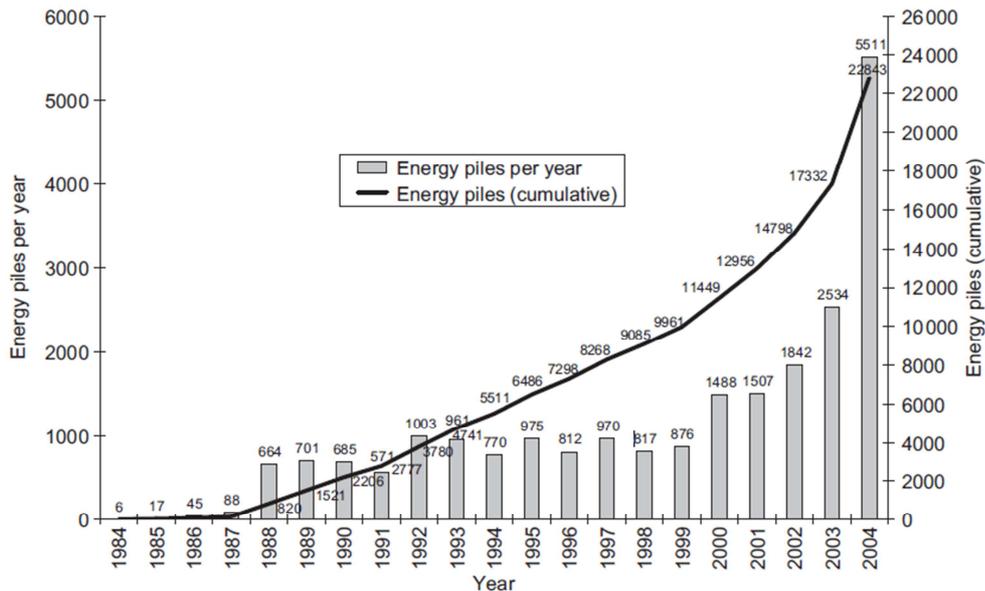


Figura 1.28: numero pali energetici installati in Austria (Brandl H. 2006)

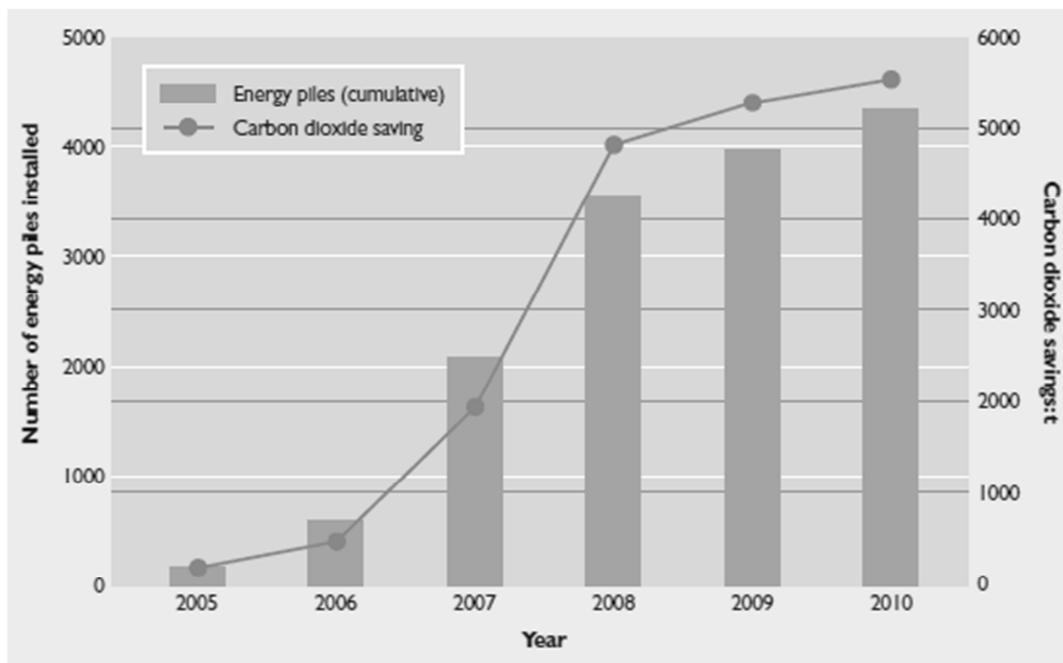


Figura 1.29: numero pali energetici installati in Inghilterra (Laloui L. e Di Donna A. 2011)

1.3.1. Fondazioni energetiche

Le fondazioni energetiche possono comprendere solette di base, pali, sistemi di elementi estrusi (elementi singoli o diaframmi continui) e colonne di cemento o pietra. Le fondazioni energetiche possono essere utilizzate per riscaldare e/o raffreddare edifici di qualsiasi dimensione, nonché per pavimentazioni di strade e ponti, ecc.

In generale per gli impianti che sono stati progettati per funzionare con una sola via di scambio per cui è possibile o solo riscaldare o solo raffreddare è preferibile un terreno con alta permeabilità e una falda con un elevato gradiente idraulico in modo tale da avere un ricambio più veloce e rendere l'impianto più efficiente. Contrariamente se l'impianto è usato con funzionamento stagionale, per cui si raffreddano gli edifici di estate stoccando calore nel terreno per essere riutilizzato nella stagione invernale per il riscaldamento è preferibile una falda con gradienti idraulici più bassi. A seconda delle proprietà del suolo e della profondità di installazione degli assorbitori, per produrre 1 kW di riscaldamento sono richiesti all'incirca tra 20 m² (suolo saturo) e 50 m² (sabbia asciutta) di superficie delle strutture in calcestruzzo a contatto con il suolo o le acque sotterranee. Non vi è alcun limite alla profondità delle pile o delle pareti del diaframma e quindi dell'installazione dei sistemi di assorbimento dell'energia. Prescindendo dai costi di installazione il potenziale energetico aumenta con la profondità, fondazioni più profonde sono vantaggiose. Si è osservato che la lunghezza minima economica dei pali o dei diaframmi è di circa 6 m. (Brandl H. 2006)

Il calcestruzzo presenta delle caratteristiche termiche ideali per essere utilizzato come scambiatore di calore. Per sfruttare la conduttività termica e capacità di stoccaggio termico nelle fondazioni energetiche sono installati all'interno del calcestruzzo tubi in plastica di polietilene ad alta densità con diametro di 20 o 25 mm e rispettivamente uno spessore di 2,0 o 2,3 mm. Sono posizionati in modo da formare un circuito di anelli separati o spirali contigue (Figura 1.30), che fanno circolare un fluido termovettore (mezzo di scambio termico) di acqua,

eventualmente addizionata con antigelo (principalmente glicole) o una soluzione salina. Le miscele di acqua glicolata si sono dimostrate più adatte, contengono anche additivi per prevenire la corrosione nel blocco di testa, delle valvole, della pompa di calore, ecc.

Le tubazioni di plastica possono essere fissate alle gabbie di rinforzo della fondazione in stabilimento (strutture prefabbricate) o in sito oppure inserite solo dopo il getto di calcestruzzo.



Figura 1.30: esempio di circuito a spirale in un palo energetico (Brandl H. 2006)

Per motivi pratici, gli impianti vengono più comunemente installati in cantiere. In questo caso per resistere alle deformazioni durante l'annegamento nel calcestruzzo e soprattutto per controllare l'integrità dell'impianto, sono installati una valvola di bloccaggio e un manometro (Figura 1.31). Ciò consente al tubo del circuito di essere pressurizzato.



Figura 1.31: valvola e manometro per i tubi scambiatori dei pali energetici (Suckling T. P. et al. 2004)

Questa pressione, di circa 8 bar, è mantenuta in un primo momento fino a quando il calcestruzzo non è maturato e inizia a indurire e successivamente applicata prima che l'intero circuito primario sia definitivamente chiuso. La Figura 1.32 mostra una vista parziale del sistema di posa dei tubi di assorbimento durante la costruzione di una platea su pali energetici.

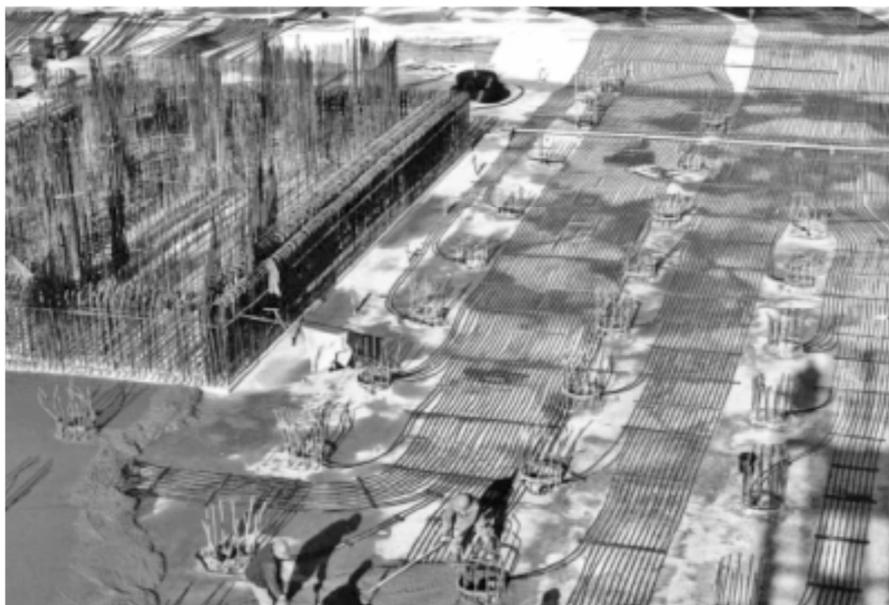


Figura 1.32: cantiere aperto per la costruzione di una platea su pali (Brandl H. 2006)



Figura 1.33: particolare del raccordo in una fondazione energetica (Brandl H. 2006)

Una volta colato il calcestruzzo, i tubi di ogni singolo elemento sono collegati tra di loro e poi riuniti in blocco in un unico punto (Figura 1.33).

Il circuito secondario è una rete di riscaldamento o raffreddamento degli edifici (tubazioni secondarie) incassata nei pavimenti e nelle pareti della struttura o in ponti di ponti, strutture stradali, piattaforme ecc.. Infatti, oltre alla climatizzazione degli edifici, applicazione più consueta per questi tipi di impianti, possono essere utilizzati anche per risolvere o migliorare i problemi in altre realtà. Per esempio se utilizzati per riscaldare o raffreddare il manto stradale e l'impalcato dei ponti si potrebbe impedire la formazione del ghiaccio e quindi evitare le conseguenze ad esso connesso, aumentare la durabilità della pavimentazione e dei substrati se suscettibili a cicli di gelo/disgelo o se interessati da traffico intenso.

L'esperienza ha dimostrato che questi sistemi di raffreddamento e/o riscaldamento geotermici provenienti da fondazioni energetiche e altre strutture termoattive possono far risparmiare fino a due terzi dei costi di riscaldamento convenzionali (Brandl H. 2006), ridurre la produzione di anidride carbonica e le emissioni di biossido di zolfo anche del 50% degli edifici (Laloui L. et Di Donna

A. 2011). Inoltre, rappresentano un contributo efficace alla protezione dell'ambiente fornendo energia pulita e auto-rinnovabile.

1.3.1.1. Pali energetici

Nel caso di pali energetici il rischio di danni al tubo dell'assorbitore può essere ridotto da una gabbia di rinforzo rigida, ovvero saldando il rinforzo elicoidale alle barre di rinforzo verticali. Un semplice collegamento con fili permetterebbe eccessive deformazioni della gabbia di rinforzo durante il sollevamento e l'inserimento nel calcestruzzo del palo o comunque durante il getto del calcestruzzo (Figura 1.34) in base alle tecniche di costruzione.



Figura 1.34: armatura di un palo energetico con impianto termoscambiatore prima del getto di calcestruzzo (Brandl H. 2006)

Altre alternative per pali di energia sono:

- pali di tubi in acciaio con condotte riempite con calcestruzzo e con scambiatori di calore inseriti (tubi di assorbimento);
- colonne di calcestruzzo installate dopo la tecnica di vibroflotazione e quindi dotate di tubi di assorbimento.

I pali in acciaio sono riempiti sotto pressione con il cemento e sono attivati termicamente con l'inserimento dei tubi scambiatori. Sono costituiti da elementi standard lunghi 5 m facilmente componibili e presentano un diametro standard di 170 mm. Occorre però fare attenzione alle possibili instabilità che si possono presentare se il terreno è costituito da materiale sciolto.



Figura 1.35: tubi scambiatori in pali di acciaio riempiti con calcestruzzo (Brandl H. 2006)

Anche le colonne di calcestruzzo costruite con la tecnica di vibroflotazione possono essere utilizzate come "colonne energetiche" (Figura 1.35). In questo caso però il rendimento è ridotto rispetto a quella dei pali prefabbricati o trivellati.

In Svizzera sono più di 40 gli edifici costruiti su pali energetici, si tratta di industrie, edifici di civile abitazione, scuole o aeroporti. Probabilmente il più famoso è il Dock Midfield Terminal all'aeroporto di Zurigo, operativo dal 2003. Le fondazioni sono costituite da 350 pali trivellati di 27 m di lunghezza con un

diametro compreso tra 0.9 m e 1.5 m, di questi 306 sono pali energetici con una media sulla lunghezza attivata pari a 26,8 m con una capacità di estrazione pari a 49 W/m, raggiungendo in totale 402 kW. Collegati a una pompa di calore, forniscono l'85% del fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale, pari a 2700 MWh (Laloui L. et al. 2006). Un altro esempio in Svizzera il complesso scolastico "Vers-l'Eglise" a Valais. L'edificio costituito da circa 20 classi sviluppa in lunghezza per 50 m e le fondazioni comprendono 118 pali di cui circa un terzo (41 pali) è attivato termicamente con una potenza di estrazione pari a 50 W/m raggiungendo una capacità installata complessiva di 45.6 kW (Anstett et al. 2005).

In Austria uno dei progetti tra quelli costruiti su fondazioni energetiche vi è il centro di riabilitazione a Bad Schallerbach nel distretto di Grieskirchen. Con un volume complessivo di 90000 m³, la struttura si distribuisce su 7 piani di cui 2 sono interrati ed è costruita su un pendio instabile (Figura 1.36).

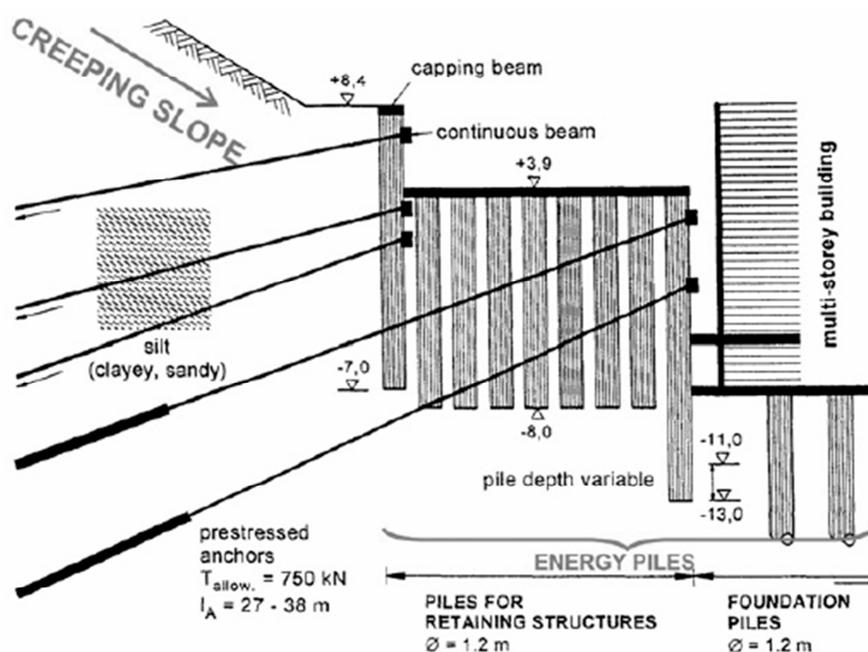


Figura 1.36: vista parziale dei pali energetici ancorati sul pendio instabile a Bad Schallerbach, Austria (Brandl H. 2013)

Le fondazioni sono costituite da 175 pali con diametro variabile tra 1 m e 2 m e hanno la funzione di sostenere i carichi della struttura, permettere lo scavo dei piani interrati e la stabilizzazione del pendio, presentano infatti in base ai requisiti statici e alle caratteristiche del terreno lunghezze differenti: 9 - 11 m i pali di fondazione e 9 - 18 m gli elementi per il sostegno del terreno e del pendio molti dei quali sono ulteriormente fissati con ancoraggi pretesi. Come mostrato in Figura 1.37, complessivamente sono 143 i pali attivati termicamente con 400000 m di tubi scambiatori e di questi è stato strumentato con fessurimetri, celle termiche e di pressione, lo scopo era investigare gli effetti delle variazioni della temperatura del terreno e all'interno delle fondazioni. I primi test si sono svolti nell'inverno 1996/1997 e solo dopo circa un anno, nell'autunno del 1997 l'impianto geotermico è stato messo in funzione a pieno regime.

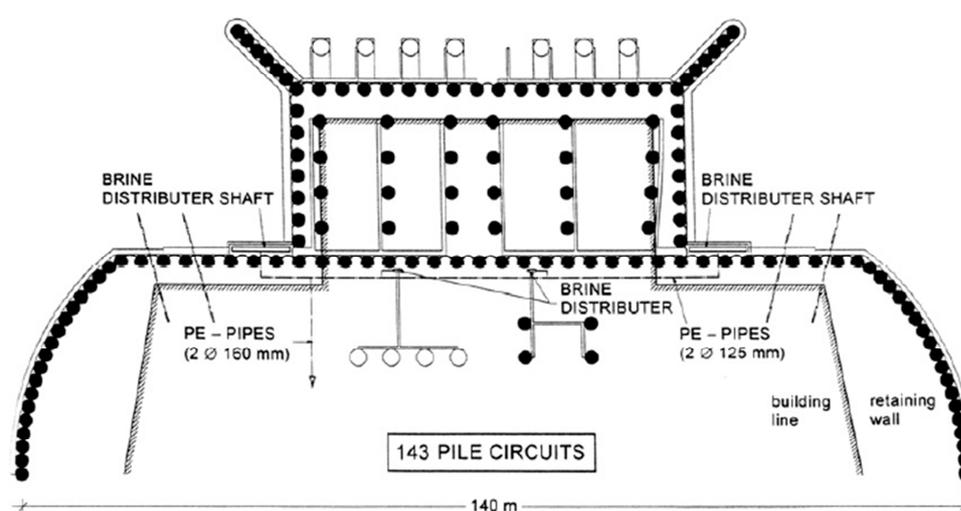


Figura 1.37: disposizione pali di fondazione a Bad Schallerbach, Austria (Brandl H. 2013)

Il comportamento osservato in questi test può essere generalizzato per la maggior parte dei pali energetici.

Inizialmente, prima che fossero applicati carichi, si sono instaurate delle sollecitazioni dovute alla maturazione e sviluppo del calore del calcestruzzo, successivamente, con la riduzione della temperatura interna e una conseguente contrazione del materiale, il carico alla base si è ridotto ma si sono mobilitati sforzi di attrito lungo la superficie laterale. Osservando in seguito i dati sul lungo pe-

riodo, senza contare i carichi dovuti alla struttura, si è constatato che le fluttuazioni delle temperature del terreno e il funzionamento corretto del sistema geotermico non influiscono sulla resistenza della struttura (Figura 1.38), ma sono comunque considerazioni che occorre tenere presente nel momento della progettazione.

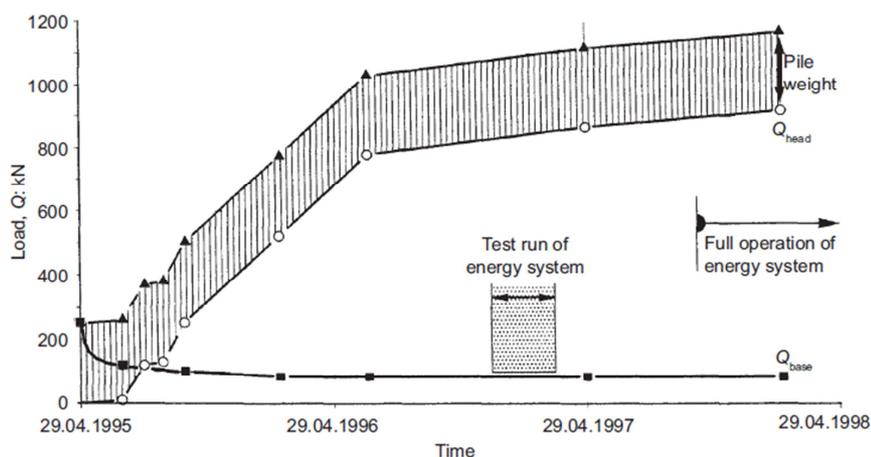


Figura 1.38: andamento dei carichi alla base e in testa del palo energetico (Brandl H. 2013)



Figura 1.39: particolare del muro di contenimento e dello scavo (Suckling T. P. et al. 2002)

In Inghilterra il primo progetto che ha utilizzato come fondazioni dei pali energetici è iniziato nel 2001. L'edificio in questione è il Keble College dell'università a Oxford. La struttura si distribuisce su 6 piani di cui uno interrato che si attesta alla profondità di 7 m rispetto al piano terra (Figura 1.39). La stratigrafia del terreno fa riferimento a uno strato più superficiale di terreno (3 m) al di sotto del quale si trova 1 m di argilla compatta, 3/5 m di deposito alluvionale mediamente denso, caratterizzato nei primi cm dalla presenza della falda e, e più in profondità lo strato di argilla molto dura di Oxford (bedrock). Dalla Figura 1.40 si osserva la disposizione dei muri di contenimento (perimetrali), per lo scavo del piano interrato, costruiti con la tecnica dei pali secanti, sono formati da 115 pali primari ($D = 0.60$ m e $l = 15$ m) disposti a intervallo regolare e 108 pali secondari ($D = 0.75/0.60$ m e $l = 15/12$ m in base alle caratteristiche del terreno). Al centro, per resistere al carico dell'edificio, sono stati disposti 61 pali di fondazione ($D = 0.45$ m e $l = 12$ m).

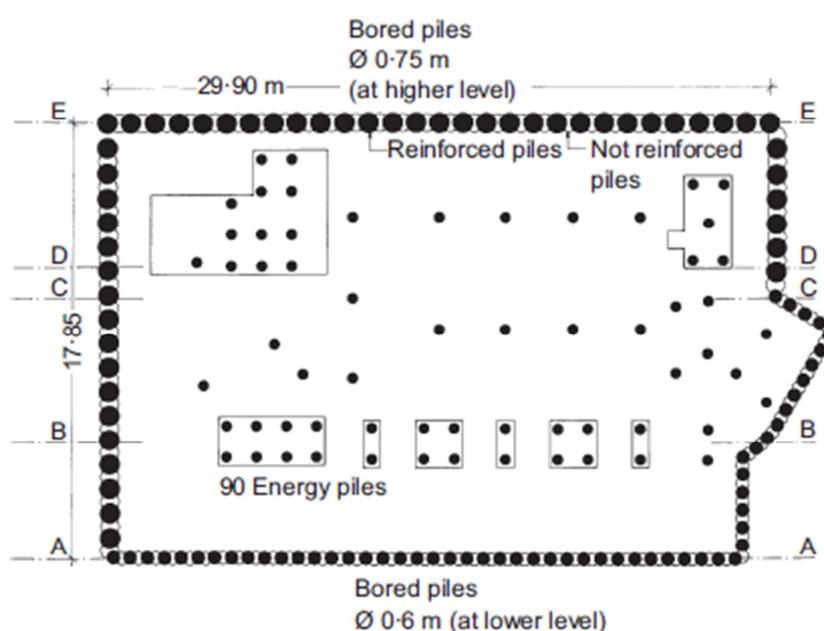


Figura 1.40: disposizione pali energetici Keble College, Oxford (Suckling T. P. et al. 2002)

Tutti i pali sono attivati termicamente con 5200 m complessivi di tubi scambiatori riuscendo così a soddisfare la domanda di energia per la climatizzazione dell'edificio, sia in estate (65 kW) che in inverno (85 kW).

In Giappone i costi per gli scavi atti all'installazione di GSHP sono eccessivamente alti per rendere questo tipo di produzione di energia competitivo rispetto alle altre fonti alternative esistenti. Ad esempio negli Stati Uniti il costo è approssimativamente di US\$ 30/m mentre in Giappone si arriva anche a US\$ 100/m, motivo per il quale anche nell'isola nipponica si stanno aprendo campi sperimentali per sfruttare le fondazioni degli edifici per la loro climatizzazione. Un esempio tra questi è il campo sperimentale costruito presso l'Università di Chiba a est di Tokyo, rappresentato schematicamente in Figura 1.41. La temperatura media annuale dell'aria a Chiba si attesta a 15.4 °C con 26.4 °C di media in agosto e 5.4 °C a gennaio, per cui l'impianto è stato ideato per funzionare sia in inverno che in estate, avendo la necessità di climatizzare gli ambienti tutto l'anno.

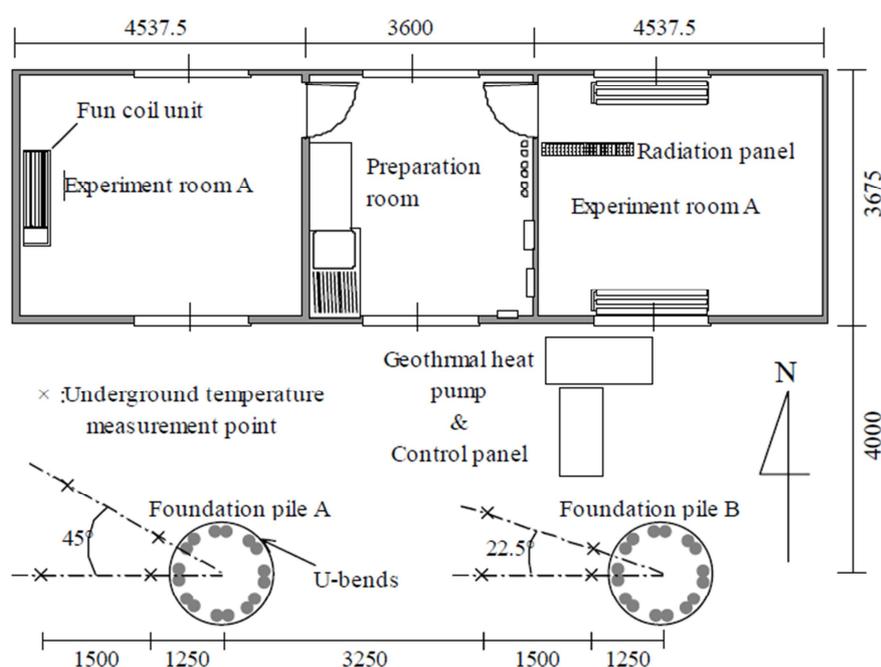


Figura 1.41: schema campo sperimentale all'Università di Chiba, Giappone (Ooka R. 2007)

L'oggetto della sperimentazione sono stati 2 pali di fondazione ($D = 1.5$ e $l = 20$ m) attivati termicamente con 8 loop indipendenti di tubi in polietilene con diametro esterno di circa 34 mm ad alto grado molecolare. Ogni loop è chiuso attraverso una valvola e un manometro, rendendo possibili più misurazioni di

versificate e controllando quali sezioni dell'impianto attivare. L'impianto è stato fissato all'armatura della struttura con alcuni rinforzi rigidi ma in questo caso i tubi scambiatori sono stati ancorati all'esterno dell'armatura del palo di fondazione (per diminuire la distanza tra elemento scambiatore e terreno) (Figura 1.42).

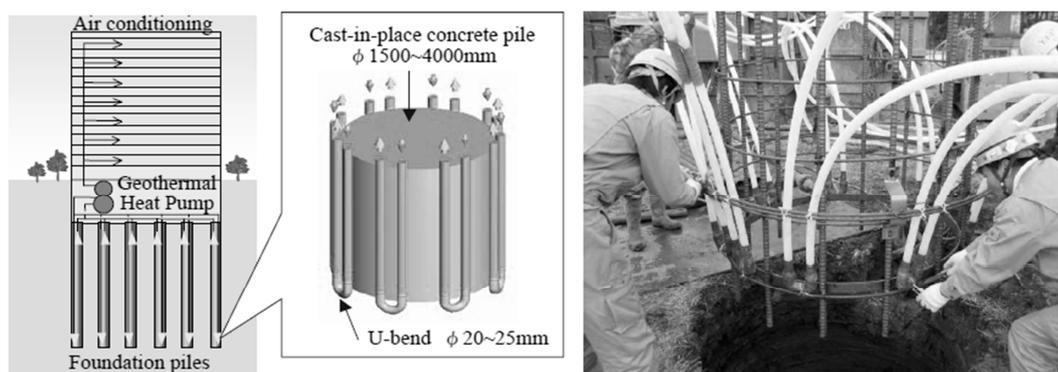


Figura 1.42: disposizione tubi scambiatori attorno ai pali di fondazione all'Università di Chiba, Giappone (Ooka R. 2007)

La pompa di calore utilizzata è un sistema acqua-acqua con un compressore alternativo che sviluppa 4.6 kW per il raffreddamento e 5.7 kW per il riscaldamento. Mentre il circuito secondario è diviso in due stanze, la prima vede installato un ventilconvettore mentre la seconda è climatizzata con un pannello radiante a pavimento. Sono stati confrontati le temperature dell'aria, dall'acqua di falda e degli ambienti climatizzati ed è stato misurato il calore estratto durante la stagione invernale e quello stoccato durante la stagione calda. In conclusione sono stati calcolati i COP dell'impianto nel caso in cui sia usata come fonte di calore l'acqua di falda o l'aria (Figura 1.43) e si è osservato come la GSHP sia più efficiente di una pompa di calore ad aria (Ooka R. 2007).

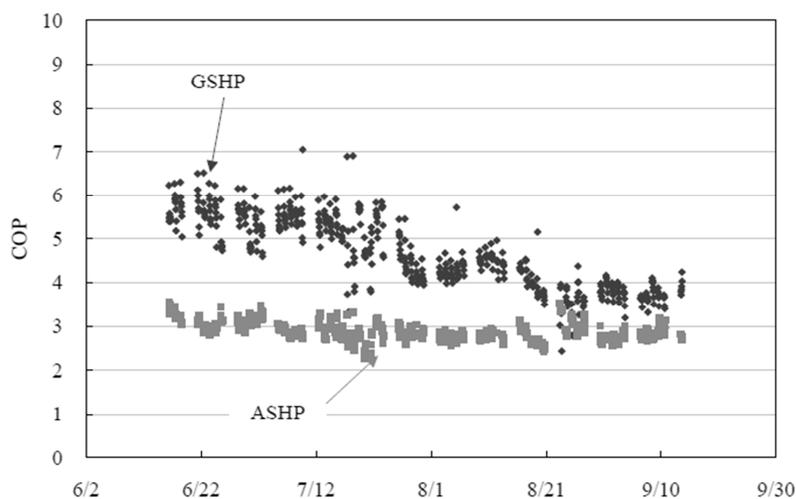


Figura 1.43: confronto COP di GSHP e ASHP a Chiba, Giappone (Ooka R. 2007)

Sebbene gli USA sono tra i principali produttori di energia geotermica al mondo e si stia diffondendo l'utilizzo di fondazioni energetiche, rispetto l'Europa in America l'utilizzo di geostrutture termoattive è molto limitata. L'unico caso ben documentato riguarda la costruzione di un hotel a Geneva, New York (Henderson H. I. et al. 1999).

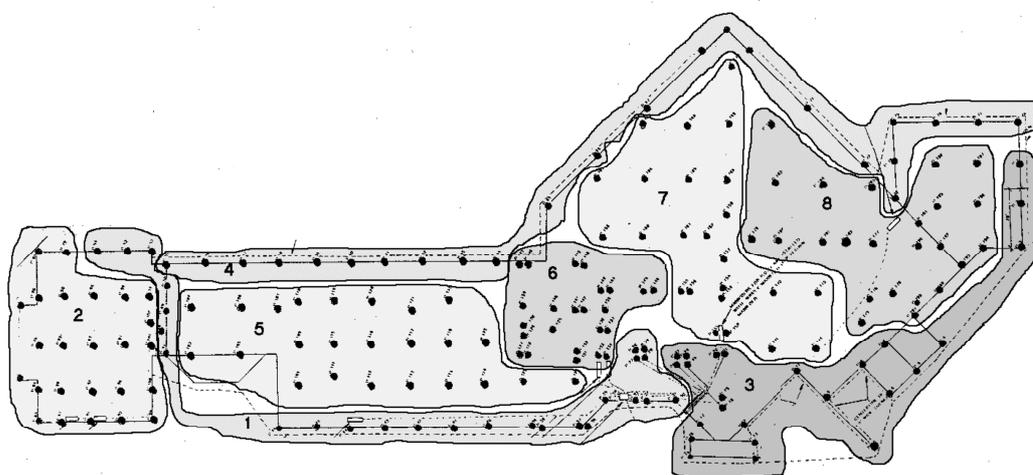


Figura 1.44: disposizione dei pali energetici al di sotto dell'hotel a Geneva, New York (Henderson H. I. et al. 1999)

Le fondazioni della struttura, che comprende 149 camere per gli ospiti, sono formate da 198 pali energetici profondi 26 m (Figura 1.44). L'impianto della geostruttura però è combinato con un altro sistema per l'estrazione di energia:

al di sotto del parcheggio antistante l'hotel sono state installate fino a raggiungere 42 m di profondità 120 sonde a pozzo profondo. Le misure e le analisi successive hanno messo in luce come il sistema geotermico della fondazione fosse più efficiente rispetto agli scambiatori di calore dei pozzi profondi, effetto benefico dovuto all'azione schermante dell'edificio che impedisce scambi di calore tra aria e terreno.

1.3.1.2. Diaframmi energetici

I principi su cui si basano le paratie le travi o platee di fondazione attivate termicamente sono le medesime utilizzate per la progettazione dei pali energetici. In fase di progettazione occorre studiare le proprietà del terreno, il gradiente idraulico della falda, l'effettiva possibilità e capacità di estrazione dell'impianto, la destinazione d'uso del calore e la richiesta di energia da parte degli edifici da climatizzare; nella fase di costruzione invece occorre scegliere le tecniche di installazione più consone alla situazione, preservare l'integrità dell'impianto dei tubi scambiatori, testare i sistemi geotermici attraverso strumenti di misurazione specifici per confrontarli con i risultati di simulazioni numeriche, ottimizzare il sistema stesso, controllare la manutenzione e fornire dati per la ricerca.

Di nuovo, uno dei primi casi in cui sono stati applicati questi impianti innovativi è rappresentato dalla Metro Line di Vienna (Austria) in particolare l'estensione chiamata U2. Costruita in più fasi, la nuova tratta collega la stazione di Schottenring con l'ex aeroporto nel distretto di Aspern ha creato l'opportunità di applicare questo impianto geotermico che si estende per quattro stazioni: U2/1 Schottenring, U2/2 Taborstraße, U2/3 Praterstern e U2/4 Meße (Figura 1.45).

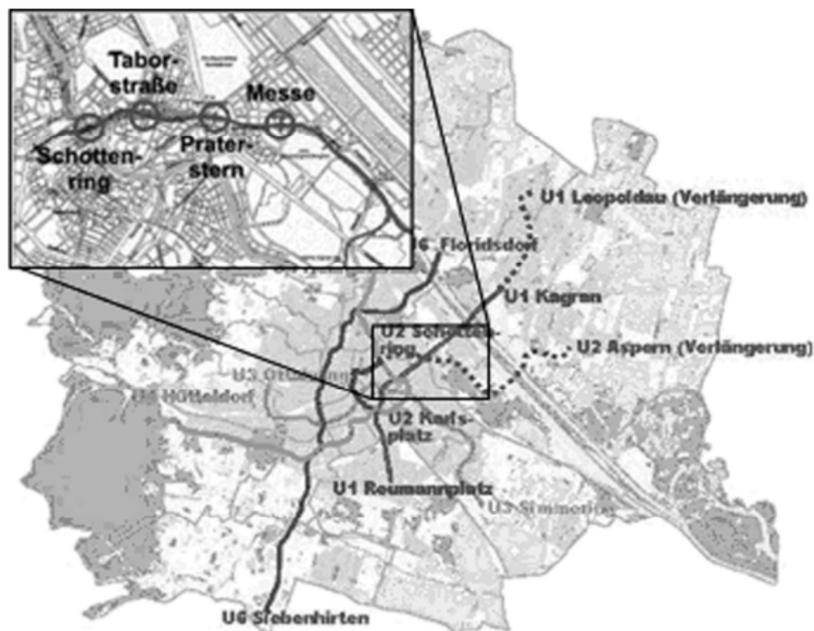


Figura 1.45: rappresentazione dell'estensione del tratto U2 metro line, il riquadro riporta la collocazione degli impianti geotermici (Adam D. et al. 2009)

I tubi per la trasmissione del calore in questo caso sono fissati ai rinforzi dei diaframmi, dei pali, delle travi di fondazione (Figura 1.46) e dell'arco rovescio del tunnel; connessi poi a una pompa di calore invertibile è possibile regolare le temperature per l'estrazione dell'energia geotermica.



Figura 1.46: trave di fondazione della stazione U2/4 Meße strumentata con i tubi scambiatori (Adam D. et al. 2009)

Questo progetto rappresenta la prima applicazione nel mondo su scala reale della tecnologia termoattiva nelle metropolitane. Per questo motivo vennero installati sistemi di misurazione e monitoraggio completi anche per l'ottimizzazione e la garanzia della qualità per il controllo della manutenzione e per ulteriori ricerche.

Le stazioni sono state costruite con il metodo cut-and-cover. Di conseguenza, i tubi di assorbimento si trovano nelle pareti del diaframma, nelle lastre di fondo e tra il rivestimento primario e secondario dei tunnel nelle stazioni. Il programma di misurazione standard comprende sensori di temperatura installati nelle pareti del diaframma, nei tubi della galleria e 5,0 m sotto le lastre inferiori. Oltre a questa apparecchiatura standard, sono stati installati diversi dispositivi di misurazione per studiare l'influenza termica sulle deformazioni della struttura sotterranea, e in particolare dei pannelli del diaframma.

La prima stazione è stata U2/2-Taborstraße. Gli ambienti soffrivano di un surriscaldamento naturale durante tutto l'anno. Pertanto è stato progettato un sistema di raffreddamento geotermico con uno sviluppo superficiale di 1865 m² attraverso diaframmi e 1640 m² con l'arco rovescio della galleria in prossimità della stazione, permettendo lo stoccaggio del calore in eccesso nel terreno. Si è osservato che questo sistema di raffreddamento arriva alla capacità massima di 81 kW. In Figura 1.47 è riportata una sezione della stazione e sono indicati i diaframmi energetici e tra questi quelli strumentati per la raccolta di dati. Il pannello di misurazione è dotato di:

- 21 estensimetri per registrare tensioni e pressioni di compressione e temperatura lungo la zona anteriore e posteriore del diaframma sui punti di supporto e nel mezzo tra loro;
- estensimetri a catena costituiti da sette segmenti per misurare le deformazioni longitudinali tra i singoli punti di supporto e sotto la lastra inferiore, fino alla punta dei diaframmi della parete del diaframma;

- sensori di temperatura per misurare la temperatura su entrambi i lati della parete del diaframma;
- sensori di temperatura per monitorare le temperature di afflusso e di ritorno di entrambi i circuiti dell'assorbitore.

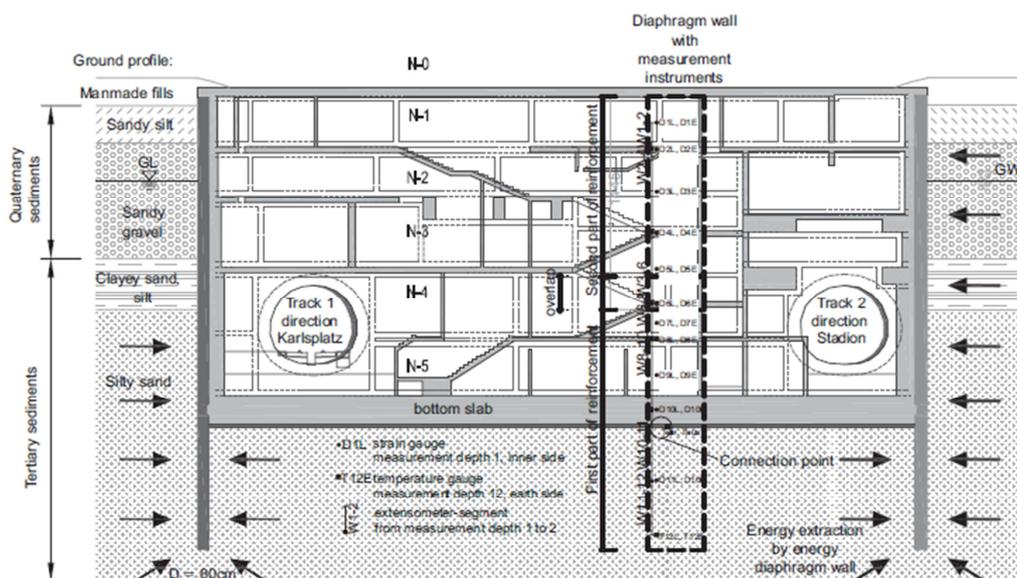


Figura 1.47: sezione della stazione U2/2-Taborstraße con indicati gli strumenti di misurazione (Adam D. et al. 2009)

Studi di fattibilità prima e misurazioni sul campo dopo hanno rivelato che l'estrazione/stoccaggio di energia geotermica ha un'influenza molto limitata sul terreno vicino agli elementi assorbenti e che i sistemi di assorbimento geotermico per il raffreddamento e il riscaldamento di stazioni e linee metropolitane rappresentano un'innovazione non solo rispettosa dell'ambiente ma anche altamente economica.

Il secondo caso si riferisce al centro artistico di Bregenz, in Austria. L'edificio ha un volume strutturale di 28 000 m³ e un'area di 33 500 m². La costruzione richiedeva una profondità delle fondazioni pari a 11 m. Gli elementi di fondazione comprendono muri perimetrali con spessore tra 0,5 m e 1,2 m intorno allo scavo e pannelli di diaframma (barrets piles) e pali di 1,2 m di diametro. La profondità del muro arriva fino a 28 m mentre i pali variano tra 17 m e 25 m (Figura 1.48).

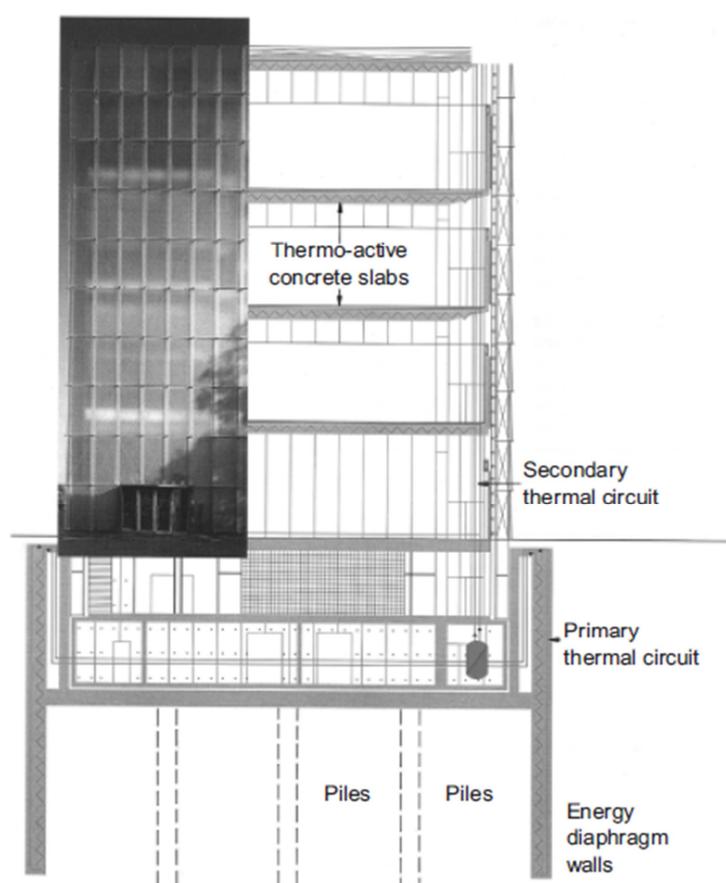


Figura 1.48: sezione della struttura dell'Art Center di Bregenz, Austria (Brandl H. 2006)

L'energia termica per il condizionamento viene estratta dal sistema di assorbimento integrato nel calcestruzzo delle pareti del diaframma. In totale sono stati installati 24000 m di tubi in PE divisi in 249, collegati ai circuiti di flusso e di ritorno posti attorno all'edificio accanto ai diaframmi. Le unità di assorbimento sono state disposte ad anello all'interno delle gabbie di rinforzo dei diaframmi e poi sono state inserite nelle trincee prima di gettare il calcestruzzo. Durante la fase di costruzione, le unità di assorbimento sono state pressurizzate a 8 bar e monitorate, in modo da poter rilevare immediatamente eventuali guasti ai tubi. L'impianto fornisce una capacità massima di 120 kW. Il circuito secondario all'interno dell'edificio comprende circa 30000 m di tubazioni posizionate nei pavimenti e nelle pareti. Il circuito secondario in questa struttura ha una duplice funzione, oltre alla climatizzazione dell'edificio permette anche di trasferire il calore delle radiazioni solari al circuito primario e quindi al terreno, questo per-

ché nelle sale delle mostre occorre un controllo igrometrico e delle temperature ottimale. È stato valutato che con l'installazione dell'impianto geotermico e l'utilizzo di questo per la riscaldamento e il raffreddamento dell'edificio ha portato a vantaggi economici considerevoli oltre ovviamente a quelli ambientali. Il risparmio sui costi di investimento è stato di € 1.32 milioni e il risparmio annuale in termini di costi energetici e operativi è pari a € 22700 rispetto a un sistema di condizionamento d'aria convenzionale.



Figura 1.49: Uniqa Tower a Vienna, Austria (Brandl H. 2006)

Un altro esempio è quello rappresentato dalla torre Uniqa (Figura 1.49), situata nel centro di Vienna. Costruito per ospitare la sede dell'omonima azienda è fondata su diaframmi profondi 35 m. Si è osservato che le condizioni idriche e geologiche a tale profondità sono la condizione ideale per l'estrazione dell'energia geotermica. Complessivamente la superficie della geostruttura energetica attraverso la quale avviene lo scambio di calore con il terreno è di 7800 m² riuscendo ricavare 420 kW per il riscaldamento e 240 kW per il raffreddamento (Bouazza A. et al. 2012)

Anche altri paesi stanno sviluppando le tecnologie adatte per sfruttare le fonti di energia geotermica superficiale; ne è un esempio la Croazia. Qui ci sono 28 siti di cui 18 sono in uso per l'estrazione dell'energia geotermica, ma si tratta soprattutto di fonti ad alta entalpia o comunque di impianti geotermici verticali. Non sono ancora state costruite delle geostrutture energetiche geotecniche ma nel 2010 è stato fondato il Centre for Geothermal Research all'università di Zagabria nel dipartimento di Ingegneria Civile. Questo ha dato un nuovo impulso alla ricerca per mettersi in linea con il resto dell'Europa e trovare nuove soluzioni che combinino le funzioni strutturali e le richieste energetiche delle costruzioni. Sono stati così proposti i primi progetti piloti per studiare la fattibilità e l'efficienza di eventuali geostrutture energetiche, tra questi vi è il progetto dell'estensione della scuola elementare di Ksaver Šandor Gjalski a Zagabria. L'espansione prevede la costruzione di un muro di ritenuta lungo 150 m formato da pali energetici alti 20 m, di questi viene attivato termicamente un palo ogni 5 m. Dalle analisi degli impianti verticali esistenti e dall'esperienza maturata, si ipotizza che in Zagabria l'efficienza energetica di un impianto simile possa raggiungere 50 - 60 W per m² ma con altre soluzioni impiantistiche in cui si aumenta la superficie atta allo scambio termico si è calcolato che si possa anche triplicare la produzione di energia (Kovačević M. S. et al. 2012).

1.3.1.3. Ancoraggi energetici

Oltre agli elementi descritti precedentemente all'università di Vienna si è valutato (Oberhauser A. 2006) la possibilità di inserire i tubi scambiatori anche negli ancoraggi per il sostegno dei muri di ritenuta, i diaframmi durante gli scavi profondi o le strutture dei tunnel ecc. Sono stati svolti esperimenti in laboratorio e in campi sperimentali in scala reale, inoltre le analisi numeriche hanno dimostrato l'utilità degli ancoraggi come ulteriori elementi per l'assorbimento di energia geotermica.

Un primo esempio di applicazione di questi tipi di ancoraggio e una valutazione del loro potenziale energetico è stato seguito da Mimouni, Dupray e Laloui (2014), studiando il progetto del Lainzer tunnel a Vienna con analisi basate su metodi di calcolo agli elementi finiti. Si trattava di ancoraggi bullonati autofilettanti il cui foro era dotato di sonde geotermiche coassiali la cui parte esterna fungeva da bullone; il concetto potrebbe essere esteso ad altri tipi di ancoraggio come quelli iniettati o quelli a trefolo verificando che ci sia spazio a sufficienza per l'installazione dei tubi scambiatori. In particolar modo il primo tipo di ancoraggio è più adatto all'installazione delle sonde geotermiche poiché le prestazioni strutturali sono poco sensibili al diametro effettivo del foro, nel secondo caso gli ancoraggi meccanici o in resina sono formati da barre rinforzate sigillate nella parte finale per cui le dimensioni del foro devono essere adeguate alle necessità strutturali. Come le pompe di calore anche gli ancoraggi possono essere attivi termicamente lungo tutto l'arco dell'anno: nella stagione invernale per assorbire calore dal terreno e nella stagione estiva per cederne.

La geometria del problema in analisi riguarda un tunnel costruito con la tecnica cut-and-cover. Gli ancoraggi hanno un ruolo strutturale solamente durante la fase di costruzione: sono utilizzati per mantenere i diaframmi che costituiscono i muri della galleria prima del rinterro. Il progetto comprende 4 ancoraggi per ogni muro disposti con un grado di inclinazione di 20° sotto e una spaziatura longitudinale di 3 m (Figura 1.50) arrivando a 53 m di ancoraggio per ogni metro di tunnel.

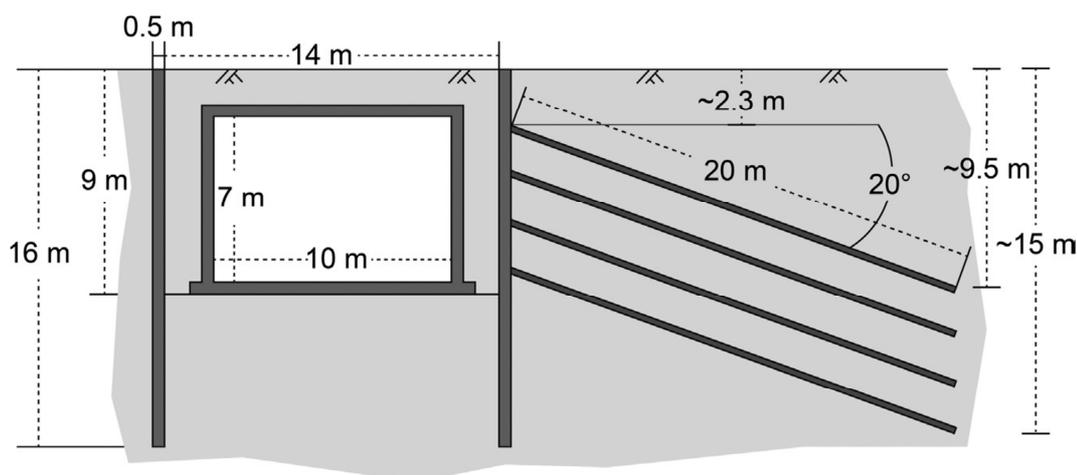


Figura 1.50: sezione trasversale con ancoraggi, Lianzer tunnel (Mimouni T. 2014)

In questo particolare studio è stata seguita un'analisi agli elementi finiti accoppiando il comportamento idraulico e termico senza investigare gli aspetti meccanici. È stato considerato infatti che l'azione di tamponamento del riempimento riduce ulteriormente l'interazione tra galleria e terreno ed essendo una galleria superficiale, l'espansione termica del terreno indotta dalle variazioni di temperatura non comporta significativi cambiamenti negli sforzi agenti sulla galleria, inoltre l'attivazione termica degli ancoraggi avviene solamente dopo il completamento della galleria quando questi non hanno più una funzione strutturale.

I risultati sono poi stati confrontati con i valori medi di estrazione di calore per i pali di fondazioni dettati dall'esperienza e dalla letteratura. In particolare la Società degli Ingegneri e Architetti ha fornito alcuni dati sulla potenza estraibile con ordini di grandezza che vanno da 25 a 50 W/m corrispondenti a 50/100 kWh all'anno per m di pila (Anstett et al. 2005). I risultati dello studio sugli ancoraggi energetici hanno portato a valori di 4 W/m, molto inferiori alle fondazioni energetiche ma devono essere confrontati considerando i valori di diametro della struttura: gli ancoraggi presentano diametri tra 100 mm e 200 mm mentre i pali di fondazione possono arrivare anche a 1000 mm. Inoltre va considerata la distanza quindi l'influenza tra un elemento e l'altro, l'intervallo tra un ancoraggio si aggira intorno a 1/3 m mentre i pali di fondazioni sono sepa-

rati gli uni dagli altri con distanze pari a 3 volte il loro diametro diminuendo in modo considerevole l'interazione termica. Tuttavia si è constatato il fatto che nel confrontare la capacità di estrazione degli ancoraggi occorrerebbe tenere in considerazione anche il volume di terreno coinvolto.

Facendo riferimento ai due esempi di fondazione energetica per l'aeroporto Dock Midfeld di Zurigo (Laloui. et al. 2006) e il complesso scolastico "Vers-l'Eglise" a Valais (Anstett et al. 2005), nel primo caso la porzione di terreno interessata per l'estrazione di calore è pari a 660 000 m³. La lunghezza della galleria, con la stessa configurazione dello studio di Mimouni T. et al., necessaria per produrre la stessa potenza corrisponde a 3 km interessando 672000 m³ di terreno. Nel secondo caso il terreno condizionato dall'estrazione energetica è pari a 30 000 m³ pari a 214 m di tunnel corrispondenti a 48 000 m³ di terreno interessato. Si osserva quindi come anche con capacità ridotte di estrazione gli ancoraggi influenzino una porzione di terreno confrontabile con quella dei pali di fondazione ma distribuito su distanze maggiori comprendendo un'area di un'eventuale utenza maggiore riducendo i costi e perdite nel trasporto del calore.

In generale i risultati fanno capire come le capacità di estrazione di energia dipendano dal contenuto d'acqua, dalla permeabilità del terreno e dalle proprietà termiche del terreno (conducibilità λ e calore specifico c_s) ma anche dai cicli termici di scambio imposti all'impianto. Le capacità di estrazione al variare di tali parametri e condizioni varia tra 0.4 GWh e 0.8 GWh all'anno per un tratto di 1 km di galleria corrispondenti a 53,33 m. In particolare si sono studiati il caso di un terreno non permeabile e quello di uno poco permeabile modellati rispettivamente con materiale argilloso e limoso. Le proprietà utilizzate per descrivere i due terreni sono rappresentate nella Tabella 1.8.

Property		S _{psoil}	N _{psoil}
Grain thermal conductivity, λ	W/m/K	3.43	2.42
Grain specific heat capacity, c_s	J/kg/K	419	732
Grain density, ρ_s	kg/m ³	2700	2700
Porosity, n	-	0.45	0.55
Permeability, k	m ²	10–13	10–15
Air entry value, Π	kPa	50	500
Maximum degree of saturation, S_{max}	-	1	1
Residual degree of saturation, S_{res}	-	0.05	0.1
van Genuchten exponent, m	-	lug-17	1/3

Tabella 1.8: proprietà termiche terreni non permeabili e poco permeabili (Dickson M. H. 2004)

Le proprietà termiche del terreno sono molto influenzate dall'oscillazione della falda, riducendo l'efficienza energetica anche del 20% se la falda si abbassa (Mimouni T. et al. 2005). Ma in condizioni sature senza un ciclo stagionale di ricarica della falda, i terreni poco permeabili permettono una produzione di calore maggiore (9,63 kWh all'anno per metro di ancoraggio) rispetto a quelli impermeabili (7.41 kWh/m). Osservando invece le analisi con le ipotesi di uno stoccaggio termico durante la fase estiva si osserva che il terreno impermeabile permetta un recupero del calore all'85% molto maggiore rispetto al terreno limoso con il quale si raggiunge solamente il 50%.

1.4. Gallerie energetiche

Rispetto alle strutture geotecniche di fondazione, le gallerie presentano una maggior area di contatto con il terreno per cui la quantità di energia geotermica estratta è significativamente maggiore. Motivo per il quale negli ultimi anni si stanno sviluppando nuove tecniche per attivare termicamente anche le gallerie. In generale, come negli impianti delle fondazioni energetiche, il calore può essere utilizzato per il riscaldamento e/o il raffreddamento di stazioni ferroviarie, edifici amministrativi e residenziali e per mantenere piattaforme, ponti, strade ecc. liberi dal ghiaccio nella stagione invernale. Per permettere questa duplice funzionalità occorre una temperatura del terreno il più costante possibile durante l'arco dell'anno, condizione che è più probabile ottenere nelle gallerie profonde, ad esempio quelle di montagna, ma che è meno sfruttabile nel caso si voglia utilizzare la risorsa per climatizzare altri edifici. Tra le gallerie è possibile una distinzione in base alla temperatura interna. Nelle gallerie fredde (circa 15 °C) il passaggio di treni o altri veicoli comporta effetti limitati sulle temperature del terreno circostante. Al contrario le gallerie calde presentano delle temperature più elevate, ad esempio le gallerie metropolitane possono raggiungere i 30 °C o casi più estremi come le gallerie di montagna in cui si arriva anche a 45 °C. L'attivazione termica della galleria presenta due possibili sistemi di applicazione. Oltre alla climatizzazione come nei sistemi geotermici classici, il rivestimento energetico può essere utilizzato per raffreddare le gallerie "calde" e ridurre i costi legati alla realizzazione degli impianti di ventilazione.

Le soluzioni, ormai collaudate o ancora in via sperimentale non dipendono solamente dalle caratteristiche idro-termiche e geotecniche del terreno ma anche dalla tecnica di scavo che si usa per la costruzione della galleria. (Adam D. et al. 2009 e Barla M. et al. 2016)

La prima applicazione degli scambiatori di calore nelle gallerie è stata impiegata presso il tunnel Lainzer (Vienna). La galleria Lainzer è stata costruita in diverse sezioni con metodi differenti. Per ottimizzare la progettazione energetica

del tunnel e per scopi di ricerca, sono stati realizzati i seguenti progetti geotermici.

La costruzione della sezione LT24 (Figura 1.51), Hadersdorf-Weidlingau, è stata selezionata come impianto di prova, per esaminare sia gli aspetti tecnici che quelli economici.

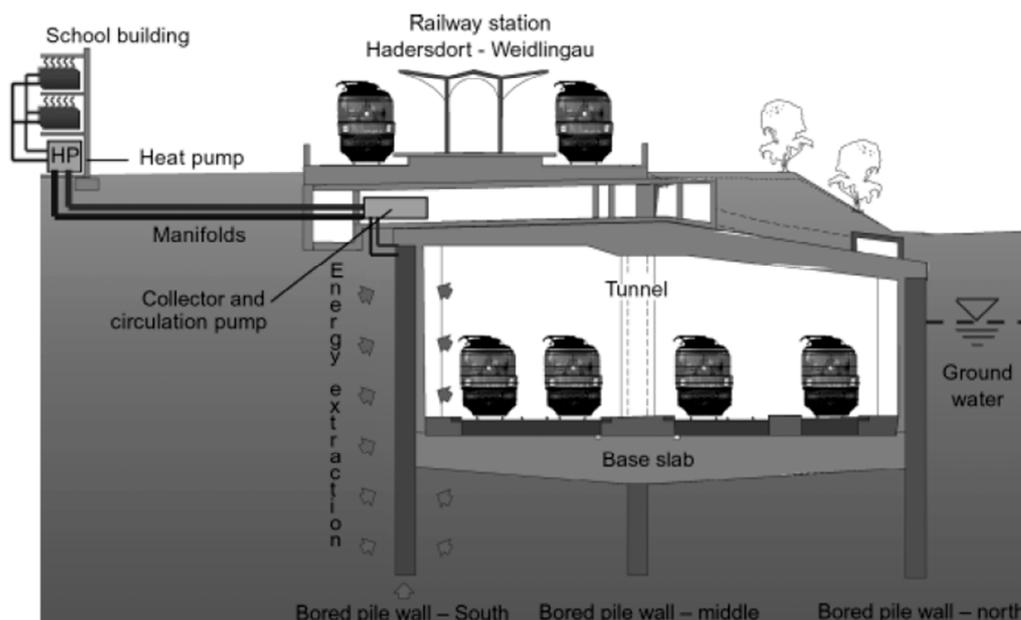


Figura 1.51: rappresentazione schematica di una sezione generica del tratto sperimentale LT24, Lainzer tunnel (Brandl H. 2006)

Il nuovo tratto è stato scavato con la tecnica cut-and-cover e il sistema di geoscalatori è stato inserito nei pali trivellati che formano le paratie laterali per il sostegno della copertura. L'impianto comprende 59 pali energetici da 1,2 m di diametro con una lunghezza media pari a 17,1 m i quali sono intervallati a pali di medesime dimensioni costruiti con la tecnica del jet-grouting con la sola funzione portante. Collegato a 6 pompe di calore, l'impianto provvede a fornire l'energia necessaria per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio scolastico costruito nella zona limitrofa. Le sperimentazioni dell'impianto sono iniziate nel febbraio del 2004. I dati sono stati fin dall'inizio soddisfacenti. L'energia geotermica estratta ha rispecchiato i valori di performance massimi predetti e a partire già dall'autunno dello stesso anno l'impianto è stato capace

di rispondere al fabbisogno energetico della struttura a cui era collegato (Figura 1.52). Come criterio per la regolazione del sistema energetico è stata utilizzata la temperatura dell'aria esterna ed si è verificato che fino a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ la scuola può essere completamente riscaldata con energia proveniente dalle fonti geotermiche, per temperature inferiori viene aggiunto l'apporto termico di una caldaia a gas.

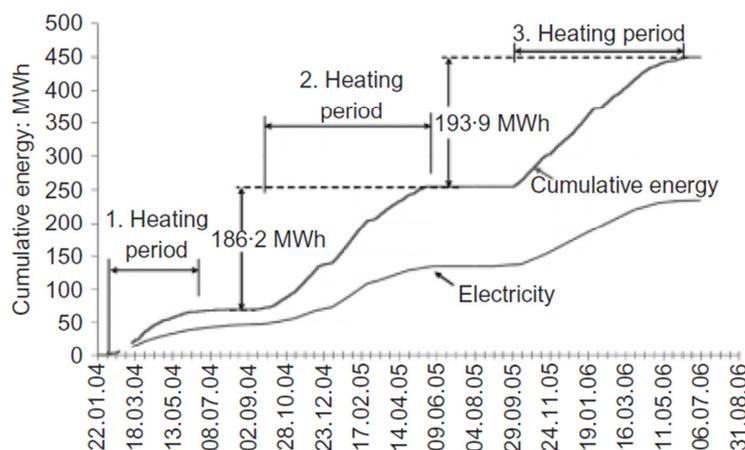


Figura 1.52: andamenti dell'energia estratta e consumo di elettricità dell'impianto sperimentale LT24 (Adam D. et al. 2009)

I pali energetici sono dotati di serpentine collegate, attraverso tubi secondari, ad alcuni collettori che si trovano in un punto centrale del tunnel.

Dai calcoli preliminari è stata prevista una potenza termica estraibile di circa 150 kW a lungo termine e una produzione annua di energia pari a 214 MWh. Si sono osservati successivamente i vantaggi non solo ecologici ma anche economici. L'utilizzo di questo impianto rispetto al vecchio sistema di riscaldamento a gas naturale dell'edificio scolastico ha portato a una riduzione del gas naturale di 34 000 m³ utilizzato equivalente a 30 t di CO². Inoltre il risparmio legato ai costi operativi ammonta a circa € 10000.

Questo impianto dal punto di vista delle ricerca tecnologica ha avuto una grandissima importanza. Essendo il primo esempio di galleria energetica al mondo è stato necessario raccogliere numerosi dati sulla temperatura, sulle sue oscillazioni nella galleria, nel terreno circostante e nella falda freatica, le variazioni di tensioni e eventuali spostamenti indotti dall'attivazione dell'impianto che po-

trebbero modificare la capacità portante della struttura. A tale scopo sono stati utilizzati numerosi dispositivi di misurazione. Sono stati utilizzati 18 termometri su sei pali a diversi livelli mentre un altro palo è stato strumentato con dinamometri su 5 livelli per osservare l'evoluzione delle tensioni con il variare della temperatura. Con telecamere sensibili al calore è stato possibile infine osservare in modo più evidente le differenze tra i pali attivati termicamente e quelli con la sola funzione strutturale.

Nella Figura 1.53 è stato riportato l'andamento delle temperature sopra la base del tunnel nelle zone interne ed esterne dei pali energetici e nella zona sottostante al tunnel. Si nota innanzitutto la variazione dovuto alla fase di maturazione del calcestruzzo e in seguito come le temperature crescano al crescere della domanda di energia.

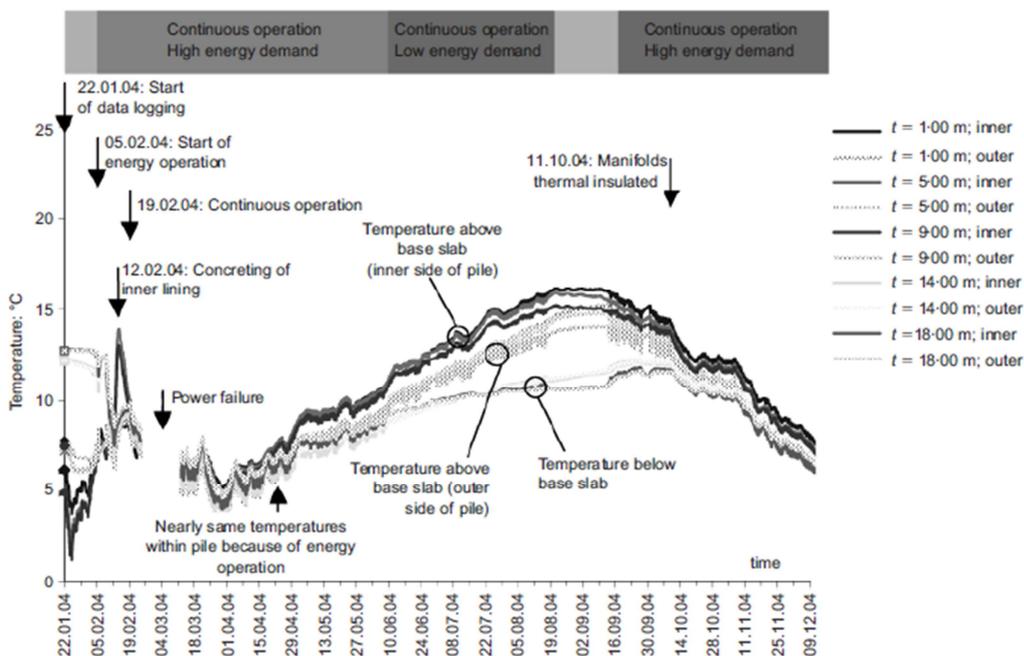


Figura 1.53: andamento temperature dei pali energetici nel tratto sperimentale LT24, Lainzer tunnel (Brandl H. 2006)

Nella Figura 1.54 invece si osservano le deformazioni misurate in momenti diversi nella zona interna, esterna e nella zona centrale del palo energetico. Per calibrare la strumentazione è stata fatta una lettura zero prima dell'asportazione del terreno nella zona limitrofa al diaframma. Dal grafico si nota come le de-

formazioni indotte dall'attivazione dell'impianto siano significativamente inferiori a quelle causate dalla spinta del terreno e come le variazioni della temperatura del tunnel stesso siano maggiori rispetto a quelle causate dall'estrazione e dallo stoccaggio del calore nei pali.

Si è notato infine come i tubi scambiatori rendano uniforme la temperatura all'interno della struttura, questo bilanciamento termico riduce di conseguenza i momenti indotti e non comporta dei carichi aggiuntivi nella struttura.

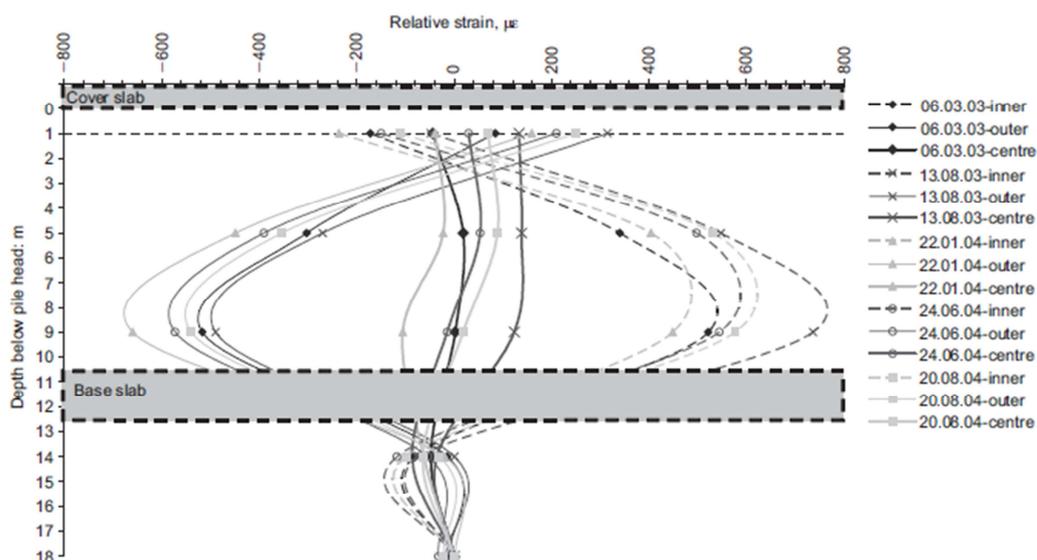


Figura 1.54: andamento deformazioni di un palo energetico nel tratto sperimentale LT24, Lainzer tunnel (Brandl H. 2006)

Concettualmente però il caso appena descritto si basa sul sistema collaudato dei tubi scambiatori fissati alle armature delle strutture di fondazione. Nel caso invece di tunnel a sezione circolare sono state sviluppate soluzioni progettuali completamente nuove (Barla M. et al. 2016, Bouazza A. et al. 2012, Pralle N. 2011). Un esempio è la sezione LT22, Bierhauslberg, che è stata scavata con la NATM e per tale sezione sono state utilizzate 2 soluzioni per l'estrazione del calore: chiodi/ancoraggi energeticamente attivi fissati nella roccia circostante e una rete di tubi scambiatori inserita tra due strati di geotessile, interposto tra il primo rivestimento e quello definitivo (Figura 1.55).



Figura 1.55: dettaglio del geotessile energetico installato nel rivestimento del tratto LT22, Lainzer Tunnel (Adam D. et al. 2009)

A Stoccarda nel 2013, in Germania, è stato messo in funzione un impianto di prova lungo la linea 6 della metropolitana di Fasanenhof. Erano due i tunnel equipaggiati con tubi assorbitori per una lunghezza di 10 m. Ogni singolo sottocircuito comprendeva circa 2200 m di tubazione attivando complessivamente 90 m² di superficie. La pompa di calore, collegata al circuito per lo scambio termico si trovava nel locale tecnico della stazione di Europaplatz ed è stata usata per testare i diversi profili di carico sia nella fase di riscaldamento che di raffreddamento. A supporto della progettazione sono stati utilizzati calcoli numerici con metodi agli elementi finiti e modelli digitali bi e tridimensionali. In seguito, dopo l'installazione, sono state condotte alcune misurazioni sulle temperature (Figura 1.56) sia dell'aria interna sia del terreno esterno alla galleria. L'obiettivo era quello di osservare l'influenza della galleria energetica sul terreno circostante e calcolare il possibile rendimento dell'impianto studiando i flussi di calore in gioco. Si è dimostrato come la costruzione del tunnel influenzi la temperatura del terreno circostante fino a 8 m di distanza, oltre questo limite le temperature ritornano a valori indisturbati del terreno naturale di 12 °C (arenaria e scisto a Fasanenhof).

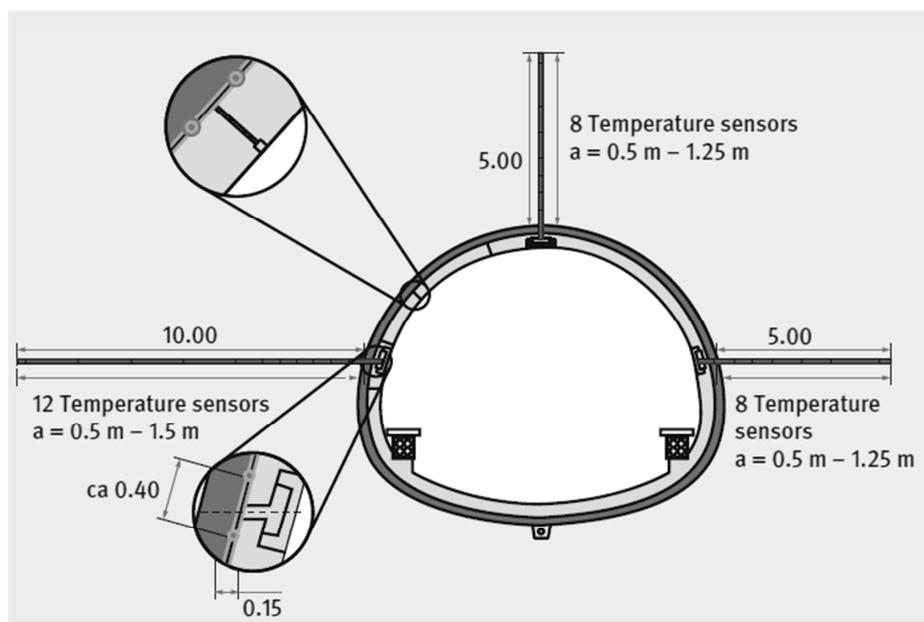


Figura 1.56: dettaglio della sezione con misuratori di temperatura nella linea 6, tunnel di Fasanenhof (Geimer C. et al. 2013)

Inoltre è stato osservato che la temperatura dell'aria interna e le sue variazioni più veloci rispetto a quelle del terreno hanno un impatto significativo sul funzionamento dell'impianto. In particolare, è necessario osservare due condizioni operative critiche: quando l'aria del tunnel si riscalda la temperatura può scendere al di sotto della temperatura di alimentazione; al contrario durante il raffreddamento può aumentare oltre la temperatura di mandata. Ciò riduce considerevolmente la produzione dell'impianto geotermico e il flusso di volume deve essere aumentato per poter estrarre l'energia richiesta. Anche la presenza della falda modifica le prestazioni dell'impianto: il flusso di acque sotterranee aumenta l'efficienza dell'impianto permettendo una ricarica naturale di energia nel terreno. Con le diverse sperimentazioni infine si è stimato che a seconda del periodo dell'anno la potenza termica oscilla intorno a valori tra 5 e 37 W/m².

Anche in Italia sono presenti esempi di gallerie energetiche. Il primo riguarda il campo sperimentale lungo il nuovo tratto della metro di Torino, nel quale sono stati installati due conchi energetici per osservare il funzionamento e gli scambi termici del sistema geotermico. Un altro caso riguarda la galleria di base del Brennero. Pur rimanendo alle fasi progettuali e di verifica, è stata studiata la fat-

tibilità di impianti geotermici incorporati nei corpi delle gallerie. In particolare è stata proposta una progettazione preliminare della galleria energetica a Mules, nella provincia autonoma di Bolzano. La galleria presenta una lunghezza di circa 1780 m ed è utilizzata come accesso durante la costruzione del BBT per diventare poi successivamente l'unica via di fuga italiana, è interamente scavata nel granito di Bressanone presentando la copertura massima di 1209,6 m al km 1540. L'entrata si trova a 870 m s.l.m. e intercetta la tratto ovest della galleria del Brennero con un dislivello di 150 m (730 m s.l.m.). Lo sviluppo longitudinale è per lo più rettilineo con l'eccezione dei primi 200 m collegati all'asse di ventilazione che permette un'areazione naturale del tunnel. Come mostrato in Figura 1.57 la galleria presenta due sezioni: per la maggior parte del suo sviluppo la galleria è divisa da un setto orizzontale. In caso di incendio la parte superiore verrebbe utilizzata per convogliare fumo e fuoco verso la colonna di areazione lasciando libera la parte inferiore come via di fuga.

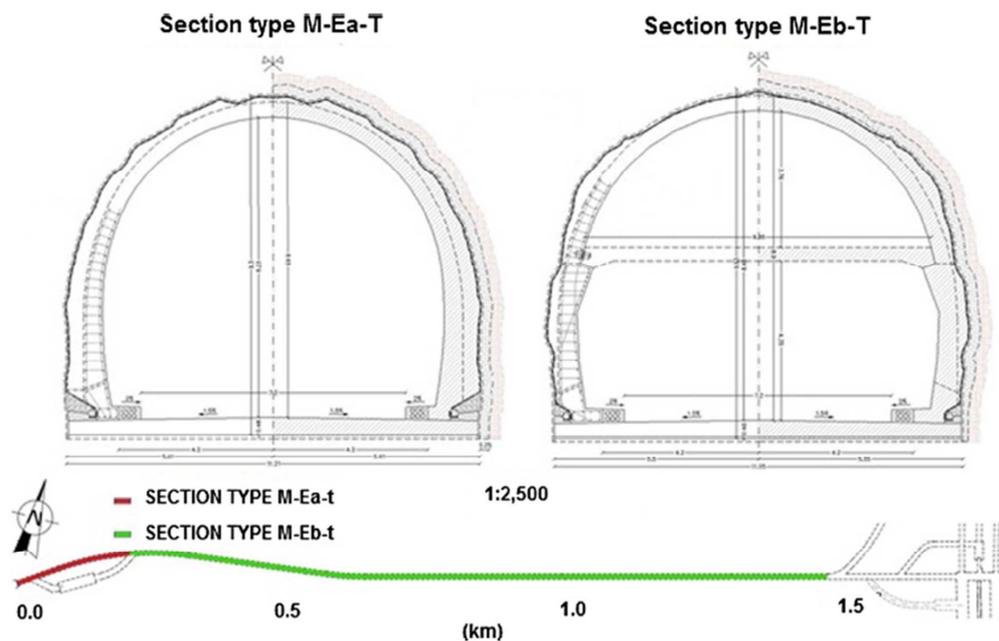


Figura 1.57: sviluppo e sezioni del tunnel di accesso al BBT a Mules (Tinti F. et al. 2017)

In generale la sezione rimane costante, caratteristica favorevole all'installazione del rivestimento geotermico e raggiunge 9,78 m e 9 m rispettivamente come larghezza e altezza massima.

Lo scavo della galleria, avvenuto con la tecnica di perforazione puntuale e l'utilizzo di esplosivi, è completato. Al momento è supportato dal rivestimento primario ma nei prossimi anni è prevista l'installazione dello strato di materiale impermeabile e del rivestimento secondario, anch'essa condizione ideale per l'installazione dell'impianto di estrazione geotermica.

L'obiettivo del progetto è quello di ricostruire l'andamento delle temperature intorno alla galleria e, considerate le specificità spaziali delle proprietà naturali della massa di rocce, il gradiente di temperatura, la variazione del flusso di acque sotterranee e i vincoli geometrici del tunnel, è stato definito l'impianto di estrazione geotermica ottimale.

Lo studio di fattibilità è iniziato raccogliendo informazioni utili dalla letteratura tecnica e dai database, misurazioni in loco e in laboratorio per definire il comportamento tridimensionale della temperatura nella massa rocciosa attorno al tunnel e nell'aria nel tunnel stesso. La stima della temperatura è stata utilizzata come condizione al contorno per la quantificazione dell'energia geotermica sfruttabile fornita dal rivestimento di energia.

Il problema principale era trovare un compromesso soddisfacente tra le configurazioni teoricamente più efficienti, i requisiti di alimentazione effettivi, l'efficienza minima richiesta, lo spazio tunnel disponibile, i costi di investimento e i tempi di installazione. In base alle simulazioni e i calcoli, la configurazione ottimale proposta corrisponde a un gruppo di 60 condotte da 330 m ciascuna, accoppiate in 6 sottogruppi, parallele al tunnel (Figura 1.58). La massima potenza termica sfruttabile è stata calcolata a circa 560 kW, con la massima temperatura di uscita all'ingresso della galleria di circa 19 °C. Il costo del sistema GHE che utilizza un rivestimento di energia è stato stimato inferiore del 73% rispetto a un sistema GHE a circuito chiuso verticale che fornisce la stessa quantità di calore. Rimane comunque un problema da risolvere: la generale assenza di potenziali utenti finali vicino all'ingresso del tunnel non permette un uso efficace di questa enorme quantità di energia termica. La possibile soluzione potrebbe es-

sere quella di distribuire calore di bassa qualità ai villaggi e agli edifici vicini attraverso una nuova rete di teleriscaldamento.

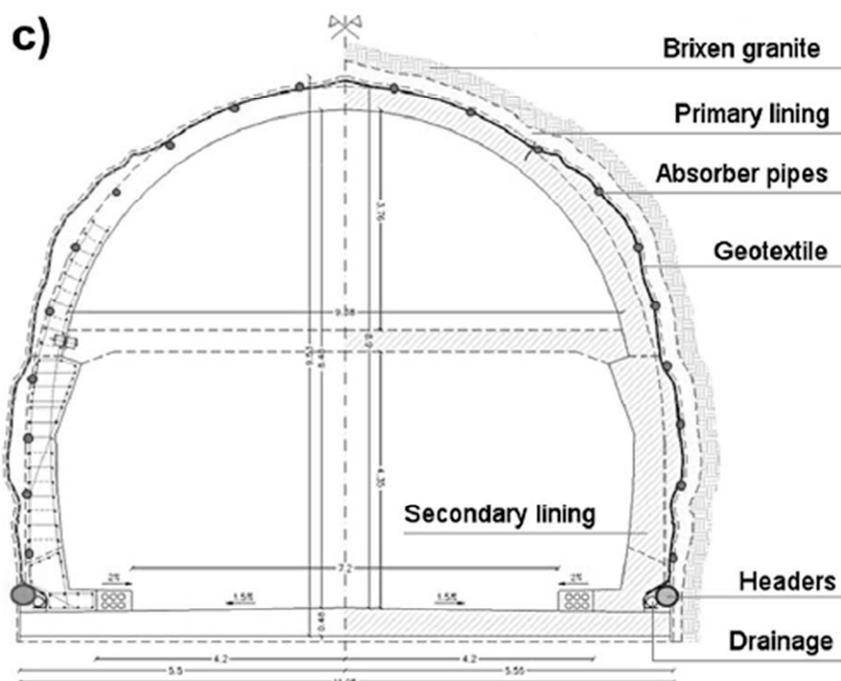


Figura 1.58: disposizione ottimale impianto di tubi scambiatori, sezione della galleria di Mules (Tinti F. et al. 2017)

1.5. Concio energetico

La realizzazione di tunnel tramite la tecnica dello scavo meccanizzato ha avuto, a partire dalla seconda metà dell'ottocento, sviluppi importantissimi, e in maniera più marcata negli ultimi trent'anni, durante i quali le frese a piene sezione, note come Tunnel Boring Machines (TBM), sono state impiegate con successo per lo scavo di rocce dure e terreni sciolti in diverse condizioni geomeccaniche, consentendo di realizzare opere in sotterraneo in condizioni ritenute impossibili qualche decennio fa.

Lo scavo meccanizzato offre numerosi vantaggi rispetto al metodo di scavo convenzionale (esplosivo, martellone, pale meccaniche ecc.) in particolar modo quando si affronta lo scavo di gallerie in terreni soffici o rocce spingenti, tipici degli ambienti urbani nei quali lo scavo ha un impatto maggiore soprattutto nei confronti delle strutture circostanti. La TBM, realizza uno scavo in continuo, applica attraverso la testa fresante, una spinta contro il fronte di scavo e una contemporanea rotazione della testa, raccoglie il materiale e lo convoglia attraverso degli adeguati sistemi di smarino (nastri trasportatori, vagoni, ecc) verso l'esterno del tunnel in zona di discarica e contemporaneamente permette l'installazione della struttura di supporto formata da anelli segmentati in diversi conci. I vantaggi che le TBM presentano riguardano la velocità e continuità realizzativa, condizione che comporta risparmi notevoli in termini di tempi e costi rispetto al sistema convenzionale, soprattutto in presenza di terre. Nella metodologia convenzionale le operazioni più pericolose, o meglio quelle più soggette al verificarsi di fenomeni di infortuni sul lavoro, sono quelle del posizionamento dei sostegni in calotta. Tutti i tipi di TBM riducono drasticamente questi rischi, da una parte perché è una metodologia di scavo che determina degli stati tensionali indotti di entità minore, dall'altra garantiscono una totale protezione da cadute dall'alto durante la messa in posa dei sostegni in calotta (Sorgia L. 2008).

Questa tecnica per la realizzazione delle gallerie rappresenta le condizioni ideali ai fini geotermici. Per sfruttare energeticamente il rivestimento in conci prefabbricati delle gallerie è possibile integrare il sistema di tubi scambiatori nei conci stessi (Tinti F. et al. 2017, Barla et al. 2016, Pralle N. et al. 2011, Frodl S. et al. 2010)(Figura 1.59).

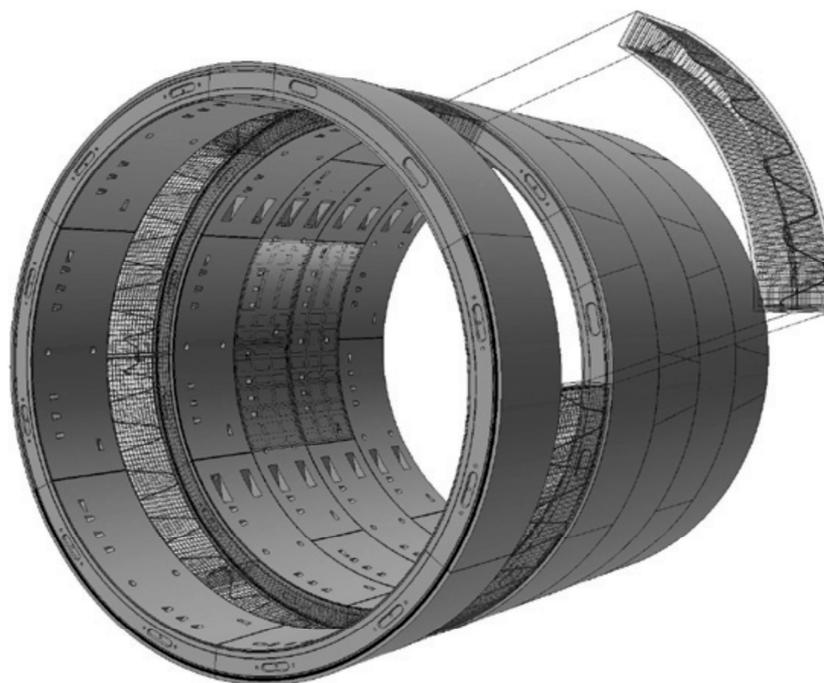


Figura 1.59: modello digitale della galleria con conci energetici "Energietübbing" (Pralle N. et al. 2011)

Ogni anello solitamente è formato da 5/7 segmenti con larghezza che varia tra 1 e 2 m e spessore di 30/50 cm, questi ultimi realizzati in cemento armato, vengono strumentati con un circuito idraulico (20/30 m di lunghezza), formato da tubi in polietilene reticolato (Pe-Xa), direttamente fissati all'armatura verso la parte interna così da non compromettere l'integrità del copriferro (Figura 1.60). I tubi scambiatori sono formati da 3 strati: uno interno in polietilene ad alta densità, uno intermedio polimerico e uno esterno composto da una barriera di etilene vinil alcool (EVOH) che limita la permeabilità all'ossigeno. (Barla M. et al. 2016). Il fluido termovettore è normalmente costituito da acqua mista a glicole propilene al fine di evitarne il congelamento fino a -20 °C.



Figura 1.60: preparazione del concio energetico “Energietübbing” (Pralle N. et al. 2011)

Ogni concio dopo la posa in galleria deve essere collegato con i conci adiacenti facenti parte dello stesso anello strutturale. Questo è possibile attraverso giunzioni idrauliche flessibili realizzate a tergo del passaggio della TBM in apposite cavità realizzate durante il getto (Figura 1.61). Successivamente occorre collegare l’anello alla pompa di calore tramite le condotte di mandata e di ritorno del circuito principale. Comunque occorre verificare che l’inserimento dell’impianto nei segmenti garantisca i requisiti relativi all’integrità strutturale della galleria, la tenuta stagna del rivestimento e la connessione idraulica tra i conci non interferisca con l’avanzamento della TBM e garantisca i limiti di robustezza e durabilità.

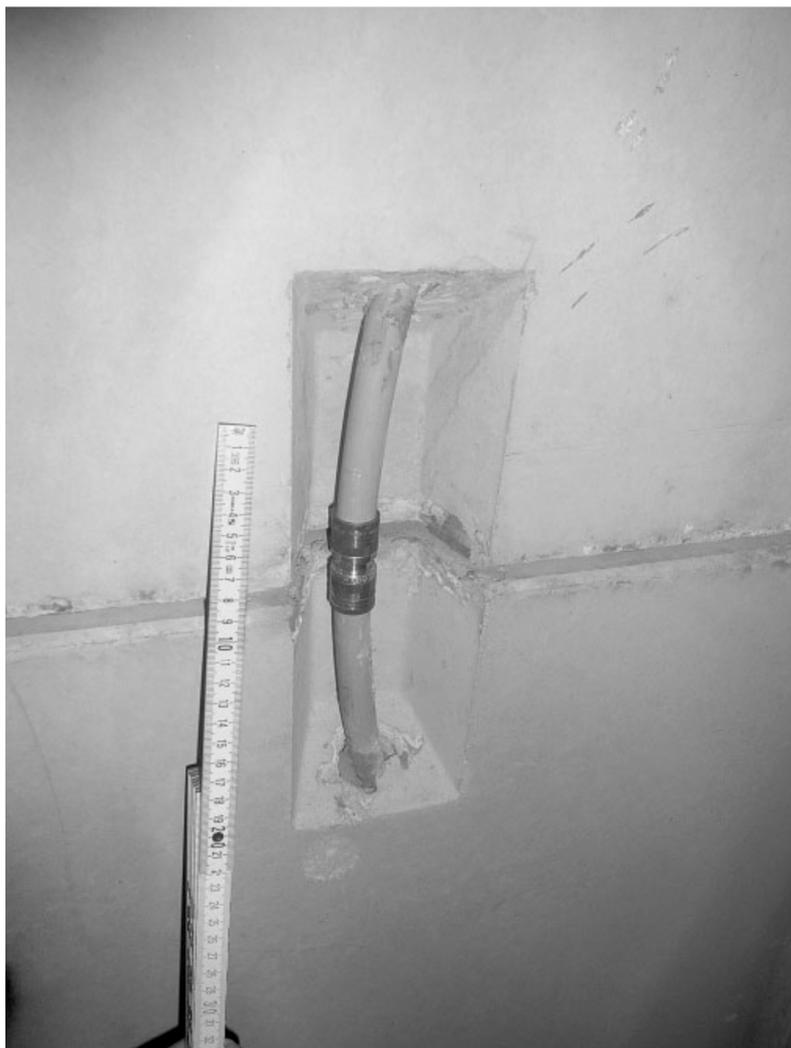


Figura 1.61: particolare delle connessioni idrauliche tra conci energetici (Frodl S. et al. 2010)

Un primo studio su questi conci energetici è stato svolto in un campo sperimentale in Germania. Con l'occasione della costruzione di un nuovo tratto ferroviario ad alta velocità nel 2007, in una galleria sono stati installati 4 anelli energetici. Tra maggio e settembre del 2009 è stato allestito un campo sperimentale con una pompa di calore temporanea e un sistema di monitoraggio prima che il tunnel entrasse in funzione. Sono stati connessi 5 conci (Figura 1.62) per formare una superficie di scambio termico con il terreno di 60 m².

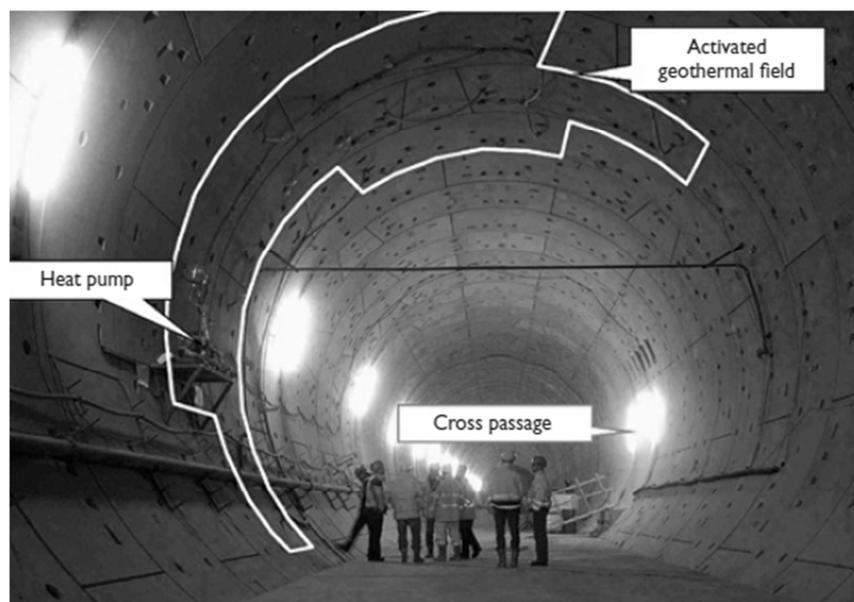


Figura 1.62: conci energetici attivati termicamente, campo sperimentale Germania (Pralle N. et al. 2011)

Il numero e la posizione dei segmenti utilizzati nella sperimentazione sul campo sono stati scelti in base ai requisiti di spazio dei lavori di costruzione in corso nel tunnel. Essendo un campo sperimentale temporaneo i tubi di scambio termico erano connessi all'interno della galleria per soddisfare le richieste del cliente di rimuovere gli impianti dopo il completamento della prova sul campo. Per le misure dei dati sono stati utilizzati più di 40 misuratori per acquisire le temperature all'interno e sulle superfici dei conci, dell'aria interna alla galleria e del terreno intorno fino a 5/7 m di distanza. Uno scambiatore di calore inserito nella struttura del tunnel è più complesso di un sistema geotermico convenzionale, poiché anche il calore viene trasferito all'interno del tunnel. I risultati del test di risposta termica eseguiti sul tunnel riflettono quindi l'interazione tra il tunnel cavo, il rivestimento del tunnel e il terreno circostante. Lo studio si è diviso in 4 fasi distinte: fase 0, lettura della temperatura a condizioni inalterate (circa 3 mesi); fase 1, primo test di risposta termica (4 giorni) immissione di calore nel terreno attraverso un flusso di calore costante; fase 2, periodo di riposo; fase 3, messa in funzione della pompa di calore per l'estrazione del calore (2 mesi). Il test svolto nella fase 1 era caratterizzato da un livello di potenza costante (riscaldamento), che veniva imposto al sistema per un certo periodo di tempo. Alla roccia circostante è stata fornita per tutta la durata del test inizial-

mente un livello di potenza termica di 1,0 kW, aumentato a 1,5 kW successivamente dopo 72 ore. Il test ha richiesto 4 giorni. Il test di fase 3 consisteva nella simulazione di operatività della pompa di calore per l'estrazione del calore durante l'inverno. Durante questa fase è stata utilizzata una pompa di calore con potenza 1,0/1,5 kW. Il flusso di calore scambiato attraverso l'impianto presenta due valori a seconda che si consideri la perdita data dai tubi di collegamento o no, nel primo caso il flusso termico corrisponde a valori tra 10 W/m² e 20 W/m² ma considerando che al di fuori del rivestimento comunque i tubi di collegamento scambiano calore con l'ambiente circostante si possono raggiungere 17/25 W/m². Inoltre le temperature di mandata del fluido di scambio sono rimaste ben al di sopra di 0 °C si potrebbero aumentare i valori della potenza trasmessa con settaggi della pompa di calore su temperature più basse. Per avere un'idea di quanto l'attivazione energetica di una galleria influenzi il terreno intorno si osservi la Figura 1.63 che mostra la distribuzione della temperatura fino a 7 • 5 m di distanza dalla galleria nel terreno circostante. I dati indicano che l'estrazione del calore influenza la temperatura del terreno fino a una profondità di 5 m.

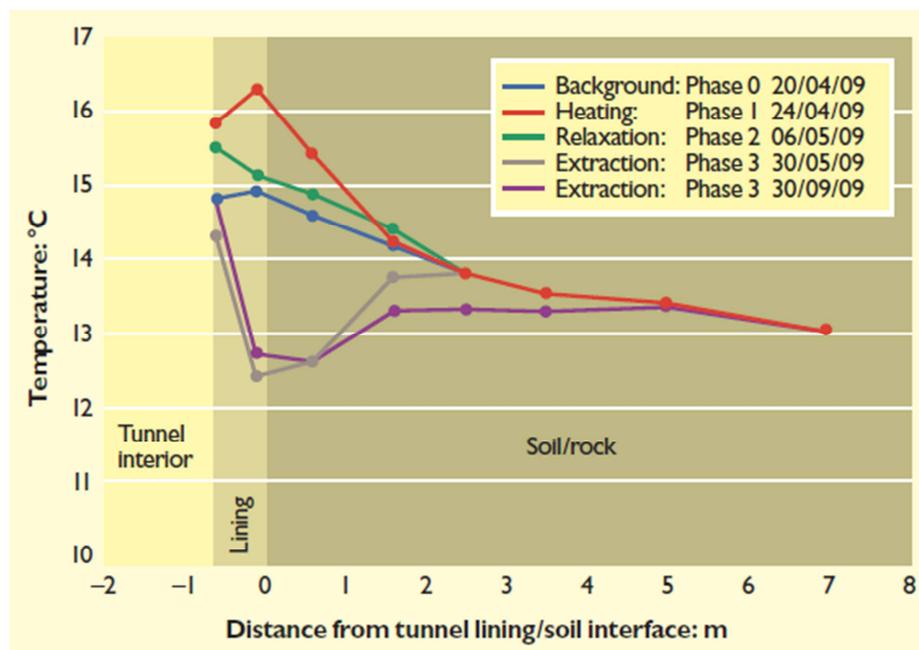


Figura 1.63: andamento temperatura nelle diverse fasi, campo sperimentale Germania (Pralle N. et al. 2011)

Il primo vero utilizzo commerciale di questi conci energetici, sviluppati da Rehau AG+Co and Ed. Züblin AG (Zentrale Technik), è stato all'interno della galleria Jenbach in Tirolo in un tratto di 54 m.

La sezione H8, Jenbach fa parte del percorso per l'accesso settentrionale alla futura galleria di base del Brennero sull'arteria ferroviaria tra Monaco e Verona. Il percorso del tunnel segue l'andamento naturale dell'Inn Valley, a est si collega con la vicina metropolitana H3-6, quindi inizia la sezione di tunnel lunga 3.467 m scavati utilizzando la TBM. Il terreno interessato dallo scavo era composto unicamente da ghiaia coesiva e terreni sabbiosi della ghiaia della Lower Inn Valley. Oltre al tunnel principale, con un intervallo di 500 m, sono state costruite 7 gallerie trasversali utilizzate in caso di emergenza come vie di fuga. Il tunnel è stato scavato da ovest a est da un pozzo di partenza lungo 60 m, nel quale successivamente è stata costruita una sezione con la tecnica cut-and-cover.

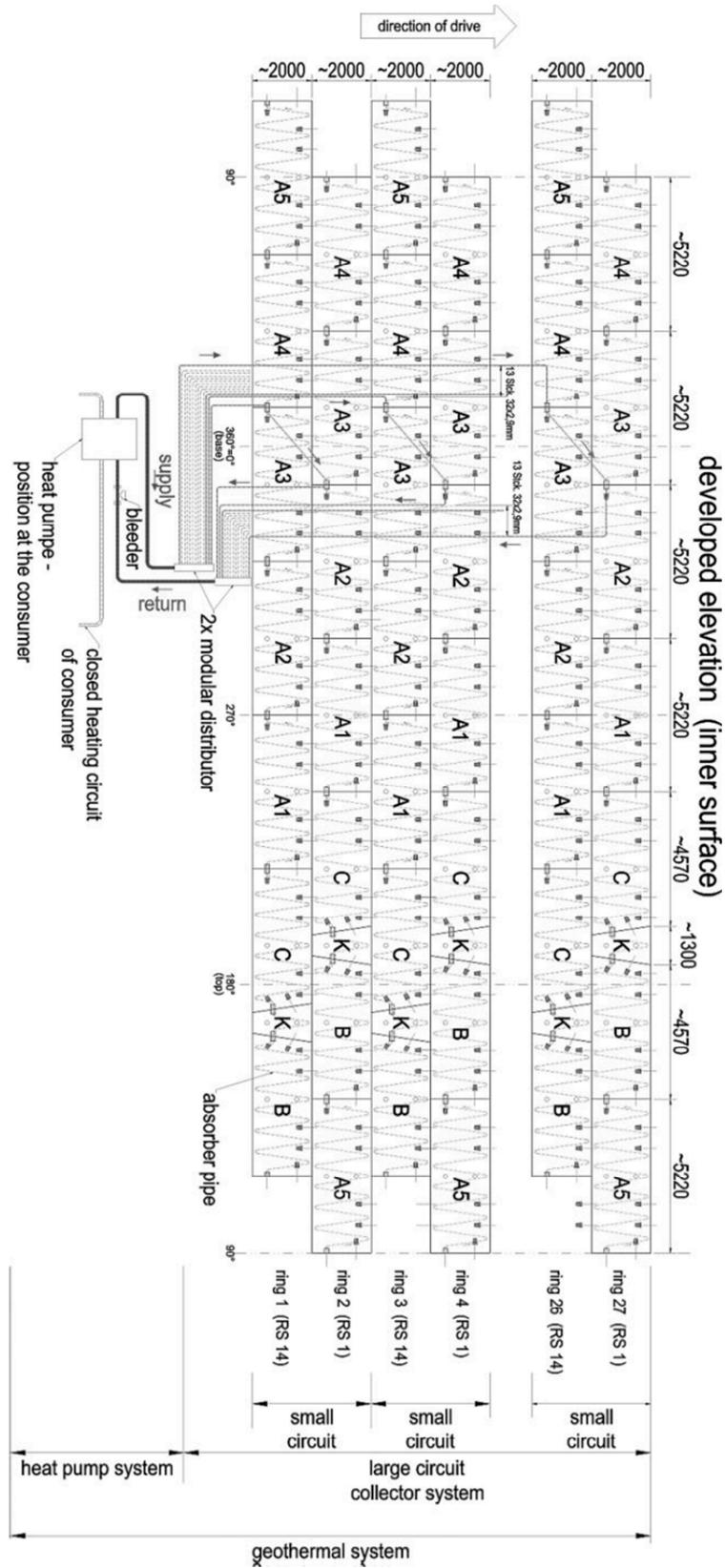


Figura 1.64: schema dell'impianto integrato nell'anello della galleria, Jenbach (Frodl S. et al. 2010)

La struttura del tunnel è composta da diversi anelli larghi 2 m con un diametro di 12 m. In ogni anello sono connessi 8 segmenti spessi 50 cm, i quali sono rivestiti da un involucro in calcestruzzo di 20 cm per la protezione al fuoco. I tubi scambiatori utilizzati sono composti da materiale polietilenico (PE-X) con un diametro esterno di 20 mm e formano una serpentina trasversale allo sviluppo del concio con una spaziatura di 25/30 cm arrivando complessivamente fino a 175 m. L'inserimento dei tubi scambiatori non determina delle variazioni della progettazione dei segmenti prefabbricati. Il circuito è inserito internamente alla gabbia dell'armatura che non cambia rispetto a quella utilizzata per conci convenzionali di medesime dimensioni, non pregiudicandone le prestazioni strutturali. Il collegamento del circuito tra un concio e l'altro è permesso tramite manicotti idraulici che devono presentare una certa flessibilità in modo da permettere libertà di movimento durante il collegamento e durante i micro movimenti di assestamento della struttura. Le connessioni sono inserite in tasche che presentano una sezione più ridotta possibile per non alterare la superficie di contatto dei segmenti, ottenute direttamente sulla cassaforma del concio. L'installazione dell'impianto geotermico, terminato nel 2008 e diventato operativo nel 2011, ha rappresentato la possibilità di utilizzare l'energia geotermica per riscaldare gli edifici municipali limitrofi in via di ristrutturazione; la profondità del tunnel si attesta in media a 16 m, condizione ideale per lo sfruttamento della fonte geotermica di energia (Frodl S. et al. 2010). Nella Figura 1.64 si osserva lo schema del circuito primario: due anelli, in un caso tre, sono accoppiati parallelamente prima di essere collegati alle condotte che portano alla pompa di calore. In questo modo si riducono le perdite di carico del fluido termovettore all'interno del circuito e si rende l'impianto più efficiente.

I collettori termici, integrati nella trave di base (Figura 1.65), percorrono la galleria fino al pozzo per la via di sicurezza al chilometro 40, distante 90 m dal cantiere del municipio dove sono collegati a una pompa di calore a gas.



Figura 1.65: particolare dei collettori termici prima dell'installazione della trave di base (Frodl S. et al. 2010)

Il picco di richiesta per il riscaldamento è di 80 kW con una temperatura esterna di $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$; l'impianto geotermico con la pompa di calore produce 43 kW, dalla combustione del gas si ricavano 28 kW per cui i restanti 15 kW derivano dallo sfruttamento del calore della terra. È stato utilizzato un metodo alle differenze finite per la progettazione e il calcolo della lunghezza necessaria per rispondere alla richiesta di energia. Per l'applicazione del metodo sono state fatte alcune semplificazioni teoriche: si considera il tunnel sia sufficientemente lungo e interamente attivato energeticamente e il terreno intorno sia omogeneo. Si crea una simmetria radiale del campo di calore che ha permesso lo studio di un modello bidimensionale. Si è concluso che per soddisfare la richiesta di energia per l'edificio comunale di Jenbach sono stati necessari 27 anelli per una lunghezza complessiva di 54 m di galleria (Figura 1.66).

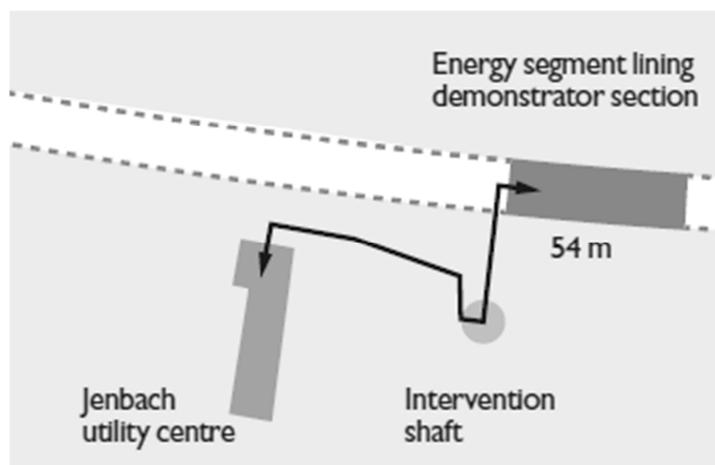


Figura 1.66: localizzazione galleria energetica di Jenbach e utenze (Pralle N. et al. 2011)

Nel 2014 al Politecnico di Torino è stato proposto un nuovo concio energetico, denominato ENERTUN, esso presenta due fondamentali innovazioni.

La prima riguarda il posizionamento dei tubi che sono posizionati in modo tale che i loro tratti più lunghi siano perpendicolari all'asse della galleria (Figura 1.67). Attraverso modellazioni numeriche con metodi agli elementi finiti accoppiando gli aspetti meccanici, termici e idraulici si è osservato come la nuova disposizione degli scambiatori consenta di ridurre le perdite di carico e migliorare lo scambio termico.



Figura 1.67: confronto disposizione tubi scambiatori (Barla M. e Di Donna A. 2016)

Tale disposizione infatti riduce il numero di curve della rete dei tubi interni al concio ottenendo una riduzione in termini di perdite di carico di circa il 20-30 %. Inoltre, a parità di materiali, lunghezza dei tubi e condizioni del sottosuolo, l'aumento di scambio termico è stimato nell'ordine del 5-10 % rispetto ai concii ove la tubazione è allineata con l'asse longitudinale della galleria. Il rendimento

delle due diverse configurazioni è stato confrontato attraverso analisi numeriche agli elementi finiti i cui risultati sono mostrati in Tabella 1.9.

Direzione principale delle tubazioni rispetto all'asse della galleria	Q	q	q _l
	W	[W/m ²]	[W/m]
Parallela	1670.79	52.76	1193.42
Perpendicolare (ENERTUN)	1773.49	56	1266.78

Tabella 1.9: Confronto in termini di scambio di calore tra le due tipologie di conci proposti (Barla M. e Di Donna A. 2016)

I risultati ottenuti derivano da una condizione particolarmente favorevole, quale la presenza di un significativo flusso di falda corrispondente a 1,5 m/giorno in direzione SE, verso il fiume Po, quindi perpendicolari allo sviluppo della galleria che favorisce uno scambio termico non solo di tipo conduttivo ma anche convettivo e consente una ricarica continua della temperatura del sottosuolo.

Il secondo aspetto innovativo riguarda la flessibilità di utilizzo data da tre diverse configurazioni, denominate rispettivamente "ground", "air" and "ground&air" (Figura 1.68). Il concio ENERTUN così non permette solamente la climatizzazione annuale di edifici limitrofi eventualmente presenti (configurazione ground) ma consente anche la limitazione del surriscaldamento interno della galleria dovuto al traffico di esercizio e la riduzione della necessità di ventilazione forzata, grazie all'estrazione del calore dall'interno della galleria e al controllo della sua temperatura (configurazione air).

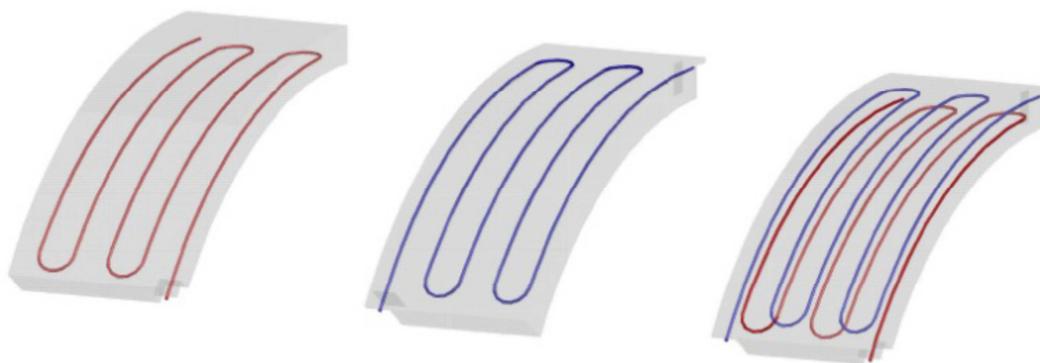


Figura 1.68: configurazioni concio ENERTUN (Barla M. e Di Donna A. 2016)

Grazie a tali condizioni l'attivazione della galleria dovrebbe consentire di estrarre in inverno e iniettare in estate rispettivamente circa 53 e 74 W per metro quadro di rivestimento. Considerando l'intera lunghezza della galleria, questo dovrebbe consentire teoricamente di coprire una richiesta energetica fino a 1.67 kW in modalità riscaldamento e 2.34 kW in modalità condizionamento, che risulta in linea con il fabbisogno energetico del grattacielo della Regione Piemonte.

Sono quindi stati valutati gli effetti dell'attivazione del rivestimento sul sottosuolo, in termini di variazione di temperatura della falda. Mediante analisi numeriche TH è stato simulato il funzionamento continuo dell'impianto per un periodo di 10 anni. I risultati mostrano una variazione ciclica dell'ordine di 5°C a 10 m dal contorno della galleria, sul lato E, e diventa trascurabile oltre i 30 m di distanza, osservando quindi un impatto ambientale minimo mitigato anch'esso dal gradiente di flusso particolarmente favorevole.

Successivamente è stato realizzato un campo sperimentale nella galleria del prolungamento Sud della Linea 1 della Metropolitana di Torino ancora in fase di scavo. La porzione di linea di interesse è posta nella parte Sud-Est della città e include due stazioni (Italia '61 e Bengasi)(Figura 1.69), due pozzi di ventilazione (PB1 e PB2), un pozzo terminale (PT) e un'intersezione per consentire il futuro collegamento con la stazione ferroviaria del Lingotto. Lo scavo che presenta un diametro di 7,4 m è realizzato con TBM EPB. La profondità media del

tratto di galleria è di 21,5 m e lo scavo avviene al di sotto del livello di falda che si attesta a circa 12 m di profondità interessando un acquifero di circa 22-23 m. L'acqua di tale acquifero ha una temperatura media di 14 °C ed è interessata da un flusso di entità importante in direzione SE, verso il fiume Po.

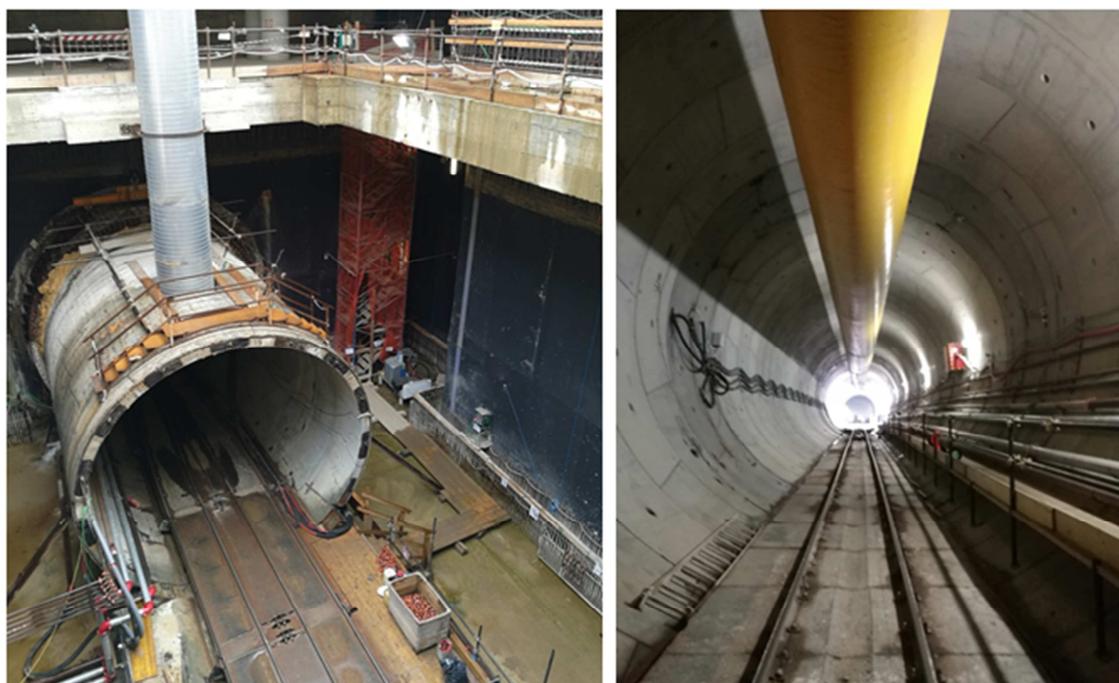


Figura 1.69: termine prolungamento linea 1 Metro di Torino (foto autoprodotta)

Ogni anello del rivestimento della galleria è costituito da sette conci prefabbricati di spessore di 30 cm e hanno una larghezza di circa 1,4 m installati direttamente dalla TBM e a tergo di questi viene iniettata una malta cementizia per garantire il completo contatto con il terreno. Gli anelli attivati termicamente sono dotati di un doppio impianto ground/air e collegati tra loro in parallelo alle tubazioni principali di mandata e ritorno le quali saranno poi a loro volta collegate a una pompa di calore che consentirà di simulare il funzionamento reale dell'impianto (Figura 1.70). Il collegamento di ogni anello alla rete principale sarà eseguito con valvole di intercettazione tali da garantire un corretto bilanciamento dell'impianto idraulico.

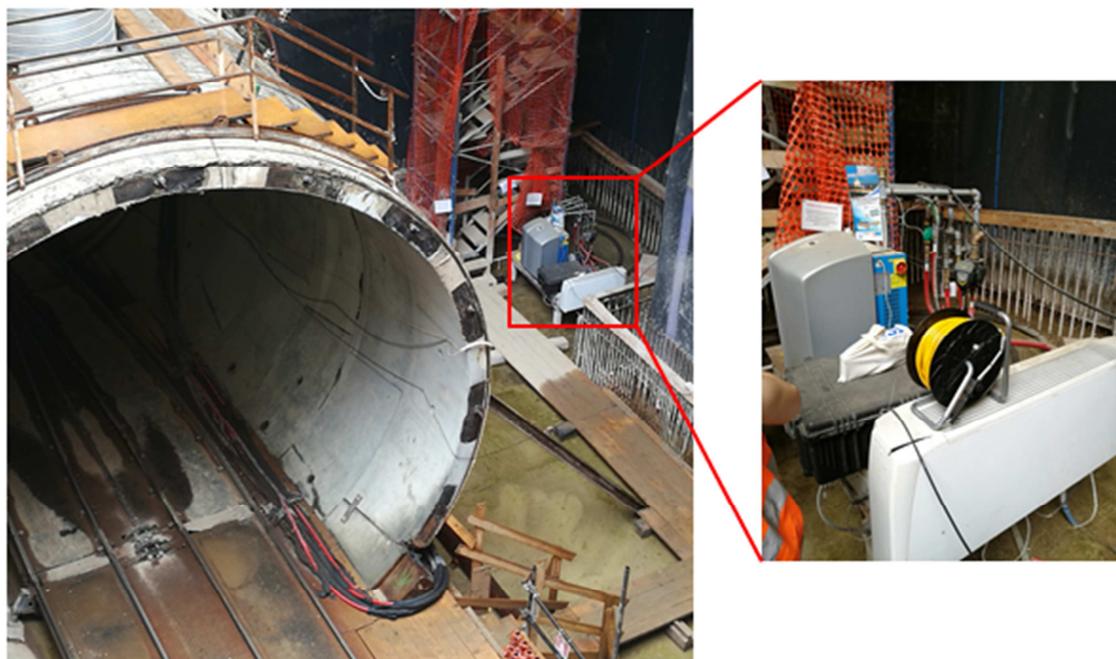


Figura 1.70: pompa di calore e dissipatore esterni alla galleria (foto autoprodotta)

Il fine del campo sperimentale è molteplice: potrà consentire di determinare direttamente in sito parametri e dati utili alla validazione dei modelli numerici quali la capacità di scambio termico, la trasmissività dei materiali, le deformazioni e lo stato tensionale nel rivestimento e consentirà di valutare la reale applicabilità e valore commerciale della tecnologia proposta. A tale scopo diverse sezioni della galleria sono state dotate di un sistema di monitoraggio in grado di misurare la variazione delle grandezze di maggior interesse. Anche tale sistema presenta degli accorgimenti innovativi. Oltre ai diversi termistori per la temperatura, ai piezometri per la variazione del livello di falda, a estensimetri e altri sensori per le deformazioni e lo stato tensionale della galleria e a immagini catturate con la termocamera per i campi di temperatura all'interno della galleria verranno anche utilizzati dei sensori con fibre ottiche (Figura 1.71). I dati di tutti i sensori sono raccolti quindi da una centralina che permette il controllo da remoto in tempo reale degli output (Figura 1.72).

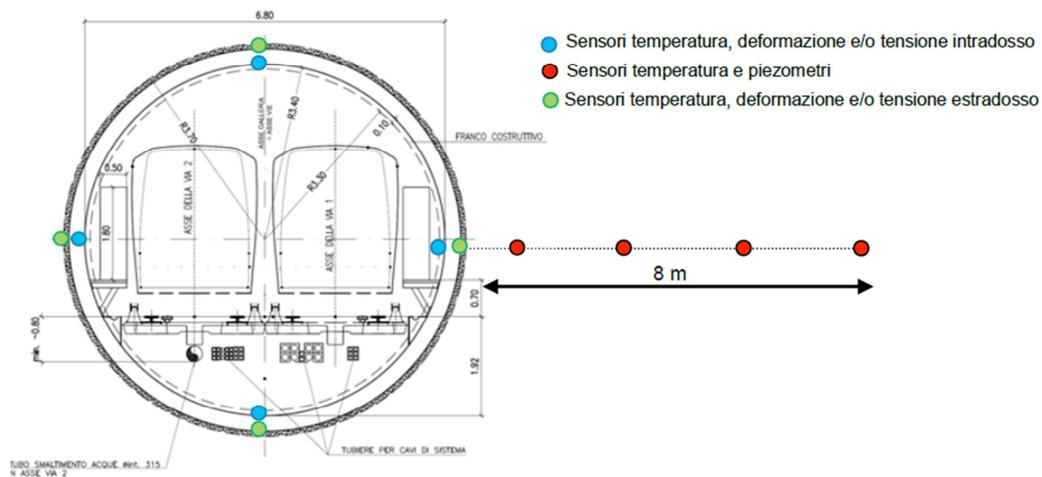


Figura 1.71: particolare della sezione con sistema di monitoraggio, campo sperimentale Torino (Barla M. e Di Donna A. 2016)

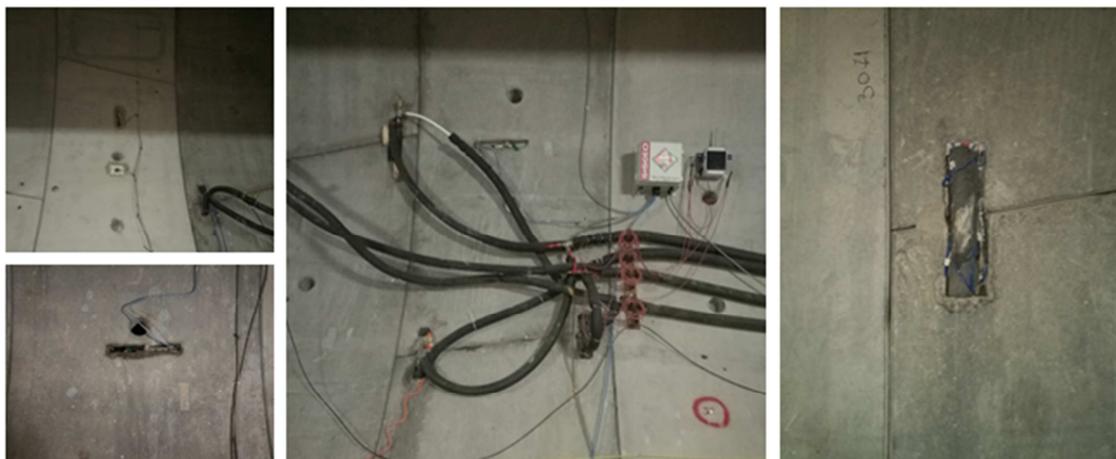


Figura 1.72: centralina wireless per raccolta dati, campo sperimentale Enertun (Barla M. e Di Donna A. 2016)

2. MATERIALE GEOPOLIMERICO INNOVATIVO DA FANGHI DA LAVORAZIONE LAPIDEA

2.1. Estrazione della pietra ornamentale

In Italia l'attività dell'industria mineraria è regolata ai sensi del Regio Decreto 29 luglio 1927, n. 1443. Nell'Art. 2 viene fatta distinzione tra miniere in profondità e miniere in superficie quindi tra miniere sotterranee e cave, definendo anche i differenti materiali estraibili. Le prime sono utilizzate soprattutto per l'estrazione di materiale pregiato mentre i materiali da cava sfanno riferimento alle torbe, ai materiali per costruzioni edilizie, stradali e idrauliche, alle terre coloranti, al quarzo, alle sabbie silicee ecc. In Italia tra i materiali tipici da cava vi sono:

- sabbia e ghiaia per la fabbricazione del calcestruzzo;
- argilla per mattoni e laterizi in genere;
- calcare per la fabbricazione del cemento;
- gesso;
- pietre da costruzione e da decorazione: marmi, graniti, gneiss, arenarie, travertino, ardesia, ceppo.

Nelle cave di pietra ornamentale si utilizzano tecniche e tecnologie specifiche per permettere il distacco dalla parete di grossi blocchi rocciosi il più possibile regolari e privi di danni, minimizzando i difetti durante l'estrazione del materiale. Le fasi lavorative per l'estrazione in cava sono essenzialmente due. La prima corrisponde al taglio primario del blocco di roccia. Lo si separa dal versante della cava. Le dimensioni del blocco dipendono principalmente dalle caratteristiche del materiale, dai sistemi di discontinuità e dalla morfologia della parete rocciosa. Solitamente il volume varia da poche centinaia a qualche migliaio di metri cubi.

Successivamente occorre dividere il blocco in porzioni più piccole per rendere più agevole il trasporto e inviare il materiale alle fabbriche predisposte per le lavorazioni di finitura.

Sono diversi i metodi per la separazione e i successivi tagli del blocco, di seguito sono elencati alcuni.

- Disgaggio dei blocchi attraverso una pressione all'interno di fori preventivi;
- Scavo con esplosivo;
- Taglio con utilizzo di catene diamantate o motoseghe;
- Taglio con la catena.

Il primo caso è tra le tecniche più antiche. Vengono praticati con un apposito trapano una fila di fori la cui spaziatura dipende dalla resistenza del materiale, se è possibile si seguono i piani di debolezza intrinseci della roccia. Due elementi rastremati sono successivamente inseriti e ripiegati verso l'alto e tra questi interposto un cuneo (Figura 2.1). Agendo con un martello in modo sequenziale sulla testa dei cunei si trasmette la forza sulle pareti dei fori così da permettere la separazione del blocco.



Figura 2.1: cunei e tasselli utilizzati per la separazione dei blocchi di roccia in cava (<http://drystonegarden.com>)

Questa tecnica ha tempi di preparazioni più lunghi ma è la meno dispendiosa in termini economici ed è utilizzata quando non sono possibili altri metodi o quando la roccia esibisce piani di debolezza utili alla lavorazione. In alternativa basandosi sulla stessa fisica di funzionamento nei fori sono inseriti altri materia-

li, che se bagnati presentano caratteri espansivi, ad esempio il legno o la calce disidratata.

Più veloce risulta essere la tecnica che utilizza l'esplosivo. Questa tecnica però presenta un impatto ambientale molto elevato e i blocchi ottenuti non sono regolari. Alla base di questa tecnica occorrono buona progettazione ed esecuzione poiché pratiche improprie, inadeguate o un utilizzo di esplosivo eccessivo determinano rischi molto alti e possono provocare gravissimi danni. Una volta veniva utilizzata la polvere da sparo o la dinamite, ora tra gli esplosivi più comuni vi è il nitrato di ammonio. In base alle condizioni della roccia: tipo di materiale, densità, resistenza, condizione di frantumazione e presenza o meno dell'acqua viene definito quale tipo di esplosivo utilizzare. Esplosivi ad alta velocità sono utilizzati normalmente per rompere e frantumare la roccia, quelli con velocità minori per creare pressioni maggiori nelle rocce più morbide. Nei casi si verifichi la presenza di gas metano per cui l'uso di esplosivi comporterebbe dei rischi troppo alti, è stato sviluppato un metodo brevettato non esplosivo, denominato "Cardox" che utilizzava anidride carbonica liquefatta. (Radulovi Z. 2012)

Da circa venti anni la tecnica più utilizzata in cava per il disgaggio di blocchi di roccia è quella con il filo diamantato. Il diamante è il materiale più duro della scala di Mohs (durezza 10) per cui riesce a scalfire qualsiasi altro materiale. Lo schema da seguire per l'uso di questo metodo comprende: innanzitutto carotare la roccia con una perforazione orizzontale e una verticale. Si crea così il passaggio attraverso il quale è inserita la catena in acciaio inox diamantata. La catena è quindi chiusa attorno a una puleggia che imprime contemporaneamente la tensione e la rotazione della catena. La catena azionata dalla puleggia taglia in modo netto la roccia. Per evitare accumulo di materiale eroso e surriscaldamenti dati dall'attrito durante la lavorazione, il taglio viene continuamente lubrificato con acqua. Sebbene con questa tecnica sia possibile tagliare qualsiasi tipo di roccia, l'efficacia rimane comunque legata alla composizione mineralogica della

roccia. Nei materiali carbonati, dove non sono presenti quarzo e minerali duri, la tecnica con il filo fornisce un'eccellente produttività: la velocità di taglio è di circa 10 m²/ora. Nei materiali più resistenti all'usura la velocità potrebbe anche ridursi del 60% e questo spiega il motivo per cui la tecnica con il filo diamantato è diffuso per materiali calcarei e cave di marmo, mentre per granito, gneiss e altre rocce di silicato è solitamente sfruttato l'esplosivo. Infatti il costo dell'estrazione con seghe a filo aumenta da calcare e marmi (durezza 3) a feldspato (durezza 6) e quarzo (durezza 7).

Infine, per le rocce a bassa tenacità come travertino e marmo, è possibile operare il taglio con motoseghe apposite che presentano lunghezza che vanno da 2 m a 6 m. In questo caso la profondità di taglio e la velocità diminuiscono ma viene prodotto molto meno materiale di scarto e si ottiene un taglio molto più preciso che riduce i tempi per le successive lavorazioni di finitura. D'altra parte gli svantaggi sono collegati all'uso limitato a solo alcuni tipi di roccia, alla gestione della macchina e alla scarsa profondità del taglio.

Dopo il disaggancio dei blocchi dal versante della cava, occorre ribaltarli e procedere con la segmentazione secondaria che permetterà un trasporto agli impianti di finitura più agevole e differenziato. Solitamente viene utilizzata una tecnica con i cunei che si basa sullo stesso concetto della tecnica per il taglio primario, quello che varia è l'obiettivo. Con l'azione spingente dei cunei si cerca di separare definitivamente il blocco dalla parete. In un secondo momento, anche con l'utilizzo di pistoni pneumatici si procede con il ribaltamento. Solitamente vengono disposti rifiuti di cava in un mucchio che svolge la funzione ammortizzante per il blocco. In alternativa ai cunei sono utilizzati delle sacche d'aria inserite nella fessura e poste sottopressione, gonfiandosi spingono sulle pareti e provocano la rottura completa del blocco. In seguito si procede con il taglio secondario e con il trasporto.

Per la produzione di lastre tagliate dai blocchi si usano comunemente tre tipi di seghe: seghe multilama, seghe mono-lama e seghe a filo.

La sega multiblade è composta da una base fissa e da un ampio telaio mobile sotto di essa. Sul telaio sono disposte diverse seghe con lame circolari. Il telaio si può muovere oltre il limite del blocco in modo da ottenere dei tagli completi e sono possibili in entrambe le direzioni. Le lame delle seghe possono variare il loro interasse in base allo spessore finale della lastra voluto. Sono utilizzate principalmente due tipi di lame: una lama in acciaio che utilizza l'impasto abrasivo per l'azione di taglio o lame in acciaio con diamanti incastonati nel bordo. Nel primo caso il taglio viene irrorato con un impasto abrasivo, composto da acqua e una piccola graniglia d'acciaio. La grana d'acciaio crea attrito nel punto in cui la lama della sega entra in contatto con la pietra. La graniglia entra quindi in un ciclo di recupero che permette il riutilizzo della pasta abrasiva. Occorre però sempre monitorare la miscela di nuovi abrasivi con le particelle riciclate per garantire un taglio uniforme. Questo tipo di sega è usato più frequentemente per segare blocchi di marmo e calcare. Gli abrasivi utilizzati in questo processo sono meno costosi, ma richiedono più tempo di taglio. Più recentemente sono utilizzate le seghe con le lame diamantate. Deve essere utilizzata dell'acqua per provvedere al raffreddamento della lama durante il taglio. Questo tipo di sega è comunemente usato per segare pietre dure come i graniti. Con l'utilizzo di queste lame si riduce molto il tempo per la lavorazione ma esse determinano un costo più alto.

Meno frequentemente sono usate seghe a filo diamantato fisse. Le seghe a filo sono utilizzate quando si desiderano lastre più spesse di 4 cm. Una sega a filo utilizza la stessa tecnologia delle seghe a filo utilizzate nel processo di estrazione. Il costo dell'utilizzo di una sega a filo per sega a blocchi è superiore a quello delle seghe a catena a causa dell'elevato costo del filo abrasivo. Spesso sono utilizzate seghe a lama singola per verificare la solidità e la compattezza del blocco e per studiare direzioni di taglio ottimali.

2.2. Produzione e composizione dei fanghi di segagione

Durante le operazioni di estrazione in cava e successivi tagli occorre controllare la produzione dei rifiuti, trovare un metodo adatto per lo stoccaggio o possibili impieghi alternativi. L'utilizzo dell'acqua non ha solo lo scopo di raffreddare gli utensili e agevolare il taglio ma anche contenere la polvere che ne scaturisce. In caso contrario questo scarto si libererebbe sotto forma di pulviscolo con conseguenze molto impattanti per l'ambiente e l'uomo. L'acqua si miscela con il residuo lapideo formando il così detto "fango di segagione" e costituisce la parte preponderante degli scarti di queste lavorazioni. Si stima che per ogni tonnellata di roccia siano prodotti 0.1 m³ corrispondente al 20-30% della massa totale lavorata (Torres P. et al. 2009; De Gennaro et al. 2006).

In questa fase della lavorazione i fanghi di segagione si presentano con una concentrazione di solido in massa dell'ordine del 40% (i fanghi di taglio e lucidatura sono ancora più diluiti) ed è necessaria l'adozione di idonei processi per la disidratazione e la separazione tra fase liquida e solida (marmettola) (Figura 2.2) e renderli maneggevoli, condizione raggiungibile se si riduce l'umidità al 25% circa (Mancini R. et al. 2005).



Figura 2.2: agglomerati di fango di segagione dopo la disidratazione (fotografia autoprodotta)

Nel caso in cui si voglia procedere con lo smaltimento del materiale di scarto, da marzo del 2003, occorre trattarlo come rifiuto speciale non pericoloso ai sensi degli articoli 27 e 28 del D. Lgs. 22/97 s.m.i. e del D. Lgs. 36/03 (criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica). I fanghi sono considerati come rifiuti inerti purché rientrino nei valori di sicurezza per quanto riguarda le concentrazioni di componenti nocive riportate nella tab. 2 del D. Lgs. 03/05. Occorre porre una certa attenzione allo smaltimento e stoccaggio poiché le caratteristiche del fango lapideo lo rendono potenzialmente dannoso per l'ambiente. Innanzi tutto per la granulometria. Essendo polvere molto fine, il diametro massimo non supera 125 μm , se venisse raccolta in luoghi non riparati accuratamente, l'azione del vento potrebbe provocare dispersioni di pulviscolo lapideo nell'aria causando problemi respiratori e di visibilità non solo nelle zone di stoccaggio ma anche a decine di chilometri di distanza. Se invece non si trattassero in modo adeguato le acque di scarico dopo le lavorazioni si potrebbero causare: una modifica dei parametri chimici, fisici e biologici di corpo d'acqua superficiali con conseguenti ripercussioni su flora e fauna, degradazione dell'efficienza del sistema depurativo delle fognature e alterare la composizione mineralogica del suolo e del sottosuolo. Per la tutela delle acque dall'inquinamento si fa riferimento alla legge Merli n. 319/76. In anni passati era prassi comune smaltirli direttamente in fiumi o corsi d'acqua senza nessun trattamento preventivo, provocando però gravi scompensi nella catena alimentare ittica, in quanto veniva ostacolata la fotosintesi delle alghe. Attualmente invece sono effettuati attenti trattamenti di depurazione prima della confluenza nei sistemi fognari.

Oltre alle caratteristiche fisiche della polvere lapidea occorre anche porre l'accento sulla possibile contaminazione con sostanze altamente inquinanti, la cui presenza deriva dallo stretto contatto con i macchinari di taglio. Metalli pesanti, come Nichel (Ni), Cromo (Cr), Manganese (Mn) se il taglio è avvenuto con un sistema a telaio o Rame (Cu) o Cobalto (Cb) nel caso di utensili diamantati, se inalati possono provocare problematiche serie al sistema respiratorio

umano. È possibile che la contaminazione non riguardi solo i metalli ma anche idrocarburi pesanti (Hc) contenuti nei lubrificanti dei macchinari, soprattutto se gli impianti sono meno recenti e tecnologicamente surclassati sprovvisti di dispositivi di recupero degli oli lubrificanti. Se la percentuale di idrocarburi pesanti supera 500 ppm occorre smaltire il materiale in apposite discariche progettate per rifiuti speciali.

Oltre al riscontro ambientale, le aziende devono affrontare il discorso dello smaltimento degli scarti di lavorazione dal punto di vista economico. Date la localizzazione dell'azienda, la modernità degli impianti e l'andamento del mercato lapideo, si stima che in media siano spesi, per ogni kg di fango da trattare, dai 2 ai 5 centesimi di euro, a cui si devono aggiungere i costi per operazioni di trasferimento e confinamento (De Gennaro et al. 2006). I costi variano in base al volume di limo prodotto e dunque legata alla dimensione aziendale: l'impatto è maggiore per le imprese piccole poiché con volumi maggiori i costi unitari si abbassano. Per la depurazione delle acque dai fanghi di segazione da alcuni anni a questa parte si è passati alle tecniche di disidratazione con filtropressa. L'impianto segue due fasi principali: la raccolta e una prima decantazione del fango per immettere nuovamente nel ciclo della lavorazione le acque chiare con la successiva disidratazione e compattazione dei fanghi rimanenti.

In Figura 2.3 è schematizzato l'impianto nelle diverse componenti per il recupero delle acque separate dalla fase solida raccolta in una vasca apposita al di sotto della filtropressa.

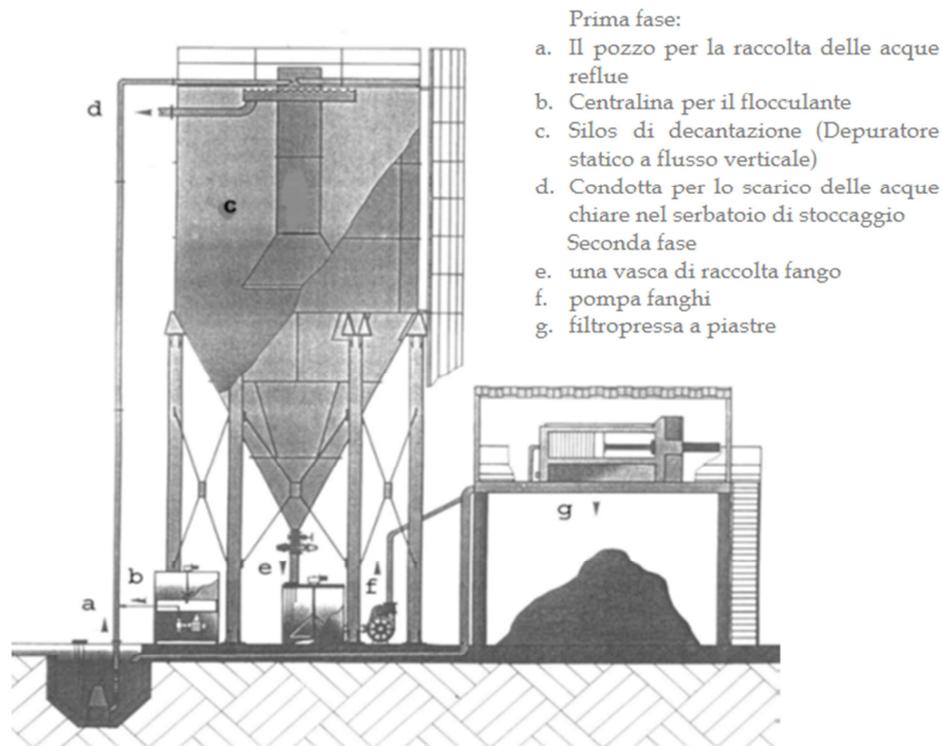


Figura 2.3: schema della depurazione delle acque dal fango di segazione (Mancini R. et al. 2005, rielaborata)

Nel caso in cui si voglia riciclare il materiale il recupero deve avvenire ai sensi degli art. 31 e 33 del D.Lgs. 22/97 per fare richiesta di riutilizzo dei fanghi di segazione certificati con la sigla CER 010413 (Mancini R. et al. 2005) e s.m.i. e del D.M. 05/02/98 o ai sensi degli art. 27 e 28 (procedure semplificata e ordinaria).

L'obiettivo è rendere l'industria lapidea ecosostenibile favorendo la valorizzazione dei materiali di scarto per possibili rimpieghi economicamente utili. Infatti nell'ultimo decennio la concorrenza dei paesi emergenti, che si sono immessi nel mercato lapideo con prezzi nettamente vantaggiosi, impone ai paesi dell'Eurozona e non di cambiare la propria filosofia nella produzione interna e sviluppare nuove tecniche per il riciclo dei materiali altrimenti considerati rifiuti.

Per poter ipotizzare un sistematico recupero dei fanghi bisogna innanzitutto ipotizzare la separazione dei metalli pesanti presenti nel materiale. Questa operazione ha la duplice funzione di ottenere da un lato un fine lapideo con mag-

gior grado di purità con minor contenuto di metalli pesanti e dall'altro la graniglia esausta che potrebbe essere riammessa nel ciclo produttivo. La soluzione più semplice da applicare è la separazione magnetica. In base alla quantità di limo prodotto, quindi alla grandezza dello stabilimento le alternative sono due: la prima prevede la separazione direttamente in situ. A valle delle macchine da taglio si installano apparecchi atti all'allontanamento della graniglia dal materiale lapideo. Questa soluzione è vantaggiosa per le aziende con volumi di produzione più grandi. Se invece le quantità prodotte sono ridotte la separazione direttamente in stabilimento risulterebbe dispendiosa. In questo caso la soluzione più economica è rappresentata dalla creazione di un impianto centralizzato in cui siano raccolti i fanghi di più aziende per essere trattati. Seguendo la seconda alternativa si è anche osservato come i fini lapidei ottenuti siano più eterogenei poiché miscelando fanghi di diversa origine si eliminano le caratteristiche mineralogiche e chimiche legate al luogo di estrazione (Colombo A. et al. 2006).

In seconda battuta occorre prevedere alcuni trattamenti che riducano la presenza di cobalto, legata alla lavorazione con lame diamantate e di idrocarburi pesanti derivanti dalla lubrificazione delle componenti dell'impianto.

In definitiva rimane fondamentale conoscere la composizione chimica e mineralogica e valutare come questa caratteristiche varino nel tempo. In alcuni studi (Colombo A. et al. 2006, nell'ambito del progetto PIC INTERREG III A) si è evidenziato come la composizione dei fanghi sia analoga a quella del materiale lapideo di provenienza ma allo stesso tempo si differenzi da questa in base al tipo di lavorazione utilizzato dalle aziende, distinguendo in particolare i tagli con utensili diamantati e quelli con graniglia metallica. I dati relativi alle componenti più abbondanti sono forniti in percentuale di peso dell'ossido corrispondente, quelli relativi per gli elementi considerati ad alta pericolosità per la loro tossicità sono dati in parti per milione (ppm). Si osservi in particolare la percentuale di Silice (Tabella 2.1), il contenuto varia tra 34% e 71% in base al materiale lavo-

rato: percentuali molto basse sono solitamente associate a quantità maggiori di Ossido di Calcio (CaO) e di Magnesio (MgO) e derivano da marmi dolomitici. Per i fanghi derivanti da impianti che utilizzano utensili diamantati il contenuto di Ferro (Fe_2O_3) e di Calcio (CaO) è piuttosto basso, circa 5%. Tali percentuali crescono nel caso delle seghe a telaio e graniglia metallica abrasiva, con le quali la percentuale di Ferro arriva anche a 17%. Ma componente ferrosa varia anche all'interno dei campioni prelevati in tempi diversi nelle stesse aziende. La causa principale è la quantità di abrasivo utilizzato nelle procedure non standardizzate che provocano un aumento delle componenti metalliche.

	Utensili diamantati	Graniglia metallica
	%	%
SiO_2	71.19 - 33.99	62.55 - 55.42
Al_2O_3	17.09 - 8.17	15.31 - 12.21
Fe_2O_3	5.09 - 1.84	15.12 - 7.4
MgO	11.44 - 0.7	2.74 - 1.24
CaO	16.77 - 1.79	7.23 - 3.37
Na_2O	4.13 - 1.74	3.8 - 2.83
K_2O	4.12 - 1.74	3.68 - 2.37
TiO_2	0.76 - 0.21	0.58 - 0.27
P_2O_2	0.5 - 0.07	0.23 - 0.12
MnO	0.12 - 0.04	0.16 - 0.09

Tabella 2.1: composizione chimica dei fanghi di segazione, ossidi (Colombo A. et al. 2006)

Il dato distintivo è il contenuto di Cobalto maggiori concentrazioni di tale metallo sono causate dai residui dei leganti adoperati per fissare l'abrasivo alle strumentazioni, in particolare per i dischi diamantati rispetto alle seghe da telaio (Tabella 2.2).

	Utensili diamantati	Graniglia metallica
	ppm	ppm
Ba	1144.7 - 302	822 - 428.6
Rb	239.8 - 66.9	182 - 74.3
Sr	361.9 - 66.9	465.8 232.4
Mo	3.9 - 0.1	36.3 - 10.5
Cr	41.1 - 0.7	417.4 - 54.7
Ni	29.2 - 1.9	130.6 - 37.2
Co	245 - 54.3	33.3 - 9.7
Cu	163.4 - 14.4	233.1 - 67.8
As	1.4 - 0.5	11.5 - 2
Pb	91.1 - .4	6.5 - 1.4
Zn	788 - 50	72 - 37

Tabella 2.2: composizione chimica dei fanghi di segazione, elementi pericolosi (Colombo A. et al. 2006)

Lo studio in seguito ha permesso di determinare la composizione mineralogica presenti e osservare la loro variazione durante il tempo. Si è osservato che le diverse tecniche di lavorazione non portano differenze nelle quantità relative alle sostanze cristalline. Avere tali informazioni è fondamentale per capire i campi di applicazione più consoni al tipo di materiale. Plagioclasio, Quarzo e Feldspato alcalino sono sempre presenti. (Tabella 2.3). In minor quantità sono presenti anche Calcite e Dolomite, quest'ultima però è abbondante solo nel caso di marmi dolomitici.

	Utensili diamantati	Graniglia metallica
	%	%
Quarzo	17.5 - 45	28 - 37
Feldspati alcalini	4 - 15.5	6.5 - 12
Pagioclasi	21 - 54	42 - 52
Miche	5.5 - 11.5	6 - 11
Dolomite	1.5 - 50	-
Calcite	-	1 - 4

Tabella 2.3: composizione mineralogica dei fanghi di segazione (Colombo A. et al. 2006)

2.3. Geopolimeri

Questo materiale inorganico innovativo è definito come legante idraulico prodotto a partire da polveri, principalmente allumino-silicatiche, disciolte in un ambiente fortemente basico.

2.3.1. Definizione e cenni storici

I progetti che riguardano lo studio e le applicazioni dei geopolimeri sono relativamente recenti. Fu il chimico francese Joseph Davidovits a inventare il termine “geopolimero”. Il prefisso geo indica che si parla di un prodotto di geosintesi, cioè di un prodotto che mima materiali già presenti in natura; il suffisso polimero si riferisce invece al processo di produzione ovvero una polimerizzazione per policondensazione. Sono materiali attivati con alcali, e compongono la famiglia dei leganti inorganici derivati dalla reazione di un sale metallo alcalino con una polvere di silicati. Con un contenuto di alluminio e sodio maggiore fanno parte di tale famiglia anche i polimeri inorganici. Rispetto ai cementi Portland presentano strutture più complesse, disordinate e una maggiore reticolazione (Figura 2.4).

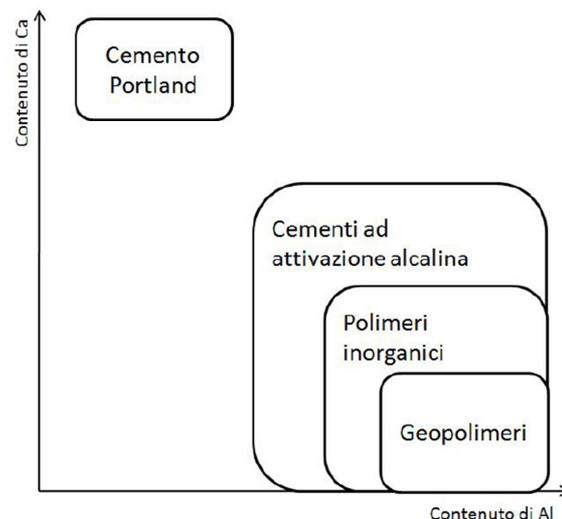


Figura 2.4: inquadramento dei materiali attivati con alcali (Van Deventer J.S.J. et al. 2010)

I geopolimeri sono un sottoinsieme dei polimeri inorganici, caratterizzato da un maggior contenuto di allumina, un altissimo contenuto di sodio e un basso tenore di calcio. Chimicamente e strutturalmente possono essere confrontati con le materie lapidee naturali.

I primi studi sui geopolimeri risalgono agli anni 50. Furono svolte ricerche su nuovi materiali attivati con soluzioni alcaline (Malone P.G. et al. 1985, Krivenko P.V. 1994) e alcuni anni dopo se ne approfondirono proprietà e tecniche di preparazione, con Victor D. Glukhovsky (et al. 1980). La ricerca si concentrò su materiali contenenti silice e allumina come argille, ceneri vulcaniche, scorie industriali e feldspati che se attivati con soluzioni alcaline mostravano caratteristiche superiori ai cementi dell'epoca. Invece le fasi di produzione proposte erano essenzialmente quattro: distruzione, coagulazione, condensazione e cristallizzazione. All'inizio i geopolimeri, grazie alle loro grandi capacità di resistere al calore, vennero presi in considerazione per sostituire i materiali con matrice organica. Nelle prime applicazioni infatti vennero utilizzati per rivestimenti anti-fiamma e protezioni termiche. E solo alla fine del XX secolo si scoprirono le alte prestazioni meccaniche comportando un sempre più largo uso dei geopolimeri nel campo dell'ingegneria civile (Wastiels J. Et al. 1993).

2.3.2. Materiali costituenti e chimica del processo

La produzione dei geopolimeri si articola principalmente in 3 fasi. Occorre innanzi tutto preparare e miscelare le materie prime. Sono utilizzate polveri amorfe alluminosilicate dissolte in soluzioni basiche. Si ottiene una miscela le cui caratteristiche di viscosità e consistenza dipendono dai materiali utilizzati. La miscela viene versata negli stampi di forma voluta. La fase finale riguarda quindi la stagionatura e consolidamento che tendenzialmente possono avvenire anche fuori stampo poiché dopo alcune ore il manufatto è in grado di sostenere il proprio peso e non deformarsi. Generalmente questi passaggi avvengono a temperatura ambiente. Si è osservato però che il riscaldamento del composto

durante la fase di stagionatura permette un'agevolazione delle reazioni chimiche e quindi il raggiungimento di caratteristiche migliori. Il costo della produzione in quest'ultimo caso inizia a crescere infatti si tratta di una tecnica utilizzata prevalentemente per polveri poco reattive o per la realizzazione di manufatti destinati a impieghi strutturali. Nella realizzazione di questo materiale è di fondamentale importanza un'attenta analisi delle quantità chimiche in gioco, in quanto queste avranno influenza su molti aspetti del geopolimero; possiamo infatti affermare che generalmente:

- Il rapporto molare Si/Al influenza marcatamente le proprietà fisiche;
- Al crescere del rapporto $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ cresce il tempo di presa;
- Il rapporto Na/Al regola il corretto bilanciamento delle cariche;
- Il grado di concentrazione del catione nella soluzione attivante influenza il grado di polimerizzazione del processo e di conseguenza la resistenza a compressione;
- Il grado di alcalinità della soluzione attivante permette invece di regolare le quantità prodotte.

Errori nella formulazione chimica possono portare a conseguenze molto gravi come sviluppi di tensioni, rottura dei manufatti o molto più semplicemente a proprietà meccaniche scadenti (Duxson P. et al. 2007, Fernández-Jiménez A. et al. 2009).

Le materie prime da utilizzare nel processo di produzione di un geopolimero sono tre:

- Polveri reattive contenenti alluminio e silicio;
- Soluzione attivante alcalina;
- Eventuali additivi e/o cariche.

La scelta delle polveri di partenza è fondamentale ed è in funzione della futura applicazione del materiale geopolimerico. Per agevolare la polimerizzazione occorre utilizzare materie prime pulverulenti ricche in silicio (come ad esempio

ceneri volanti, scorie d'altoforno) e in alluminio (argille caolinitiche o bentonitiche). La reazione chimica dipende anche dal contenuto di vuoti presenti tra gli aggregati, questo parametro influenza soprattutto le condizioni di superficie specifica: maggiore è la superficie specifica maggiore sarà la reattività del materiale. Il contenuto dei vuoti determina anche l'apporto d'acqua necessario alla polimerizzazione e varia a seconda del materiale impiegato. Questa variazione a sua volta influisce sui parametri di stagionatura (tempo e temperatura): in questa fase è infatti essenziale che tutta l'acqua non utile alla reazione chimica per formare la struttura geopolimerica sia correttamente evacuata.

Tra le polveri alluminosilicate il più utilizzato è il caolino calcinato. È un materiale altamente reattivo, condizione dovuta alla sua coordinazione cationica che permette una facile reazione con le soluzioni alcaline. La reattività di queste polveri dipende in larga misura dalle caratteristiche morfologiche, composizionali e mineralogiche del materiale impiegato, dal suo grado di deidrossilazione, agglomerazione e superficie specifica; quest'ultime sono funzione del processo di produzione del metacaolino (temperatura di calcinazione e tipologia di forno) a partire da polveri caolinitiche. La deidrossilazione del caolino ha inizio generalmente a una temperatura appena superiore ai 500 °C dando origine al metacaolino, il quale è stabile tra i 600 e 900 °C. Questo processo, attivato termicamente, può essere di due tipi (intra- o inter- deidrossilazione) che portano rispettivamente alla formazione di metacaolino con alluminio in pentacoordinazione (Al(V)) o in coordinazione tetraivalente (Al(IV)), nel secondo caso quando si ha una deidrossilazione incompleta rimangono dei gruppi ossidrili legati all'alluminio che presenta numero di coordinazione VI (Figura 2.5) (Medri V. et al. 2010).

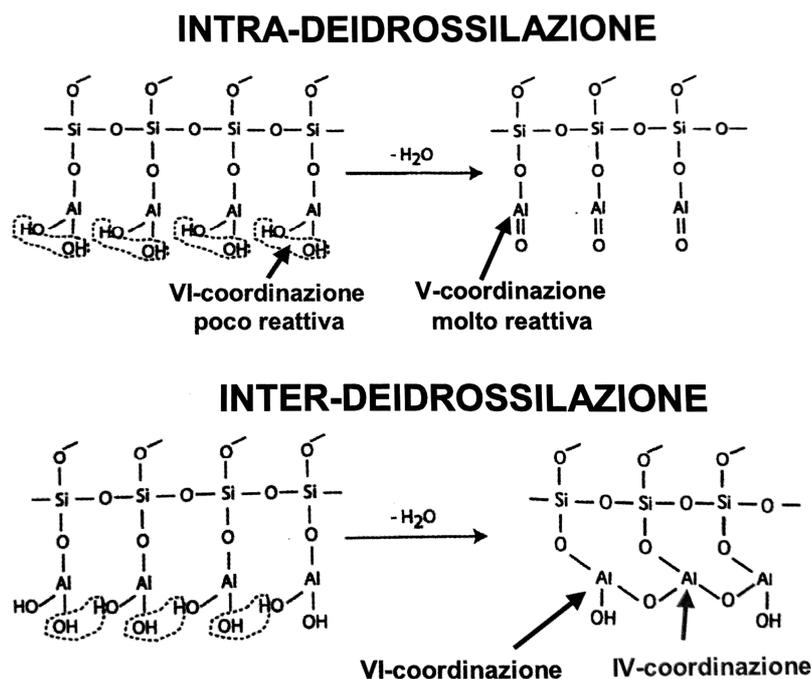


Figura 2.5: meccanismi di deidrossilazione durante il processo di calcinazione del caolino (Leonelli C. et al. 2011)

La massima reattività si raggiunge quando si ha prevalenza di alluminio in coordinazione V a temperature comprese tra 700 °C e 800 °C. Questa tipologia di polveri minerali viene generalmente utilizzata per applicazioni hightech o per impieghi ad alte temperature.

Un altro tipo di polveri reattive adoperate per la produzione di geopolimeri sono le pozzolane. Si originano naturalmente con le esplosioni vulcaniche si tratta infatti di piroclastiti sciolti. Presentano una granulometria variabile e possiedono fasi cristalline annegate in una struttura amorfa silicea. Se fatto reagire con acqua e calce, che permette il consolidamento, questo materiale presenta delle caratteristiche di un ottimo legante e possiede un certo grado di reattività in soluzione alcalina che ben si adatta al loro impiego nella produzione di geopolimeri (Van Jaarsveld J.G.S. et al. 2003,). La loro composizione dipende dal sito di origine ma in generale presentano un rapporto silice/allumina maggiore rispetto alle altre polveri per cui non sono utilizzate per la produzione di cemento ma sono comunque impiegate nel campo dell'edilizia (Bondar D. 2010, Allahverdi A. 2008, Kamseu E. 2009). Per aumentare la reattività di questo materiale sono

possibili alcuni trattamenti termici facendo attenzione a non aumentare le fasi cristalline.

La loppa d'altoforno invece è uno dei sottoprodotti nel processo di produzione della ghisa, principalmente di composizione calcio-alluminosilicatica. Per valorizzare la loppa d'altoforno e considerarla materiale di recupero occorre che acquisisca caratteristiche idrauliche adeguate. A tal fine se viene bruscamente raffreddata all'uscita dell'altoforno è possibile conferirle una struttura a granuli vetrosa, ottenendo silice amorfa. In seguito per aumentare la reattività si rende necessaria una macinatura molto fine. Si polverizza il materiale, altrimenti inerte, per aumentare la superficie specifica reagente ottenendo Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS). La composizione chimica dipende dal metallo raffinato ma è possibile definire alcuni range medi degli ossidi presenti (Tabella 2.4). Questa tipologia di polveri, la cui composizione chimica può essere leggermente modificata a seguito di trattamenti di affinazione, dà origine alla classe di geopolimeri denominata "alkali-activated slag cements" (Glukhovskiy V. D. et al. 1980).

Composizione media - ossidi	
%	
Al_2O_3	9 - 12
$Al_2O_3 + SiO_2$	44 - 47
Scorie	
CaO	35 - 45
MgO	5 - 15

Tabella 2.4. Composizione media di una loppa espressa in percentuali in peso. (Leonelli C. et al. 2011)

La calce (CaO) favorirebbe l'allontanamento dell'acqua in eccesso e il consolidamento ma occorre procedere con l'alcalinizzazione poiché presenta una bassa reattività polimerica. La fase vetrosa è formata da $Ca_2Al_2SiO_5$ (Gehlenite) e Ca_2MgSiO_5 (Akermatite) ma solo il primo è un ottimo precursore geopolimerico poiché il magnesio non è reattivo (Davidovits J. 2008).

Nelle centrali termoelettriche con la combustione del carbone sono prodotte le cosiddette ceneri volanti. Esse formano le particelle solide dei fumi di scarico. Questo pulviscolo si forma a temperature estremamente alte, circa 1400 °C, ed è costituito dalle impurità minerali presenti nel carbone (quarzo, pirite, argilla) che fuse durante la risalita del fumo subiscono un brusco raffreddamento formando una struttura amorfa. La composizione chimica delle ceneri varia in base al materiale utilizzato per la combustione ma genericamente la percentuale di silice varia tra 40% e 60% e l'allumina tra 20% e 30% insieme a queste anche il ferro è una componente importante della polvere, le percentuali dell'ossido variano tra 3% e 12%. Il contenuto di calce invece determina uno spartiacque tra le polveri cementizie e le polveri pozzolaniche rispettivamente se la percentuale di CaO è maggiore o minore del 20%.

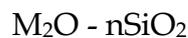
Oltre alle materie prime polverulente più conosciute e studiate sono sempre più concrete le sperimentazioni sulle polveri lapidee che derivano dalla segazione e finitura delle pietre ornamentali. Questi scarti lapidei risultano particolarmente adatti alla formulazione di geopolimeri. Le caratteristiche del prodotto dipendono dalla zona di provenienza e dagli utensili utilizzati ma si sono osservate caratteristiche simili o superiori ai tipici cementi Portland.

Quindi le materie prime particellari maggiormente utilizzate per la produzione di geopolimeri sono i metacaolini; seguono le ceneri di centrali elettriche a carbone e le scorie d'altoforno, con un'attenzione sempre più marcata verso i sottoprodotti dell'industria lapidea.

Le polveri però non hanno capacità di aggregazione occorre attivarle con apposite soluzioni alcaline. Gli attivatori comunemente impiegati sono generalmente idrossidi, solfati, carbonati e silicati alcalini. Alcuni esempi possono essere NaOH, KOH, silicati di sodio e potassio, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , Na_2SiO_4 e K_2SiO_4 o piccole quantità di clinker (Khale D. et al. 2007). Quelli maggiormente in uso con il metacaolino, sono silicati di sodio e potassio trattati in soluzione acquosa.

Le soluzioni sono prodotte tramite la dissociazione di silicati o materie ricche di silice tramite idrossidi alcalini.

Le soluzioni così ottenute sono poi filtrate e corrette in composizione per arrivare alle specifiche desiderate. I silicati alcalini in soluzione acquosa generalmente non hanno una stechiometria ben definita (derivano dalla combinazione di ossidi metalli alcalini e silice) e sono normalmente indicabili con la seguente formula generale:



dove: M=Na, K, Li, Cs; n = rapporto molare corrispondente al numero di moli di silice per mole di ossido di metallo alcalino. In base al rapporto molare viene modificata l'alcalinità della soluzione in modo inversamente proporzionale. È possibile variare tale rapporto con l'aggiunta degli idrossidi metallici corrispondenti.

In generale questi composti sono considerati come sostanze pericolose; sono numerose le normative anche internazionali di riferimento per il trattamento di tali materiali nei diversi campi di applicazione. Se tali soluzione però presentano concentrazioni basse, inferiori al 40% non sono più considerate come pericolose. Dal punto di vista ambientale i silicati solubili sono completamente ossidati e in soluzioni concentrate presentano un Ph elevato. Ma se dispersi in natura vengono rapidamente diluiti e reagendo con cationi metallici naturali formano silice amorfa o silicati insolubili, presenti normalmente in rocce e terreni.

Tra i fattori più importanti vi è anche il pH. Esso influenza la resistenza meccanica e il tempo richiesto per il loro indurimento. All'aumentare del pH il tempo necessario per il curing diminuisce ma aumenta la viscosità del materiale, rendendo più difficoltose le procedure di lavorazione (Phair J.W. et al. 2001).

È stato inoltre dimostrato che la dimensione del catione ha effetti inversi su alcune proprietà come la refrattarietà, idrolisi alcalina e resistenza meccanica. Al

diminuire della dimensione del catione cresce la capacità di dissoluzione delle polveri ma diminuisce la resistenza finale del prodotto geopolimerico (Kriven W.M. et al. 2003).

In fine alla miscela di preparazione dei geopolimeri è auspicabile l'utilizzo di cariche o additivi. La natura delle cariche può essere di sintesi o naturale, metallica, organica o inorganica ma le cariche più utilizzate sono le sabbie di natura silicea. Occorre controllare però che siano compatibili termicamente con la matrice così da evitare stress termici durante il processo di geopolimerizzazione.

L'utilizzo di queste cariche permette stabilità dimensionale, velocità di indurimento, e il miglioramento delle caratteristiche del geopolimero in funzione della funzionalità finale desiderata (Rowles M.R. et al. 2009).

Quindi la geopolimerizzazione non è una semplice reazione chimica ma è un insieme di processi. All'interno della miscela avviene la dissoluzione o idrolisi delle polveri allumino-silicate da parte della soluzione alcalina. Si rompono i legami covalenti Si-O-Si e Al-O-Si e si formano ioni OH⁻, che permettono l'unione in strutture policondensate. In base alle strutture molecolari delle polveri di partenza si hanno diversi gradi di dissoluzione ma è importante utilizzare materie prime di composizione prevalentemente amorfa, chimicamente più reagente rispetto alla fase cristallina. Infatti se la dissoluzione è completa per la porzione amorfa, comporta un'attivazione solamente superficiale per quella cristallina liberando solo alcuni tetraedri molecolari silico-alluminati. Durante questo processo è fondamentale che il pH sia il più possibile vicino a 14, così da ottenere un ambiente fortemente basico propedeutico per la riuscita del processo. Il controllo del pH permette inoltre di evitare concentrazioni di ioni H⁺, che in presenza di acqua e umidità possono scambiarsi con gli ioni positivi della soluzione aggiunta. Questa reazione può portare alla nascita e crescita di sforzi di trazione agli apici delle cricche fino a raggiungere la frattura. Simultaneamente avviene la condensazione della soluzione che porta alla formazione di complesse strutture tridimensionali geopolimeriche costituite da reticoli molecolari di

silicati e alluminati definiti come polysialati e polysilosso-sialati e polidisilosso-sialati. I gruppi molecolari sono elencati di seguito.

-Si-O-Al-O-	sialato	→ poli-(sialato)
-Si-O-Al-O-Si-O-	sialato-silosso	→ poli-(sialato-silosso)
-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	sialato-disilosso	→ poli-(sialato-disilosso)

Nello specifico, la struttura che si crea risulta formata da tetraedri di silicio ((SiO₄)⁴⁻) e di alluminio ((AlO₄)⁵⁻), dispersi in una matrice nano-porosa, che condividono tra loro gli atomi di ossigeno dei vertici. La microstruttura presenta alcune analogie con il vetro: sono presenti porzioni cristalline di dimensione variabile (in base ai leganti e ai processi termici utilizzati) disperse in una fase amorfa. Il reticolo molecolare dei geopolimeri però è molto più complesso. La porosità della struttura è inversamente proporzionale al rapporto Si/Al (Duxson P. et al. 2007): se il rapporto molare è pari all'unità il diametro dei pori varia tra il micrometro e 10 μm, per raggiungere ordini di grandezze nanometriche (5 nm) se il rapporto Si/Al è di 2.5. Per ogni tetraedro sarà presente una carica elettrica negativa in eccesso rispetto al corrispondente tetraedro di silice. Questa carica in eccesso può essere neutralizzata dallo ione positivo (generalmente Na⁺ o K⁺), presente nella soluzione alcalina. Li ioni positivi potrebbero però procedere alla carbonatazione e formare molecole di Na₂CO₃ e K₂CO₃ provocando la comparsa di stati tensionali deleteri per l'integrità del manufatto.

A queste due fasi segue un periodo di stagionatura. L'acqua residua si allontana dal manufatto che intanto si solidifica. Il processo avviene per capillarità conferita dai pori presenti all'interno, correlati direttamente alla rapporto tra silici e alluminio (Tabella 2.5). La quantità e le dimensioni di questi deve essere tenuta sotto controllo poiché si potrebbe incorrere in effetti negativi come zone a diversa densità, concentrazioni di tensioni e quindi la formazione di cricche e fessure. Per sopperire a queste criticità è possibile controllare temperature e condizioni di umidità dell'ambiente di stagionatura in modo tale da mantenerle su-

periori a quelle ambiente e rendere il curing meno impattante sulle proprietà del manufatto.

Rapporto molare Si/Al	Diametro dei pori
~ 1	1÷10 μm
~ 1,65	10 μm >
~ 2,5	~ 5 nm

Tabella 2.5: corrispondenza rapporto molare Si/Al con dimensione dei pori (Leonelli C. et al. 2011)

Sono stati osservati miglioramenti della resistenza a compressione al crescere della temperatura, fino a 100°C, limite oltre al quale la perdita dell'acqua è totale e quindi controproducente (Figura 2.6) (Satpute Manesh B. et al. 2012, Amar S. Byakodi et al. 2016).

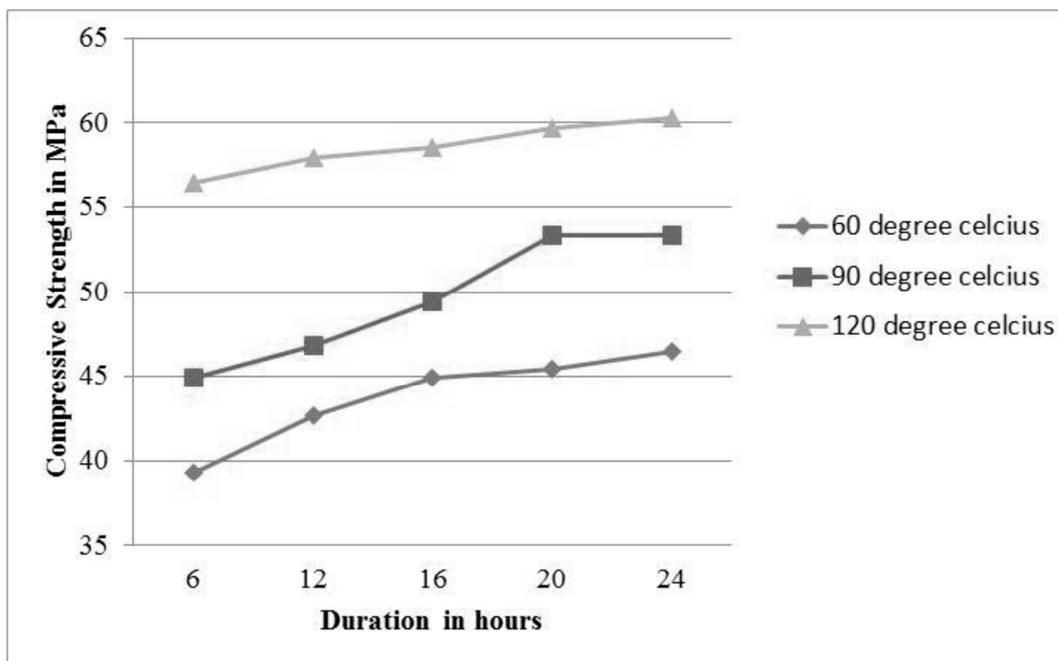


Figura 2.6: effetti della temperatura di stagionatura sulla resistenza a compressione (Satpute Manesh B. et al. 2012)

Nella Figura 2.7 è riportato lo schema del processo di geopolimerizzazione.

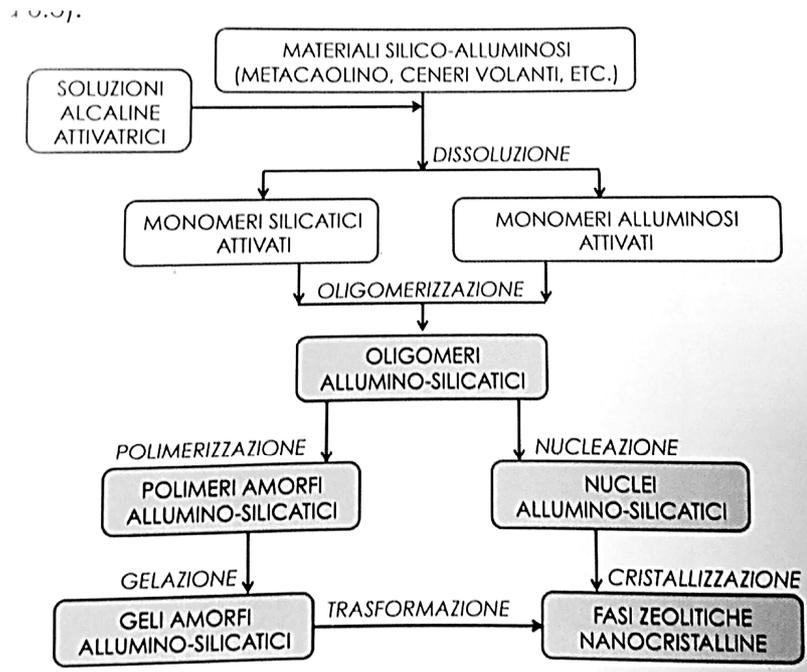


Figura 2.7: processo di geopolimerizzazione schematizzato (Leonelli C. et al. 2011)

2.3.3. Proprietà e applicazioni dei geopolimeri

Le proprietà e le caratteristiche dei geopolimeri dipendono da molte più variabili e parametri rispetto ai comuni cementi e sebbene in letteratura si possano trovare diversi studi di differenti formulazioni geopolimeriche non esistono ancora specifiche standar che definiscano una corrispondenza biunivoca tra proprietà e mix design. Le formulazioni e i metodi di formatura infatti sono progettati in base alla destinazione d'uso in modo tale da conferire al materiale le caratteristiche adatte. I geopolimeri in generale presentano le seguenti proprietà indipendenti tra loro:

- Periodo di presa e maturazione estremamente ridotti con elevata resistenza a compressione anche in tempi brevi dopo la formatura (García-Lodeiro I et al. 2007);
- Ottima resistenza al fuoco, bassi valori di conducibilità termica (Bell J. L. et al. 2005);

- Inerti alle azioni chimiche con capacità protettive dei rinforzi in acciaio per la bassa velocità di diffusione e dei cloruri pH elevato (Miranda J. M. et al. 2005 et Muntingh Y. Et al. 2006);
- Caratteristiche di buona adesione a calcestruzzo vecchio e nuovo, vetri, ceramiche e acciaio (Wachtman J.B. 1996).

Più in particolare se ci si riferisce alle proprietà meccaniche occorre fare un appunto. A oggi non esistono ancora normative, procedure e metodi di prova standard a cui fare riferimento per la caratterizzazione di nuovi materiali come i geopolimeri. In ogni caso per pensare a campi di applicazione strutturali è necessario indagare la resistenza meccanica del materiale quindi prendere in considerazione il comportamento a trazione, a compressione e a flessione, elastico e a frattura. La via percorribile è quella di sfruttare le analogie con i materiali esistenti il cui utilizzo è ormai consolidato e seguire le norme a essi associate. È infatti possibile osservare affinità tra geopolimeri e cementi per processo produttivo e maturazione, tra geopolimeri e ceramici per la microstruttura e la porosità del materiale.

Per la determinazione della resistenza a compressione e trazione caratteristica è possibile fare riferimento alle norme relative al calcestruzzo. La prova normalizzata per la definizione della resistenza a compressione comprende l'applicazione di un carico assiale su un provino cilindrico o trapezoidale a base quadrata fino al raggiungimento della rottura. La resistenza a compressione è calcolata come la forza applicata diviso l'area della base del provino. Sono stati fatti studi sulle differenti risposte dei geopolimeri in base al rapporto Si/Al. Si è notato come inizialmente al crescere di tale rapporto la resistenza a compressione cresca fino a un massimo (Si/Al circa uguale a 2.50) per poi diminuire (Figura 2.8).

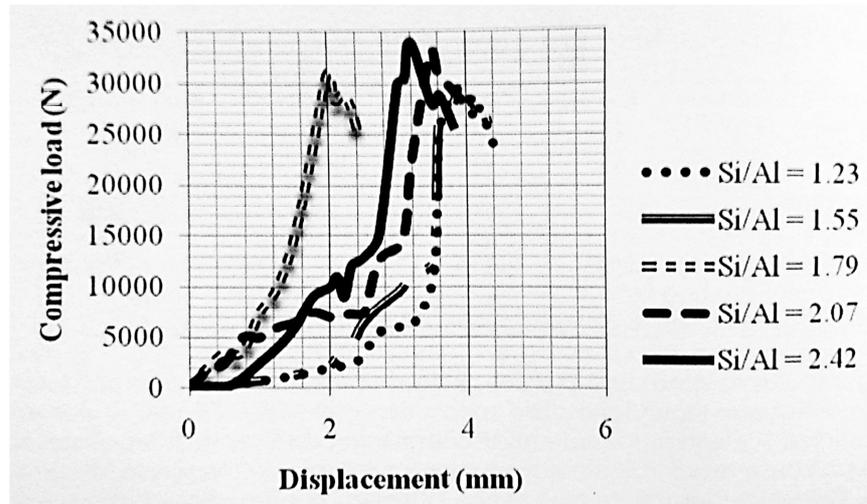


Figura 2.8: variazione resistenza a compressione in funzione del rapporto molare Si/Al (Leonelli C. et al. 2011)

Alcuni studi eseguiti su geopolimeri di diversa composizione hanno osservato un aumento della resistenza meccanica nei geopolimeri con maggior apporto di silicio presente nelle soluzioni alcaline (Duxson P. et al. 2007). I valori riportati nella Figura 2.9 mostrano la variazione della resistenza a compressione per alcuni provini maturati a 7 giorni. Il range è molto ampio si passa infatti da 20 MPa per i rapporti molari più bassi per raggiungere fino a 100 MPa per rapporti molari di Si/Al pari circa a 2.

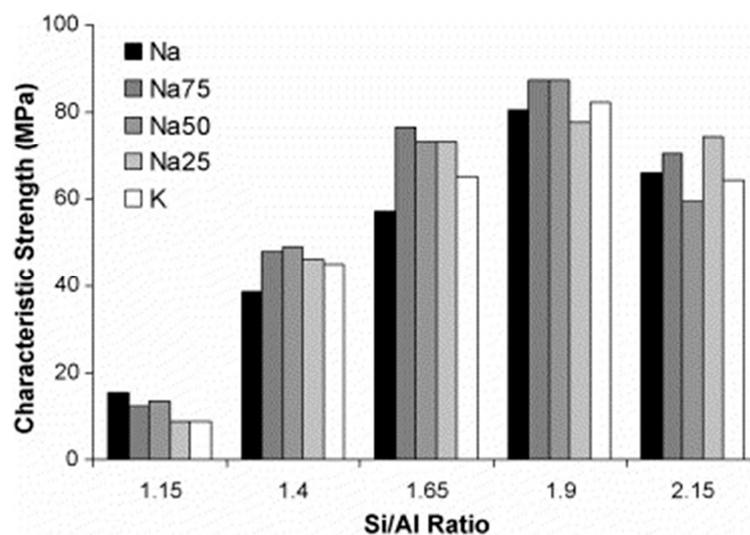


Figura 2.9: variazione resistenza meccanica in funzione del rapporto molare Si/Al (Duxson P. et al. 2007)

L'incremento delle proprietà meccaniche è dettato dall'aumento volumetrico del gel polimerico all'interno della miscela il quale comporta una maggiore

omogeneità delle caratteristiche microstrutturali. Quindi sono i processi che si instaurano durante il processo di sintesi a determinare la resistenza del materiale per cui prove di resistenza a flessione e compressione in test per valutare il grado di polimerizzazione e il livello di crosslinking. Il rapporto Si/Al non è l'unica variabile da osservare, concorrono a definire la resistenza del materiale anche le percentuali di CaO e K₂O e la tipologia di soluzione alcalina. Aumentando la concentrazione di idrossido di sodio si osserva anche un aumento delle caratteristiche meccaniche, dovuto probabilmente a una maggior dissoluzione delle particelle delle polveri e a un'accelerazione della condensazione (Xu H. 2001).

Altri studi hanno condotto le medesime prove di compressione variando la densità del materiale. Sono risultati valori di resistenza a compressione simili a quelli riportati precedentemente, compresi tra 28 MPa e 128 MPa. (Duxson P. e al. 2005).

Per la resistenza a trazione la prova corrispondente è la prova su 3 o 4 punti. Tale prova permette di indurre nei provini uno stato di compressione e uno di trazione separate dell'asse neutro. La prova si conclude con la frattura del provino dalla parte del lato teso. Misurando il carico applicato P per portare a rottura il manufatto è possibile definire la tensione massima σ_{max} corrispondente alla resistenza massima a trazione. I valori riportati in letteratura variano tra 5 MPa e 14 MPa (Duxson P. e al. 2005).

Attraverso la prova a flessione è possibile ricavare un altro parametro fondamentale: il modulo di Young. Occorre misurare lo spostamento della parte centrale del provino (freccia) sotto l'applicazione di un carico noto. Attraverso tale modulo è possibile descrivere la relazione tra sforzi e deformazioni nel campo elastico. Il carico P corrispondente alla tensione massima di rottura definito precedentemente. Si tratta di materiali fragili e questo comportamento è evidente nella Figura 2.10, dove sono riportati i risultati di una prova a flessione su 3 punti per geopolimeri preparati a partire da una diversa composizione chimica

(rapporto Si/Al). Sull'asse delle ascisse sono riportati valori degli spostamenti in relazione allo sforzo applicato. Il comportamento elastico del materiale è evidente, i digrammi presentano un andamento pressoché lineare fino al raggiungimento dello sforzo massimo senza presentare una zona a comportamento plastico.

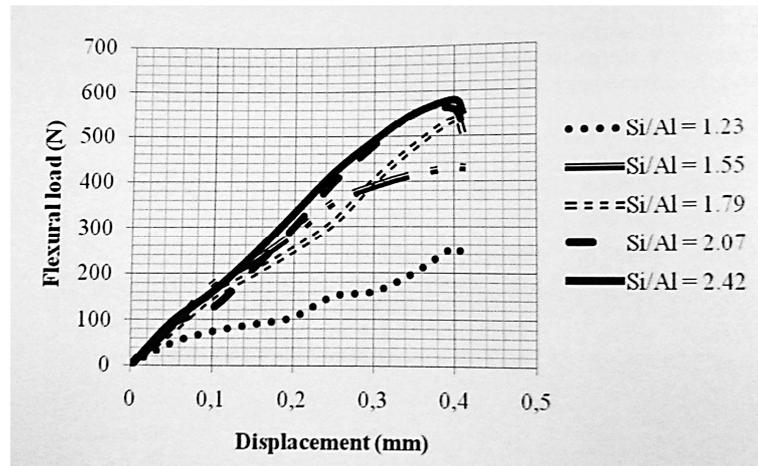


Figura 2.10: comportamento elastico dei geopolimeri nella prova a flessione su 3 punti (Leonelli C. et al. 2011)

Le differenti pendenze sono in funzione del diverso apporto di silicio della soluzione alcalina e se si osserva la Figura 2.11 è possibile notare un'analogia con l'andamento della resistenza a compressione.

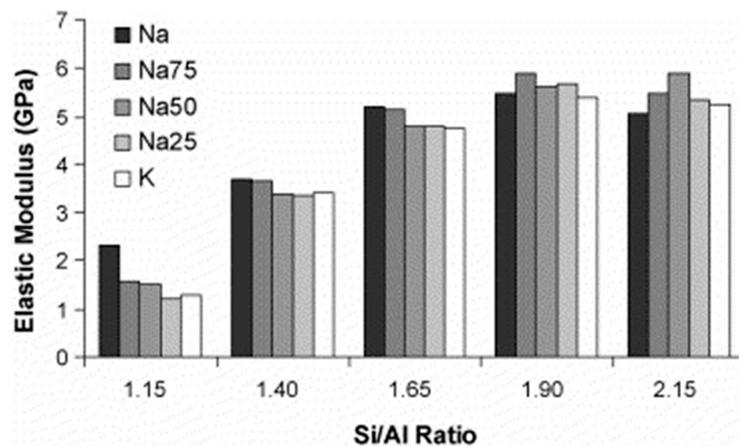


Figura 2.11: variazione modulo elastico in funzione del rapporto molare Si/Al (Duxson P. et al. 2007)

Un ulteriore problema da affrontare è quello della durabilità delle proprietà meccaniche e chimiche del materiale nell'arco di tempo di impiego. Non sono presenti ancora molti studi volti a questa tematica ma si è osservato come i geo-

polimeri siano più inerti agli attacchi chimici rispetto ai comuni cementi Portland (Figura 2.12).

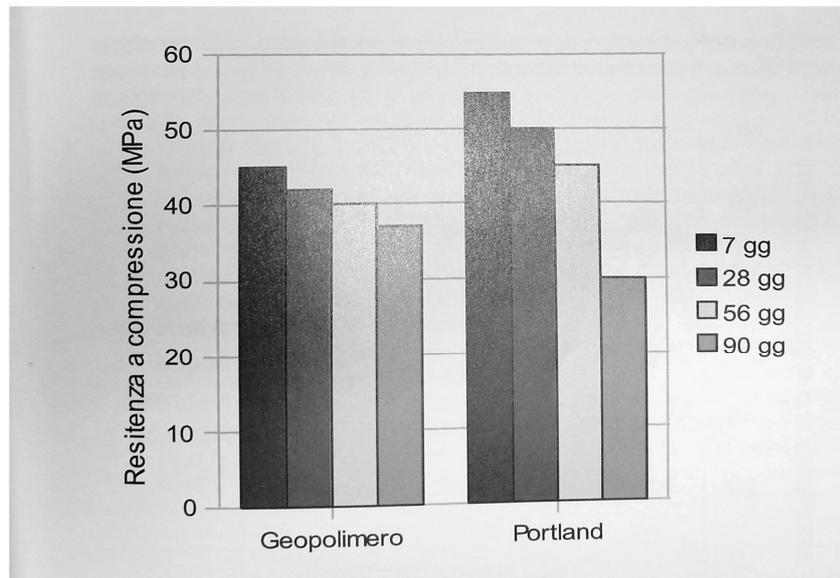


Figura 2.12: variazione resistenza a compressione, confronto tra geopolimeri e cemento Portland (Leonelli C. et al. 2011)

Più precisamente sono stati svolti sperimentazioni con le quali si potesse osservare il degrado del materiale se immerso in ambienti marini, acidi e contenenti solfati. In un'atmosfera marina si è osservato un piccolo aumento della porosità dovuta alla sostituzione degli ioni Na con ioni Mg, mentre in ambienti fortemente acidi si osserva una riduzione in peso. Tutte conseguenze che portano a una diminuzione delle resistenze meccaniche che rimangono però su valori maggiori rispetto a cementi trattati nelle stesse condizioni.

In generale dati i risultati dei diversi studi si evince come i geopolimeri possano essere considerati dei materiali con buon comportamento a lungo termine per le proprie caratteristiche di tenacità a frattura, durabilità e resistenza meccanica, inoltre se li si confronta con altri materiali da costruzione è possibile arrivare alle conclusioni schematizzate nella Figura 2.13.

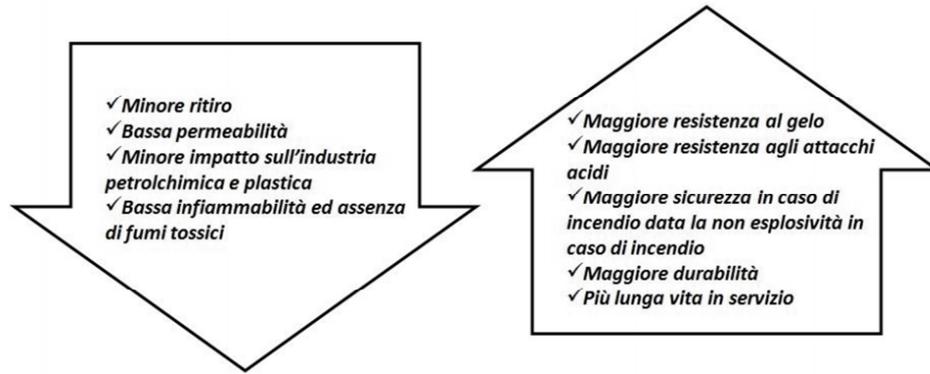


Figura 2.13: confronto tra proprietà dei geopolimeri e altri materiali da costruzione (Leonelli C. et al. 2011)

Le prime applicazioni dei geopolimeri risalgono agli anni '70, in particolare per sfruttare le proprietà termiche o per la realizzazione di impianti fognari essendo maggiormente inerti agli attacchi chimici. Oggi, date le diverse peculiarità di questo materiale, migliorabili per altro variando la composizione chimica per favorire lo sviluppo di una caratteristica piuttosto che un'altra, il campo di applicazione dei geopolimeri risulta potenzialmente molto vasto (Davidovits J. 1991).

Un modo per definire nello specifico un'utile utilizzo del materiale è quello di confrontare le sue caratteristiche con materiali noti e in tal senso possono essere utilizzati i diagrammi di Ashby che collocano i geopolimeri tra i cementi, i compositi a base polimerica e i ceramici non tecnici in base alla densità, porosità, resistenza a compressione, modulo elastico e comportamento a frattura.

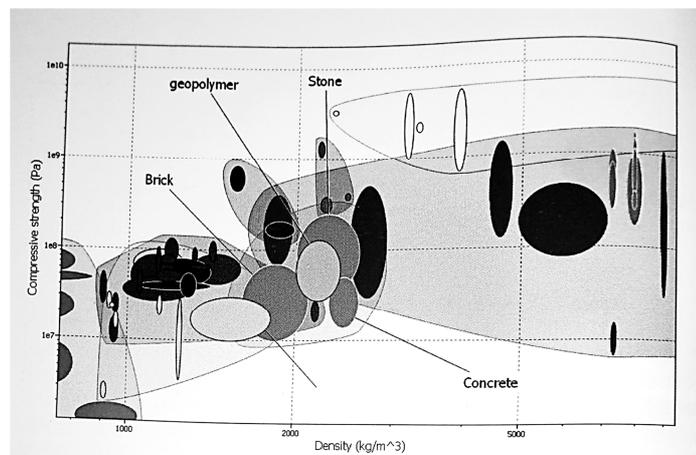


Figura 2.14: esempio diagramma di Ashby, densità/resistenza a compressione (Leonelli C. et al. 2011)

Il campo dell'edilizia risulta quello in cui i geopolimeri sono adoperati maggiormente, anche se, rispetto ad altri, è molto più recente. L'utilizzo di questo materiale nell'edilizia risale ai primi anni del 1990 (Wastiels J. Et al. 1993). Tuttavia lo sfruttamento di questa risorsa in Europa non è ancora così affermato come in altri stati come gli USA e l'Australia, dove i geopolimeri sono utilizzate in modo sistematico per ristrutturare e risanare le infrastrutture (J.S.J. Van Deventer et al. 2013).

Da annoverare nella storia vi è il cemento Pyrament®. Fu sviluppato da una nota compagnia cementizia americana, la Lone Star Industries, nell'ultimo decennio del XX secolo. Venne studiato per far fronte alle necessità tempistiche, durante la Guerra nel Golfo. Era necessario infatti costruire nuove basi aeree temporanee per l'aviazione militare. Il cemento in questione era formato da una parte di comune cemento Portland e una parte di geopolimero cementizio. La sua peculiarità era la presa rapida. In poche ore dopo il getto, la pista era in grado di accogliere i primi aerei e resistere alle azioni causati da essi.

In Australia invece per un uso civile (marciapiedi o sentieri, elementi prefabbricati, barriere acustiche...) venne prodotto il cemento E-Crete™, a base di geopolimeri derivanti da fly-ash senza più l'utilizzo del cemento comune.

I geopolimeri hanno inoltre trovato impiego non solo come materiale cementizio ma sono stati sviluppati anche materiali compositi e per certi aspetti presentano maggiori norme di riferimento che ne governano processi di produzioni e modalità di impiego. Alcuni esempi applicativi, riguardano i compositi fibrorinforzati (Externally Bonded - Fiber Reinforced Polymer, EB-FRP) applicati esternamente per opere di ripristino di strutture già esistenti (Krivenko P.V. 2010 et Wang H. et al. 2005). Oppure sul mercato è possibile trovare prodotti come gli Eco-Panel Insulpor, formati da un impasto geopolimerico al cui interno sono disperse sfere derivanti da trattamenti granulazione di vetro macinato in polvere fine. Oppure i prodotti della Banah Cem (UK) che consistono in diverse combinazioni multilayer formati da geopolimeri e materiali isolanti.

Ma l'esempio più importante di applicazione dei geopolimeri nell'industria delle costruzioni riguarda la struttura del Global Change Institute (GCI), costruita nel 2013 a Brisbane (Australia). È il primo edificio al mondo ad aver utilizzato il calcestruzzo a base geopolimerica nella realizzazione delle sue 33 travi prefabbricate. Il cemento utilizzato per il getto è denominato Earth Friendly Concrete (EFC), brevettato dalla compagnia cementizia Wagners ed è a base di ceneri volanti e scorie d'altoforno con aggiunta di sabbia e aggregati.

Le ultime frontiere di studio per altre applicazioni in questo settore riguardano soprattutto la tematica del raffreddamento naturale degli edifici, per la quale sono tuttora oggetto di studio numerose formulazioni geopolimeriche.

**3. PROVE SPERIMENTALI IN LABORATORIO: CON-
DUCIBILITA', MODULO ELASTICO DINAMICO E
STATICO**

3.1. Descrizione generale piano sperimentale

La sperimentazione ha riguardato lo studio dei parametri di conducibilità (conduttività) e resistenza termica del materiale geopolimerico prodotto a partire da una miscela di polvere lapidea e soluzioni alcaline sodiosilicate, da confrontare, in seguito con i parametri termici del calcestruzzo utilizzato nella galleria del nuovo tratto della galleria della metro di Torino.

Per raggiungere tali risultati è stata utilizzata una piastra calda o termoflussimetro con anello di controllo per cui sono stati prodotti un campione a base cementizia e a base geopolimerica di dimensioni 50 cm x 50 cm x 5 cm.

I campioni relativi al calcestruzzo sono stati direttamente confezionati dall'azienda incaricata per la produzione dei conci di galleria della Metro. Invece i campioni di geopolimeri sono stati autoprodotti nei laboratori del dipartimento di Ingegneria Chimica e di Architettura Tecnica del Politecnico di Torino.

A completamento del progetto sono state svolte alcune prove meccaniche delle diverse miscele all'interno del dipartimento Ingegneria DISEG. In particolare è stata studiata la resistenza meccanica con la MTS e il modulo di elasticità dinamico con la prova ad ultra suoni.

È possibile consultare negli allegati il diario di laboratorio che riporta date, tempistiche e alcune indicazioni delle lavorazioni svolte all'interno dei laboratori del Politecnico (Allegato 1).

3.2. Preparazione campione a base cementizia

Il campione a base cementizia delle dimensioni 50x50x5 (cm) è stato prodotto con la stessa miscela del calcestruzzo utilizzato per la produzione dei conci della metro di Torino.

È stato possibile avvalersi della disponibilità e dell'aiuto dell'azienda incarica del confezionamento dei conci della galleria della metro: Generali Prefabbricati S.p.a., leader nella produzione di solai alveolari estrusi Spiroll e di componenti prefabbricati in c.a. e c.a. precompressi con presenza su tutto il territorio italiano.

In Allegato 2 è possibile visionare la scheda tecnica direttamente fornita dall'azienda, mentre in Figura 3.1 sono rappresentati i campioni.



Figura 3.1: campioni di cemento (foto autoprodotta)

3.3. Preparazione campione geopolimerico a base di polvere lapidea

3.3.1. Costruzione cassero

Per la produzione dei campioni geopolimerici da testare con il flussimetro si è resa necessaria la costruzione di un cassero di dimensioni adatte.

Le dimensioni del cassero sono state studiate in modo tale che permettesse il confezionamento di provini con dimensione netta del foro pari a 50 x 50 x 5 (cm) e allo stesso tempo il proprio ingombro non superasse le dimensioni massime di carico della camera climatica. Si è passati così dal prototipo 1 al prototipo 2. Per garantire la rigidità e resistenza adeguate per evitare la deformazione dovute alle spinte del materiale gettato, sono state adoperate staffe angolari, prime disposte agli angoli e poi incastrate ai lati sotto la base rispettivamente al modello 1 e 2 (Figura 3.2). Con lo stesso fine sono stati inseriti altri rinforzi sui lati rimanti.



Figura 3.2: cassero per campione geopolimerico, prototipo 1 a sinistra e prototipo 2 a destra (foto autoprodotte)

La struttura finale del cassero è formata da una base quadrata e listelli di OSB spessi 1,2 cm. Sulle quattro pareti del cassero è stato fatto aderire uno strato di plastica estruso spesso 0,5 cm, questo per evitare il diretto contatto tra il truciolo del legno e la miscela di geopolimero. Alla base, invece, inizialmente era

stato disposto un film in polietilene, successivamente sostituito da una lastra di compensato, sottile 0.4 cm, avvolta nel cellofan, con il fine di rendere la superficie più resistente, liscia e meno aderente. Il prototipo definitivo del cassero è rappresentato in Figura 3.3.

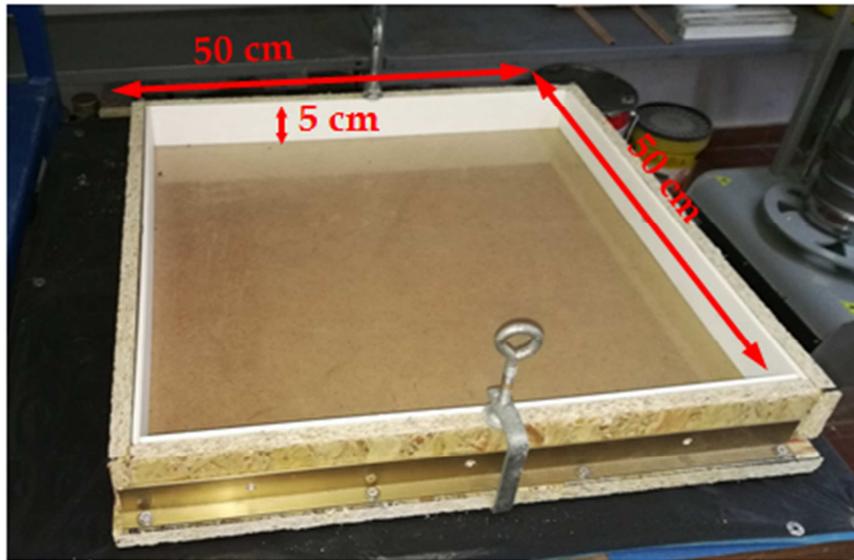


Figura 3.3: cassero per campione geopolimerico, progetto definitivo (foto autoprodotta)

3.3.2. Composizione percentuale di base

Per la preparazione della malta geopolimerica si è partiti da una composizione base studiata nel progetto di tesi di Ghiotti Stefano, per lo studio di possibili rimpieghi degli scarti di lavorazione di pietre ornamentali per formulazioni geopolimeriche (Palmero P. et al. 2017). Nella Tabella 3.1 sono riportate le percentuali delle componenti liquidi e solide.

	Componenti	Frazione in peso
Fase liquida	NaOH	3%
	Sol. Sodio silicato	14%
Fase solida	Loppa	16%
	Fanghi CSL	16%
	Sabbia	50%

Tabella 3.1: percentuali composizione malta geopolimerica (Ghiotti S. 2017)

3.3.2.1. Fase solida

Tra le percentuali della fase solida si fa riferimento alla loppa d'altoforno. Viene prodotto come materiale di scarto durante i processi di produzione della ghisa. Questo materiale appartiene alla categoria dei materiali pozzolanici a comportamento idraulico. Tali proprietà vengono conferite alla loppa solo se, al momento dell'uscita dall'altoforno, viene raffreddata rapidamente per evitare la formazione di un reticolo cristallino ordinato. Occorre in seguito macinarla adeguatamente per raggiungere una finezza simile alla polvere dei comuni cementi (Tonelli M. 1997). Nella composizione geopolimerica del progetto di tesi attuale, però, non è stata considerata e sostituita interamente con polvere di fango lapideo.

I fanghi CSL (Centro Servizio Lapideo di Verbano-Cusio-Ossola) fanno riferimento alla polvere lapidea rappresa ed essiccata dopo le lavorazioni di finitura di pietre principalmente silicatiche e carbonatiche. La formazione di tali fanghi è dovuta all'acqua utilizzata per il raffreddamento e la lubrificazione durante i tagli e le levigazioni di pietre e marmi che si miscela con la polvere residua. Rapprendendosi è possibile recuperare conglomerati fangosi come indicato in Figura 3.4.



Figura 3.4: conglomerato fangoso a base di polvere lapidea (foto autoprodotta)

Per poter adoperare tale materiale è stato necessario un'azione di sgretolamento e macinazione al fine di riottenere la polvere lapidea con granulometria inferiore ai 125 μm . Purtroppo il materiale presentava ancora un grado di umidità troppo elevato per rendere le operazioni di polverizzazioni immediate. Si è proceduto di conseguenza a una rottura e frantumazione dell'agglomerato grossolano. In seguito, disponendo il materiale su una superficie più ampia (Figura 3.5), è stata favorita l'evaporazione naturale dell'acqua ancora presente.



Figura 3.5: fase di essiccazione del materiale lapidea (foto autoprodotta)

Dopo un periodo corrispondente a circa 3 settimane si è passati a setacciare la polvere ormai asciutta. Con riferimento serie di setacci UNI è stato raccolto il passante allo staccio con aperture di 125 μm (Figura 3.6).



Figura 3.6: polvere lapidea fine inferiore a 125 μm (foto autoprodotta)

Studi e analisi precedenti a questo progetto di tesi hanno permesso di determinare la granulometria e la composizione chimica del materiale. Di seguito è riportato lo spettro di diffrazione derivante dall'analisi a raggi XRF (X-Ray Fluorescence) (Figura 3.7 e Tabella 3.2).

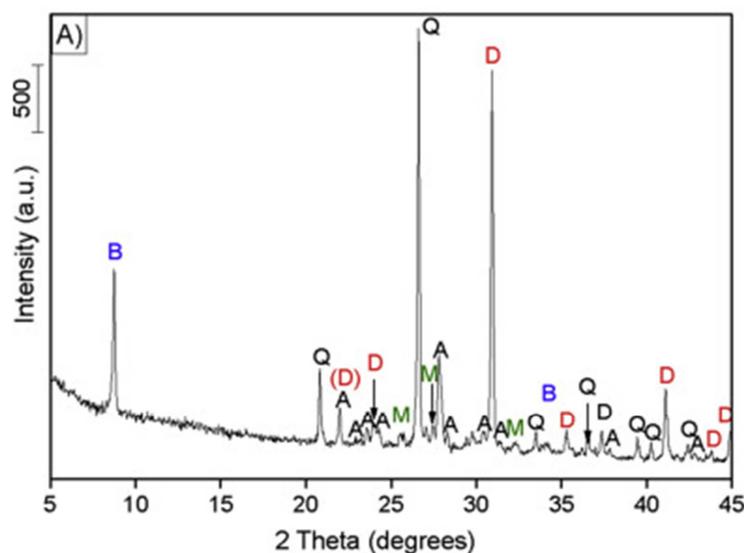


Figura 3.7: spettro a diffrazione, analisi XRF (Palmero P. 2017)

Ossido	% in peso	Fase	Formula chimica	% in peso
SiO ₂	36.50%	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	31.70%
CaO	12.30%	Albite	Na[AlSi ₃ O ₈]	26.70%
Al ₂ O ₃	8.84%	Quarzo	SiO ₂	15.80%
MgO	7.27%	Biotite	K(Fe,Mg,Ti) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	17.80%
Fe ₂ O ₃	3.13%	Leucite	K[AlSi ₂ O ₆]	7.90%
K ₂ O	2.25%			
Na ₂ O	1.20%			
TiO ₂	0.62%			
MnO	0.11%			
P ₂ O ₅	0.09%			
SO ₃	0.12%			
Altri metalli*	0.53%			
CO ₂	27.00%			
Total	99.96%			

*Tracce di Ba, Sr, Zr, Rb, Cu, Ni, Zn

Tabella 3.2: percentuali in peso di componenti ossidi e mineralogici del fango CSL (Palmero P. 2017)

Relative allo stesso progetto di tesi sono riportati anche i risultati dello studio della curva granulometrica attraverso analisi FE-SEM (Field Emission - Scanning Electron Microscope) (Figura 3.8), da cui si evincono i valori percentuali della frequenza cumulativa in volume pari a 10%, 50% e il 90% relativi ai diametri 2, 17 e 60 μm .

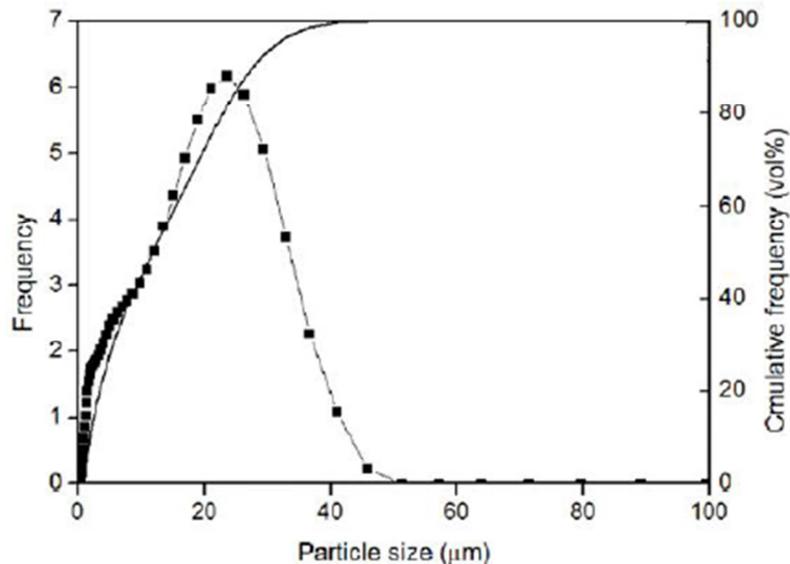


Figura 3.8: curva granulometrica, polveri lapidee (Palmero P. 2017)

Facendo sempre riferimento alla Tabella 3.1, come aggregato solido sono state impiegate le diverse sabbie presenti in laboratorio seguendo un piano sperimentale per risolvere, come spiegato in seguito, alcune problematiche relative al confezionamento dei campioni.

Sono riportati di seguito le procedure dello studio granulometrico e il calcolo del volume dei vuoti apparenti relativi alle sabbie utilizzate nella varie fasi della sperimentazione, che hanno portato ai risultati raccolti nell'Allegato 3. La distribuzione granulometrica è misurata mediante setacciatura. La norma di riferimento è la UNI EN 933-1. Attraverso l'utilizzo di una serie di setacci con aperture delle maglie decrescenti, è possibile dividere un aggregato in numerose classi granulometriche. La combinazione tra numero di setacci e grandezza delle maglie è definita in funzione della natura del campione e accuratezza richiesta, in conformità con la normativa di riferimento UNI EN 933-2. Per ottenere

un campione rappresentativo occorre eseguire prelievi in numero e posizione rispetto al cumulo adeguati. Per ogni classe di sabbia utilizzato si è deciso di eseguire 3 prelievi: il primo nella zona superficiale del cumulo, il secondo in mezzaria e il terzo al fondo; i risultati in seguito sono stati mediati in modo tale da ottenere un dato privo di errori dovuti eterogeneità o fenomeni di sedimentazione. Prelevato un campione globale di materiale si è proceduto tecnica della quartatura (norma UNI EN 932-2) per estrarne un sottocampione da analizzare (Figura 3.9).



Figura 3.9: procedimento della quartatura (foto autoprodotte)

Si è disposto il campione di partenza sul piano di lavoro e lo si è mescolato per formare un cono rovescio. Successivamente si rovescia formando un nuovo co-

no. Dopo aver ripetuto questa procedura per 3 volte, si appiattisce il cono ottenuto fino a formare un cerchio piatto che abbia diametro e spessore uniformi. Il mucchietto così ottenuto è diviso in quattro parti lungo due diagonali perpendicolari. Si scartano una coppia di quarti opposti e si riunisce il materiale rimanente in un nuovo mucchietto. L'operazione della quartatura deve essere effettuata fino a che non si raggiunge il quantitativo di materiale definito dall'UNI EN 933-1, la quale riporta la Tabella 3.3 indicante la massa minima del campione da testare in funzione della dimensione massima dell'aggregato.

Dimensione massima dell'aggregato D mm	Massa della porzione di prova (minimo) kg
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Nota 1 - Per gli aggregati di altre dimensioni, la massa minima della porzione di prova può essere ricavata dalle masse indicate nel prospetto 1.

Nota 2 - Se la massa della porzione di prova non è conforme alle indicazioni del prospetto 1, la distribuzione granulometrica ottenuta non sarà conforme alla presente norma e ciò deve figurare nel resoconto di prova.

Nota 3 - Per gli aggregati di massa volumica reale minore di $2,00 \text{ Mg/m}^3$ o maggiore di $3,00 \text{ Mg/m}^3$ (vedere prEN 1097-6) deve essere apportata una correzione appropriata alle masse della porzione di prova date nel prospetto 1, sulla base del rapporto delle masse volumiche, al fine di ottenere una porzione di prova di volume approssimativamente uguale a quello degli aggregati di normale massa volumica.

Tabella 3.3: masse proporzionali al diametro massimo dell'aggregato, analisi granulometrica (norma UNI EN 933-2)

Si procede quindi alla pesatura del preparato da disporre nel setaccio superiore della serie. Successivamente si dispone la serie nell'agitatore che, con movimenti rotatori e vibrazioni verticali, permette un'agitazione uniforme e continua. Successivamente, partendo dall'alto, viene misurata la massa di materiale trattenuto per ogni setaccio e il quantitativo passante all'ultimo setaccio con le aperture più piccole. Per verificare la validità della prova la differenza tra i valori della massa iniziale versata nei setacci e la somma dei trattenuti parziali non deve superare il punto percentuale. La Tabella 3.4 mostra i risultati positivi ottenuti.

Classe Sabbiosa	Massa iniziale	Massa finale	Errore percentuale
FG3g	584	583.76	0.04%
	541.1	540.78	0.06%
	572.39	571.66	0.13%
FG3f	537.4	532.73	0.87%
	548.83	546.89	0.35%
	566.2	565.66	0.10%
FG4	448.3	447.34	0.21%
	534.68	534.3	0.07%
	504.83	504.7	0.03%

Tabella 3.4: confronto massa iniziale inserito e somma dei trattenuti parziali

Per determinare la curva granulometrica dei passanti percentuali occorre prima calcolare il trattenuto percentuale rispetto al peso totale applicando la seguente equazione

$$T_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^N P_i = P_{tot}} \cdot 100$$

Eq. 24

Calcolato il trattenuto parziale per ogni setaccio si passa a calcolare il trattenuto percentuale cumulato

$$TC_i = \frac{\sum_{i=1}^j P_i}{P_{tot}} \cdot 100$$

Eq. 25

Al numeratore è indicata la somma dei trattenuti dei setacci fino al setaccio j-esimo. Sottraendo al 100% il trattenuto cumulato è quindi possibile calcolare il passante percentuale

$$TC_i = 100 - TC_i$$

Eq. 26

Questo è il dato che viene solitamente rappresentato graficamente ed è definito come curva granulometrica dell'aggregato (Figura 3.10).

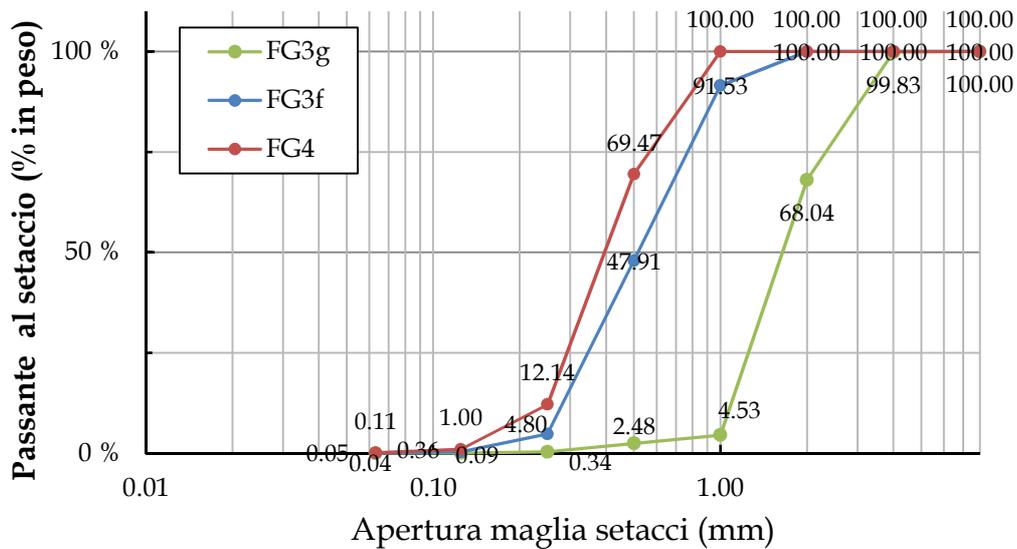


Figura 3.10: passanti percentuali, sabbie FG3g, FG3f e FG4

In seguito è stato calcolato il volume dei vuoti apparenti al fine di verificare che gli apporti di polvere fine lapidea e di soluzione liquida fossero ideali. La soluzione infatti oltre a idratare gli aggregati in modo adeguato per favorire la sintesi geopolimerica deve riempire le cavità rendendo il materiale compatto ma allo stesso tempo non eccedere in maniera significativa. Esaminando invece solamente la fase solida si considera la polvere come filler che va a colmare i vuoti tra gli aggregati sabbiosi, una percentuale differente potrebbe portare a una diminuzione della compattezza del campione come indicato in Figura 3.11 (de Larrard F. 1999).

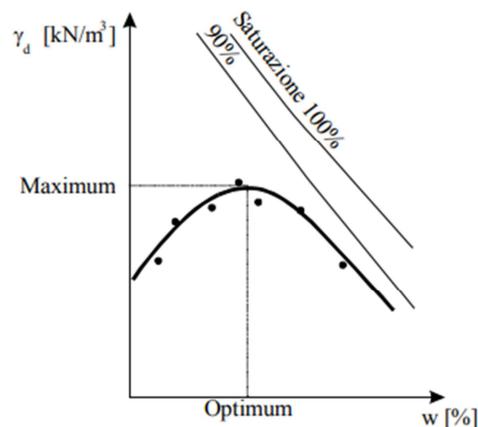


Figura 3.11: curva costipamento in funzione dell'apporto lapideo

Ipotizzando l'utilizzo di un mix design binario, in base al rapporto di aggregati fini e grossolani, si passa da una composizione grossolana dominante a una fine dominante. Nel primo caso la percentuale minima dei vuoti raggiungibile corrisponde a 25,95 %. Tale valore deriva dalla modellazione degli aggregati con sfere rigide monodimensionali (Abdel-Jawad Y.A. et al. 2002) ed è del tutto teorico poiché le particelle, pur essendo appartenenti alla stessa classe granulometrica, per loro natura non sono affatto sferiche, presentano dimensioni simili ma differenti e la compattazione completamente casuale. Nel secondo caso estremo, i cui si ha dominanza di aggregati fini, la riduzione della compattezza è dovuto alla riduzione del volume solido totale. In definitiva la compattezza maggiore si ha con valori centrali per i quali i grani fini riescono a riempire i vuoti formati dai grani più grossi senza determinarne un eccessivo allontanamento.

In laboratorio la procedura per il calcolo del volume dei vuoti apparente ha seguito la normativa UNI EN 1097-3. Le masse utilizzate fanno riferimento alle masse finali derivate dalla setacciatura. Quindi gli aggregati vengono inseriti in un cilindro graduato e successivamente compattati raggiungendo circa 300 ml di volume occupato. Versando acqua all'interno del contenitore dopo circa 2 ore di attesa i vuoti si irrorano tra i grani e misurato il nuovo peso. Calcolando la massa di H₂O introdotta si determina il volume da essa occupata e lo si considera pari a quello dei vuoti. Come indicato nelle seguenti equazioni.

$$m_{H_2O} = m_{umd} - m_{sec} - m_{tara}$$

Eq. 27

$$V_v = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}$$

Eq. 28

Rapportando i dati trovati con il volume iniziale degli aggregati è possibile calcolare il volume in percentuale dei vuoti.

$$\%V_v = \frac{V_v}{V_{agg}} \cdot 100$$

Eq. 29

I dati sono raccolti nell'Allegato 3.

3.3.2.2. Fase liquida

Per quanto riguarda la fase liquida ci si riferisce alla soluzione attivante necessaria per la geopolimerizzazione. In particolare per ogni miscela geopolimerica occorre preparare la soluzione di Idrossido di sodio (NaOH) comunemente chiamata soda caustica e mescolarla successivamente con la soluzione sodio silicato. La preparazione di tale fase liquida è stata effettuata all'interno del dipartimento del Disat, dove è stato possibile utilizzare strumenti più adeguati per una miscelazione più omogenea e stabile.

Inizialmente per la produzione della soluzione di idrossido di sodio si è adoperato l'NaOH in granuli presente nel laboratorio, fornito dall'azienda Sigma Aldrich (Figura 3.12). Successivamente essendo i volumi dei campioni da produrre più grandi rispetto ai provini di solito prodotti nei laboratori del Disat è stato acquistato dell'Idrossido di sodio in scaglie prodotto dall'azienda tedesca Donau Chemie e confezionato dalla società Chimica Emilio Fedeli (Figura 3.12). Nell'Allegato 4 sono riportate le schede tecniche corrispondenti. In entrambi i casi comunque si tratta di Idrossido di sodio con grado di purezza non inferiore al 98%, parametro fondamentale per la composizione chimica da produrre.



Figura 3.12: NaOH, Sigma Aldrich a destra e Donua Chemie a sinistra (foto autoprodotta)

La soluzione di sodio silicato, di cui è presente nell'Allegato 5 il certificato di analisi e conformità, è fornita invece dall'azienda Chimica Strola s.n.c. - Torino.

La scelta della soluzione è ricaduta sul sodio silicato poiché cationi più piccoli come il Sodio con densità di carica maggiore aiutano la dissoluzione e l'idrolisi delle polveri allumino silicate ma allo stesso tempo le dimensioni non sono così ridotte da ritardare la finalizzazione del processo di geopolimerizzazione che si potrebbe tradurre in perdita di resistenza meccanica.

3.3.3. Test sul nuovo dosaggio dei reagenti

Rispetto ai dosaggi percentuali di partenza si è deciso di sostituire interamente la porzione relativa alla loppa d'altoforno con la sabbia. Questa modifica implica una preparazione differente rispetto alle composizioni geopolimeriche. La stagionatura deve avvenire in ogni caso a una temperatura di 80 °C ma è possibile ridurre drasticamente i tempi di preparazione.

Per la classificare i campioni si è deciso di utilizzare un codice alfa numerico definito come l'esempio seguente

$$n.FG\#FG\#(+).A/B/C.\#$$

dove:

- n si riferisce alla miscela preparata per confezionare i campioni;
- FG#FG# è la serie alfanumerica che indicata la composizione granulometrica utilizzata;
- il simbolo + si indicata che nella miscela è stata addizionata una componente liquida per rendere la miscela più lavorabile e agevolare l'idratazione di tutta la fase solida;
- A/B/C indicano le dimensioni dei campioni prodotti rispettivamente : A = 8x2x2 (cm), B = 16x4x4 (cm) e C = 50x50x5 (cm);
- L'ultimo # numero invece distingue i campioni derivanti dalla medesima miscela.

Il primo step, avendo modificato la composizione precedentemente studiata in altri progetti di tesi (Ghiotti S. 2017), ha riguardato la produzione di campione di scala ridotta (Figura 3.13).



Figura 3.13: preparazione campioni per test nuova composizione (foto autoprodotta)

Sono stati prodotti 4 campioni di dimensioni 8X2X2 (cm). Durante la preparazione della miscela però sono stati riscontrati alcuni problemi di lavorabilità: la soluzione presentava una viscosità molto alta. Di conseguenza è stata aggiunta una soluzione di sodio silicato al 81 % in acqua pari a circa il 5% in peso rispetto la massa totale della miscela.

Nell'Allegato 6 sono riportate le tabelle relative alla preparazione dei campioni test per la nuova composizione. Estratti dalla camera climatica dopo 72 ore di sintesi a 80 °C, i campioni presentavano una stratificazione particolare in scala di grigi come se ci fosse stata una risalita della materia liquida. In generale però sono stati raggiunti buoni livelli di compattezza e rigidità (Figura 3.14).



Figura 3.14: risultato campioni per test nuova composizione (foto autoprodotta)

3.3.4. Risoluzione problemi di ritiro volumetrico e stati di coazione durante la stagionatura

Pur avendo modificato la composizione solida della miscela, i risultati sembrano riprodurre quelli degli studi precedenti. Per questo motivo si è passati a produrre i campioni da testare nella prova a compressione e flessione e la piastra da inserire all'interno del flussimetro. Per calcolare le quantità da impiegare nella produzione dei nuovi campioni si è proceduto con gli strumenti della proporzione tra masse dei componenti impiegati e volumi prodotti.

Come visibile in Allegato 7 è stato considerato come unico dato di input quello relativo alla massa di acqua arrotondato per eccesso.

In questa fase la preparazione della miscela è avvenuta in maniera autonoma. Nel laboratorio di Architettura tecnica è stata pesata e preparata la fase solida (Figura 3.15)



Figura 3.15: quantità componenti solidi, miscela n. 2 (foto autoprodotta)

Per la preparazione della fase liquida invece ci si è spostati nei laboratori del Disat, previo il test di sicurezza per l'uso delle strumentazioni e il maneggiamento delle componenti chimiche presenti nei vari locali. In particolare la preparazione della soluzione di idrossido di sodio ha richiesto molto tempo essendo la reazione molto esotermica e le quantità da miscelare molto maggiori (Figura 3.16).



Figura 3.16: preparazione fase liquida, miscela n. 2 (foto autoprodotta)

I 640 g di idrossido di sodio sono stati miscelati al litro di H_2O , in continuo movimento, step by step durante l'arco di un'intera giornata facendo attenzione a non provocare surriscaldamenti eccessivi o versamenti della soluzione altamente corrosiva. Uniti i due elementi si è disposto il contenitore sotto cappa di aspirazione, chiuso in modo quasi ermetico e lasciato mescolare per circa 12 ore.

Il giorno seguente si è quindi proceduto all'unione delle due fasi, trattandosi di quantità considerevoli sono stati adoperati contenitori più capienti (Figura 3.17). Inizialmente si pensava che mezzi meccanici per il mescolamento, quale trapano con punta a elica, potessero essere pratici e velocizzare le procedure. In realtà la viscosità della miscela rendeva sostanzialmente inadatta l'azione puntuale dello strumento e si è tornati così a una miscelazione manuale più lunga e complessa ma in generale più controllata. Si è quindi passati al getto del materiale nel cassero autofabbricato e nelle casseforme in acciaio previa la lubrificazione delle pareti con un apposito olio (Figura 3.18). Con alternanza tra un'azione battente e attesa si è cercato di portare a un grado di costipamento maggiore il materiale per favorire la fuoriuscita della fase gassosa dalla miscela.



Figura 3.17: prodotto finale, miscela n. 2 (foto autoprodotta)



Figura 3.18: getto nelle casseforme, miscela n. 2 (foto autoprodotta)

Il tutto si è quindi disposto all'interno della camera climatica e si è proceduto con un nuovo ciclo di trattamento termico per la geopolimerizzazione.

All'uscita dalla camera climatica sono stati subito evidenti alcuni problemi, visibili anche nelle Figura 3.19 e Figura 3.20.

Per quanto riguarda i campioni nei casseri in acciaio è possibile fare le seguenti osservazioni:

- profonde fessurazioni che attraversano tutto il corpo del provino;
- differenza nella consistenza e nella colorazione tra superficie libera e zone più profonde aderenti al cassero;

- sgretolamento del materiale anche con azioni sollecitanti molto basse;
- difficoltà nelle operazioni di scasseramento, il materiale rimane adesivo al cassero di acciaio, l'olio lubrificante utilizzato per ungere le pareti in acciaio risulta inadeguato.

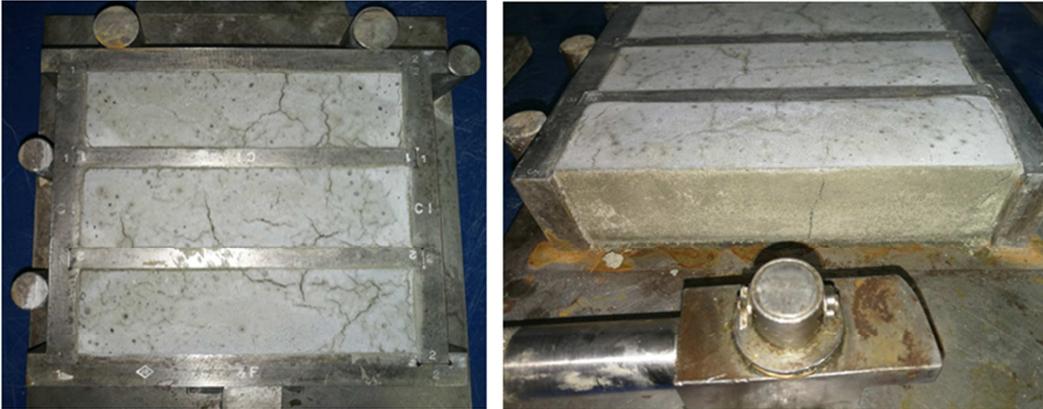


Figura 3.19: fratture e fessurazioni, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta)



Figura 3.20: materiale adesivo alla cassaforma, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta)

Invece nel caso del campione piastra conservato nel cassero autoprodotta in materiale legnoso si sono notate risposte differenti al ciclo termico (Figura 3.21 e Figura 3.22):

- un ritiro considerevole durante la cottura, si osserva una diminuzione volumetrica di circa 0.5 cm per ogni lato;
- colorazione più omogenea e visibilmente meno crepe;
- presenza comunque di fessure su tutta la superficie con esclusione della zona centrale.



Figura 3.21: ritiro volumetrico, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta)



Figura 3.22: ritiro volumetrico, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta)

In definitiva è possibile affermare che, passando da campioni di dimensioni ridotte a volumi più grandi i risultati non sono soddisfacenti. Se però i campioni B non sono stati in alcun modo utili ai fini di un'indagine meccanica, si è co-

munque considerata la piastra C valida per i test all'interno del termoflussimetro.

Di conseguenza si è cercato di risolvere le complicazioni sopra citate.

Seguendo l'ipotesi che i problemi potessero essere legati alla difficoltà di mescolamento e poca lavorabilità, si è proceduto al confezionamento della miscela n. 3. Si sono considerate come punto di partenza nuovamente le percentuali delle componenti relativi agli studi presedenti (Ghiotti S. 2017) variando e aumentando gli apporti della soluzione sodio silicato addizionale (Allegato 8). Inoltre per mescolare i reagenti in modo opportuno con la fase solida si è adoperata il mixer Hobart 5-Quart, presente in laboratorio (Figura 3.23) e si è sottoposto i campioni a un'azione di costipamento attraverso l'utilizzo della tavola a scosse ad azione manuale (Figura 3.24).



Figura 3.23: mixer Hobart v. 50 (foto autoprodotta)



Figura 3.24: tavola a scosse ad azione manuale (foto autoprodotta)

I campioni, gettati nei casseri di acciaio, sono stati disposti in camera climatica per essere sottoposti al trattamento termico, in questa occasione, sono stati alloggiati all'interno anche dei contenitori di acqua, che hanno permesso di mantenere l'ambiente umido per tutta la durata del processo (Figura 3.25). Poiché si è anche ipotizzato che un ambiente troppo secco avesse causato un ritiro della superficie libera dei campioni troppo veloce.



Figura 3.25: mantenimento ambiente umido camera climatica (foto autoprodotta)

Come è possibile vedere nelle Figura 3.26, Figura 3.27 e Figura 3.28 il risultato è comunque stato insoddisfacente.

Con la miscela n. 3 è stato possibile fare ulteriori osservazioni. Pur avendo subito i medesimi trattamenti termici delle miscele precedenti, le zone più profonde sono risultate ancora “crude”, le componenti non hanno reagito e la soluzione alcalina non ha raggiunto il flash point per la geopolimerizzazione. Si può affermare dunque che un aumento della fase liquida:

- aumenta la differenza in termini di consistenza tra zona superficiale libera e zone profonde durante il processo termico;
- pur rendendo lavorabile la soluzione è controproducente ai fini dell'attivazione alcalina poiché un maggior contenuto liquido richiede tempistiche prolungate che determinano maggiori differenze di cui sopra.

I provini infatti si sono presentati molto fragili; solo con un leggero sforzo è stato possibile portarli a rottura.

Per verificare la presenza di soda residua inattiva all'interno dei campioni sono stati selezionate alcune partizioni dei campioni e disposte nuovamente in camera climatica. Effettivamente dopo un nuovo trattamento termico i campioni hanno preso maggiore consistenza e rigidità (Figura 3.29). Si è potuto fare un'ulteriore osservazione:

- il materiale e gli spessori di cui sono formati i casseri impediscono il raggiungimento di una temperatura uniforme distribuita su tutto il campione. Sulla superficie libera si arriva velocemente a 80 °C e quindi all'attivazione della sintesi chimica per l'indurimento del materiale. Le pareti spesse del cassero invece impongono uno sfasamento al calore nelle zone più profonde del campione e causano l'instaurarsi di stati di coazione all'interno del manufatto poiché si

impongono delle differenze sostanziali in termini di consistenza e rigidità tra zona superficiale e cuore.



Figura 3.26: fessurazioni, miscela n. 3 (foto autoprodotta)



Figura 3.27: stagionatura inadatta, miscela n. 3 (foto autoprodotta)



Figura 3.28: rottura campioni, miscela n. 3 (foto autoprodotta)



Figura 3.29: parti sottoposte al nuovo ciclo termico, miscela n. 3 (foto autoprodotta)

Osservando invece i campioni relativi alle miscele precedenti è importante riportare alcune note in particolare relative alla stagionatura (Figura 3.30 e Figura 3.31):

- i campioni di geopolimeri dopo il trattamento termico hanno continuato a stagionare a temperatura ambiente cambiando il loro stato di consistenza. L'eventuale soda ancora presente nel materiale ha continuato a reagire anche a temperature minori rispetto a 80 °C.



Figura 3.30: stagionatura a temperatura ambiente, miscela n. 2 (foto autoprodotta)

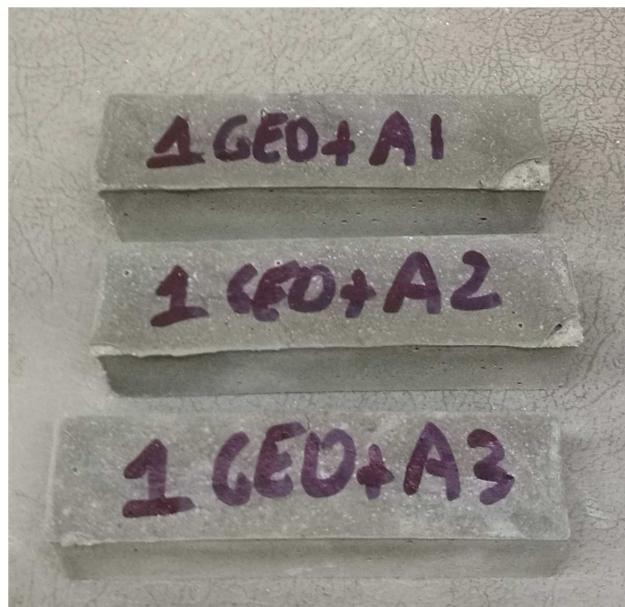


Figura 3.31: stagionatura a temperatura ambiente, miscela n. 1 (foto autoprodotta)

In definitiva si è appurato quindi che i problemi di fessurazione non erano dovuti a un inadeguato mescolamento.

Si è passati quindi alla tesi che i problemi fossero dovuti all'utilizzo di aggregati con dimensione inadeguata.

I risultati dello studio della curva granulometrica della fase solida utilizzata fino a questa fase della sperimentazione (FG4/FGN) sono riportati in Allegato 9 e si osserva, effettivamente, come la curva sia inadatta e poco assortita al fine di fornire la struttura e lo scheletro solido al materiale. Risulta mancante la classe granulometrica con diametri più grandi.

Per risolvere questo inconveniente si è passati al progetto di una curva granulometrica che trovasse il compromesso tra un utilizzo considerevole della polvere di fango da recupero e allo stesso tempo fornisse la struttura adatta al materiale

3.3.4.1. Studio curva granulometrica di progetto

Per determinare una curva granulometrica di progetto utile occorre definire con precisione le proporzioni delle classi di sabbia a disposizione in laboratorio. Questa operazione è strettamente necessaria poiché definendo una giusta distribuzione si permette un'interazione efficace tra aggregati più piccoli e quelli più grandi, in modo tale che i primi vadano a riempire i vuoti lasciati dai secondi aumentando il numero di contatti e quindi la trasmissione degli sforzi della struttura.

Per determinare i corretti apporti delle diverse classi granulometriche si sono considerate come termine di confronto alcune curve granulometriche ideali. In particolare sono state prese in esame due tipi di curve. La prima si basa su considerazioni geometriche per ottenere la massima compattezza, si tratta della curva granulometrica ideale di Fuller (Shakhmenko G. et al. 1998, Sobolev K. et al. 1996).

Tale curva è costruita a partire dalla nota equazione

$$Pc_i = \left(\frac{d_i}{D_{\max}} \right)^{k_{fuller}} \cdot 100$$

Dove:

- Pc_i corrisponde al passante cumulato al setaccio di diametro d_i
- D_{\max} è il diametro massimo degli aggregati considerati. Questo dato deve essere scelto in modo tale da permettere lo scorrimento consono di tutti gli aggregati all'interno del cassero, quindi in base alla dimensione massima del manufatto che si vuole produrre. Nel caso studio in oggetto si è considerato D_{\max} pari a 4 mm.
- k_{fuller} è il fattore esponenziale di Fuller. Solitamente è considerato pari a 0.5 ma nella formulazione delle curve ideali si è considerato anche il caso $k_{fuller} = 0.4$. variazioni in tal senso dell'esponente determinano delle traslazioni delle curve verso l'alto andando a valorizzare maggiormente le classi di aggregato più piccole.

Di seguito è riportata la Tabella 3.5 con i valori delle curve ideali di Fuller.

Curva ideale		
setaccio	Fuller (0.5)	Fuller (0.4)
mm	[%]	[%]
0.063 - 0.125	12.55	19.01
0.125 - 0.250	17.68	25.00
0.250 - 0.500	25.00	32.99
0.500 - 1.000	35.36	43.53
1.000 - 2.000	50.00	57.43
2.000 - 4.000	70.71	75.79
> 4.000	100.00	100.00

Tabella 3.5: curve ideali di Fuller

Per la seconda curva granulometrica ideale è stata presa in esame la normativa American Society for Testing and Materials International, in particolare le specifiche riportate nella norma ASTM C33/C33M - 13 (Figura 3.32).

Sieve (Specification E11)	Percent Passing
9.5-mm ($\frac{3}{8}$ -in.)	100
4.75-mm (No. 4)	95 to 100
2.36-mm (No. 8)	80 to 100
1.18-mm (No. 16)	50 to 85
600- μ m (No. 30)	25 to 60
300- μ m (No. 50)	5 to 30
150- μ m (No. 100)	0 to 10
75- μ m (No. 200)	0 to 3.0 ^{A,B}

Figura 3.32: requisiti aggregati fini (ASTM C33/C33M - 13)

Le percentuali dettate dalla curva ideale ASTM C33/C33M fine aggregate però non rispondevano all'obiettivo del massimo possibile riutilizzo delle polveri derivanti da fango lapideo. È stata quindi eseguita un'operazione di traslazione utilizzando fattori inversamente proporzionali al diametro di apertura dei setacci. È stato possibile così aumentare le classi di aggregati minori pur mantenendo la continuità e la crescita lineare caratteristiche della curva ideale. È stato così ottenuto il fuso delle distribuzioni granulometriche di riferimento. I relativi valori e grafico sono riportati nella Tabella 3.6 e Figura 3.33 seguenti.

SETACCIO	Curva ideale ASTM		
	C33/C33M - 13 min	C33/C33M - 13 med	C33/C33M - 13 max
[mm]	[%]	[%]	[%]
0.075	18.500	20.000	21.500
0.150	15.500	20.500	25.500
0.300	17.500	30.000	42.500
0.600	34.500	52.000	69.500
1.180	56.500	74.000	91.500
2.360	83.500	93.500	103.500
4.750	95.500	98.000	100.500

Tabella 3.6: curva ideale C33/C33M

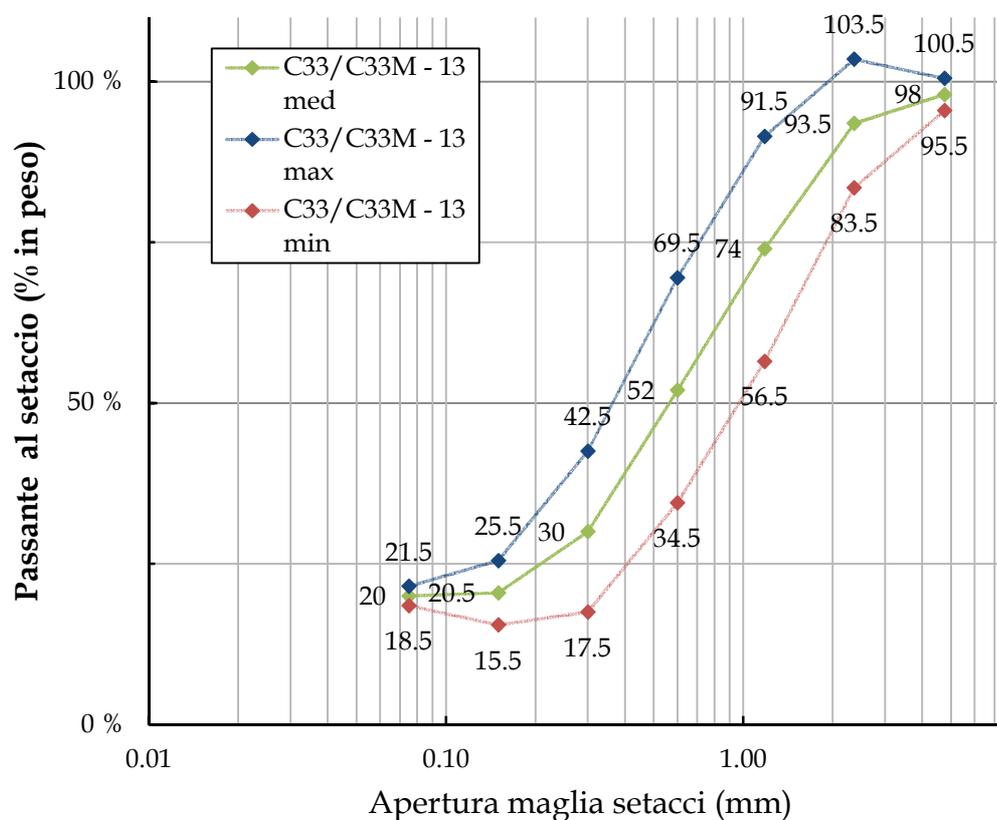


Figura 3.33: requisiti aggregati fini (ASTM C33/C33M - 13)

Per poter comparare la serie di setacci ASTM e UNI, sebbene esistano le tabelle di comparazione si è proceduto con il definire la linea di tendenza polinomiale di ordine 3 e se ne sono studiati i coefficienti. Utilizzati come fattori moltiplicativi è stato possibile definire la curva di riferimento riportata alla serie UNI (Tabella 3.7 e Figura 3.34).

Curva riferimento UNI	
SETACCIO	C33/C33M - 13
[mm]	[%]
0.063 - 0.125	16.16
0.125 - 0.250	20.73
0.250 - 0.500	29.40
0.500 - 1.000	44.70
1.000 - 2.000	67.87
2.000 - 4.000	90.80
> 4.000	100.00

Tabella 3.7: curva riferimento C33/C33M (UNI)

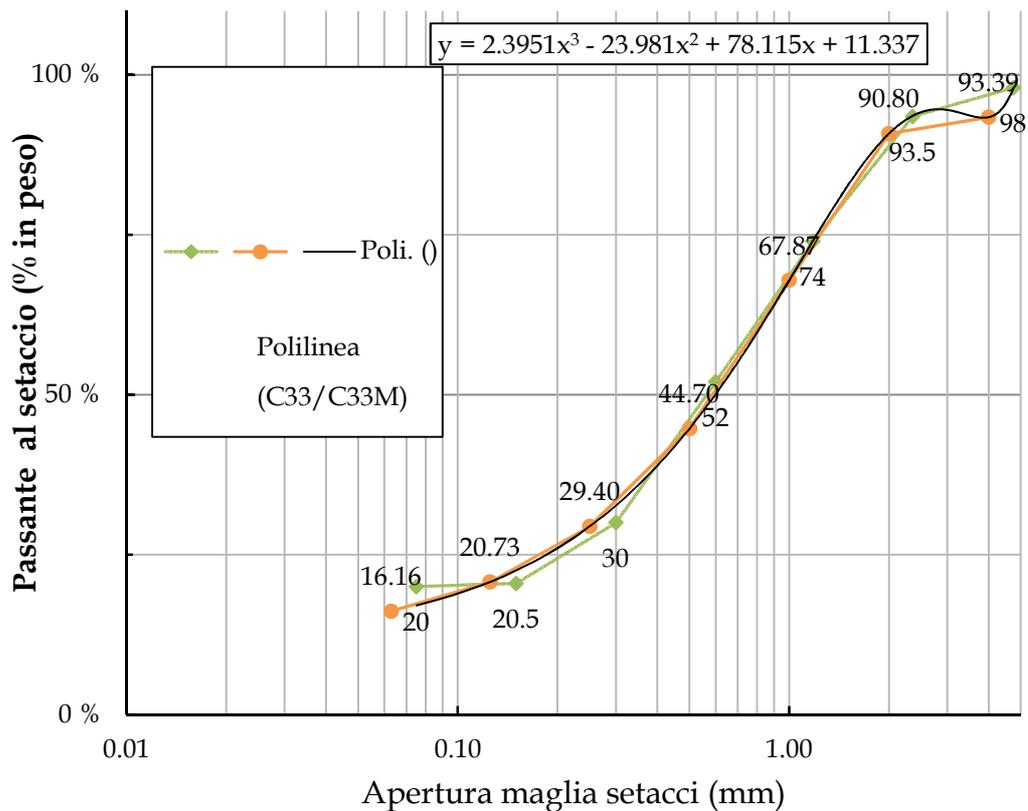


Figura 3.34: confronto curva C33/C33M ASTM e UNI

La polilinea interpola bene la serie ASTM con l'eccezione dei dati relativi ai passanti maggiori.

Individuate le curve ideali di riferimento si è quindi passato alla definizione delle curve di progetto andando a ricercare i valori percentuali di apporto delle diverse classi granulometriche presenti in laboratorio.

Per fare ciò è stato costruito un foglio di calcolo, che attraverso la componente aggiuntiva risolutore ha permesso la determinazione di diverse curve di progetto. In Allegato 10 è descritta la procedura operativa dell'utilizzo del foglio di calcolo. Nello stesso Allegato 10 sono riportati i risultati delle progettazioni delle curve granulometriche e le percentuali di utilizzo delle differenti classi di sabbia. Si nota che i dati di progetto che si discostano meno sono quelli relativi alla curva C33/C33M. In Tabella 3.8 sono riportate le classi e le percentuali di utilizzo per la definizione della curva di progetto.

Curva di progetto			
	FG3g	FG3f	FGN
% utilizzate	30.00	46.00	24.00

Tabella 3.8: apporti percentuali componenti per la curva di progetto C33/C33M

Si è quindi passati alla verifica delle curve di progetto andando a studiare la granulometria delle curve reali prodotte in base alle proporzioni trovate nella fase precedente. L'analisi granulometrica ha seguito la stessa procedura descritta nel paragrafo 3.3.2.1. Sono stati preparati 3 campioni per ogni curva di progetto attraverso la tecnica di quartatura ed è stato calcolato il passante cumulato. Di seguito è riportata la Figura 3.35 in cui è possibile confrontare la curva ideale, di progetto e reale per quanto riguarda la curva C33/C33M.

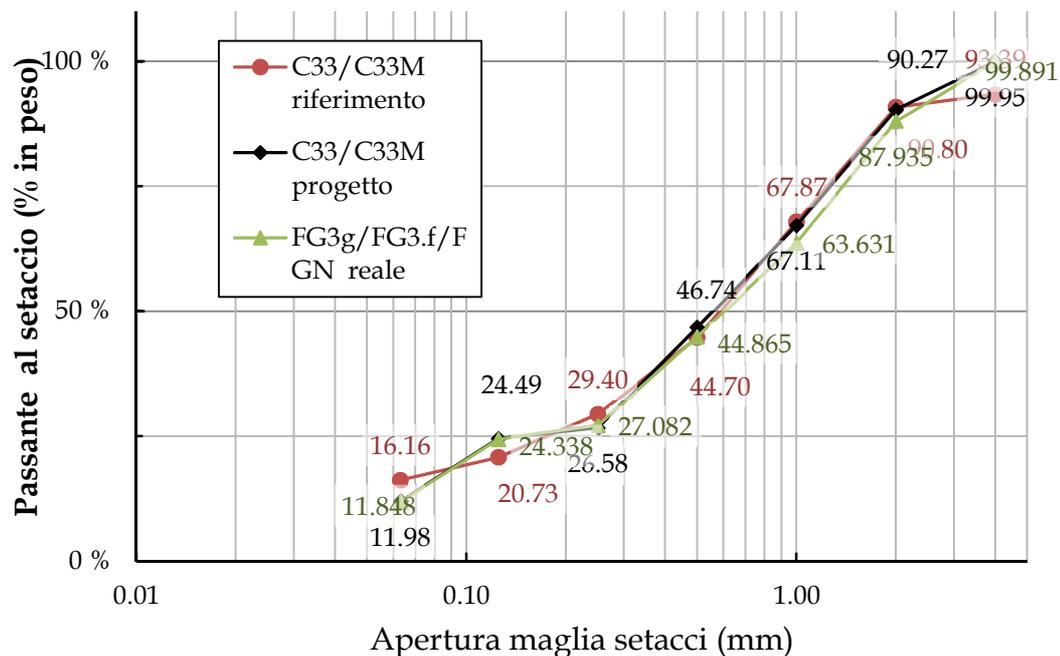


Figura 3.35: confronto curva C33/C33M ideale, di progetto e reale

In Allegato 11 sono comunque riportati gli studi granulometrici e i confronti anche per le altre curve di progetto. Dopo aver studiato la granulometria della miscela si è passati a costruire matematicamente la curva reale in base alle percentuali di polvere lapidea definite nell'Allegato 10.

Nell'Allegato 12 è riportata la tabella relativa alla preparazione della miscela n. 4. In questa occasione, essendo il volume di materiale da produrre minore, è stata ridotta la fase liquida aggiunta.

Per risolvere invece il problema legato all'aderenza del materiale con i casseri si è provato a interporre uno strato di carta da forno (Figura 3.36). Si è scelto tale materiale poiché pellicole di plastica all'interno della camera climatica avrebbero subito deformazioni con il calore e avrebbe portato alla definizione di una superficie corrugata dei campioni.



Figura 3.36: carta da forno per mantenere separato materiale e cassero (foto autoprodotta)

Per ultimo si è risolto il problema dello sfasamento della temperatura durante la cottura. Il cassero che si ha avuto in dotazione presentava pareti in acciaio troppo spesso che hanno causato durante la cottura un gradiente termico tra zona superficiale e cuore del campione. Tale differenza si è tradotta in tempi diversi di cottura e quindi l'insorgere di stati di coazione che hanno portato alla rottura i campioni. Non avendo a disposizione altri casseri si è passati a una trattamento termico dei campioni coprendoli. In particolare sono state usate le base di altri casseri così da determinare intorno ai campioni le stesse condizioni di spessore e materiale.

Un simile approccio però avrebbe dilatato i tempi dei trattamenti termici in modo considerevole. Per ovviare a ciò si è atteso che i campioni arrivassero, nel-

la prima fase del trattamento, a una consistenza tale che permettesse loro, dopo uno scasseramento anticipato (Figura 3.37), di rimanere indeformati sotto l'azione del proprio peso.



Figura 3.37: scasseramento anticipato, miscela n. 4 (foto autoprodotta)

Le zigrinature visibili sono dovute alle piegature subite dalla carta durante la procedura di copertura. Ma si tratta di scanalatura poco profonde e caratterizzano solo la zona più in superficie.

Con tale accorgimenti si è riusciti quindi ha produrre campioni integri, consistenti e utili ai fini delle indagini meccaniche.

Seguendo le stesse accortezze sono stati, in seguito, prodotti altri campioni, in primo luogo, per avere a disposizione un numero tale da dare un valore statistico ai risultati e poi per migliorare alcuni particolari aspetti del processo di produzione.

Infatti coprendo i campioni non si è data la possibilità nella prima fase del trattamento alla soluzione in eccesso di evaporare. Il gel sodico calcico che non ha reagito con la fase solida si è concentrato in superficie e non ha permesso al campione di formarsi nel modo corretto nella seconda fase in assenza del cassero (Figura 3.38).



Figura 3.38: soluzione liquida in eccesso concentrata sulla superfici dei campioni, miscela n. 4 (foto autoprodotta)

In Allegato 13 sono riportati i valori delle componenti della miscela n. 5, con la quale si è riusciti ad azzerare la soluzione liquida aggiunta. Con i campioni relativi a questa miscela si è anche tentato di risolvere il problema delle zigrinatura date dalla carta da forno. Per cui sono stati disposti solamente due strati di separazione: sopra la base e sotto il coperchio. Con lo scassero preventivo si ipotizzava che il materiale non aderisse alle pareti laterali della cassaforma ma come si può notare in Figura 3.39 in minima parte non è stato possibile evitarlo.



Figura 3.39: materiale adeso al cassero, miscela n. 5 (foto autoprodotta)

Si è quindi passati alla produzione della miscel n. 6 (Allegato 14) con la quale si è mantenuta la soluzione aggiuntiva pari a zero e si è tornati a foderare integralmente i casseri. Ottenendo i campioni in Figura 3.40.



Figura 3.40: campioni, miscela n. 6 (foto autoprodotta)

3.4. Descrizione apparato sperimentale e test in laboratorio

3.4.1. Termoflussimetro: conducibilità termica

In collaborazione con il dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino è stato possibile procedere con le prove sperimentali al fine di determinare le proprietà termiche di conducibilità (conduttività) e resistenza termica dei materiali presi in esame: calcestruzzo e geopolimeri derivanti da polveri lapidee.

I test sono stati svolti utilizzando una piastra calda o termoflussimetro con anello di guardia. Il modello è il FOX 600 prodotto da Lasercomp (Figura 3.41). In Tabella 3.9 sono riportate le specifiche tecniche dell'apparecchiatura.

Lasercomp FOX 600		
Dimensione Max piastra	mm	610
Spessore Max Campione	mm	200
T Max di misura	°C	65
T Min di misura	°C	-15
Sensibilità T	°C	± 0.01
λ min misurabile	W/mK	0.001
λ max misurabile	W/mK	0.35
λ max misurabile*	W/mK	2.5

* con l'utilizzo di termocoppie esterne

Tabella 3.9: specifiche tecniche della piastra calda Lasercomp FOX600 (Pennacchio R. 2015)

Il metodo utilizzato dall'apparecchiatura per misurare la conducibilità termica, seguendo le norme internazionali ASTM C518, ISO 8301 e DIN EN 12667, è il metodo a flusso di calore stazionario. Questo metodo economico e pratico presenta vantaggi per velocità, semplicità e accuratezza.

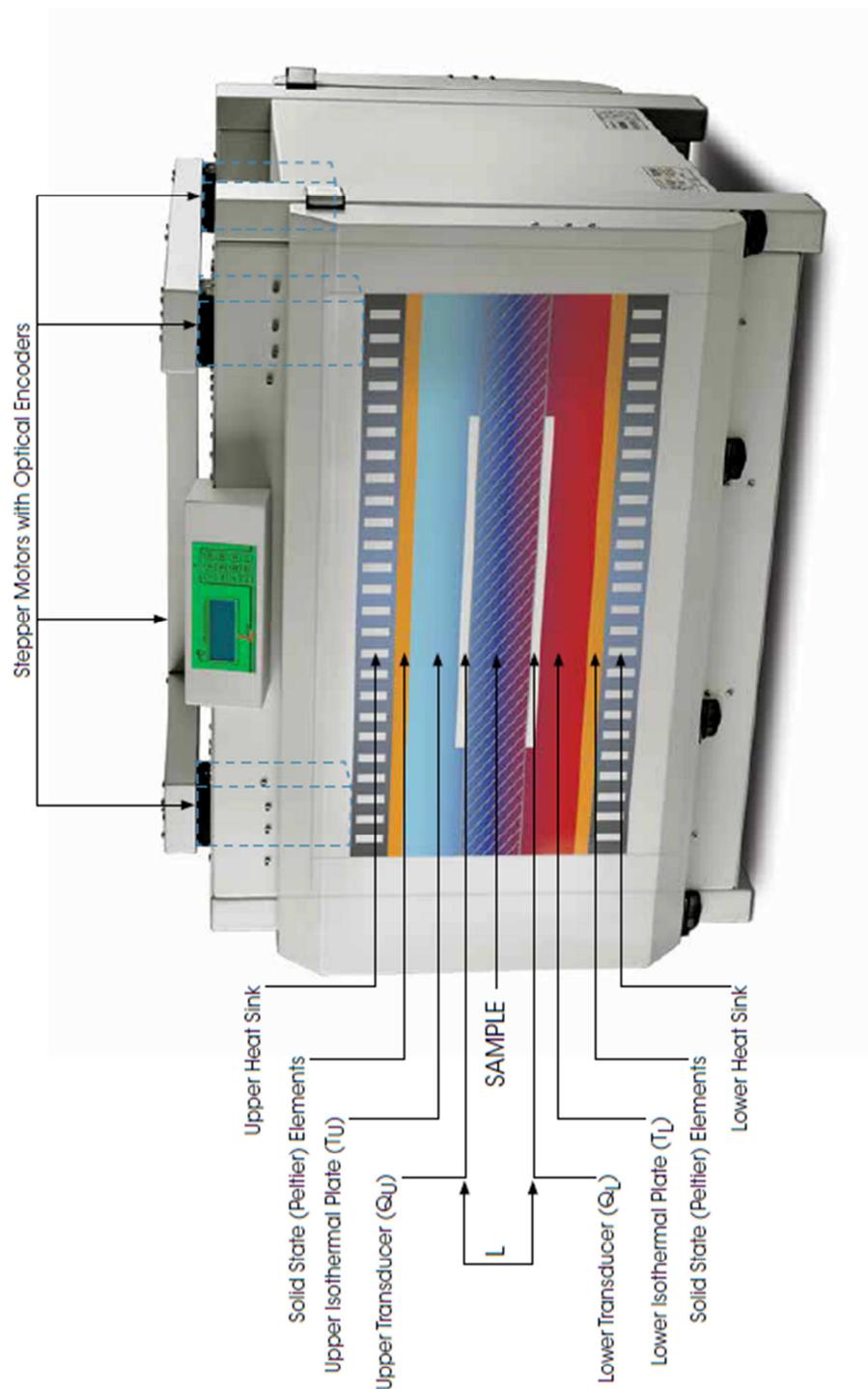


Figura 3.41: componenti principali FOX 600 (LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide)

In un misuratore di flusso di calore, il campione è posizionato tra due piastre termostate. Queste piastre stabiliscono una differenza di temperatura definita

dall'utente (ΔT) nel campione. Lo spessore del campione (L) è direttamente misurato dalla macchina per garantire una misurazione più precisa (funzione Spessore Automatico). Nel caso di campioni comprimibili è comunque possibile impostare lo spessore con gli specifici settaggi.

Due matrici di elementi Peltier a stato solido forniscono riscaldamento e raffreddamento reattivi a ciascuna piastra e mantengono il salto termico necessario attraverso un algoritmo avanzato, che porta rapidamente il sistema al completo equilibrio termico. Entrambe le placche strumenti possono operare tra $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per fornire a tali elementi la potenza necessaria viene utilizzato un sistema di refrigerazione a ricircolo come uno scambiatore di calore. Gli elementi Peltier (Figura 3.42) a bassa massa e alta potenza consentono di raggiungere rapidamente i setpoint, migliorando la produttività.

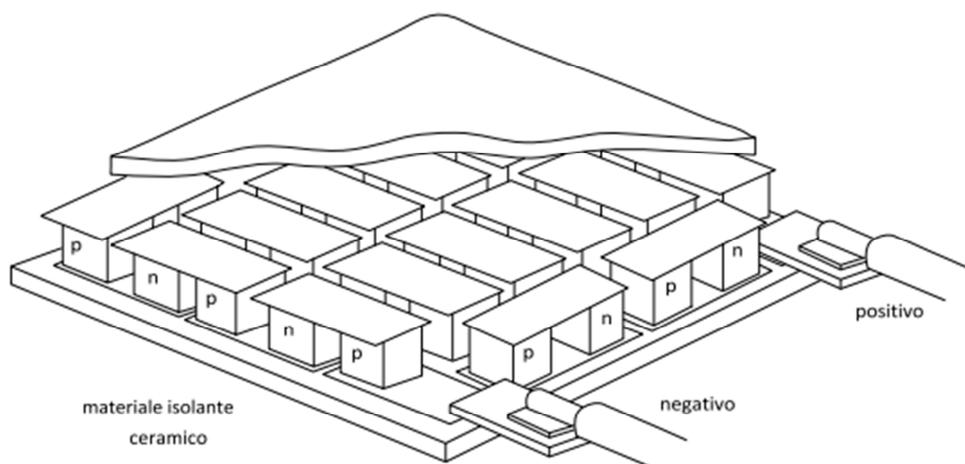


Figura 3.42: rappresentazione grafica di una cella di Peltier (Caterina Piccoli 2014)

L'effetto di Peltier è stato scoperto oltre 170 anni fa (nel 1834). Insieme con i dispositivi a effetto Seebeck costituisce un'applicazione dei sistemi detti "termoelettrici". Il suo nome deriva da Jean Charles Athanase Peltier, fisico francese, scopritore del fenomeno per cui una corrente elettrica che attraversa due giunzioni tra metalli diversi produce un trasferimento di calore. Il funzionamento è paragonabile a una pompa di calore (Figura 3.43). Fornendo corrente elettrica continua viene attivata una delle due piastre che inizia dissipare energia. Si in-

staura un ciclo termico per cui la piastra dissipatrice assorbe calore all'altra piastra che di conseguenza raffredda il corpo a contatto con essa. Se la direzione della corrente elettrica viene invertita si ha l'effetto opposto, per cui al posto di assorbire calore si genera calore determinando quindi un riscaldamento della piastra a contatto con il campione.

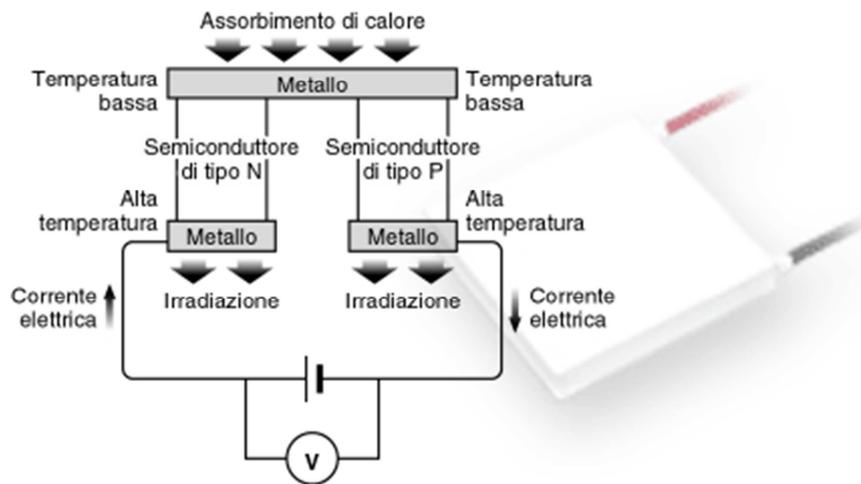


Figura 3.43: funzionamento di una cella di Peltier (http://www.z-max.jp/peltier_it/peltier/experience/experience2.html)

Per il calcolo della conducibilità (λ , W/mK) e la resistenza termica (R , m²K/W) si fa riferimento alla nota equazione di Fourier in cui lo spessore è un dato fondamentale da tenere in considerazione e occorre misurarlo con la massima accuratezza.

$$\lambda = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta T}$$

Eq. 30

$$R = \frac{1}{\lambda} \cdot L$$

Eq. 31

Per arrivare a tale risultato sono tenuti in considerazione le ultime 10 misurazioni di temperatura e voltaggio. In automatico sono definiti i flussi di calore

entranti e uscenti dal campione, rispettivamente positivo e negativo. In base al calore generato dalla cella superiore e calore assorbito dalla cella inferiore. Relativi alle seguenti equazioni matematiche.

$$Q_{\text{ass}} = Q_{\text{pelt}} - 0,5 \cdot Q_{\text{joule}} - Q_{\text{term}}$$

Eq. 32

$$Q_{\text{gen}} = Q_{\text{pelt}} + 0,5 \cdot Q_{\text{joule}} - Q_{\text{term}}$$

Eq. 33

Dove:

- Q_{ass} è il calore assorbito sul lato freddo (kJ/kg);
- Q_{gen} è il calore generato sul lato caldo (kJ/kg);
- $Q_{\text{pelt}} = a \cdot I$ è il calore assorbito per effetto Peltier (kJ/kg), in cui I è la corrente passante e a è il coefficiente di Peltier che racchiude in se effetti gli termolettrici;
- $Q_{\text{joule}} = R \cdot I^2$ è il calore generato per effetto Joule dovuto al passaggio di corrente (kJ/kg). Il coefficiente 0,5 è dovuto al fatto che metà della potenza è generata su una faccia e metà sull'altra, I è la corrente e R è la resistenza interna della cella e può essere calcolata come $R = r \cdot h/A_{\text{cel}}$, in cui r è posta come resistività della cella;
- $Q_{\text{term}} = y \cdot A_{\text{cel}} \cdot \frac{\Delta T}{h}$ è il calore dovuto alla conducibilità termica delle termocoppie (kJ/kg), in cui y è la conducibilità termica e A_{cel} è l'area della cella, mentre ΔT è la differenza di T tra lato caldo e freddo e h è l'altezza della cella.

$Q_{\text{ass}} = Q_{\text{pelt}} - 0,5 \cdot Q_{\text{joule}} - Q_{\text{term}}$ e $Q_{\text{gen}} = Q_{\text{pelt}} + 0,5 \cdot Q_{\text{joule}} - Q_{\text{term}}$ è possibile scrivere per il lato freddo la seguente equazione

$$Q_{\text{ass}} = a \cdot I - 0,5 \cdot R \cdot I^2 - y \cdot A_{\text{cel}} \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

E per il lato caldo

$$Q_{\text{gen}} = a \cdot I + 0.5 \cdot R \cdot I^2 - y \cdot A_{\text{cel}} \cdot \frac{\Delta T}{h}$$

L'apparecchiatura utilizzata è dotata di 4 encoder ottici, uno per ogni spigolo, movimentati da motorini elettrici indipendenti tra di loro. In automatico la macchina rileva per ognuno dei quattro punti l'altezza del campione in modo tale da livellare le lastre di misura anche per le superfici non perfettamente parallele (Figura 3.44). Questo determina un miglior contatto termico, evitando così i bias accidentali legati ai ponti d'aria.

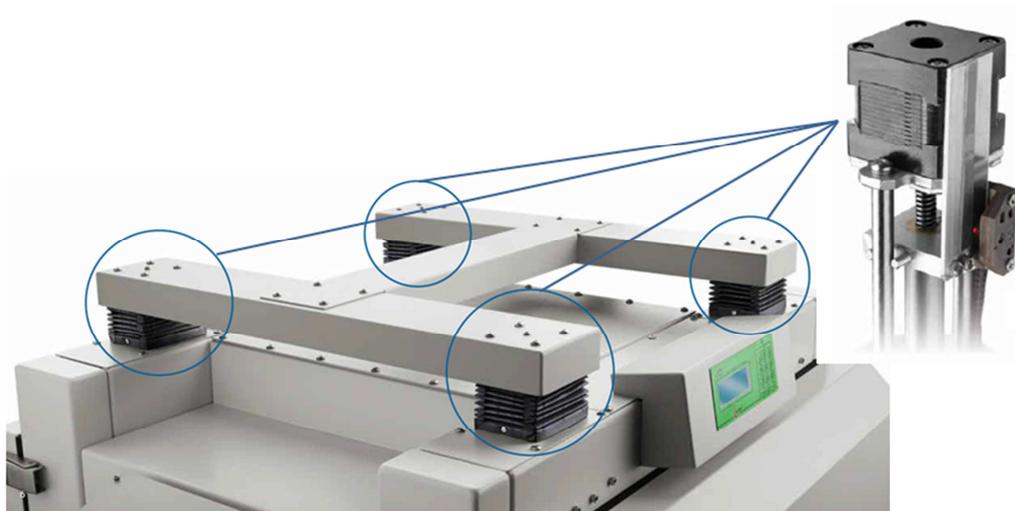


Figura 3.44: encoder ottici motorizzati (modificata da LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide)

In Tabella 3.10 sono indicati gli spessori misurati dalla macchina.

	Rear Left mm	Rear Right mm	Front Left mm	Front Right mm	Spessore medio mm
Campione cementizio	52.86	52.4	53.51	52.17	52.66
Campione geopolimerico	57.63	57.61	52.07	52.12	54.86

Tabella 3.10: spessori misurati dalla macchina

Il flusso di calore risultante (Q/A) dal trasferimento di calore in regime stazionario attraverso il campione viene misurato da due trasduttori di flusso di calore a film sottile (<1 mm di spessore) costituiti da una superficie continua di giunzioni di rilevamento che si integrano uniformemente sull'intera area del sensore e coprono una vasta area di superficie del campione superiore e inferiore, 25 cm x 25 cm (Figura 3.45).



Figura 3.45: trasduttore di flusso (LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide)

Le piastre sono così formate da una doppia zona di controllo che misura in modo indipendente la temperatura al centro e nelle aree periferiche. Una termocoppia di tipo E viene collegata al centro di ciascun trasduttore entro 0,1 mm dalla superficie dei campioni e sigillata contro l'umidità. La scelta progettuale degli apparati di misura è stata così definita poiché, riducendo l'area di misurazione alla zona più centrale, si eliminano le suscettibilità alle perdite o guadagni di bordo. Ciò garantisce l'uniformità della temperatura attraverso la larghezza del campione su entrambe le superfici della piastra e il flusso di calore puramente lineare, ottenendo la misurazione della conduttività termica più accurata indipendentemente dallo spessore del campione o dalla temperatura ambiente.

Trattandosi di materiali per la costruzione che presentano una conducibilità termica più alta rispetto ai materiali isolanti è possibile utilizzare delle termocoppie esterne. Le termocoppie sono collegate direttamente alle superfici del campione, eliminando l'impatto della resistenza dell'interfaccia e potendo arrivare anche a misurazioni di conducibilità pari a 2,5 W/mK. Le termocoppie

esterne sono poste a contatto con il campione o collocate in scanalature lavorate in provini rigidi, come mostrato in Figura 3.46. Gli strumenti configurati per questa opzione sono dotati di prese ausiliarie per le termocoppie esterne.

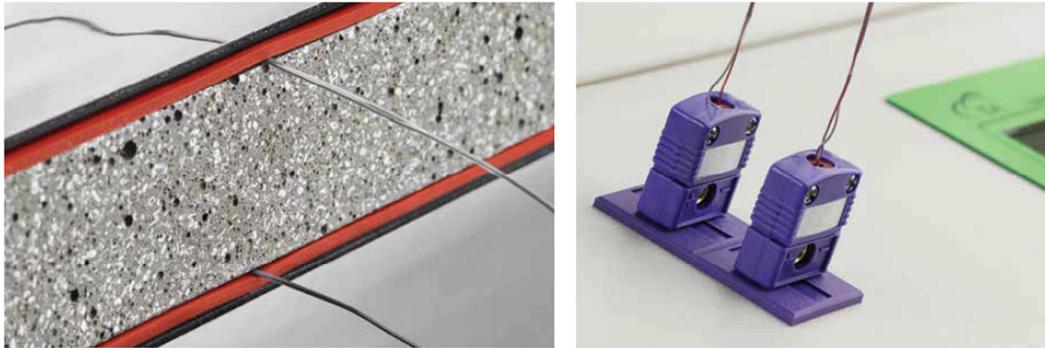


Figura 3.46: termocoppie esterne (LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide)

Nei primi test effettuati sul campione cementizio vi erano a disposizione 2 termocoppie disposte con accuratezza al centro della superficie superior e inferiore. Successivamente si è potuto passare alla misurazione attraverso l'utilizzo di 8 sonde esterne che hanno permesso un'analisi più precisa sul campione geopolimerico. Pur avendo a disposizione tali termocoppie occorre sottolineare il fatto che il dato ottenuto è molto aleatorio. Infatti i valori ottenuti potrebbero variare del 20% poiché la macchina è progettata per testare tipicamente campioni più isolanti.

Se le dimensioni dei campioni da testare sono considerevoli FOX 600 include porte della camera sia sul lato anteriore che su quello posteriore dello strumento.

Viste le specifiche tecniche della termoflussimetro con anello di guardia si è deciso di produrre dei campioni da testare corrispondenti a piastre quadrate di dimensioni 50 cm x 50 cm x 5 cm (L x L x H). La scelta è stata fatta per migliorare i risultati della sperimentazione. Infatti inserendo campioni di queste dimensioni è possibile non solo procedere alle misurazioni con i portelli chiusi ma anche interporre tra questi e il materiale da testare uno strato di gomma piuma. Il fine di questa procedura permette di ridurre maggiormente la deviazione del

flusso di calore verso le zone laterali mantenendo le linee di flusso il più possibile verticali (Figura 3.47).



Figura 3.47: preparazione campione cementizio inserito nel flussimetro (foto autoprodotta)

I campioni però presentavano superfici corrugate e scanalate che avrebbero potuto determinare la formazione di sacche d'aria che avrebbero causato delle resistenze di contatto. Per ridurre tali difetti che potrebbero comportare la falsificazione del dato finale anche del 10%, sono state interposte tra il campione e la piastra un materiale uno strato di elastomero di spessore e conducibilità note. Pressando lo strato di gomma è possibile determinare il contatto anche in prossimità delle scanalature ed evitare la formazione delle resistenze di contatto.

Con l'aiuto dei Dottorandi del DENERG Fantucci Stefano ed Elisa Fenoglio, che si sono occupati della preparazione controllo del termoflussimetro, è stato possibile ottenere i dati relativi alla conducibilità termica del campione in cemento e del campione geopolimerico.

Per quanto riguarda il campione cemento sono state svolte 3 analisi modificando il gradiente termico a cui la macchina doveva raggiungere il flusso di calore stazionario (Tabella 3.11). Successivamente, osservando i risultati sul campione a base cementizia, si è deciso di eseguire sul campione a base geopolimerica una sola analisi, con il salto termico maggiore, al fine di avere un dato più rappresentativo.

	ΔT °C	T up °C	T low °C
Campione cementizio			
Analisi 1	5	20	25
Analisi 2	10	17	27
Analisi 3	15	15	30
Campione geopolimerico			
Analisi 4	25	12.5	37.5

Tabella 3.11: set point termoflussimetro

È stato quindi possibile definire i valori di conducibilità termica dei materiali, indicati nella . come è possibile vedere le temperature raggiunte dalla macchina non corrispondono esattamente ai set point impostati, occorre fare dunque a questi valori per il calcolo della conducibilità (Tabella 3.12).

	Temp. Media °C	Cond. Up W/mK	Cond. Low W/mK	Cond. Media/analisi W/mK	Cond. Media W/mK
Campione cementizio					
Analisi 1	22.91	1.114	1.115	1.114	1.12033
Analisi 2	23.34	1.118	1.127	1.122	
Analisi 3	23.78	1.117	1.133	1.125	
Campione geopolimerico					
Analisi 4	28.16	-	-	-	0.528

Tabella 3.12: conducibilità termiche calcolate

3.4.2. Camera climatica

La procedura per la produzione dei campioni geopolimerici a base di polvere lapidea ha richiesto un periodo di stagionatura dei campioni all'interno di un ambiente con temperatura e umidità controllata. Questo è stato possibile con l'utilizzo della camera climatica presente all'interno del laboratorio di Architettura Tecnica del Politecnico.

Si tratta della camera climatica Challenge 250 ,prodotta da Angelantoni Industrie S.p.a., rappresentata in Figura 3.48.



Figura 3.48: camera climatica Challenge 250 (foto autoprodotta)

L'interno della camera è costruito in acciaio inossidabile (AISI 304) completamente saldato a tenuta di vapore. La struttura esterna e il basamento della camera sono costruiti in acciaio protetto con vernici epossidiche. La coibentazione è realizzata con schiuma poliuretanică espansa speciale priva di CFC polimerizzata, di densità 40 kg/mc. La macchina presenta una porta corredata di un oblò termoriscaldato; la parte interna è di acciaio inossidabile, la parte esterna è in materiale plastico antiurto. Nell'Allegato 15 sono riportate le specifiche tecniche e le componenti base della macchina.

Per impostare i diversi settaggi e allarmi dei programmi si utilizzano i comandi che appaiono nelle diverse videate del touch screen. La macchina utilizza un software proprietario denominato "Keykratos" gestibile anche senza periferiche esterne (Figura 3.49). In ogni programma è possibile impostare più cicli e ogni ciclo è formato da segmenti. Per ogni segmento occorre indicare la durata (ore e minuti) il set point di temperatura che si vuole raggiungere o a cui si vuole

mantenere la camera climatica. Se durante il segmento si prevede una variazione di temperatura è necessario inoltre indicare anche un gradiente termico ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

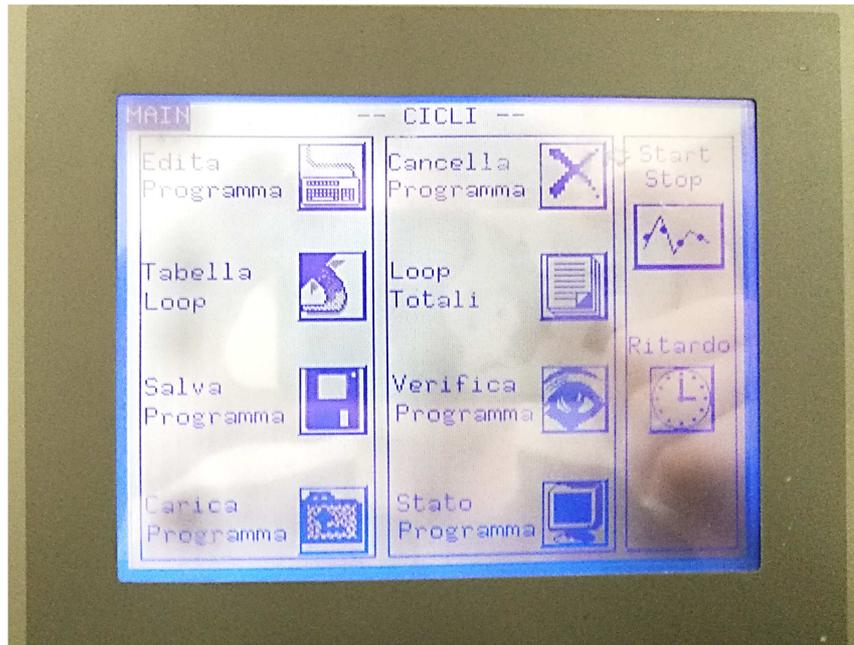


Figura 3.49: pannello di controllo, camera climatica (foto autoprodotta)

La macchina avrebbe presentato anche la possibilità di controllare il grado di umidità interna ma c'è stato un malfunzionamento della parte meccanica relativa alla sonda esterna per cui per mantenere umido l'ambiente durante le fasi di essiccazione si sono disposti insieme ai campioni da stagionare dei contenitori di acqua (Figura 3.50).



Figura 3.50: tecnica per il mantenimento dell'ambiente umido (foto autoprodotta)

In generale per la sintesi dei campioni occorre prevedere un periodo di 72 ore o superiori a una temperatura di 80°C , necessaria per l'attivazione della soluzio-

ne alcalina e l'idrolisi della polvere silicea. Essendo sconosciuto il comportamento della miscela alla variazione delle temperature in ogni programma si sono sempre previsti i segmenti di riscaldamento e di raffreddamento il più lenti possibili. Il limite della macchina corrisponde a $0.01 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Nella Tabella 3.13 seguente sono visibili i settaggi tipicamente utilizzati in ogni sintesi dei campioni geopolimerici.

PROGRAMMA		Durata		Set Point	Gradiente	
Temp. Ini.	24 °C	h	min	°C	°C/min	°C/h
IMPOSTAZIONE SEGMENTI	Segmento 1	93	20	80	0.01	0.6
	Segmento 2	72	0	80	0	0
	Segmento 3	50	0	20	0.02	1.2
Temp. Fin.	20 °C	Tot.	215	20		

Tabella 3.13: impostazioni esempio del programma della sintesi geopolimerica

3.4.3. Prova ad ultrasuoni: modulo elastico dinamico

All'interno del laboratorio di Architettura Tecnica sono stati svolti alcuni test per la definizione del modulo elastico dinamico. La macchina ad ultrasuoni utilizzata è il modello Sirio RP 4000 CSM (Figura 3.51), che permette la misurazione del tempo che un'onda indotta impiega per attraversare i campioni posti sotto analisi, secondo la norma UNI EN 12504-4:2005. In Allegato 16 è riportata la scheda tecnica con le componenti principali del pannello frontale.

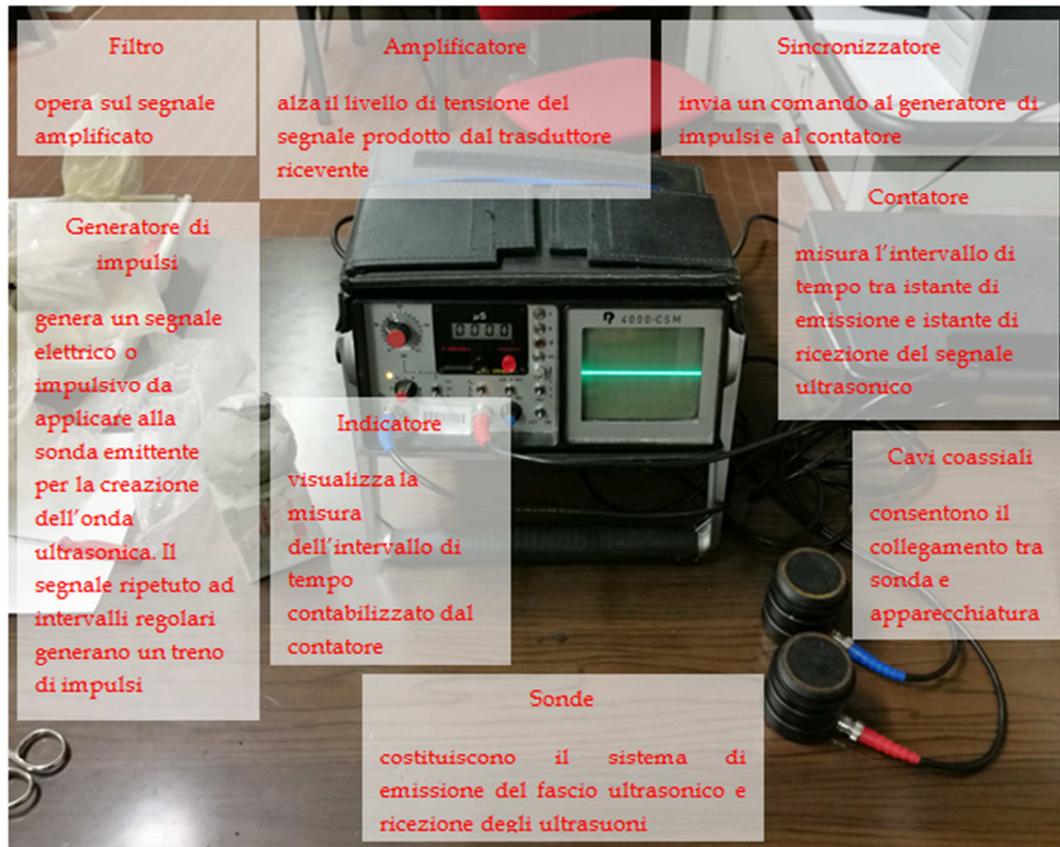


Figura 3.51: tecnica per il mantenimento dell'ambiente umido (foto autoprodotta e modificata)

Essendo una prova non distruttiva, per cui non viene alterato il materiale o distrutta la struttura del campione, è possibile ripetere le misurazioni. I test sono stati ripetuti in tempi diversi. Attraverso tali misurazioni è infatti possibile osservare come il modulo elastico dinamico, quindi la resistenza, dei campioni evolva con il passare del tempo anche a temperatura ambiente dopo l'attivazione in camera climatica. Le onde soniche come quelle ultrasoniche sono onde elastiche ma si differenziano per il campo di frequenze a cui appartengono. Convenzionalmente il limite oltre il quale si passa dalle onde udibili a quelle ultrasoniche è fissato a 20 kHz. Per descrivere le onde ci sono diversi parametri che si dividono in temporali e spaziali. Tra i primi vi è la frequenza (f , Hz) corrispondente alle oscillazioni nell'unità di tempo e è inversamente proporzionale al periodo (T , sec). Ai parametri spaziali appartiene la lunghezza d'onda (λ , m) che indica la distanza tra due massimi. Frequenza e lunghezza

d'onda sono legati tra loro attraverso la velocità (v , m/s) di propagazione attraverso l'equazione

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Eq. 34

la velocità indica lo spazio percorso dall'onda nell'unità di tempo ed funzione della densità del materiale e del modulo elastico

$$v = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}$$

Eq. 35

Con la prova ad ultrasuoni l'obiettivo è la definizione della velocità di propagazione dell'onda attraverso il campione e conseguentemente il calcolo del modulo elastico dinamico E_d .

È doveroso però considerare alcuni fattori che potrebbero falsificare i dati della prova, la velocità di propagazione infatti è in funzione della dimensione e del tipo di aggregato utilizzato nella miscela, grado di compattazione, condizione di temperatura e umidità e in particolar modo della presenza di vuoti o fratture che potrebbero indurre nelle onde fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione.

Le onde ultrasoniche sono indotte dal trasduttore piezoelettrico di materiale ceramico contenuto nelle sonde grazie alle sue proprietà di elettrostrizione. Questo sottile componente di forma circolare permette la conversione dell'energie elettrica in energia meccanica e viceversa. All'interno della sonda sorgente, agli estremi del trasduttore è applicata una differenza di potenziale che implica una compressione e dilatazione del materiale piezoelettrico generando le onde. Attraversato il campione le onde arrivano alla sonda ricevente e perturbano il trasduttore in essa contenuto il quale a sua volta determina una differenza di po-

tenziale misurata dalla macchina. Il calcolo del tempo di volo è così misurabile: l'apparecchiatura misura il tempo che intercorre tra l'induzione e la ricezione dell'onda.

Oltre alla definizione del modulo elastico dinamico, attraverso l'utilizzo della prova ad ultra suoni è possibile anche controllare la presenza di fratture o disomogeneità interne. In questo caso la prova deve essere condotta con l'utilizzo di una sola sonda che costituisce allo stesso tempo sorgente e ricevente. Dallo studio del output del segnale fornito direttamente dalla macchina (Figura 3.52). Nel caso in cui il materiale è privo di imperfezioni o difetti in genere il segnale osservato presenta due picchi: il primo relativo all'onda emessa e il secondo rappresentante l'eco, cioè l'onda riflessa sulla superficie opposta del campione. Se invece l'onda attraversa fessure o cricche una parte di essa è riflessa ottenendo un segnale con un numero maggiore di picchi.

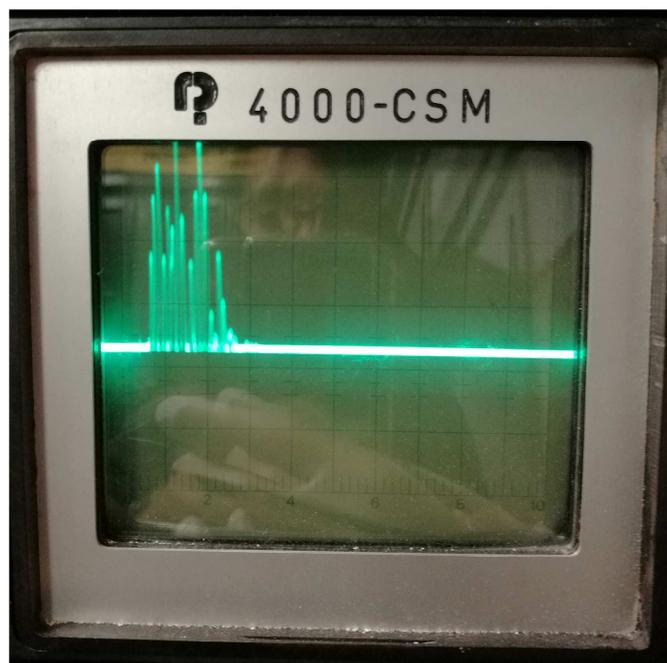


Figura 3.52: esempio segnale output test ultra suoni (foto autoprodotta)

Le fasi procedurali per il compimento dell'analisi agli ultrasuoni, seppur semplici, devono essere eseguite con la massima precisione e attenzione.

Innanzitutto occorre scegliere le sonde più consone. La normativa fornisce le indicazioni necessarie, per cui nei test sono state adoperate le sonde da 50 kHz. In base alle dimensioni dei campioni si sarebbe potuto comunque utilizzare anche le sonde da 120 kHz. In seguito occorre calibrare la macchina. Tale operazione è possibile testando il campione di calibrazione di materiale e forma nota. Dopo aver settato in maniera corretta il selettore del fondo scala e i selettori di amplificazione, agendo sul GIRA-TRIMMER, si modifica la misura a video della macchina fino a farla coincidere con i valori riportati sul tester, (53,5 μ s) (Figura 3.53).



Figura 3.53: calibrazione macchina agli ultrasuoni (foto autoprodotta)

Trattandosi di trasmissione di onde occorre garantire la massima aderenza tra sonda e campione evitando l'insorgere di avvallamenti o difetti superficiali. La presenza di vuoti infatti potrebbe falsificare la prova e determinare valori errati dei tempi misurati. È stato quindi utilizzato materiale plastico malleabile (plastilina), modellato per formare uno strato uniforme tra provino e sonda. Si sarebbero potuti utilizzare anche altri mezzi di accoppiamento come gel polimerici o grasso. Nel caso in esame, però, trattandosi di una malta, cioè un materiale con porosità più alta, tale mezzi accoppianti sarebbero stati quasi completamente assorbiti e non avrebbero più svolto la loro funzione. È quindi possibile

passare alla misurazione del tempo di volo. Accoppiando le onde sulle due facce opposte, si applica una certa pressione e si attende che il dato a video si stabilizzi. Le misurazioni sono state effettuate 4 volte e in modo differito nel tempo per osservare i cambiamenti della resistenza meccanica attraverso l'evoluzione del modulo elastico, in particolare la prima misurazione è riferita al primo giorno dopo che i campioni sono stati estratti dalla camera climatica, la seconda a 7 giorni di stagionatura a temperatura ambiente, la terza dopo 14 giorni. Nell'Allegato 17 sono riportati i risultati attinenti. Per il calcolo del modulo elastico dinamico viene utilizzata l'Eq. 35 in cui è determinata la densità media per ogni miscela considerata ottenendo l'equazione finale

$$E_d = (\rho_m \cdot v^2) \cdot 10^{-6}$$

Che definisce il modulo elastico secante in MPa. In Tabella 3.14 sono invece riportati i valori medi dei moduli dinamici a 20 giorni di stagionatura della miscela n.6.

Campione	Modulo elastico dinamico		E _d medio	deviazione standard
-	MPa	GPa		
6.3g3fgn.B.1	24910.82	24.91	23.211	2.299
6.3g3fgn.B.2	25123.28	25.12		
6.3g3fgn.B.3	26000.88	26.00		
6.3g3fgn.B.4	22649.66	22.65		
6.3g3fgn.B.5	20367.19	20.37		
6.3g3fgn.B.6	20212.01	20.21		
5.3g3fgn.B.1	20780.13	20.78	20.868	0.224
5.3g3fgn.B.2	21291.10	21.29		
5.3g3fgn.B.3	20531.52	20.53		
4.3g3fgn+.B.1	19549.62	19.55	20.159	0.334
4.3g3fgn+.B.2	20700.48	20.70		
4.3g3fgn+.B.3	20228.24	20.23		

Tabella 3.14: modulo elastico dinamico

3.4.4. Prove di flessione e compressione: carico a rottura e modulo elastico statico

Dopo le dovute valutazioni per quanto riguarda il modulo elastico dinamico sono state eseguite le prove a flessione su tre punti e delle prove a compressione per determinare il carico di rottura e il modulo elastico statico (E). Il modulo elastico descrive il rapporto che intercorre tra sforzi e deformazioni che un campione subisce se sottoposto ad azioni esterne di compressione o trazione. In un materiale perfettamente elastico il modulo rappresenta esattamente la costante di proporzionalità lineare tra sforzi e deformazioni. Nel comportamento reale di materiali (Figura 3.54), come le malte cementizie, è possibile osservare la legge lineare solo per valori di sollecitazioni minori, per valori più alti il comportamento elastico del materiale segue una legge parabolica fino ai valori di rottura (f_{cd}).

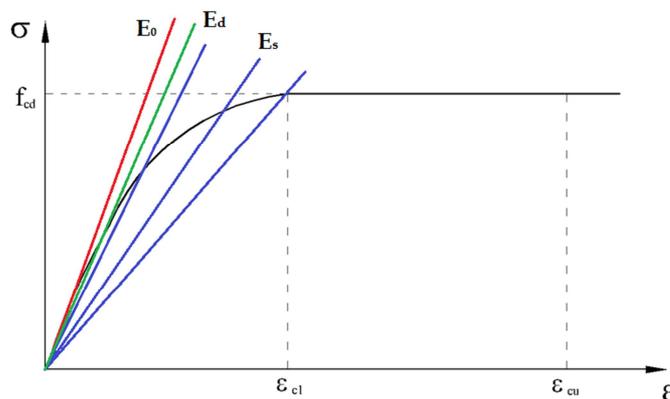


Figura 3.54: comportamento reale a compressione

È quindi possibile distinguere due tipi di modulo elastico. Il primo fa riferimento al modulo elastico tangente alla curva di sforzo deformazione nell'origine (E_0); il secondo è invece il modulo elastico secante (E_s) corrispondente al rapporto del carico applicato (σ) e la deformazione raggiunta (ϵ). Risulta quindi fondamentale definire le condizioni di carico e i valori di sforzo applicati in modo opportuno per la definizione del modulo elastico secante. La normativa UNI EN 12390 - 13: 2013 indica come condizioni di prova un carico pari a 1/3

del carico massimo di rottura del materiale (f_{cd}). In generale vale la seguente relazione

$$E_0 \cong E_d > E_{s,i}$$

Questo perché il range delle sollecitazioni indotte nei campioni dalle onde ultrasoniche è molto piccolo quasi a rappresentare le condizioni di tangenza all'origine.

Le prove sono state svolte all'interno del laboratorio MastrLab del Politecnico di Torino utilizzando una macchina universale di prova elettroidraulica MTS e si sono divise in più fasi.

La prima a riguardato le prove a flessione (Figura 3.55) su tre punti con controllo di spostamento con la quale è stato possibile studiare i comportamenti dei campioni a flessione oltre la rottura. L'apparecchiatura consta di un supporto inferiore formato da 2 rulli in acciaio e di un pistone mobile superiore che, attraverso un terzo rullo d'acciaio, impartisce un'azione verticale per determinare la separazione nella zona centrale del campione. In Allegato 18 sono riportati i grafici delle prove effettuate e in Tabella 3.15 i valori dei carichi massimi a flessione.

Campione	Resistenza a flessione			Resistenza a flessione media Mpa	Deviazione standard
	kN	kN	Mpa		
-					
6.3g3fgn.B.4	1.923		4.507	3.649	0.858
6.3g3fgn.B.6	1.191	1.557	2.791		
5.3g3fgn.B.1	0.890			2.086	-
4.3g3fgn+.B.3	1.280			3.000	-

Tabella 3.15: carico a rottura per flessione

La tabella mostra la forza massima misurata dalla MTS e le relative resistenze del materiale calcolate con la nota equazione di Navier.

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{1}{bh^2} F$$

Dove

- b e h sono le dimensioni della base quadrata del campione con lato pari a 40 mm;
- l è la distanza tra i due appoggi inferiori pari a 100 mm;
- F è la forza massima applicata dalla strumentazione.

A titolo esplicativo in Figura 3.56 è riportato l'esempio relativo al campione 6.3g3fgn.B.4.



Figura 3.55: prova a flessione su 3 punti (foto autoprodotta)

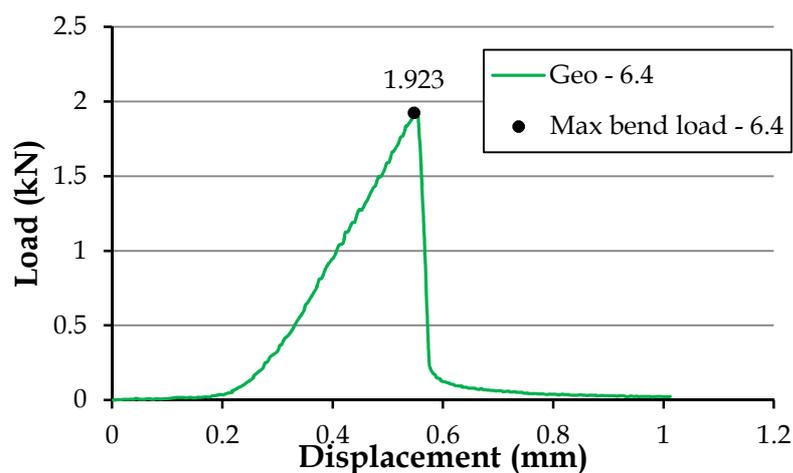


Figura 3.56: comportamento a flessione campione 6.3g3fgn.B.4

Con i provini fessurati si sono separate due metà con le quali si è proceduto con la prova a compressione distruttiva per la definizione del carico a rottura. Per

questa fase del processo viene utilizzata la medesima apparecchiatura. I supporti utilizzati precedentemente vengono sostituiti con 2 piastre, quella superiore presenta uno snodo sferico per adattarsi alla non perfetta planarità della superficie del campione. Il campione viene quindi inserito in un apposita cella come mostrato in Figura 3.57.

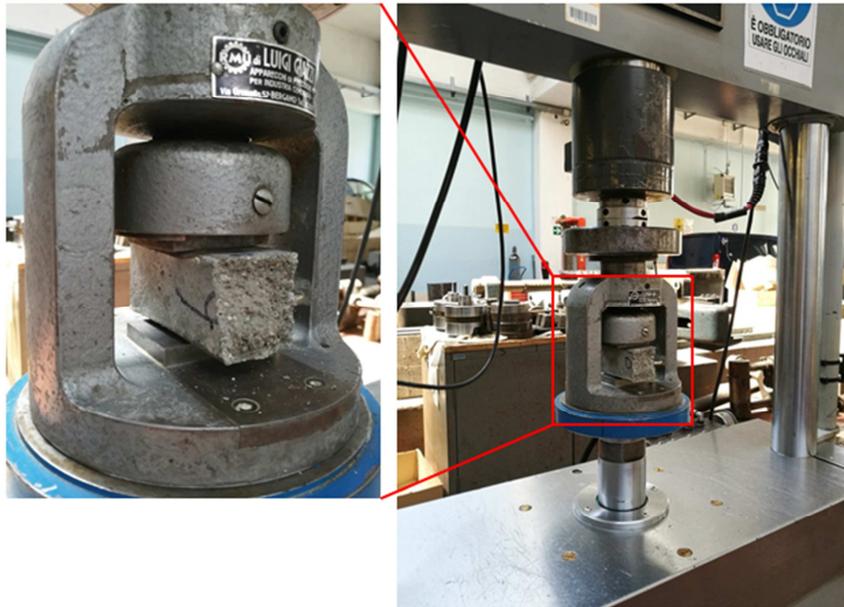


Figura 3.57: prova a compressione per il carico a rottura (foto autoprodotta)

Le due metà sono compresse fino a portarle a rottura. Il dato di carico ottenuto viene memorizzato ed eseguita la media dei risultati per ogni miscela (Tabella 3.16).

Campione	Resistenza a compressione		Deviiazione standard
	kN	Mpa	
6.3g3fgn.B.4_A	5.601	3.501	0.099
6.3g3fgn.B.4_B	5.877	3.673	
6.3g3fgn.B.6_A	5.300	3.312	0.151
6.3g3fgn.B.6_B	5.030	3.144	
5.3g3fgn.B.1_A	16.234	10.147	0.565
5.3g3fgn.B.1_B	16.719	10.449	
4.3g3fgn+.B.3_A	14.785	9.241	0.099
4.3g3fgn+.B.3_B	12.978	8.111	

Tabella 3.16: carichi a rottura, la prova a compressione

In tale occasione è stato testato anche un campione relativo alla miscela n. 3 (Figura 3.58) riportando capacità di resistenza a rottura decisamente maggiori. Il campione ha resistito a un carico pari a 35.925 kN equivalente a uno sforzo di compressione di 22.453 MPa, purtroppo, però, non si disponevano di altri campioni integri per studiare il modulo dinamico e secante.



Figura 3.58: prova a compressione miscela n. 3

Per quanto riguarda le resistenze meccaniche, in letteratura è possibile trovare numerosi articoli che fanno riferimento alle prove meccaniche su materiali geopolimerici, occorre però considerare l'aspetto fondamentale legato alla grande aleatorietà delle proprietà del materiale in funzione della composizione, delle percentuali di essa, in base agli attivatori alcalini, ai rapporti molari di questi, agli apporti d'acqua utilizzati nella miscela, ai tempi e alle condizioni di stagionatura (temperatura, umidità e pressione indotta) (paragrafo 2.3.3). Numerosi studi riguardano l'impiego di polvere lapidea per la produzione di geopolimeri. Ad esempio Muniz-Villareal et al. (2010) ha analizzato gli effetti della temperatura sulle resistenze caratteristiche a compressione dei geopolimeri a base di metacaolino, osservando un range di resistenza a compressione tra 7 e 18 MPa per trattamenti termici tra 30 e 90 °C. Oppure, il progetto di ricerca di Bassir Diop M. et al. (2007) ha sviluppato possibili nuove tecniche di produzione di elementi laterizi geopolimerici derivanti da un tufo ad alto contenuto alluminosilicato. Anche in questo caso sono state considerate diverse temperature per l'attivazione della reazione e la stagionatura del materiale con miscele preparate

in diverse concentrazioni di soluzioni alcaline. In particolare sono stati misurati valori di sforzo a compressione massimo tra 5 e 22 MPa per temperature di stagionatura tra 40 e 80 °C e con rapporti molari tra 4 e 12 per la concentrazione di soluzione di idrossido di sodio utilizzata. Un altro esempio riguarda il lavoro di Ahmari et al. (2012) che ha studiato nuovi mattoni derivanti da materiali di scarto delle lavorazioni in miniera. Nello specifico sono stati valutati i principali fattori delle proprietà fisiche e meccaniche del geopolimero: concentrazione di soluzione di sodio idrossido (NaOH) (10 e 15 M), contenuto di acqua (8-18%) e temperatura di polimerizzazione (60-120 °C), considerando inoltre per la produzione dei campioni una pressione di formatura (0-35 MPa) e si sono ottenuti valori di resistenza alla compressione tra 8 e 25 MPa. Ozer I. et al. (2015) hanno verificato le relazioni tra le caratteristiche strutturali e la resistenza a compressione in geopolimeri a base di metacaolino con differenti rapporti molari Si/Al ottenendo resistenze a compressione tra 13 e 23 MPa per soluzioni con rapporto Si/Al molare tra 1.77 e 2.2. Granizo Luz M. et al. (2007) si sono concentrati tra gli effetti che si hanno in base alla composizione geopolimerica a base di metacaolino sulla resistenza a flessione. Sono stati testati campioni derivanti da metacolino di due origini e facendo variare il rapporto molare tra gli ossidi di sodio e silicio si è ottenuto un range di resistenza a flessione tra 2 e 12 MPa. Andini S. et al. (2008) hanno testato diverse composizioni di geopolimero a partire da cenere volante variando il rapporto Si/Al e le condizioni di stagionatura (temperatura/tempo) osservando variazioni dello sforzo massimo a compressione da 2.6 a 18.6 MPa. Infine si riportano i valori delle resistenze meccaniche delle miscele geopolimeriche in riferimento al lavoro di Palmero P. et al. (2017), che è stato il punto di partenza per la preparazione del materiale geopolimerico di questo progetto di tesi. Le miscele investigate nell'articolo sono state prodotte a partire da due fanghi lapidei: il primo relativo al fango CLS, il medesimo materiale analizzato in questo lavoro di tesi, e il secondo derivante da un'altra industria per la finitura di pietre ornamentali denominato fango SRM. In Tabel-

la 3.17 si osservano i dati relativi delle resistenze a flessione e a compressione ottenuti.

Geopolimero		CLS	SRM
Resistenza a flessione	MPa	12.3	13.9
Resistenza a compressione	MPa	28.6	35.0

Tabella 3.17: resistenze a flessione e compressione geopolimeri CLS e SRM (Palmero P. et al. 2017)

Inoltre dovendo ipotizzare la sostituzione del materiale geopolimerico al comune cemento portland si ricordano i valori tipici di resistenza a compressione delle malte cementizie in base alle diverse classi di resistenza secondo la normativa UNI EN 197/1 che vanno da 32.5 MPa a 52.5 MPa.

In generale si osservano quindi resistenze meccaniche inferiori rispetto ai valori trovati in letteratura ma che non si discostano di molto considerando il fatto che il materiale geopolimerico studiato utilizza il materiale di scarto fangoso non come filler ma come unico materiale attivante della miscela, in completa sostituzione della polvere di cemento e senza l'utilizzo di materie per aumentare le caratteristiche idrauliche.

Successivamente sono stati eseguiti i test che hanno riguardato le prove a compressione non distruttive per la determinazione del modulo elastico. Seguendo il metodo B descritto nella normativa di riferimento (UNI EN 12390 - 13) (Allegato 19) sono state le condizioni di prova su 3 cicli di carico e scarico in funzione dei comportamenti a rottura ottenuti nei test precedenti. Durante la prova con l'utilizzo di due estensimetri opportunamente fissati al campione a circa 5 cm dal centro, sono misurate le deformazioni indotte (Figura 3.59).

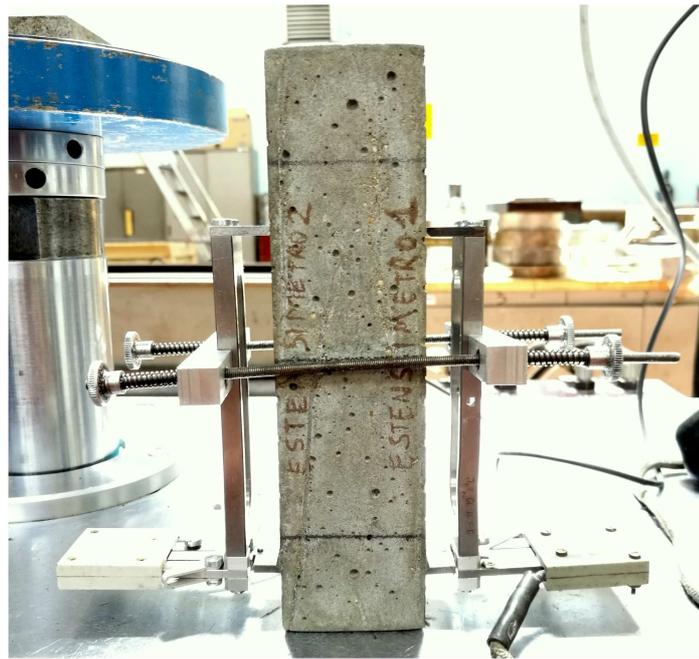


Figura 3.59: prova a compressione per il modulo elastico (foto autoprodotta)

Vengono settate le condizioni di prova su 3 cicli di carico e scarico consecutivi (Tabella 3.18). Questo è necessario per stabilizzare lo strumento e avere valori finali, su cui calcolare il modulo elastico, più attendibili su spostamenti e carichi applicati. (Figura 3.60).

	Area mm ²	Miscela 6 carico kN	miscela 5 carico kN	Miscela 4 carico kN
	1600.000	5.452	16.477	13.882
	C_{max}			
sforzo nominale superiore (kN)	$C_a = C_{max}/3$	1.817	5.492	4.627
sforzo nominale inferiore (kN)	$C_b = 15\% C_{max}$	0.818	2.472	2.082
sforzo nominale precarico (kN)	$0.5 \text{ (Mpa)} * \text{Area (mm}^2)$	0.800	0.800	0.800
velocità di carico min (kN/s)	V_{min}	0.640	0.640	0.640
velocità di carico max (kN/s)	V_{max}	0.960	0.960	0.960

Tabella 3.18: valori carichi imposti nel programma per la prova a compressione

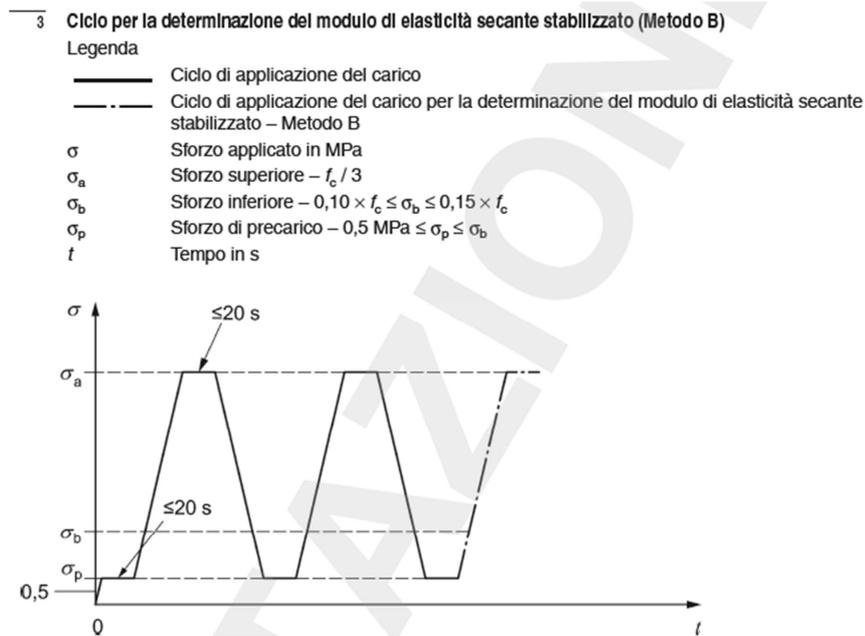


Figura 3.60: metodo B, determinazione modulo elastico secante (UNI EN 12390 - 13)

All'avvio viene applicato lo sforzo di precarico (σ_p) e mantenuto per 5 secondi. Successivamente con velocità costante viene aumentato lo sforzo fino allo sforzo nominale superiore (σ_a) e mantenuto per 15 secondi. Con la medesima velocità di carico il campione viene quindi scaricato fino al valore di sforzo nominale inferiore e nuovamente mantenuto per 15 secondi. Questo ciclo viene ripetuto 3 volte come mostrato in Figura 3.61. Alla terza fase di carico sono quindi osservati gli spostamenti misurati dagli estensimetri, determinate le deformazioni e in seguito vengono calcolati gli sforzi applicati in base ai carichi misurati dalla cella di carico e quindi calcolato il modulo elastico secante. Nel caso della miscela n. 6 essendo i valori del precarico e del carico inferiore quasi coincidenti sono stati impostati nella programmazione della prova lo stesso valore.

In Figura 3.61 è riportato l'output delle misurazioni della prova a compressione ciclica relativa al primo campione della miscela n. 4 (4.3g3fgn.B.2), si osserva sull'asse delle ascisse il tempo intercorso fino al termine della prova e sull'asse delle ordinate i carichi applicati. In Figura 3.62 invece si osservano, sempre in funzione del tempo di prova, gli spostamenti misurati dai due estensimetri (Dd1 e Dd2) di cui è poi stata calcolata la media.

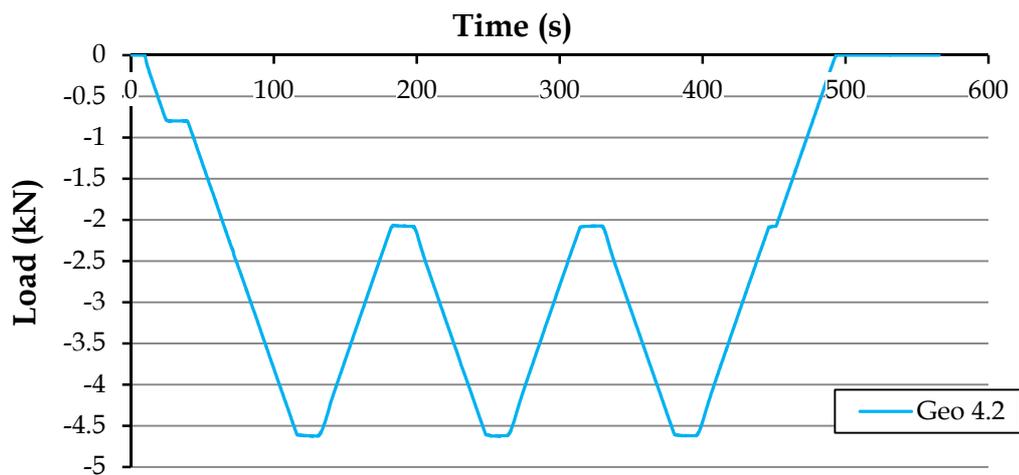


Figura 3.61: grafico dei carichi, prova a compressione ciclica

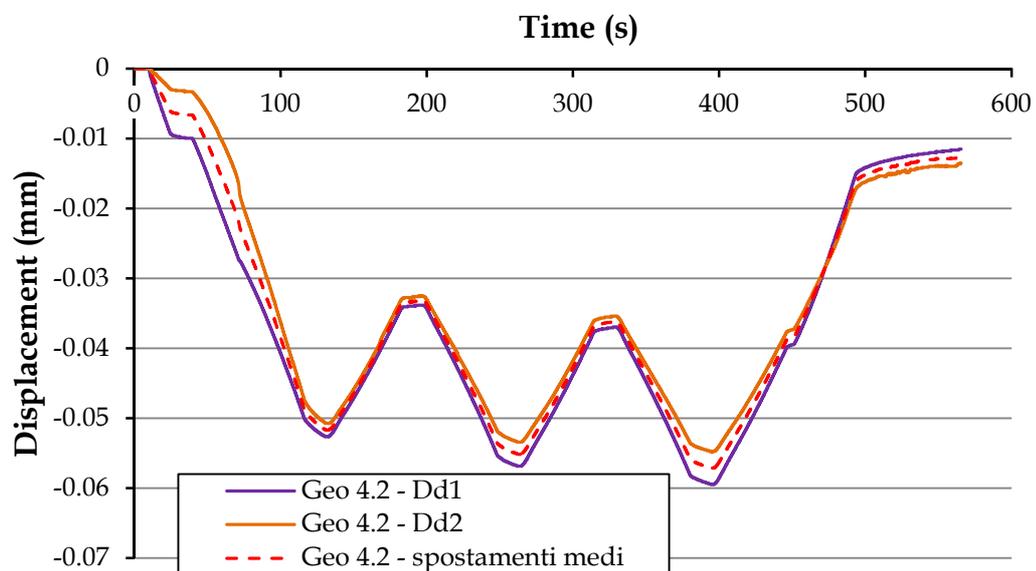


Figura 3.62: grafico spostamenti estensimetri, prova a compressione ciclica

Unendo le informazioni relative agli spostamenti e ai carichi applicati è possibile determinare l'andamento delle deformazioni in funzione degli sforzi applicati (MPa). Le deformazioni sono state determinate dividendo gli spostamenti medi rispetto alla base di misurazione degli estensimetri (10 cm) mentre gli sforzi sono stati calcolati dividendo i carichi rispetto alla base di appoggio dei campioni (1600 mm²). Si riporta in Figura 3.63 il grafico così ottenuto.

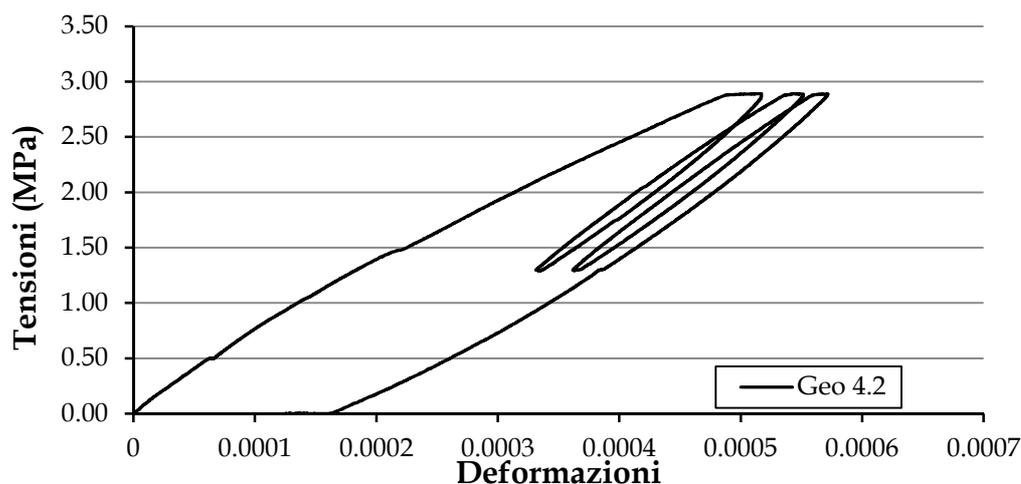


Figura 3.63: grafico sforzo/deformazione, prova a compressione per la determinazione del modulo elastico

Nell'Allegato 20 sono riportati i grafici relativi a spostamenti misurati e carichi applicati dei campioni restanti. In fine in Tabella 3.19 si osservano i valori dei moduli elastici ottenuti osservando il tratto del terzo ciclo di carico.

campione	Ciclo carico n. 3		E		E		Deviazione standard
	σ	ϵ	MPa	MPa	GPa	GPa	
-	MPa	mm/mm	MPa	MPa	GPa	GPa	
6.3g3fgn.B.1	fin.	0,50	1,3285E-04	6856,8	6,857		
	ini.	1,13	2,2400E-04				
6.3g3fgn.B.2	fin.	0,51	1,5675E-04	6240,6	6,241	6,023	0,785
	ini.	1,14	2,5690E-04				
6.3g3fgn.B.3	-						
6.3g3fgn.B.5	fin.	0,51	2,3640E-04	4972,2	4,972		
	ini.	1,14	3,6210E-04				
5.3g3fgn.B.2	fin.	1,54	5,5065E-04	7057,3	7,057	6,244	0,813
	ini.	3,43	8,1775E-04				
5.3g3fgn.B.3	fin.	1,54	1,8020E-03	5431,0	5,431		
	ini.	3,43	2,1500E-03				
4.3g3fgn+.B.1	fin.	1,29	6,3540E-04	5206,3	5,206	6,527	1,321
	ini.	2,89	9,4320E-04				
4.3g3fgn+.B.2	fin.	1,30	3,62E-04	7848,7	7,849		
	ini.	2,89	5,65E-04				

Tabella 3.19: modulo elastico secante

Anche per quanto riguarda il modulo elastico un diretto confronto con i dati in letteratura risulta difficile. È possibile fare riferimento allo studio di Duxon et al. (2007) all'interno del quale sono stati studiati gli effetti del rapporto alcalino e Si/Al sullo sviluppo delle proprietà meccaniche di geopolimeri a base di metacaolino. È stato osservato in particolare un aumento del modulo elastico al crescere del rapporto Si/Al (Figura 2.11) tra i valori di 1.5 e 6 GPa. Un altro spunto di confronto potrebbe essere il lavoro di Yan D. et al. (2016) nel quale sono stati studiati nuovamente gli effetti della composizione sulle proprietà elastiche di una composizione metacaolinica. Si è osservato in particolare che al variare dell'equivalente alcalino e del contenuto di silice il modulo di Young cresce da 1.1 a 6.1 GPa. Più significativo risulta lo studio portato avanti da Andini S. et al. (2008) con il quale si è osservata una variazione del modulo elastico tra 5.0 GPa e 10.5 GPa. In generale tutti questi valori risultano inferiori rispetto ai moduli elastici di malte prodotte a base di cemento Portland che vanno da 10 GPa a 40 GPa a seconda dei rapporti acqua/cemento, condizioni di polimerizzazione e stagionatura) (Haecker C.J. et al. 2005) o del calcestruzzo che in base alla Norme Tecniche delle Costruzioni presentano valori tra 27 e 44 GPa.

Osservando quindi i risultati dei test svolti in questo progetto di tesi è possibile affermare che siano in linea con i valori tratti dalla bibliografia.

4. ANALISI NUMERICHE DELLO SCAMBIO TERMICO DI CONCI ENERGETICI PER LE GALLERIE

4.1. Introduzione a Flac3d

FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) è un programma utilizzato per la risoluzione di modelli tridimensionali della meccanica ingegneristica attraverso le differenze finite esplicite e offre uno strumento di analisi ideale per la soluzione di problemi tridimensionali nell'ingegneria geotecnica. FLAC3D estende la formulazione numerica consolidata per le analisi bidimensionali di FLAC a tre dimensioni. I modelli sono costituiti da elementi poliedrici all'interno di una griglia tridimensionale che viene regolata dall'utente per adattarsi alla forma dell'oggetto da modellare. A ogni elemento è possibile conferire diverse caratteristiche, legami costitutivi e comportamenti a rottura.

Il metodo di calcolo alle differenze finite, come il metodo di calcolo agli elementi finiti, traduce un insieme di equazioni differenziali in equazioni di matrice per ciascun elemento, che correlano le forze agenti sui nodi con gli spostamenti. Tuttavia, FLAC3D differisce nei seguenti aspetti:

- Per la modellazione accurata dei carichi di collasso plasticizzanti e il comportamento plastico è utilizzata la "discretizzazione mista" (Marti e Cundall 1982). Si ritiene che questo metodo sia fisicamente più giustificabile del metodo di "integrazione ridotta" comunemente usato con elementi finiti;
- Vengono utilizzate le equazioni dinamiche complete del movimento. Ciò consente a FLAC3D di seguire processi fisicamente instabili senza difficoltà numerica.
- Viene utilizzato uno schema di soluzione "esplicito" (in contrasto con i metodi impliciti più comuni). Gli schemi espliciti possono seguire la non linearità arbitraria nelle leggi di sforzo/deformazione con la quasi la stessa richiesta di memoria del computer e lo stesso tempo delle leggi lineari, mentre le soluzioni implicite possono impiegare molto più tempo per risolvere problemi non lineari. Inoltre, non è necessario memorizzare alcuna matrice ciò significa che è possibile

modellare un gran numero di elementi con un requisito di memoria modesto e una simulazione di grande deformazione non richiede molto più tempo di una corsa di piccole deformazioni.

- FLAC3D è robusto nel senso che può gestire qualsiasi modello costitutivo senza alcuna regolazione dell'algoritmo della soluzione; molti codici di elementi finiti richiedono tecniche di soluzione diverse per diversi modelli costitutivi.

Occorre però considerare che le simulazioni lineari funzionano più lentamente con FLAC3D che con programmi di elementi finiti equivalenti. FLAC3D è più efficace se applicato a problemi non lineari o di grande deformazione o in situazioni in cui può verificarsi instabilità fisica.

4.1.1. Caratteristiche generali

Il programma ha quindici modelli di base built-in: il modello "null"; tre modelli di elasticità (elasticità isotropa, trasversalmente isotropa e ortotropica); e undici modelli a comportamento plastico (Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, ceppo-indurimento/ammorbidimento, ubiquitous-joint, bilineare bilancian-do/ammorbidimento giunto ubiquitario, doppio rendimento, Camclay modificato, cap-yield, plastico elastica (tipo iperbolico, Hoek-Brown e Hoek-Brown modificati). Ogni zona della griglia può avere un modello o una proprietà di un materiale diverso e può essere specificato un gradiente continuo o una distribuzione statistica di qualsiasi proprietà. Inoltre, è disponibile un modello di interfaccia (o piano di scorrimento) per rappresentare interfacce distinte tra due o più parti della griglia. Le interfacce sono piani su cui sono consentiti lo scorrimento e/o la separazione, simulando così la presenza di faglie, giunti o confini di attrito. FLAC3D contiene un generatore di griglia 3D automatico in cui le griglie sono create manipolando e connettendo forme predefinite. La griglia 3D è definita da un sistema globale di coordinate x , y , z . Ciò fornisce maggiore flessibilità nella creazione del modello e nella definizione dei parametri.

Per definire le condizioni al contorno e le condizioni iniziali si impostano condizioni limite di velocità (e spostamento) o condizioni limite (e forza). Possono essere fornite anche condizioni iniziali di stress, incluso il carico gravitazionale e le tensioni efficaci inserendo la presenza della falda freatica.

FLAC3D contiene anche un potente linguaggio di programmazione incorporato, FISH, che consente all'utente di definire nuove variabili e funzioni. Le funzioni FISH offrono la possibilità di personalizzare le analisi per soddisfare esigenze specifiche:

- variazioni di proprietà prescritte dall'utente nella griglia (ad es. aumento non lineare del modulo con profondità);
- tracciamento e stampa di variabili definite dall'utente;
- implementazione di generatori del modello tridimensionale speciali;
- specificazione di condizioni al contorno particolari;
- variazioni nel tempo e nello spazio;
- automazione degli studi di parametri.

Inoltre FLAC3D presenta ampie funzionalità grafiche per generare diagrammi e plottaggi di qualsiasi variabile di problema. Le caratteristiche di plottaggio includono i grafici delle superfici nascoste, i grafici dei contorni della superficie e i grafici vettoriali.

4.1.2. Modellazione processo fisico e interazioni

FLAC3D presenta come modalità di calcolo predefinita l'analisi meccanica statica. È possibile, però, eseguire un'analisi del flusso dei fluidi o analisi di trasporto del calore. I diversi tipi di analisi possono essere eseguiti in modo indipendente o accoppiato. Quindi il modello può essere studiato con diversi gradi di interazione.

- Analisi idraulica/meccanica (H-M), con cui è possibile studiare gli effetti meccanici a causa della presenza o della variazione di un fluido o al contrario osservare l'evoluzione della pressione di un fluido all'interno di un volume se sottoposto a sollecitazioni esterne.
- Analisi termo/meccanico (T-M), in questo caso l'accoppiamento è a senso unico. Il cambiamento di temperatura può indurre una variazione di sollecitazione meccanica in funzione del coefficiente di espansione termica, al contrario cambiamenti meccanici nel corpo non comportano cambiamenti di temperatura o cambiamenti nelle proprietà. È possibile però definire le proprietà meccaniche in funzione delle variazioni di temperatura attraverso le funzioni FISH.
- Analisi termo/idraulica (T-H-M): Il calcolo termico può essere accoppiato al calcolo del flusso del fluido facendo variare la pressione in funzione della temperatura e delle deformazioni volumetriche meccaniche. Allo stesso modo le deformazioni volumetriche possono derivare dall'espansione termica del fluido o della sua pressione. Il flusso di fluidi può anche influenzare il trasferimento di calore, è possibile studiare il trasporto di calore per convezione.

4.1.3. Nomenclatura

FLAC3D utilizza la nomenclatura convenzionalmente utilizzata da altri programmi alle differenze finite o elementi finiti. In Figura 4.1 è illustrato un esempio per indicare la terminologia utilizzata in FLAC3D.

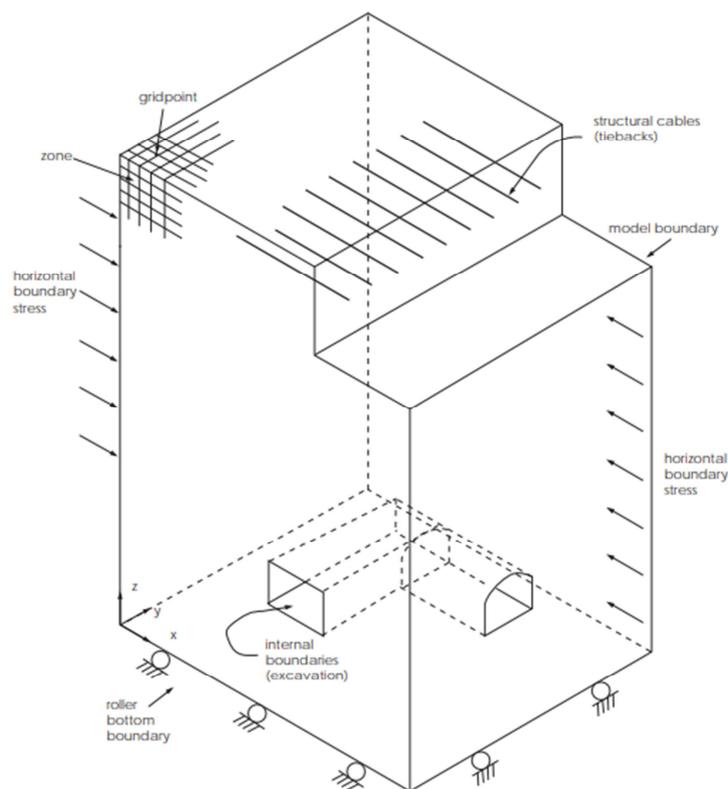


Figura 4.1: terminologia FLA3D (Manuale FLAC3D, Getting started)

FLAC3D MODEL: il modello è creato dall'utente per simulare un problema fisico. Quando si fa riferimento a un modello FLAC3D, l'utente implica una sequenza di comandi FLAC3D che definisce le condizioni del problema per la soluzione numerica.

ZONE: la “zona” è il più piccolo dominio geometrico entro il quale viene valutata la variazione di un fenomeno. Le zone poliedriche di diverse forme sono utilizzate per creare modelli e possono essere plottate tramite l'interfaccia grafica. Un altro termine per zona è “elemento”.

GRIDPOINT: i punti di griglia sono associati agli angoli delle zone. Vi sono quattro, cinque, sei, sette o otto punti griglia associati a ciascuna zona poliedrica, a seconda della forma della zona. Un insieme di coordinate x , y e z viene assegnato a ciascun punto della griglia, specificando in tal modo la posizione esatta delle zone. I gridpoint possono essere chiamati anche punti nodali e nodi.

FINITE DIFFERENCE GRID: la griglia delle differenze finite è un insieme di una o più zone. Un altro termine per la griglia è mesh. La mesh identifica anche le posizioni di memoria di tutte le variabili di stato nel modello. Tutte le quantità di vettori (per esempio forze, velocità e spostamenti) sono memorizzate in posizioni di griglia, mentre tutte le quantità scalari e tensoriali (ad es., Proprietà di sollecitazione e materiale) sono memorizzate nei centroidi della zona.

CONFIGURAZIONE DEL MODELLO - Il limite del modello è la periferia della griglia delle differenze finite. I confini interni (cioè i fori all'interno della griglia) sono anche dei limiti del modello.

MODEL BOUNDARY: la condizione al contorno è la prescrizione di un vincolo o condizione controllata lungo un limite del modello (ad esempio, uno spostamento fisso o forza per problemi meccanici, un confine impermeabile per problemi di flusso di acque sotterranee, confine adiabatico per problemi di trasferimento di calore, ecc.).

INITIAL CONDITION: definisce la condizione iniziale di tutte le variabili nel modello (ad es. sollecitazioni o pressioni dei pori) prima di qualsiasi variazione o disturbo di carico.

CONSTITUTIVE MODEL: il modello costitutivo (o materiale) rappresenta il comportamento di deformazione e resistenza delle diverse zone della mesh. I modelli costitutivi e le proprietà dei materiali possono essere assegnati individualmente a ciascuna zona del modello.

NULL ZONE: le zone nulle sono zone che rappresentano i vuoti (cioè, nessun materiale presente).

SUB-GRID: la mesh può essere composta da sottogruppi. Le sub-mesh possono essere utilizzate per creare regioni di forme diverse nel modello.

ATTACHED FACE: le facce collegate sono superfici separate della mesh o di sub-mesh che sono collegate o unite insieme. Queste superfici devono essere complanari e toccanti, anche se i nodi non devono necessariamente coincidere.

INTERFACE: un'interfaccia definisce una zona di separazione all'interno della mesh, lungo la quale durante il processo possono avvenire spostamenti o separazioni. Questo strumento è utilizzato per rappresentare una discontinuità fisica, un piano di contatto o un'interfaccia tra due materiali diversi.

RANGE: definisce l'intervallo di elementi all'interno del modello sui quali viene eseguita un'operazione. Il range, specificato in termini di coordinate x , y , z , rimane fisso nello spazio anche se il modello è in movimento, non è collegato alle zone e ai punti della mesh. Il range, specificato in termini di gruppi include lo spazio all'interno di tutte le zone comprese ed è collegato al modello.

GROUP: in un modello il gruppo fa riferimento a una raccolta di oggetti identificati da un nome univoco. I gruppi sono utilizzati per limitare l'intervallo di alcuni comandi. Qualsiasi comando di riferimento a un nome di gruppo indica che il comando deve essere eseguito su quel gruppo di oggetti.

ID NUMBER: i singoli elementi di un modello FLAC3D sono identificati da numeri di identificazione (ID). I seguenti elementi del modello hanno numeri di identificazione: interface, grid point, zone, volumi, punti di riferimento, storie, tabelle, elementi di mesh ed entità di elementi strutturali (cioè travi, cavi, pile, gusci, rivestimenti e geogriglie). Si tratta di numeri univoci che aiutano l'utente a identificare elementi specifici in un modello.

STRUCTURAL ELEMENT: inFLAC3D sono disponibili due tipi di elementi strutturali. Gli elementi lineari a due nodi rappresentano il comportamento di travi, cavi e pile. Gli elementi triangolari a tre nodi e triangolari rappresentano elementi bidimensionali (ad esempio geogriglie). Gli elementi strutturali sono utilizzati per simulare l'interazione del supporto strutturale all'interno di un terreno o di una massa rocciosa. Ogni entità di elemento strutturale (trave, cavo,

palo, guscio, rivestimento o geogriglia) è composta da tre componenti: nodi; elementi individuali (chiamati SEL); e collegamenti nodo/mesh. Le caratteristiche di ciascuna di queste componenti distinguono il comportamento delle entità del cavo, pila, guscio, rivestimento e geogriglia.

STEP: poiché FLAC3D utilizza un codice esplicito, la soluzione a un problema richiede una serie di passaggi computazionali. Durante lo stepping computazionale, l'informazione associata al fenomeno in esame viene propagata attraverso le zone nella griglia delle differenze finite. È necessario un certo numero di passaggi per arrivare a uno stato di equilibrio (o flusso costante) per una soluzione statica. Quando si utilizza l'opzione di analisi dinamica, STEP fa riferimento al timestep effettivo per il problema dinamico.

STATIC SOLUTION: una soluzione statica o in regime stazionario viene raggiunta in FLAC3D quando la velocità di variazione dell'energia cinetica in un modello si avvicina a un valore trascurabile. In alcune pubblicazioni di elementi finiti (FE), c'è l'errata idea che un metodo di soluzione dinamica non possa produrre un vero stato di equilibrio, rispetto a una soluzione FE, che si ritiene soddisfatti perfettamente l'insieme delle equazioni di governo all'equilibrio. In effetti, entrambi i metodi soddisfano solo approssimativamente le equazioni, ma il livello degli errori residui può essere ridotto al minimo. In FLAC3D, il livello di errore è quantificato oggettivamente come il rapporto tra la forza sbilanciata in un punto della griglia e la media dell'insieme di forze assolute che agiscono sul punto della griglia. Questa misura di errore è molto simile ai criteri di convergenza utilizzati nelle soluzioni FE. In entrambi i casi, il processo di soluzione viene terminato quando l'errore è inferiore al valore desiderato.

UNBALANCED FORCE: unbalanced force indica quando viene raggiunto uno stato di equilibrio meccanico (o l'inizio del flusso plastico) per un'analisi statica. Un modello è in perfetto equilibrio se il vettore di forza nodale netto (la forza risultante) in ogni punto della griglia è zero. La forza massima non in equilibrio non raggiungerà mai esattamente lo zero per un'analisi numerica, ma il modello

è considerato in equilibrio quando la forza massima non in equilibrio è piccola rispetto alle forze applicate totali nel problema. Se la forza non in equilibrio si avvicina a un valore diverso da zero costante, questo probabilmente indica che la rottura e il comportamento plastico si verificano all'interno del modello. Quando un nodo è fissato in una data direzione, il componente della forza non in equilibrio in quel punto è equivalente alla forza di reazione.

DYNAMIC SOLUTION: per una soluzione dinamica, sono risolte le equazioni di moto dinamiche complete (compresi i termini inerziali); la generazione e la dissipazione dell'energia cinetica influenzano direttamente la soluzione. Sono necessarie soluzioni dinamiche per problemi che coinvolgono carichi ad alta frequenza e di breve durata (ad esempio, carico sismico o esplosivo).

LARGE STRAIN/SMALL STRAIN: Per impostazione predefinita, FLAC3D opera in modalità small-strain: le coordinate del punto di griglia non sono modificate anche se gli spostamenti calcolati sono grandi (rispetto alle dimensioni delle zone tipiche). In modalità large strain, le coordinate del punto di griglia sono aggiornate a ogni passaggio in base agli spostamenti calcolati.

4.1.4. Convezione dei segni

Di seguito sono riportate le convenzioni dei segni utilizzate in FLAC3D.

DIRECT STRESS: gli stress positivi indicano tensione; gli stress negativi indicano la compressione.

SHEAR STRESS: con riferimento alla Figura 4.2, una sollecitazione di taglio positiva punta nella direzione positiva dell'asse coordinato del secondo pedice se agisce su una superficie con una normale verso l'esterno nella direzione positiva. Viceversa, se la normale verso l'esterno della superficie è in direzione negativa, allora i punti di sollecitazione di taglio positivi nella direzione negativa

dell'asse delle coordinate del secondo pedice. Il tensore delle tensioni è simmetrico (cioè, le sollecitazioni di taglio complementari sono uguali).

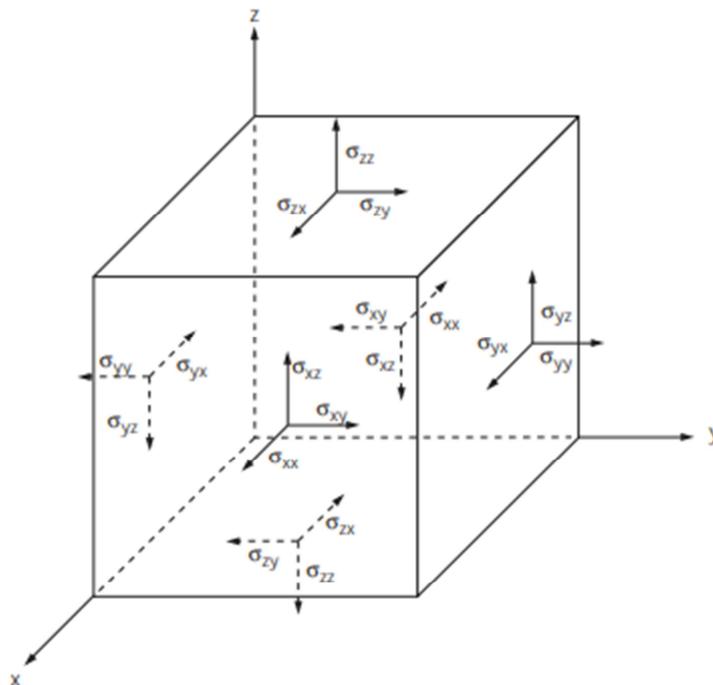


Figura 4.2: convenzione dei segni di tensione in FLA3D (Manuale FLAC3D, Getting started)

DIRECT STRAIN: la deformazione positiva indica estensione, deformazione negativa indica compressione.

SHEAR STRAIN: la deformazione di taglio segue la convenzione dello sforzo di taglio.

PRESSURE: una pressione positiva agirà normalmente e in direzione verso la superficie di un corpo. Una pressione negativa agirà normalmente in direzione opposta alla superficie di un corpo. La Figura 4.3 illustra questa convenzione:

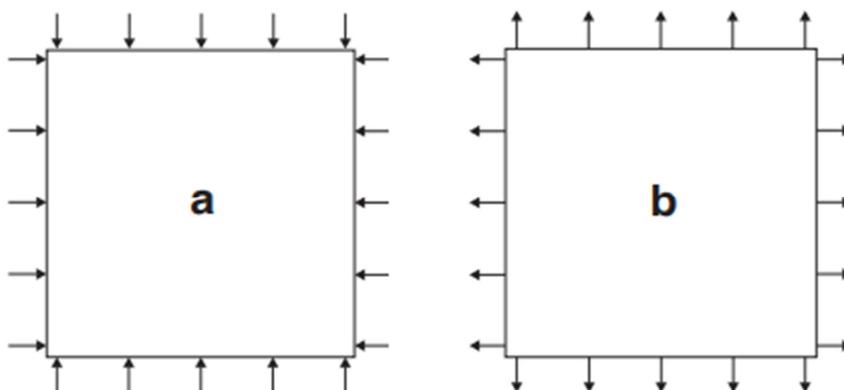


Figura 4.3: convezione dei segni di pressione in FLAC3D, (a) positiva e (b) negativa (Manuale FLAC3D, Getting started)

PORE PRESSURE: la pressione dei pori è positiva in compressione e negativa in tensione.

DIP, DIP DIRECTION: In FLAC3D, gli assi xyz globali formano un sistema destrorso. Quando vengono specificati dip e dip direction, FLAC3D assume quanto segue: + y punti Nord (0 gradi azimut); + x punti est (+90 gradi azimutali); e + z punta in alto. La dip direction è misurata in senso orario nel piano orizzontale da Nord, che è a 0 gradi di azimut. La dip è misurata positiva verso il basso dal piano orizzontale.

VECTOR QUANTITIES: le componenti x, y e z delle grandezze vettoriali quali forze, spostamenti e velocità sono positivi quando si punta nelle direzioni degli assi x, y e z.

4.1.5. Sistema di unità di misura

Esempi di serie consistenti di unità per i parametri di base sono mostrati nelle Tabella 4.1 Tabella 4.2 Tabella 4.3. Nessuna conversione tranne l'attrito e gli angoli di dilatazione, che sono inseriti in gradi, vengono eseguiti in FLAC3D.

	SI				Imperial	
Length	m	m	m	cm	ft	in
Density	kg/m ³	10 ³ kg/m ³	10 ⁶ kg/m ³	10 ⁶ g/cm ³	slugs/ft ³	snails/in ³
Force	N	kN	MN	Mdynes	lbf	lbf
Stress	Pa	kPa	MPa	bar	lbf/ft ²	psi
Gravity	m/sec ²	m/sec ²	m/sec ²	cm/s ²	ft/sec ²	in/sec ²

Tabella 4.1: unità di misura, parametri meccanici (Manuale FLAC3D, Getting started)

	SI		Imperial	
Water bulk modulus	Pa	bar	lbf/ft ²	psi
Water density	kg/m ³	10 ⁶ g/cm ³	slugs/ft ³	snails/in ³
Permeability	m ³ sec/kg	10 ⁻⁶ cm sec/g	ft ³ sec/slug	in ³ sec/snail
Intrinsic permeability	m ²	cm ²	ft ²	in ²
Hydraulic conductivity	m/sec	cm/sec	ft/sec	in/sec

Tabella 4.2: unità i misura, parametri idrulici (Manuale FLAC3D, Getting started)

Length	m	m	m	cm
Density	kg/m ³	10 ³ kg/m ³	10 ⁶ kg/m ³	10 ⁶ g/cm ³
Stress	Pa	kPa	MPa	bar
Temperature	K	K	K	K
Time	s	s	s	s
Specific Heat	J/(kg K)	10 ⁻³ J/(kg K)	10 ⁻⁶ J/(kg K)	10 ⁻⁶ cal/(g K)
Thermal Conductivity	W/(mK)	W/(mK)	W/(mK)	(cal/s)/cm ² K ⁴
Convective Heat-Trans. Coefficient	W/(m ² K)	(W/m ² K)	W/(m ² K)	(cal/s)/(cm ² K)
Radiative Heat-Trans. Coefficient	W/(m ² K ⁴)	W/(m ² K ⁴)	W/(m ² K ⁴)	(cal/s)/cm ² K ⁴
Flux Strength	W/m ²	W/m ²	W/m ²	(cal/s)/cm ²
Source Strength	W/m ³	W/m ³	W/m ³	(cal/s)/cm ³
Decay Constant	s ⁻¹	s ⁻¹	s ⁻¹	s ⁻¹

Tabella 4.3: unità i misura, parametri termici (Manuale FLAC3D, Getting started)

4.1.6. Approccio generale per la risoluzione di analisi numeriche

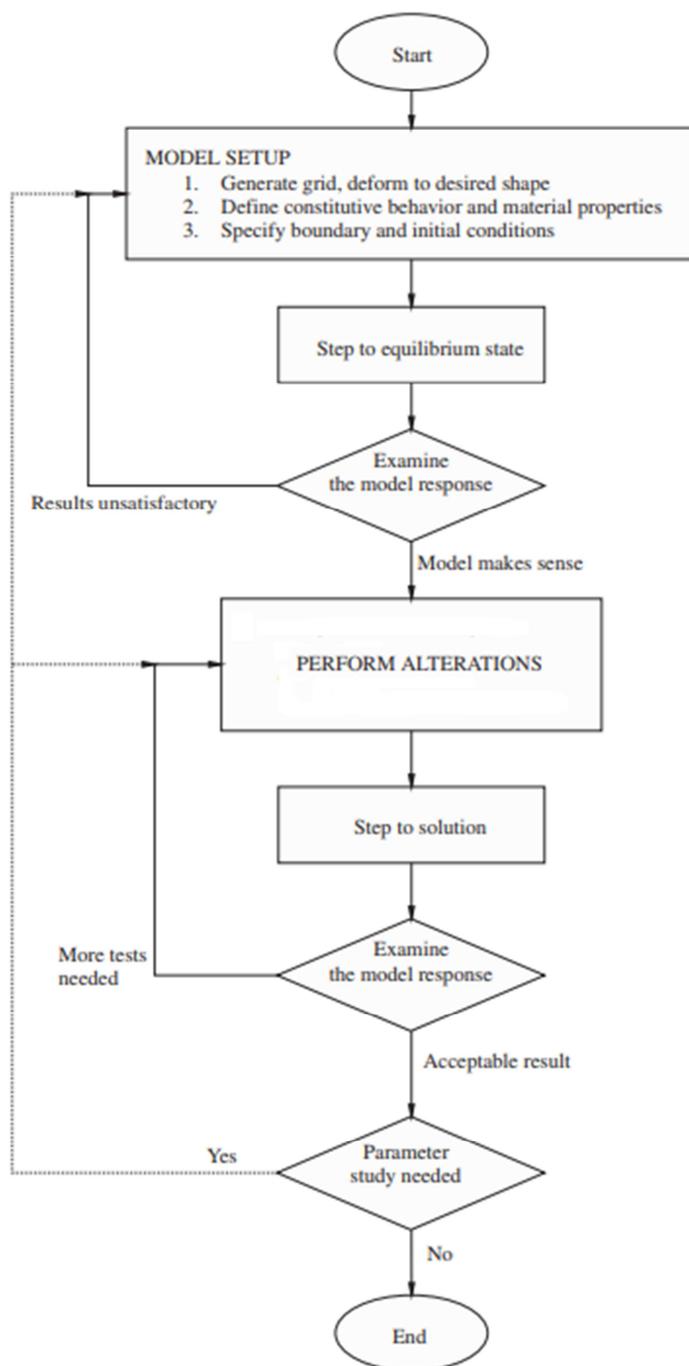


Figura 4.4: scema generico per la risoluzione di analisi numeriche (Manuale FLAC3D, Getting started)

Di seguito è indicata la procedura generale (Figura 4.4) per la risoluzione dei problemi meccanici che ben si adatta anche alla risoluzione di analisi idrauliche

e termiche. In qualsiasi modello si voglia creare e trovare una soluzione occorre considerare degli aspetti specifici che includono:

- generazione della mesh;
- condizioni limite al contorno e iniziali;
- definizione e modellazione sequenziale;
- scelta del modello costitutivo e delle proprietà del materiale;
- miglioramento dell'efficienza della modellazione;
- interpretazione dei risultati.

In generale gli step fondamentali per la definizione di un modello ben costruito sono i medesimi di altri software di analisi numerica bidimensionale. La principale differenza è la procedura per la generazione della mesh.

In Figura 4.5 è riportato il prospetto delle condizioni dei problemi da affrontare confrontati con gli approcci che occorre seguire nella modellazione. Nella geotecnica le considerazioni che occorre fare e la filosofia da seguire sono differenti da quelle per la progettazione di strutture con materiali fabbricati. Le caratteristiche di resistenza e deformabilità di ambienti naturali, come il terreno o le rocce, per la caratteristica di eterogeneità intrinseca, possono variare in modo considerevole sia nello spazio che nel tempo e i dati che si possono ottenere con test di laboratorio o in situ non potranno mai essere completamente rappresentativi. Ad esempio, le informazioni su sollecitazioni, proprietà e discontinuità possono essere solo parzialmente conosciute ed essere definite attraverso distribuzioni statistiche. Per questo motivo un modello numerico per lo studio di problemi in geotecnica deve essere utilizzato per comprendere i meccanismi dominanti che influenzano il sistema. Per tutti gli altri casi in cui i dati sono sufficienti, rappresentativi e appropriati, FLAC3D può essere utilizzato come strumento per una progettazione a regola d'arte.

Typical situation	Complicated geology; inaccessible; no testing budget	← →	Simple geology; \$\$\$ spent on site investigation
Data	NONE	← →	COMPLETE
Approach	Investigation of mechanisms	← · Bracket field behavior by parameter studies · →	Predictive (direct use in design)

Figura 4.5: prospetto di situazioni nella modellazione (Manuale FLAC3D, problem solving whit FLAC3D)

Per le situazioni in cui sono disponibili pochi dati, il modello non dovrebbe mai essere considerato come una "black box" che riceve l'input di dati da un'estremità e produce una previsione di comportamento all'altra. Il modello numerico deve essere preparato con attenzione e deve essere validato. La Figura 4.6 elenca i passaggi consigliati per eseguire un esperimento numerico di successo; ogni passo è discusso separatamente.

- Step 1 Define the objectives for the model analysis
- Step 2 Create a conceptual picture of the physical system
- Step 3 Construct and run simple idealized models
- Step 4 Assemble problem-specific data
- Step 5 Prepare a series of detailed model runs
- Step 6 Perform the model calculations
- Step 7 Present results for interpretation

Figura 4.6: fasi per analisi numerica (Manuale FLAC3D, problem solving whit FLAC3D)

- Step 1: definire gli obiettivi per l'analisi del modello.
Occorre definire il livello di dettaglio da includere in un modello, questo dipende strettamente dallo scopo dell'analisi. Bisogna arrivare a un compromesso tra il grado di complessità e il grado di rappresentazione del modello della situazione reale indagata.
- Step 2: creare un quadro concettuale del sistema fisico.
Occorre conoscere il problema fisico e avere una visione concettuale di esso per definire un modello rappresentativo: geometria, leggi costitutive dei materiali, condizioni al contorno e condizioni iniziali.

- Step 3: costruire ed eseguire semplici modelli idealizzati.
Quando si idealizza un sistema fisico per l'analisi numerica, è più efficiente costruire ed eseguire modelli di test semplici prima di costruire il modello dettagliato. Modelli semplici sono più facili da controllare e validare e i risultati possono fornire ulteriori informazioni sul quadro concettuale del sistema; Potrebbe essere necessario ripetere il passaggio 2 dopo l'esecuzione di modelli semplici. Questi modelli possono rivelare carenze che possono essere sanate prima di passare ai modelli più complessi che richiedono un maggior costo in termini di memoria fisica e tempo. I risultati dei modelli semplici inoltre, possono anche identificare quali parametri hanno la maggiore influenza sull'analisi.
- Step 4: assemblare dati specifici del problema.
I tipi di dati richiesti per un'analisi del modello includono: dettagli della geometria, posizioni della struttura geologica, comportamento del materiale, condizioni iniziali e azioni esterne. Poiché tipicamente ci sono grandi incertezze associate a condizioni specifiche per l'indagine deve essere selezionato un intervallo ragionevole di parametri. I risultati delle semplici esecuzioni del modello (step 3) possono spesso dimostrarsi utili nel determinare questo intervallo.
- Step 5: preparazione di una serie di esecuzioni di modelli dettagliati.
Se il modello presenta diverse variabili da interrogare è possibile che occorra una serie di più simulazioni. Per velocizzare tale fase è possibile seguire alcuni accorgimenti: prendere in considerazione l'esecuzione di variazioni dei parametri su più computer per abbreviare il tempo totale di calcolo se risulta difficile ottenere informazioni sufficienti per arrivare a una conclusione utile se i tempi di realizzazione del modello sono eccessivi; salvare lo stato del modello in diversi stadi intermedi in modo tale che l'analisi non debba essere ripetuta dall'inizio per ogni variazione di parametro; individuare diversi punti nel modello in cui è possibile monitorare un record del cambiamento

di un parametro (come spostamento, velocità o stress) durante il calcolo. Inoltre, l' unbalanced force nel modello deve essere sempre monitorata per verificare lo stato di equilibrio o guasto in ciascuna fase di un'analisi.

- Step 6: esecuzione dei calcoli del modello.

Con lo stesso approccio dello step 3 e 5, prima di avviare un'analisi completa è consigliabile dividerla in più fasi per controllare meglio il processo.

- Step 7: risultati attuali per l'interpretazione.

La fase finale del problem solving è la presentazione dei risultati per una chiara interpretazione dell'analisi. L'output grafico dovrebbe essere presentato in un formato che può essere confrontato direttamente con le misurazioni e le osservazioni sul campo. I grafici dovrebbero identificare chiaramente le regioni di interesse dall'analisi e fornire i valori numerici di qualsiasi variabile nel modello per un'interpretazione più dettagliata.

4.2. Analisi termica

L'opzione termica di FLAC3D incorpora sia i modelli di conduzione che di avvezione. I modelli di conduzione consentono la simulazione della conduzione del calore transitoria nei materiali e lo sviluppo di spostamenti e sollecitazioni termicamente indotte. Il modello di avvezione prende in considerazione il trasporto del calore per convezione; può simulare la densità del fluido dipendente dalla temperatura e l'avanzamento termico nel fluido. L'opzione termica ha diverse caratteristiche specifiche:

- Sono disponibili quattro modelli di comportamento termico: conduzione isotropica, conduzione anisotropo, conduzione isotropa/avvezione e modello termico nulla ed è possibile conferire comportamenti diversi a zone della mesh diverse;
- analisi termica e analisi meccanica possono essere accoppiate ma in modo unidirezionale;
- le fonti di calore possono essere inserite nel materiale come fonti puntuali o fonti di volume. Il comportamento delle fonti di calore possono essere descritti attraverso le funzioni FISH;
- sono disponibili sia algoritmi espliciti che impliciti.
- attraverso le funzioni FISH è possibile governare la dipendenza delle variabili termiche in base alla temperatura.

4.2.1. Convenzioni e definizioni

Come convenzione di notazione, il simbolo a_i indica la componente i – esima del vettore $[a]$ in un sistema cartesiano di assi di riferimento; A_{ij} è un componente (i, j) del tensore $[A]$, f_i è usato per rappresentare la derivata parziale di f rispetto a x_i . La convenzione di somma di Einstein si applica solo agli indici i, j e k che prendono i valori 1, 2, 3 per i componenti che coinvolgono le dimensioni spaziali. Gli indici possono assumere qualsiasi valore quando utilizzati

nelle equazioni di matrice. I seguenti numeri adimensionali sono utili nella caratterizzazione della conduzione di calore transitoria:

- Lunghezza caratteristica

$$L_c = \frac{\text{volume of solid}}{\text{surface area exchanging heat}}$$

- Diffusività termica

$$\kappa = \frac{k}{\rho C_v}$$

dove:

- κ è la conduttività termica;
- ρ è la densità;
- C_v è il calore specifico a volume costante.

- Tempo caratteristico

$$t_c = \frac{L_c^2}{\kappa}$$

4.2.2. Conduzione

Le variabili coinvolte nella conduzione del calore in FLAC3D sono la temperatura e le tre componenti del flusso di calore. Queste variabili sono correlate attraverso l'equazione del bilancio energetico e le leggi di trasporto derivate dalla legge della conduzione del calore di Fourier. La sostituzione della legge di Fourier nell'equazione del bilancio energetico produce l'equazione differenziale della conduzione del calore, che può essere risolta per particolari geometrie e proprietà, settate le condizioni al contorno e le condizioni iniziali. Le deformazioni volumetriche indotte dalle azioni termiche sono introdotte nelle leggi costitutive meccaniche e idrauliche incrementali per tenere conto degli accoppiamenti di pressione termica e dei pori termici.

4.2.2.1. Equazione di bilancio dell'energia

L'espressione differenziale del bilancio energetico ha la forma

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t}$$

Eq. 36

Dove:

- $q_{i,i}$ è il vettore di flusso di calore in [W/m²];
- q_v è l'intensità della fonte di calore volumetrica in [W / m³];
- ζ è il calore immagazzinato per volume unitario in [J / m³].

In generale, le variazioni di temperatura possono essere causate da cambiamenti nella conservazione dell'energia e nella deformazione volumetrica ε , e la legge costitutiva termica relativa a tali parametri può essere espressa come

$$\frac{\partial T}{\partial t} = M_{th} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \beta_{th} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)$$

Eq. 37

Dove:

- M_{th} e β_{th} sono costanti del materiale;
- T è la temperatura [°C].

In FLAC3D, si considera il caso particolare della legge per cui $\beta_{th} = 0$ e $M_{th} = \frac{1}{\rho C_v}$, secondo l'ipotesi per cui i cambiamenti di deformazione svolgono un ruolo trascurabile nell'influenzare la temperatura (presupposto valido per problemi meccanici quasi statici che coinvolgono solidi e liquidi) di conseguenza l'Eq. 37 diventa

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \rho C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Eq. 38

Sostituendo l'Eq. 38 nell'Eq. 36 si ottiene l'equazione del bilancio termico

$$-q_{i,i} + q_v = \rho C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Eq. 39

Si noti che, per quasi tutti i solidi e i liquidi, i calori specifici a pressione costante e a volume costante sono essenzialmente uguali. Di conseguenza, C_v e C_p possono essere usati in modo intercambiabile.

4.2.2.2. Legge di trasporto di calore

La legge fondamentale che definisce la relazione tra il vettore di flusso di calore e il gradiente di temperatura è la legge di Fourier. Per un solido stazionario, omogeneo, isotropico, questa legge costitutiva è data nella forma

$$q_i = -kT_{,i}$$

Eq. 40

Dove:

- k è la conducibilità termica in $[W / m^{\circ}C]$,

Ricavando dall'Eq. 40 q_i e sostituendolo nell'Eq. 36 si ottiene l'equazione differenziale per la conduzione del calore. Le condizioni iniziali corrispondono a un dato campo di temperatura. Le condizioni al contorno sono generalmente espresse in termini di temperatura o di flusso di calore. In questa versione di FLAC3D, sono considerati quattro tipi di condizioni, corrispondenti a: temperatura; componente del flusso; superfici convettive e superfici isolate. La legge che governa il moto convettivo fa riferimento all'equazione

$$q_n = h(T - T_e)$$

Eq. 41

Dove

- q_n è il componente del flusso normale al limite nella direzione della normale esterna [W/m^2];
- h è il coefficiente di trasferimento termico convettivo [W/m^2C];
- T è la temperatura del fluido circostante [$^{\circ}C$].

Si noti che nella formulazione numerica utilizzata in FLAC3D, i limiti sono adiabatici per impostazione predefinita.

4.2.3. Avvezione

I meccanismi di trasferimento del calore convettivo nei mezzi porosi considerati nell'implementazione di FLAC3D sono la "convezione forzata" (in cui il calore è trasportato dal movimento del fluido) e la convezione libera (con cui si spiega il movimento del fluido causato da differenze di densità dovute alle variazioni di temperatura). Le ipotesi di lavoro sono quelle dell'equilibrio termico locale (viene considerato il flusso a basso numero di Reynolds) e le variazioni di piccola densità (si applica l'approssimazione di Boussinesq).

4.2.3.1. Equazione di bilanciamento per il trasporto di calore per diffusione e convezione

$$c^T \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}^T + \rho_0 c_w \mathbf{q}_w \cdot \nabla T - q_v^T = 0$$

Eq. 42

Dove:

- T è la temperatura;
- \mathbf{q}^T è flusso termico;

- \mathbf{q}_w è la portata specifica del fluido;
- q_v^T è l'intensità volumetrica della fonte di calore;
- ρ_0 e c_w sono la densità di riferimento e il calore specifico del fluido;
- c^T è il calore specifico efficace definito come $c^T = \rho_d C_v + n S \rho_0 c_w$ con ρ_d e C_v densità apparente e calore specifico della massa solida, n porosità e S saturazione.

Per il bilanciamento della massa del fluido si fa riferimento invece all'equazione

$$\frac{\partial P}{\partial t} = M \left(-\nabla \cdot \mathbf{q}_w - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \beta \frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

Eq. 43

Dove:

- M è il modulo di Biot;
- ε è la deformazione volumetrica;
- β è l'espansione termica volumetrica della matrice porosa;

Si noti che il termine β_f è l'espansione termica volumetrica del fluido e rientra nell'espressione del coefficiente β ma solitamente è trascurato nell'approssimazione di Boussinesq e che gli ultimi due termini sono presenti solo se si considera l'accoppiamento meccanico.

4.2.3.2. Legge di trasporto

- Trasporto di calore legge di Fourier

$$\mathbf{q}^T = -\mathbf{k}^T \nabla T$$

Eq. 44

Dove \mathbf{k}^T è la conduttività termica effettiva, che è isotropa nella formulazione dell'avvezione. L'effettiva conduttività termica è definita in termini di conduttività termica solida e del fluido, k_s^T e k_f^T nell'equazione

$$\mathbf{k}^T = k_s^T + nS\mathbf{k}_f^T$$

Eq. 45

- Trasporto dei fluidi legge di Darcy

$$\mathbf{q}_w = -\mathbf{k} \nabla (P - \rho_w \mathbf{g} \cdot \mathbf{x})$$

Eq. 46

Dove:

- \mathbf{k} è il coefficiente di mobilità del fluido ;
- ρ_w è la densità del fluid. In questo caso è correlata alle variazioni di temperatura dell'equazione lineare

$$\rho_w = \rho_0 [1 - \beta_f (T - T_0)]$$

Eq. 47

In queste equazioni, le variazioni di densità del fluido dovute a cambiamenti di temperatura sono significative solo nella loro generazione di forze di galleggiamento (cioè l'approssimazione di Boussinesq).

4.2.4. Formulazione numerica

4.2.4.1. Conduzione

L'equazione del bilancio energetico $-q_{i,i} + q_v = \rho C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$, insieme alla legge di Fourier $q_i = -kT_{,i}$, è risolta in FLAC3D usando un approccio a differenze finite basato su una discretizzazione media in zone composte da due sovrapposizioni di calore costante flusso di tetraedri. Lo schema numerico si basa su una formulazione nodale dell'equazione del bilancio energetico. Questa formulazione è equivalente alla formulazione per l'analisi meccanica che conduce alla forma nodale della legge di Newton. Si ottiene sostituendo la temperatura, il vettore del flusso di calore e il gradiente di temperatura rispettivamente per il vettore di velocità, il tensore delle tensioni e i tensori della tensione di deformazione. Il sistema risultante di equazioni differenziali ordinarie viene risolto utilizzando due modalità di discretizzazione nel tempo, corrispondenti a formulazioni esplicite e implicite. I principali risultati sono riassunti di seguito.

Convenzionalmente, i nodi di un tetraedro sono indicati localmente con un numero da 1 a 4 così come le facce a loro opposte. La variazione della temperatura all'interno del tetraedro è lineare e mediante l'applicazione del teorema di divergenza di Gauss, è descritta dall'equazione

$$T_j = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 T^l n_j^l S^l$$

Eq. 48

Dove

- n_j^l è il vettore dell'unità esterna normale alla faccia l ;
- S è l'area della superficie della faccia;
- V è il volume del tetraedro.

Sempre ai nodi l'equazione di bilancio di energia (Eq. 39) può essere espressa come

$$q_{i,i} + b^* = 0$$

Eq. 49

Dove

$$b^* = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} - q_v$$

Eq. 50

che definisce l'equivalente delle "forze del corpo" istantanee utilizzate nella formulazione del nodo meccanico.

Considerando un singolo tetraedro può essere definito il calore nodale (Q_e^n con $n=1,4$) in equilibrio con il calore del tetraedro e le body forces attraverso la seguente equazione

$$Q_e^n = Q_t^n - \frac{q_v V}{4} + m^n C_v^n \frac{dT^n}{dt}$$

Eq. 51

Dove

$$Q_t^n = \frac{q_i n_i^{(n)} S^{(n)}}{3}$$

Eq. 52

E

$$m^n = \frac{\rho V}{4}$$

Eq. 53

La forma nodale dell'equazione del bilancio energetico viene stabilita ricercando che, in ogni nodo, la somma del calore nodale equivalente ($-Q_e^n$) dei nodi dei tetraedri che si uniscono in quel punto, divisa per 2, e il contributo nodale (Q_w^n) dei flussi e delle sorgenti applicati è pari a zero.

$$-\sum Q_e^n + \sum Q_w^n = 0$$

Eq. 54

I componenti del vettore del flusso di calore del tetraedro nell'equazione (Eq. 52) sono correlati al gradiente di temperatura mediante la legge sui trasporti (Eq. 40). A loro volta, i componenti del gradiente di temperatura possono essere espressi in termini di temperature nodali del tetraedro usando l'equazione (Eq. 48).

Per diminuire il costo computazionale, in FLAC3D viene adottata una formulazione di zona. A ogni nodo, n , di una particolare zona si considera la somma, Q_z^n , di contributi (Eq. 52) di tutti i tetraedri appartenenti alla zona e che si incontrano nel nodo, divisa per 2. In seguito vengono assemblate le matrici di zone locali $[M]$ che mettono in relazione i valori delle zone nodali, Q_z^n , con le temperature delle zone nodali, T^n ($n = 1,8$).

$$Q_z^n = M_{nj} T^j$$

Eq. 55

Con T^j ($j = 1,4$) che formano il vettore delle temperature nodali. Le matrici così formate presentano la caratteristica di simmetria e per ognuna di esse sono computate 36 componenti. Allo stesso modo con la sovrapposizione di zona sono definiti i valori globali Q_T^n . Per ogni nodo globale è possibile scrivere

$$Q_T^n = C_{nj} T^j$$

Eq. 56

Dove le componenti C_{nj} formano la matrice globale e T^j forma il vettore globale delle temperature nodali.

Sostituendo nell'eq. (Eq. 54) l'eq. (Eq. 51) dopo alcuni passaggi si ottiene la forma nodale del bilancio energetico al nodo n-esimo

$$\frac{dT^n}{dt} = -\frac{1}{\sum[mCp]^n} \left[Q_T^n + \sum Q_{app}^n \right]$$

Eq. 57

Il termine $Q_T^n + \sum Q_{app}^n$ corrisponde all'“out-of-balance heat”, dove Q_T^n è una funzione delle temperature nodali definite nell'Eq. 56, e Q_{app}^n è il contributo noto delle sorgenti di volume, dei flussi limite e delle sorgenti puntuali, definiti come

$$Q_{app}^n = - \sum \left[\frac{q_v V}{4} + Q_w \right]^n$$

Eq. 58

Una di queste espressioni vale per ogni nodo globale coinvolto nella discretizzazione. Insieme formano un sistema di equazioni differenziali ordinarie che viene risolto in FLAC3D con il metodo di calcolo implicito o esplicito alle differenze finite.

Per quanto riguarda la formulazione esplicita si assume che la temperatura di un nodo vari in modo lineare su un intervallo di tempo, Δt : la derivata sul lato sinistro dell'Eq. 58 è espressa utilizzando il calcolo delle differenze finite in avanti; e il calore fuori bilancio viene valutato al tempo t . Le temperature nodali, partendo da un campo di temperatura iniziale, sono aggiornate a ogni intervallo Δt ai valori incrementali, purché la temperatura non sia fissa, usando l'espressione

$$T_{\langle t+\Delta t \rangle}^n = T_{\langle t \rangle}^n + \Delta T_{\langle t \rangle}^n$$

Eq. 59

Dove

$$\Delta T_{<t>}^n = \chi^n \left[Q_{T<t>}^n + \sum Q_{app<t>}^n \right]$$

Eq. 60

E

$$\chi^n = - \frac{\Delta t}{\sum [mC_p]^n}$$

Eq. 61

La stabilità numerica dello schema esplicito può essere raggiunta solo se il timestep rimane al di sotto di un valore limite. Per derivare il criterio di stabilità, consideriamo la situazione in cui un nodo n da uno stato iniziale zero T_0 , in un insieme di zone, subisca una perturbazione di temperatura. Utilizzando l'Eq. 56, otteniamo

$$Q_T^n = C_{nn} T_0$$

Eq. 62

Se il nodo n appartiene a un confine convettivo si ottiene

$$\sum Q_{app}^n = D_{nn} T_0$$

Eq. 63

dove D_{nn} è usato per rappresentare il coefficiente di temperatura nel termine convettivo globale al nodo n. Dopo un time record termico, seguendo lo schema di calcolo esplicito (Eq. 59 → Eq. 61), la nuova temperatura sul nodo n è

$$\Delta T_{<\Delta t>}^n = T_0 \left[1 - \frac{\Delta t}{\sum [mC_p]^n} (C_{nn} + D_{nn}) \right]$$

Eq. 64

Per evitare segni alternati di temperature mentre il calcolo viene ripetuto per Δt successivi, il coefficiente di T_0 nella relazione precedente deve essere positivo. Tale requisito implica

$$\Delta t < \frac{\sum [mC_p]^n}{C_{nn} + D_{nn}}$$

Eq. 65

Il valore del timestep utilizzato in FLAC3D è il valore nodale minimo definito dalla componente a destra, moltiplicato per il fattore di sicurezza di 0.8.

Per valutare l'influenza dei parametri coinvolti, è utile tenere presente la seguente rappresentazione del timestep critico. Se L_c è la lunghezza caratteristica del tetraedro più piccola, possiamo scrivere l'espressione che definisce il timestep critico

$$\Delta t_{cr} = \frac{1}{m} \left[\frac{\kappa}{L_c^2} + \frac{h}{\rho C_v L_c} \right]^{-1}$$

Eq. 66

Dove

- Δt_{cr} è il timestep critico,
- κ , h , ρ e C_v sono definiti precedentemente nell'equazione della diffusività termica.

m è una costante, più grande dell'unità, che dipende dalla discretizzazione geometrica media (ad esempio, $m = 6$ per una discretizzazione regolare in cubi, Karlekar B. V. et al. (1982)).

Quindi il timestep critico corrisponde a una misura del tempo caratteristico necessario per la diffusione del fronte da propagare nel tetraedro. Utilizzando un'espressione simile è possibile stimare il tempo necessario per la propagazio-

ne del fronte in un determinato dominio, a condizione che L_c sia interpretato come la lunghezza caratteristica del dominio preso in considerazione.

Si consideri il caso in cui non si verifichi la convezione. Si osserva che il numero di passi necessari per modellare la propagazione del processo di diffusione in tutto il dominio è proporzionale al rapporto tra lunghezze caratteristiche elevate al quadrato per il dominio e il tetraedro e quindi potrebbe crescere così tanto da non permettere l'uso del metodo esplicito. Questo metodo di calcolo però presenta il vantaggio di presentare timesteps molto piccoli in modo tale da rendere possibile un controllo più accurato sulle fluttuazioni della temperatura.

È possibile però risolvere il problema legato alla necessità di utilizzo di timestep estremamente piccoli per raggiungere la stabilità di calcolo del metodo esplicito. Con la formulazione implicita si elimina questa restrizione, ma implica la risoluzione di equazioni simultanee a ogni timestep.

La formulazione implicita in FLAC3D utilizza il metodo Crank-Nicolson, in cui si assume che la temperatura di un nodo vari in modo quadratico nell'intervallo di tempo Δt . In questo metodo, la derivata $\frac{dT^n}{dt}$ nell'Eq. 57 è espresso usando una formulazione a differenza centrale corrispondente a un punto intermedio, mentre il termine legato all'"out-of-balance heat" $Q_T^n + \sum Q_{app}^n$ viene valutato prendendo valori medi a t e $t + \Delta t$. si ottiene quindi la formulazione

$$T_{<t+\Delta t>}^n = T_{<t>}^n + \Delta T_{<t>}^n$$

Eq. 67

Dove

$$\Delta T_{<t>}^n = \chi^n \left[\frac{1}{2} (Q_{T<t+\Delta t>}^n + Q_{T<t>}^n) + \sum \overline{Q_{app}^n} \right]$$

Eq. 68

E

$$\sum \overline{Q_{app}^n} = \frac{1}{2} \left(\sum Q_{app<t+\Delta t>}^n + \sum Q_{app<t>}^n \right)$$

Eq. 69

Dalla definizione Eq. 56, è possibile scrivere

$$Q_{T<t>}^n = C_{nj} T_{<t>}^j$$

Eq. 70

E

$$Q_{T<t+\Delta t>}^n = C_{nj} T_{<t+\Delta t>}^j$$

Eq. 71

Utilizzando l'Eq. 59, questa ultima espressione diventa

$$Q_{T<t+\Delta t>}^n = Q_{T<t>}^n + C_{nj} \Delta T_{<t>}^j$$

Eq. 72

Sostituendo l'equazione precedente in Eq. 68 e utilizzando l'Eq. 70 otteniamo

$$\Delta T_{<t>}^n = \chi^n \left[C_{nj} T_{<t>}^j + \frac{1}{2} C_{nj} \Delta T_{<t>}^j + \sum \overline{Q_{app}^n} \right]$$

Eq. 73

Infine, raggruppando i termini

$$\left[\delta_{nj} - \frac{\chi^n}{2} C_{nj} \right] \Delta T_{<t>}^j = \chi^n \left[C_{nj} T_{<t>}^j + \sum \overline{Q_{app}^n} \right]$$

Eq. 74

Per semplicità di notazione, vengono definite la matrice nota [A] e il vettore [b] attraverso le seguenti componenti

$$A_{nj} = \delta_{nj} - \frac{\chi^n}{2} C_{nj}$$

Eq. 75

E

$$b_{n<t>} = \chi^n \left[C_{nj} T_{<t>}^j + \sum \overline{Q_{app}^n} \right]$$

Eq. 76

Con questa convenzione si arriva a

$$A_{nj} \Delta T_{<t>}^j = b_{n<t>}$$

Eq. 77

Tale equazione può essere scritta per ciascuno dei nodi coinvolti nella griglia. Il sistema risultante di equazioni è risolto in FLAC3D utilizzando il metodo iterativo di Jacobi (Quarteroni A. et al. 2008). In questo approccio, gli incrementi di temperatura all'iterazione $r + 1$ al nodo n sono calcolati utilizzando la relazione di ricorrenza

$$\Delta T_{<t>}^{n<r+1>} = \Delta T_{<t>}^{n<r>} + \frac{1}{A_{nn}} \left[-A_{nj} \Delta T_{<t>}^{j<r>} + b_{n<t>} \right]$$

Eq. 78

dove la convenzione di notazione di Einstein si applica solo all'indice j . Sostituendo l'eq. di [A], si ottiene

$$\Delta T_{<t>}^{n<r+1>} = \Delta T_{<t>}^{n<r>} + \frac{1}{1 - \frac{\chi^n}{2} C_{nn}} \left[\frac{\chi^n}{2} C_{nj} \Delta T_{<t>}^{j<r>} + b_{n<t>} \right]$$

Eq. 79

L'approssimazione iniziale è scelta in modo tale

$$\Delta T_{\langle t \rangle}^{n \langle 0 \rangle} = 0$$

Quindi, la prima approssimazione $\Delta T_{\langle t \rangle}^{n \langle 1 \rangle}$ è calcolata usando la stessa formula usata nello schema esplicito divisa per $(1 - \frac{\chi^n}{2} C_{nn})$ (si noti che in FLAC3D, le condizioni al contorno dipendenti dalla temperatura (contenute in b_n) sono aggiornate nella procedura iterativa implicita).

In FLAC3D, sono considerati un minimo di 3 e un massimo di 500 iterazioni e il criterio per il rilevamento della convergenza ha la forma

$$\max_n |\Delta T_{\langle t \rangle}^{n \langle r+1 \rangle} - \Delta T_{\langle t \rangle}^{n \langle r \rangle}| < 10^{-2} \max_n |\Delta T_{\langle t \rangle}^{n \langle r \rangle}|$$

Eq. 80

La grandezza del timestep deve essere selezionata in relazione sia alla convergenza che alla precisione dello schema implicito. Sebbene il metodo Crank-Nicolson sia stabile per tutti i valori positivi di Δt (senza convezione), la convergenza del metodo di Jacobi non è garantita incondizionatamente a meno che la matrice $[A]$ non sia strettamente diagonalmente dominante:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |A_{kj}| < |A_{kk}|$$

Eq. 81

Secondo la definizione di A_{nj} (Eq. 75) e di χ^n (Eq. 61), questa condizione sufficiente è sempre soddisfatta per valori sufficientemente piccoli di Δt . Se non viene raggiunta la convergenza del metodo di Jacobi, viene emesso un messaggio di errore. È quindi necessario ridurre la grandezza del timestep implicito o utilizzare il metodo esplicito. Inoltre, sebbene il metodo implicito sia accurato, potrebbe essere necessario selezionare il timestep appropriato, poiché il suo valore deve rimanere piccolo rispetto alla lunghezza d'onda di qualsiasi fluttuazione

della temperatura nodale. Tipicamente, il metodo esplicito viene usato nell'analisi dei degli stadi perturbati, mentre il metodo implicito è preferito per il resto della simulazione. Il tempo di calcolo e il costo computazionale sono due fattori che devono essere presi in considerazione quando si seleziona l'approccio implicito in FLAC3D. Nel metodo implicito, un insieme di equazioni deve essere risolto a ogni timestep, richiedendo un minimo di tre iterazioni. La quantità di memoria di calcolo richiesta per una fase iterativa è approssimativamente uguale a quella necessaria per un timestep nello schema esplicito. Inoltre, i valori intermedi devono essere memorizzati nella procedura iterativa, richiedendo una memoria aggiuntiva da allocare rispetto allo schema esplicito. Tali inconvenienti, tuttavia, possono essere più che compensati dal timestep molto più ampio generalmente consentito dal metodo implicito o dal guadagno in accuratezza.

4.2.4.2. Avvezione

Lo sviluppo per la conduzione-convezione è un'implementazione delle differenze finite della conduzione termica esplicite. Consiste nell'aggiungere un termine di avvezione nel bilancio dell'energia termica, come formulato nell'Eq. 42, per tenere conto della convezione forzata da parte del fluido. Inoltre, la logica della convezione naturale viene considerata mediante la dipendenza della densità del fluido (Eq. 47) nell'equazione di trasporto (Eq. 46) in funzione della temperatura.

L'implementazione numerica della parte di conduzione termica della logica di avanzamento viene eseguita utilizzando la formulazione implicita o esplicita descritte precedentemente. L'algoritmo però viene modificato aggiungendo un contributo di calore al flusso out-of-balance nei nodi, prima di computare le nuove temperature per il passaggio termico. Innanzitutto, il termine della fonte di calore ($\rho_0 c_w q_w \cdot \nabla T \cdot V$) viene calcolato per ogni zona a cui è assegnato il modello convettivo, per ogni timestep termico. In questa formula, q_w è portata specifica del fluido per la zona, ∇T è il gradiente di temperatura e V è il volume

della zona. Il gradiente di temperatura viene considerata la media dalle temperature nodali in ciascun tetraedro, usando il teorema di divergenza di Gauss. Il termine legato alla fonte di calore viene quindi distribuito ai nodi e aggiunto al loro flusso out-of-balance. Infine, la densità del fluido locale utilizzata nell'equazione di trasporto viene aggiornata in base alla temperatura di zona, secondo la legge (Eq. 47) per tenere conto della convezione naturale. La logica seguita nel modello di avvezione accoppia i calcoli per il fluido e i calcoli termici e si basa sullo stepping sequenziale dei moduli fluido-termici. Il termine legato all'avvezione viene aggiunto durante il calcolo termico e richiede l'immissione del valore indicante la portata specifica del fluido, che può essere settato manualmente o attraverso il calcolo del flusso di fluido.

La stabilità dello schema numerico per risolvere l'equazione del bilancio energetico (Eq. 42) è governata da due numeri: il numero Peclet, Pe ; e il numero di Courant, Cr .

Considerando un calore specifico c^T , l'equazione del bilancio energetico (Eq. 42) può essere scritta nella forma

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla T) - \mathbf{v} \cdot \nabla T$$

Eq. 82

dove, per definizione,

$$D = \frac{k^T}{c^T}$$

Eq. 83

E

$$\mathbf{v} = \frac{\rho_0 c_w}{c^T} \mathbf{q}_w$$

Eq. 84

Il numero di Peclet fornisce una misura degli effetti relativi di avvezione e diffusione ed è definito come

$$Pe = \frac{\|\mathbf{v}\|}{D/\Delta L}$$

Eq. 85

dove ΔL è la dimensione della griglia. Il numero di Courant è una misura della distanza percorsa da una particella durante un timestep Δt^T su ΔL

$$Cr = \frac{\|\mathbf{v}\|\Delta t^T}{\Delta L}$$

Eq. 86

Nel caso unidimensionale, ad esempio, i vincoli classici sono $Pe \leq 2$ e $Cr \leq 1$ (Perrochet P. et al. 1993). Nell'implementazione corrente, i timestep di fluido e termico espliciti sono calcolati in base alle diffusività fluide e termiche e sono identici a quelli adottati nella logica del fluido e della conduzione. La precisione di calcolo può variare in base ai valori settati per i numeri di Peclet e Courant, alla dimensione della griglia e dei timestep.

4.3. Modellazione numerica

Per poter studiare il comportamento termico di un elemento rappresentante un concio di galleria sono state svolte alcune analisi numeriche. Sono stati studiati e confrontati i comportamenti termici di alcuni conci modificando la stratigrafia interna, con il fine ultimo di verificare l'effettiva ottimizzazione termica dei flussi di calore con l'inserimento di uno strato di materiale geopolimerico derivante da polvere lapidea. Di seguito sono riportati i passaggi delle analisi numeriche svolte.

4.3.1. Definizione degli obiettivi per l'analisi del modello

Il fine ultimo delle analisi termiche svolte hanno riguardato:

- lo studio delle proprietà termiche e confronto con i dati sperimentali reali dei materiali a base cementizia e geopolimerica;
- lo sviluppo di un modello che potesse riprodurre il comportamento di un concio di galleria attivato termicamente con l'inserimento di un impianto di tubi scambiatori al suo interno;
- lo studio della suscettività termica del concio ottimizzandone la stratigrafia, creando modelli multilayer che riproducessero l'introduzione del materiale geopolimerico a base di polvere lapidea nella produzione del concio.

4.3.2. Modellazione test in laboratorio: termoflussimetro

Con l'utilizzo del software FLAC3D è stato possibile riprodurre l'esperimento di laboratorio svolto all'interno del dipartimento Denerg che ha portato alla mi-

sura della conducibilità termica dei materiali a base cementizia e geopolimerica (paragrafo 3.2.1).

I successivi sottoparagrafi descrivono i passaggi seguiti per la creazione del modello del test del termoflussimetro, lo schema generale però è stato seguito anche nelle analisi successive.

4.3.2.1. Dominio e discretizzazione

La creazione del dominio è uno step fondamentale. Il dominio è il volume di controllo di cui è eseguita l'analisi numerica. Il dominio deve essere rappresentativo del caso studio deve tenere in conto delle presenza delle particolarità e delle eterogeneità della realtà e quindi essere rappresentativo, ma allo stesso tempo deve essere ben definito controllabile e non richiedere costi di tempo e memoria di calcolo eccessivi. Deve nascere dal compromesso tra riproducibilità ed efficacia.

Nel caso studio, in questa fase, il dominio da considerare fa riferimento alla lastra a base quadrata inserita all'interno del termoflussimetro. In una prima fase sono stati considerati campioni di dimensione 50x50x5 (cm) le cui dimensioni in seguito sono state modificate in base alle misurazioni effettuate (Figura 4.7).

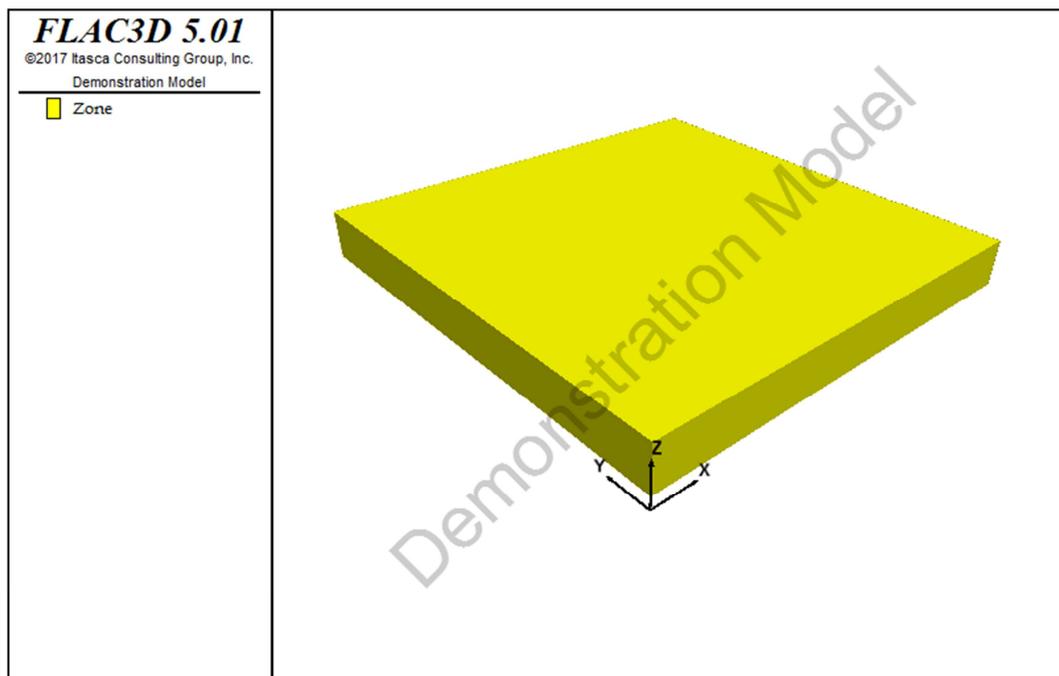


Figura 4.7: dominio modello delle prove di laboratorio, termoflussimetro

Si è quindi passati alla discretizzazione del dominio. Il volume del dominio è molto semplice e trattandosi di un parallelepipedo sono stati utilizzati degli elementi a forma prismatica a base rettangolare (brick-shaped mesh). Per decidere la forma e quindi la distribuzione di questi elementi si è considerato che, in un test come quelli svolti con il termoflussimetro, si dovesse avere una maggior precisione e quindi maggiore discretizzazione lungo lo spessore. Considerando in seguito che la versione del software a disposizione era una versione dimostrativa per cui è possibile costruire una mesh costituita al massimo da 600 elementi, è stata creata una mesh $4 \times 4 \times 37$, rispettivamente distribuiti lungo gli assi x , y e z , costituita da 592 elementi brick-shaped come rappresentato in Figura 4.8.

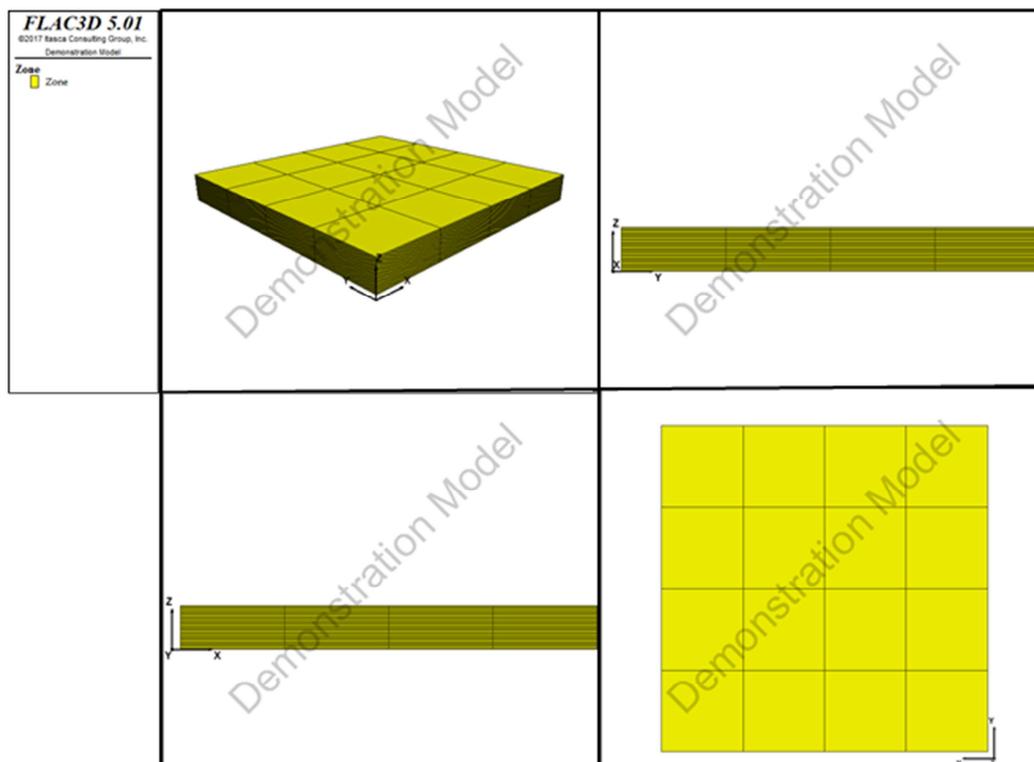


Figura 4.8: prospetto di situazioni nella modellazione (Manuale FLAC3D, problem solving whit FLAC3D)

4.3.2.2. Scelta delle variabili, condizioni al contorno e condizioni iniziali

Le condizioni al contorno in un'analisi numerica consistono nei valori che si attribuiscono alle variabili considerate nel modello. In un'analisi meccanica si fa riferimento ad esempio a forze applicate e spostamenti, oppure in un'analisi termica a condizioni di flusso e temperatura. Le condizioni al contorno si dividono tra reali e artificiali. Le prime fanno effettivamente riferimento a condizioni date da azioni esterne reali, ad esempio uno scavo di una galleria o la creazione di un rilevato oppure il calore trasportato dall'acqua di falda. Le condizioni artificiali, invece, permettono la rappresentazione artificiale intorno al dominio. Le condizioni al contorno, salvo modifiche imposte durante l'analisi, sono fisse. Le condizioni iniziali invece fanno riferimento ai valori che si impongono alle caratteristiche del modello e queste durante l'analisi possono variare.

Le condizioni al contorno da considerare in questa analisi e quelle successive fanno riferimento solamente a condizioni al contorno di tipo termico per cui fanno riferimento a condizioni di temperatura e flusso di calore. Come nell'esperimento reale si vuole raggiungere uno stato di flusso di calore stazionario. Ciò è stato possibile considerando le temperature delle facce superiore e inferiore fissate a un certo valore.

4.3.2.3. Modello costituente

Oltre alle condizioni al contorno occorre definire anche i modelli che governano le relazioni tra i parametri caratteristici del materiale. Il software FLAC3D come definito in precedenza al suo interno ha settato diversi modelli costitutivi per le analisi meccaniche ma anche alcuni modelli termici:

- Modello isotropico: per le analisi con trasmissione di calore per conduzione con conduttività termica isotropica;
- Modello anisotropo: per le analisi con trasmissione di calore per conduzione con conduttività termica anisotropa;
- Modello avvezione: per considerare nell'analisi non solo il contributo della conduzione ma anche dell'avvezione;
- Modello nullo: modello ad hoc per escludere partizioni di elementi dall'analisi numerica.

Nelle analisi numeriche eseguite viene considerato il modello termico isotropo per il quale occorre specificare i valori per la conducibilità termica, il calore specifico e la densità dei materiali. In aggiunta si specifica che tutte le analisi sono state svolte con il metodo di calcolo implicito.

4.3.2.4. Validazione modello numerico

Prima di eseguire le analisi con i dati sperimentali è stato eseguito uno step aggiuntivo per la validazione del modello. Impostando valori di controllo per le

condizioni al contorno di temperatura, per le caratteristiche termiche di conducibilità termica, calore specifico e densità sono stati confrontati i valori di flusso di calore in stato stazionario dati dall'output dell'analisi e i valori trovati secondo l'equazione di Fourier $\lambda = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta T}$). Inserendo i valori delle proprietà dei materiali visibili in Tabella 4.4 il valore di flusso termico corrispondente è pari a 75 W.

Caratteristiche per validazione		
densità	kg/m ³	2200
conducibilità termica	W/kgK	1.5
calore specifico	J/kgK	1000
spessore	m	0.05
T sup	°C	30
T inf	°C	20
ΔT	K	10
Area	m ²	0.25
Calore	W	75

Tabella 4.4: proprietà utilizzate per la validazione del modello

Gli stessi valori sono stati settati all'interno del modello numerico che ha riportato i risultati visibili in Figura 4.9 e Figura 4.10

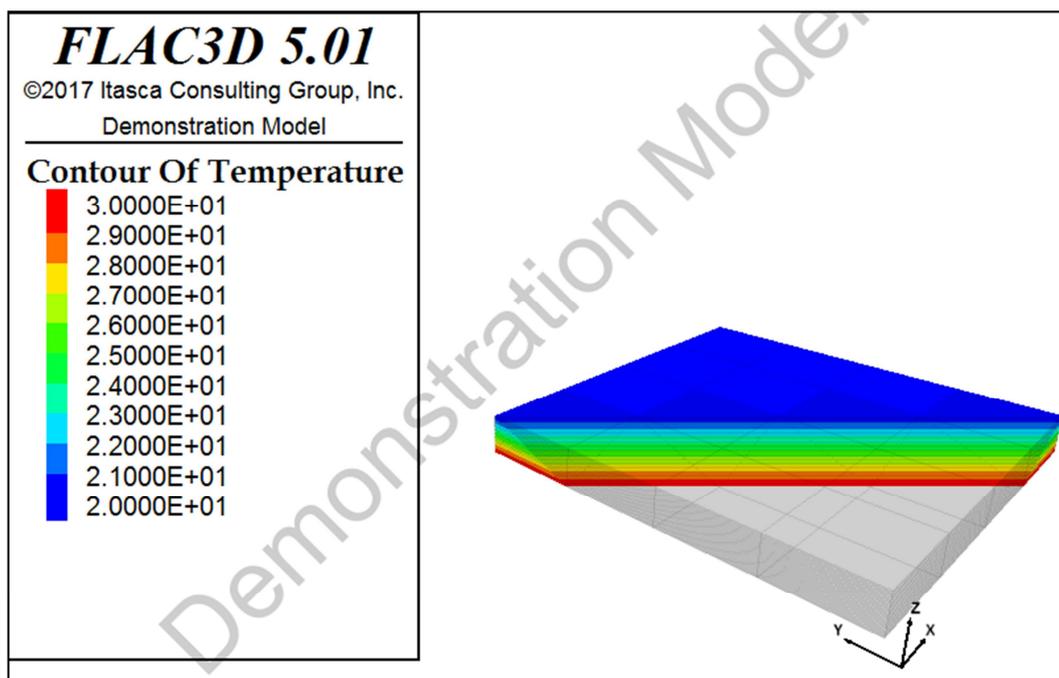


Figura 4.9: distribuzione delle temperature, validazione modello

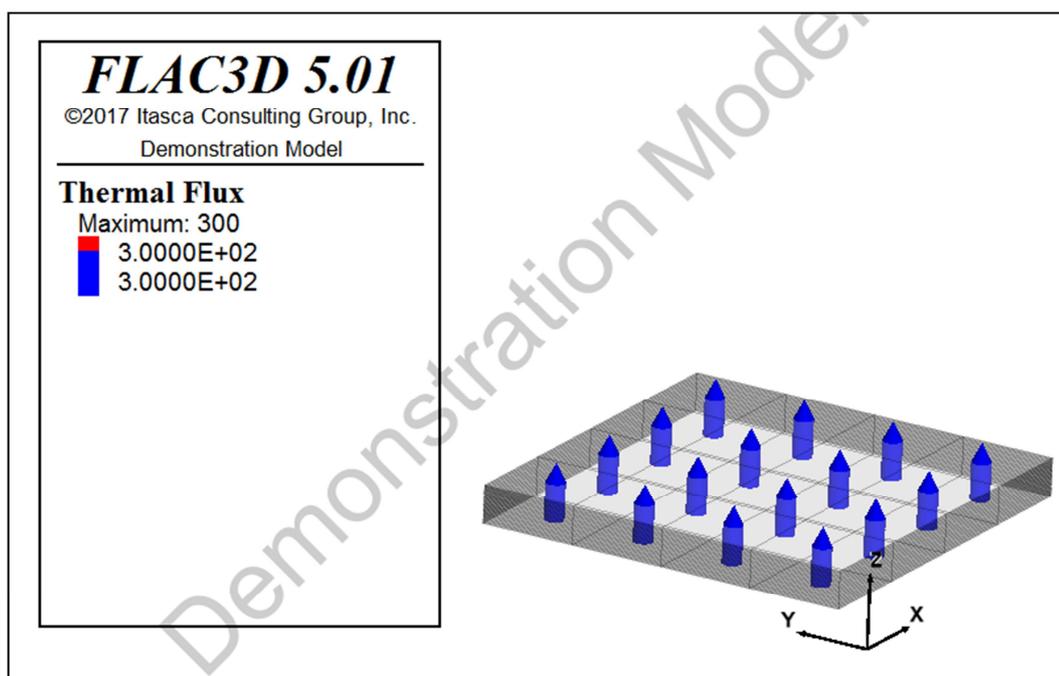


Figura 4.10: flusso termico, validazione modello

Dalla Figura 4.10 il valore calcolato dal programma corrisponde al flusso di calore per m^2 moltiplicandolo per l'area si ottiene il calore trasportato a flusso costante 75 W.

Nel modello sono state inoltre studiate le evoluzioni della temperatura durante il processo. Quindi sono state confrontate la soluzione numeriche data dal software e la soluzione data dal software attraverso l'utilizzo di una funzione FISHER.

Per trovare la soluzione analitica è stata considerata l'equazione definita da Crank J. (1975)

$$T(z, t) = T_1 + \frac{z}{L}(T_2 - T_1) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\kappa n^2 \pi^2 t / L^2} \left(\frac{T_2 \cos(n\pi) - T_1}{n} \right) \sin \frac{n\pi z}{L}$$

Eq. 87

Dove:

- T_1 è la temperatura su un lato;
- T_2 è la temperatura sull'altro lato;
- L è lo spessore;
- t è tempo;
- z è la distanza lungo l'asse z ;
- κ è la diffusività termica definita come $\kappa = \frac{k}{\rho C_p}$, con k corrispondente alla conducibilità termica; ρ alla densità; e C_p al calore specifico.

Nella Figura 4.11 è riportata l'evoluzione della distribuzione delle temperature all'interno della piastra a diversi step di calcolo. Come si può osservare all'ultimo step calcolato si raggiunge la situazione di stazionarietà caratterizzata da una distribuzione delle temperature lineare

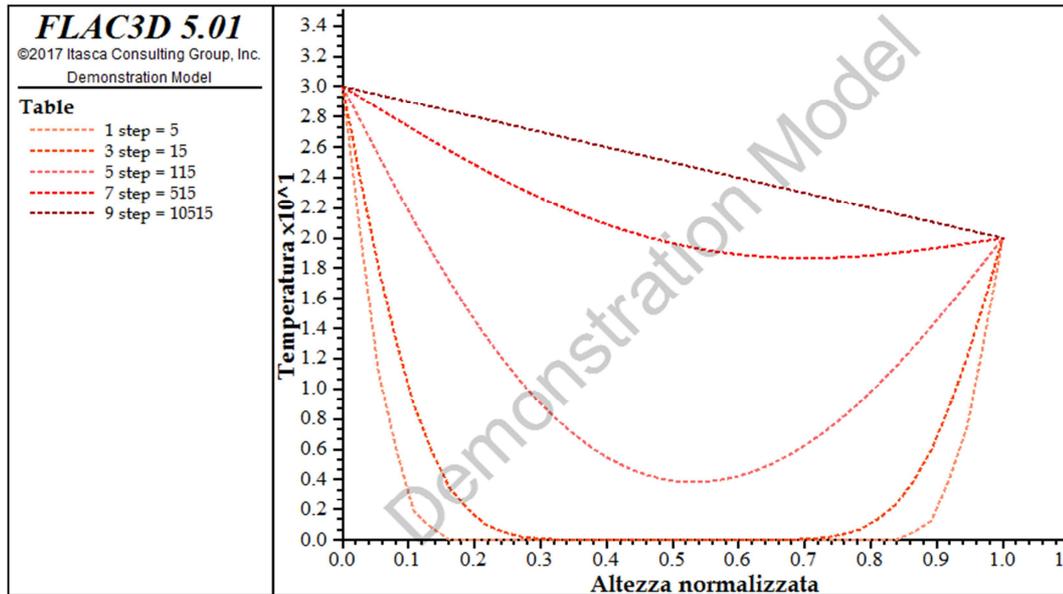


Figura 4.11: distribuzione temperature nel tempo, soluzione numerica

Si noti che sull'asse delle ascisse è riportata l'altezza normalizzata rispetto allo spessore della lastra.

Nella Figura 4.12 è invece riportata la soluzione analitica confrontata con la soluzione numerica ed è possibile osservare la perfetta coincidenza tra i due tipi di soluzione. Le serie corrispondenti alla soluzione analitica sono quelle formate dal segno +.

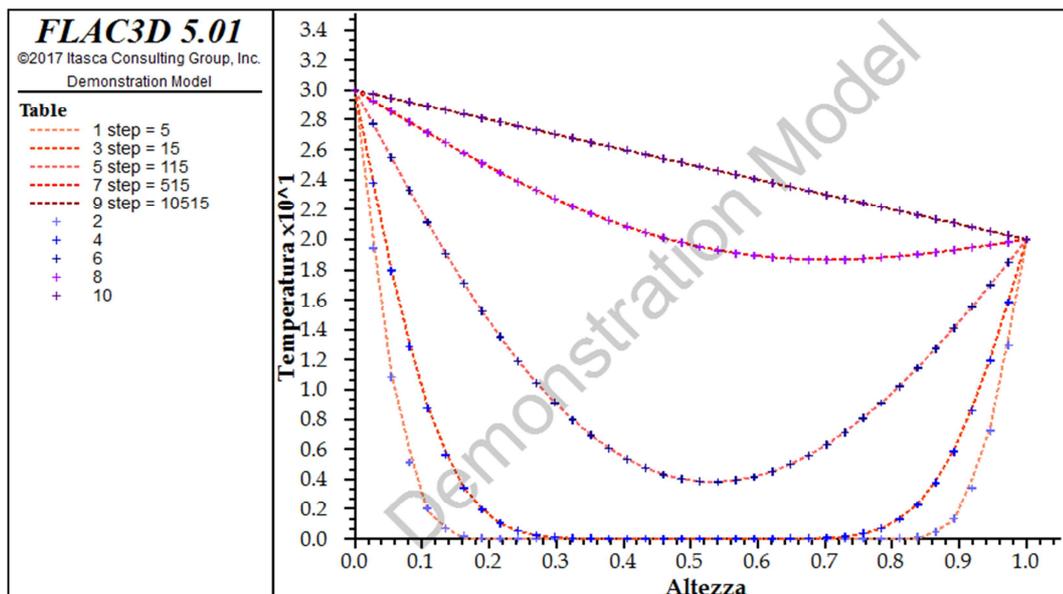


Figura 4.12: distribuzione temperature confronto soluzione numerica e analitica

4.3.2.5. Campione a base cementizia

Si è quindi passati allo studio delle prove di laboratorio. Con la stessa metodologia è stato costruito il modello per il campione a base cementizia. Per il confronto con i dati reali sono stati considerati come dati di input nel software la conducibilità termica e le temperature misurate nelle ultime fasi del test con il termoflussimetro. Inoltre le lastre non presentavano superfici perfettamente parallele, è stato quindi considerato come dato geometrico la media delle misure dello spessore in prossimità dei 4 angoli (Tabella 4.5).

Campione cementizio		
densità	kg/m ³	2200
conducibilità termica	W/kgK	1.125
calore specifico	J/kgK	1000
spessore	m	0.053
T sup	°C	20.25
T inf	°C	27.31
ΔT	K	7.06

Tabella 4.5: dati input, modello campione cementizio

Dalla sperimentazione con il termo flussimetro sono stati misurati i valori di flusso di calore riportati in Tabella 4.6 mentre dall'equazione di Fourier si otterrebbe un valore di calore Q pari a 37.47 W pari a un flusso di 149.86 W/m². Nelle Figura 4.13 e Figura 4.14 seguenti sono invece riportati la distribuzione delle temperature e il valore di flusso termico risultato dall'analisi numerica.

Flussimetro		flusso di calore medio (W/m ²)
HeatFlux Upper (W/m ²)	151.9	150.8
HeatFlux Lower (W/m ²)	149.7	

Tabella 4.6: flusso di calore sperimentazione termoflussimetro, campione cementizio

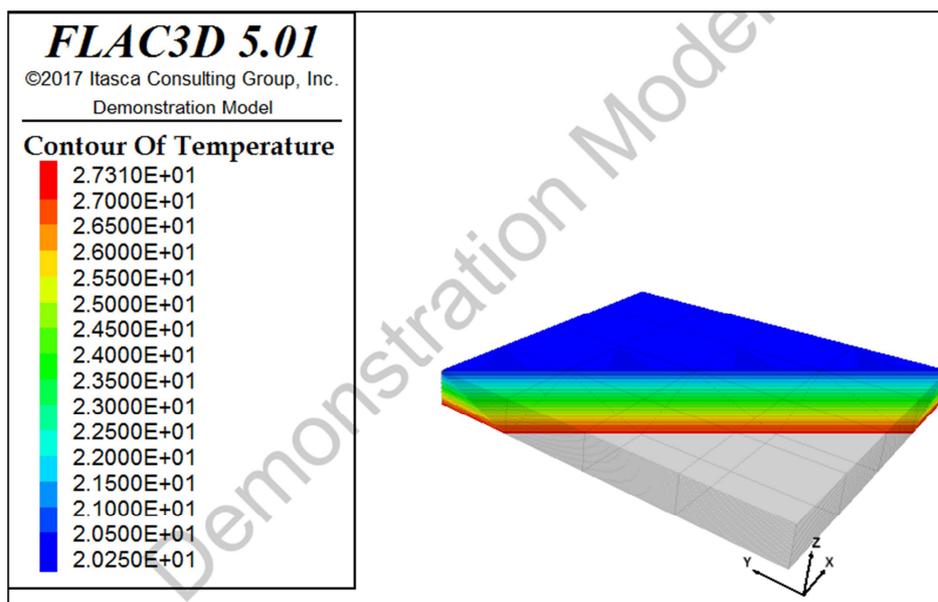


Figura 4.13: distribuzione temperature, campione cementizio

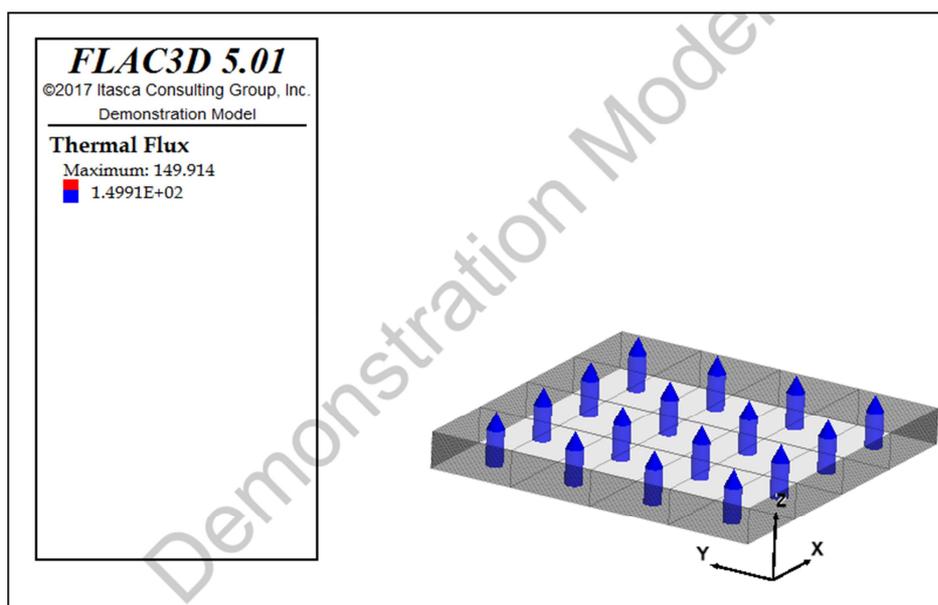


Figura 4.14: flusso di calore, campione cementizio

Infine per un confronto più chiaro i risultati sono stati raccolti nella Tabella 4.7.

Flusso di calore (W/m ²)		
Fourie	Flussimetro	Flac3D
149.86	150.8	149.91

Tabella 4.7: flusso di calore, campione cementizio

4.3.2.6. Campione a base geopolimerica

Per la modellazione del campione geopolimerico si è proceduto allo stesso modo. La Tabella 4.8 riporta i dati di input inseriti nel modello termico.

Campione geotermico		
densità	kg/m ³	2050
conducibilità termica	W/kgK	0.53
calore specifico	J/kgK	1000
spessore	m	0.055
T sup	°C	21.13
T inf	°C	35.19
ΔT	K	14.06

Tabella 4.8: dati input, modello campione geotermico

Con gli stessi dati viene calcolato il calore in condizioni stazionarie pari a 33.87 W che attraverso la lastra geopolimerica determina un flusso di calore pari a 135.49 W/m². La Tabella 4.9 riporta i valori misurati durante la sperimentazione con il termoflussimetro.

Flussimetro	flusso di calore medio (W/m ²)
HeatFlux Upper (W/m ²)	145.1
HeatFlux Lower (W/m ²)	125.7
	135.4

Tabella 4.9: flusso di calore sperimentazione termoflussimetro, campione geopolimerico

Invece nelle Figura 4.15 e Figura 4.16 sono rappresentati gli output dell'analisi termica.

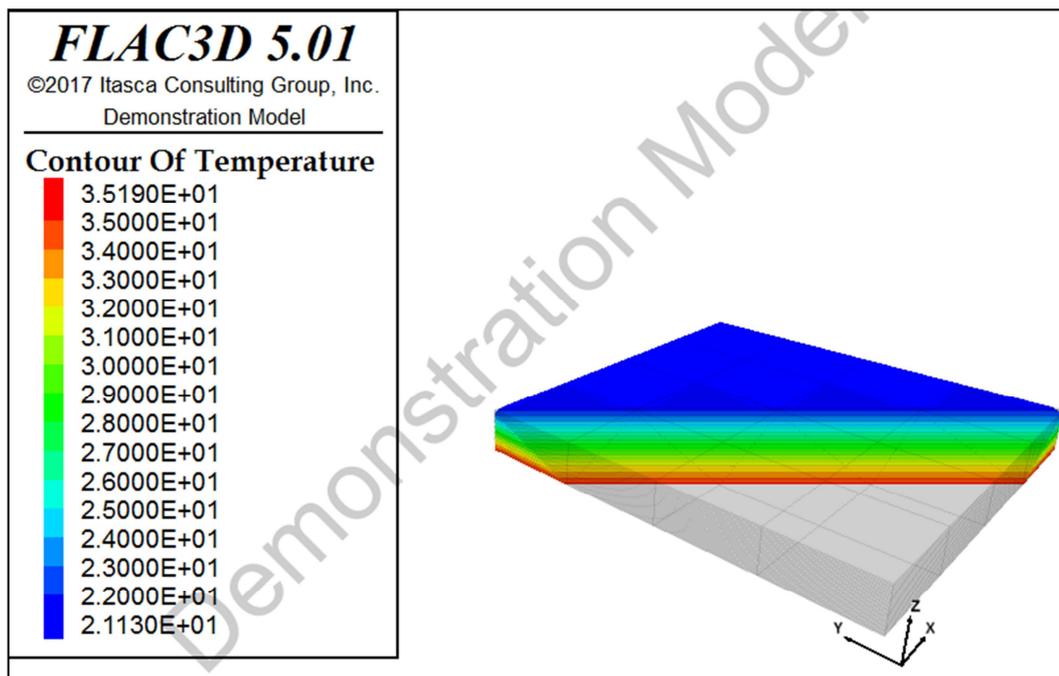


Figura 4.15: distribuzione temperature, campione geopolimerico

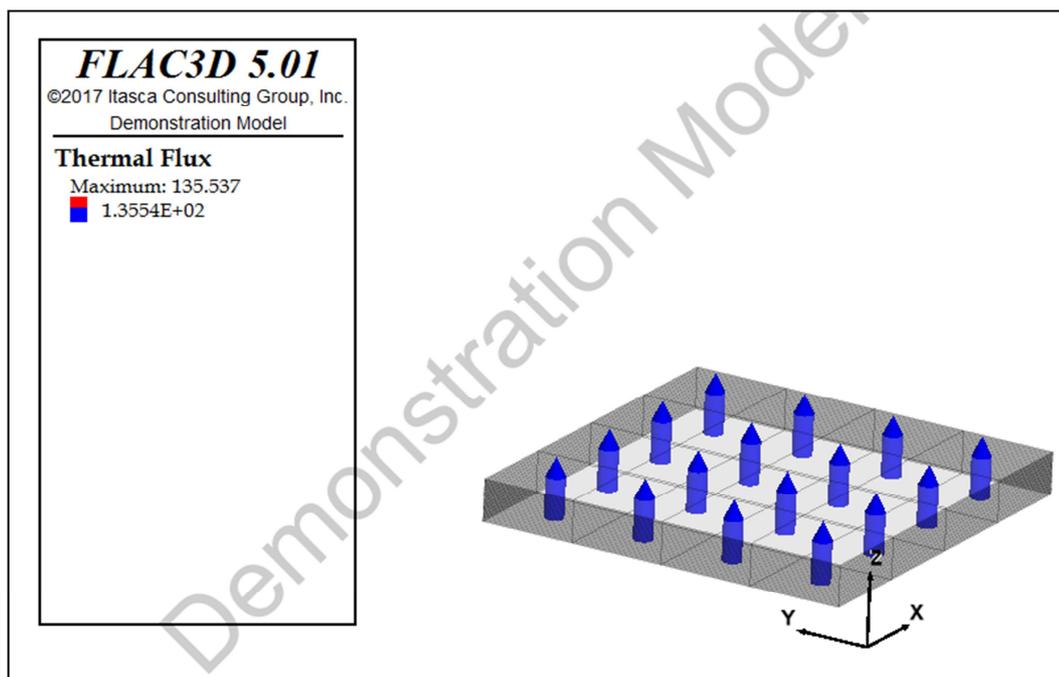


Figura 4.16: flusso di calore, campione cementizioopolimerico

Flusso di calore (W/m ²)		
Fourie	Flussimetro	Flac3D
135.49	135.4	135.54

Tabella 4.10: flusso di calore, campione geopolimerico

4.3.3. Studio dell'ottimizzazione termica dei conci di galleria

Si è quindi passati allo studio e al confronto del comportamento termico del modello rappresentanti conci di galleria energetici facendo variare la stratigrafia dei materiali. Lo scopo dell'analisi numerica è verificare la variazione degli apporti termici che si potrebbero ottenere con l'inserimento di uno strato di materiale geopolimerico, che ha conducibilità termica inferiore (paragrafo 3.2.1), all'intradosso della galleria in modo tale da conferire proprietà isolanti al concio attivato termicamente dall'impianto di tubi scambiatori (paragrafo 1.5).

Innanzitutto è stato necessario definire un modello che rappresentasse in modo adeguato un concio energetico. La Tabella 4.11 riporta dimensioni principali del concio a cui si fa riferimento.

Dimensioni principali concio di galleria		
Lunghezza, L	m	2.0
Larghezza, d	m	1.0
Spessore, s	m	0.3
Raggio di curvatura interno, r	m	3.4

Tabella 4.11: dimensioni principali, concio energetico

Inizialmente basandosi sui modelli precedentemente costruiti si è pensato di riprodurre il concio come un parallelepipedo (Figura 4.17) mantenendo le stesse impostazioni per la discretizzazione (4x4x37 (elementi) in direzione x,y e z) e modificando solamente le dimensioni (2x1x0.3 (m) rispettivamente nelle direzioni x, y e z).

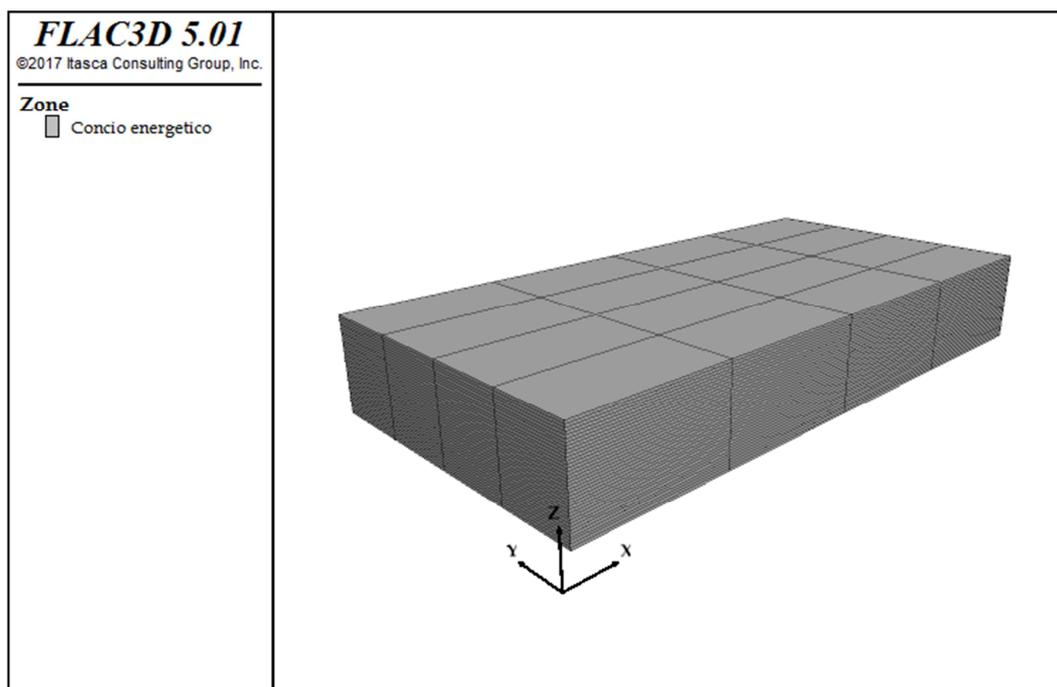


Figura 4.17: modello 1, concio energetico

Questo modello però poco si adattava alla rappresentazione dei tubi scambiatori inseriti all'interno del concio. Si è ipotizzato infatti l'inserimento nel modello di un impianto formato da 3 tubi scambiatori paralleli con configurazione "ground" quindi atti allo scambio di calore con il terreno a 6 cm di profondità, considerando circa 3 cm di copriferro e circa 3 cm di armatura a cui i tubi sono legati. Per modellare il passaggio dell'impianto, non potendo creare dei veri e propri fori nella direzione longitudinale (tali fori avrebbero implicato la necessità di una discretizzazione del dominio di elementi radialmente distribuiti intorno a essi, quindi un numero di elementi superiore ai 600 permessi con la versione dimostrativa), inizialmente si sono posizionati delle sorgenti di calore applicate a grid points specifici del modello. Per definire il valore di tali sorgenti ci si è riferiti a studi precedenti sulla modellazione della metro di Torino (Barla M. et al. 2016) utilizzando l'equazione

$$Q = mc_w |T_{wo} - T_{wi}|$$

Eq. 88

Dove:

- m [kg/s] è la portata massica e può essere espressa come $m = v_f \left(\frac{m}{s}\right) \cdot \rho_w \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot A(m^2)$ cioè velocità del fluido e densità del fluido e la sezione effettiva del tubo. Sono stati presi come valori plausibili rispettivamente $v_f = 0.4$ m/s, $\rho_w = 1080$ kg/m³ e $A = 326.8$ m²;
- c_w (J/kgK) è il calore specifico del fluido cioè una soluzione di acqua e glicole considerato $c_w = 3475$ (J/kgK);
- T_{w0} e T_{wi} sono corrispondenti alle temperature di mandata e di ritorno del fluido del fluido e la differenza è pari a circa 4 K.

Ottenendo un valore pari a 1962 [J/s] o [W]

Si è quindi passati a una distribuzione differente, cercando di ottenere nelle posizioni più consone i grid points necessari a tale scopo (Figura 4.18).

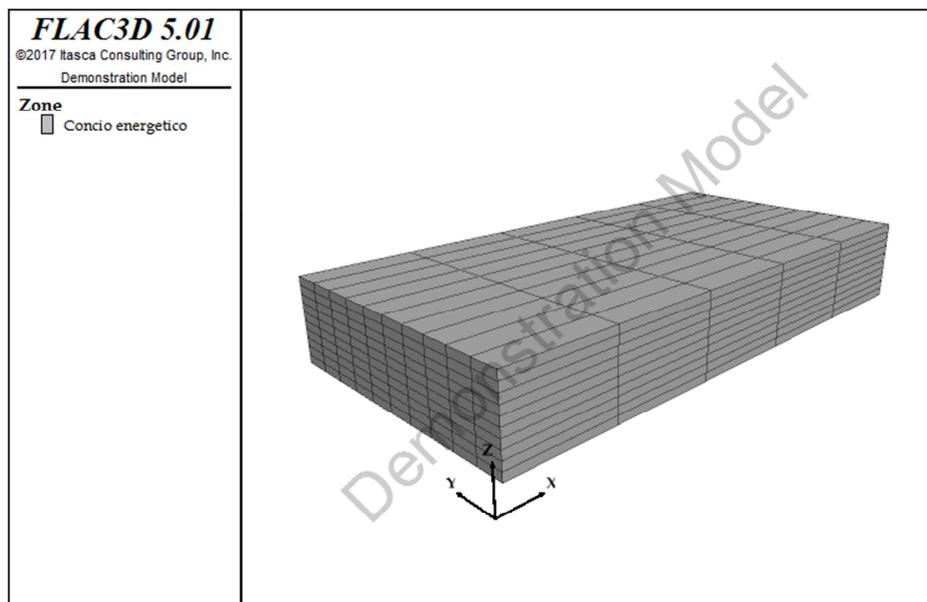


Figura 4.18: modello 2, concio energetico

Si è potuto associare alla posizione dei nodi le sorgenti di calore come mostrato in Figura 4.19, ricordando che la convenzione dei segni implica calore generato per valori positivi e calore assorbito per valori negativi. In Tabella 4.12 sono riportati gli ID identificativi e le posizioni precisi dei grid points interessati.

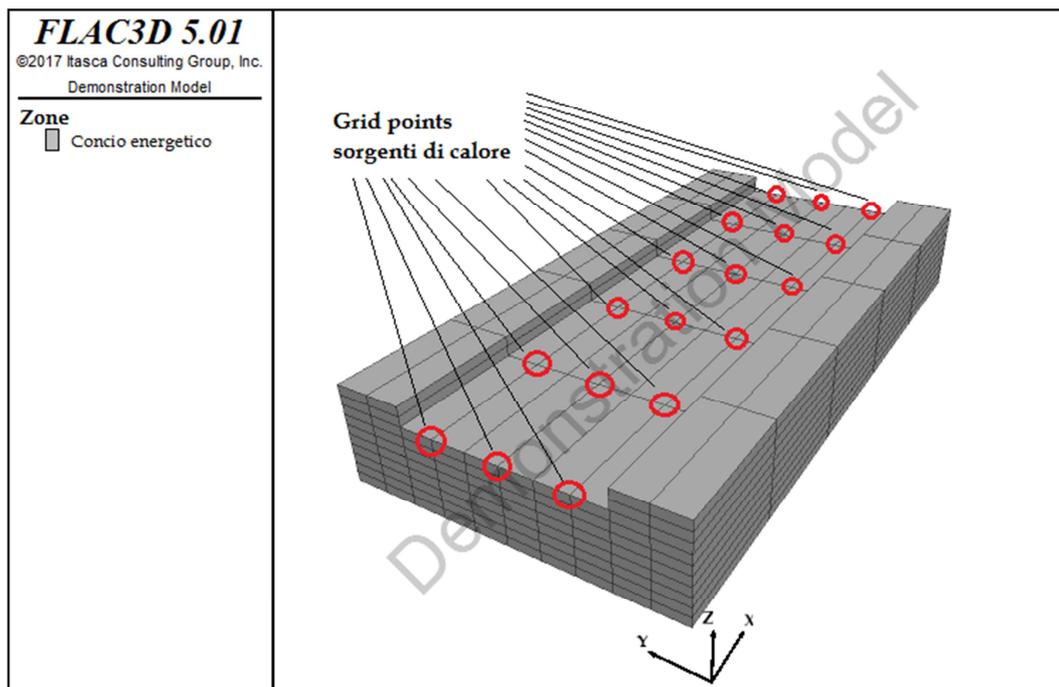


Figura 4.19: posizione sorgenti di calore

Gp	posizione		
	x	y	z
-	m	m	m
Gp 547	0.0	0.3	0.2
Gp 548	0.4	0.3	0.2
Gp 549	0.8	0.3	0.2
Gp 550	1.2	0.3	0.2
Gp 551	1.6	0.3	0.2
Gp 552	2.0	0.3	0.2
Gp 559	0.0	0.5	0.2
Gp 560	0.4	0.5	0.2
Gp 561	0.8	0.5	0.2
Gp 562	1.2	0.5	0.2
Gp 563	1.6	0.5	0.2
Gp 564	2.0	0.5	0.2
Gp 571	0.0	0.7	0.2
Gp 572	0.4	0.7	0.2
Gp 573	0.8	0.7	0.2
Gp 574	1.2	0.7	0.2
Gp 575	1.6	0.7	0.2
Gp 576	2.0	0.7	0.2

Tabella 4.12: posizionamento sorgenti di calore

Si è proceduto con l'impostazione delle condizioni al contorno.

Sulla superficie a contatto con l'aria interna della galleria la scelta più corretta è stata quella di fissare la temperatura a 25 °C, per quanto riguarda la superficie all'estradosso ci si è accorti subito che per rappresentare l'interfaccia struttura terreno non era possibile fissare una temperatura ai valori monitorati sul campo (Barla M. et al. 2016). È stato di conseguenza modificato nuovamente il modello inserendo degli elementi che rappresentassero uno strato di terreno. Nel particolare sono stati aggiunti al dominio di indagine 3 m a cui successivamente sono state conferite le proprietà del terreno di Torino in prossimità del tratto della Metro (Figura 4.20). Il modello è stato così modificato poiché con l'esperienza si è osservato che fissare condizioni al contorno artificiali a una distanza D dalla zona di interesse non implica delle perturbazioni e falsificazioni sui risultati dell'analisi, dove D è definita come 10 volte la grandezza caratteristica del volume di interesse. Nel caso in esame $D = 3.3$ m.

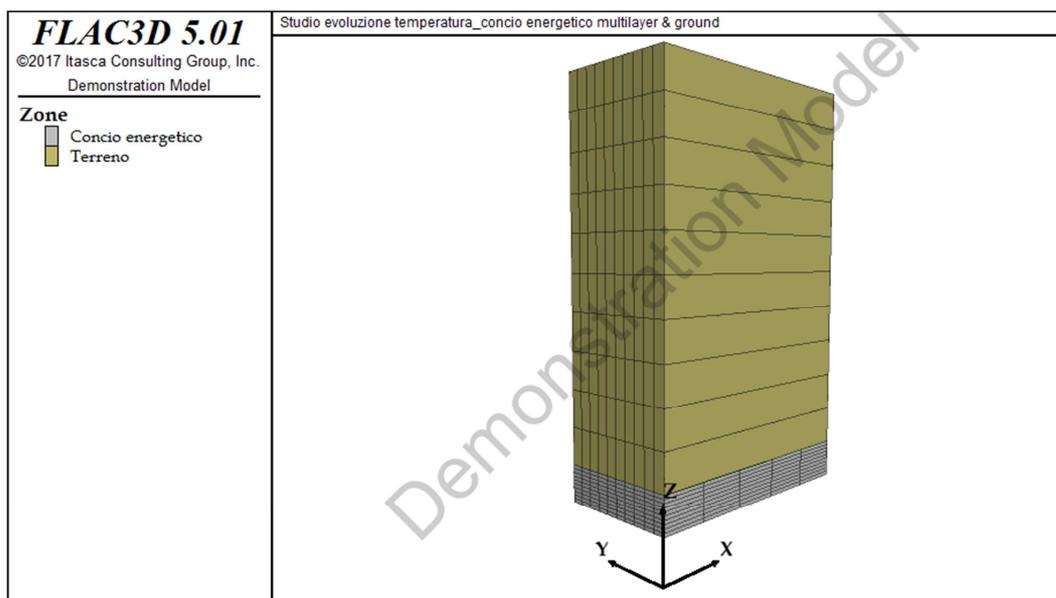


Figura 4.20: concio energetico e terreno

Le condizioni al contorno definite su questo modello fanno riferimento alla Tabella 4.13.

Condizioni al contorno modello 3			
Zona	Condizione		
Superficie $z = 3.3$	fix temperature	°C	14.0
Superficie $z = 0$	fix temperature	°C	25.0

Tabella 4.13: condizioni al contorno, concio energetico e terreno

Prima di procedere con le analisi atte allo studio dell'ottimizzazione del comportamento termico del concio si sono svolte alcune analisi impostando valori di controllo delle proprietà termiche necessarie al modello isotermico (densità, conducibilità termica e calore specifico). Si sono notate alcune criticità che sono state prontamente risolte procedendo con alcune accortezze e modifiche del modello numerico.

Si è notato che i flussi generati dall'attivazione dell'impianto risentivano dell'influenza delle pareti verticali del modello, queste infatti non sono state posizionate a una distanza sufficiente per impedire la perturbazione dei confini del dominio. Non potendo aumentare le dimensioni del modello, poiché si sarebbero creati elementi con dimensioni eccessive per le analisi alle differenze finite, si sono conferite alle superfici indicate caratteristiche adiabatiche (flusso di calore pari a 0 W/m^2). Inoltre l'inserimento delle sorgenti di calore non dava un sufficiente controllo del fenomeno del trasporto del calore e quindi una successiva indagine corretta dei risultati delle analisi termiche. Per sopperire a tale mancanza al posto di inserire delle sorgenti di calore sono stati impostati dei valori di temperatura fissa nelle zone di passaggio dei tubi. Per ipotizzare un valore rappresentativo della temperatura di funzionamento dei tubi si è immaginato il concio modellato come se corrispondesse alla zona centrale dell'impianto. Osservando quindi le temperature mandata e di ritorno del fluido durante il funzionamento invernale, considerate in studi precedenti (Barla M. et al. 2016), si è eseguita la media e si è calcolata una temperatura pari a 6 °C . È stato per altro necessario definire le temperature iniziali dell'intero dominio rendendo il modello più rappresentativo delle condizioni reali. Si è infatti con-

ferito agli strati di terreno una temperatura iniziale di 14 °C e agli strati del concio 20 °C. Le nuove condizioni iniziali sono riportate in Tabella 4.14.

Condizioni al contorno modello coccio e terreno	
Zona	Condizione
Terreno	
$z = 3.3$	fix temperature °C 14.0
$z = (0.3, 3.3)$	ini temperature 14.0
Concio	
$z = (0, 0.3)$	ini temperature 14.0
$z = 0$	fix temperature °C 25.0
Impianto tubi scambiatori	
$z = 0.24$	$y = 0.3$
	$y = 0.5$
	$y = 0.7$
	fix temperature °C 6.0

Tabella 4.14: condizioni iniziali e al contorno, concio energetico e terreno

Si distinguano ora i due modelli da confrontare. Il primo fa riferimento al concio interamente formato da calcestruzzo, come quello utilizzato nella Metro di Torino. Nel secondo invece è stato ipotizzato la sostituzione di uno strato pari a 6 cm di calcestruzzo all'intradosso del concio con il materiale geopolimerico a base di polvere lapidea (Figura 4.21). Le differenze dei modelli quindi riguardano le proprietà di densità, calore specifico e conduttività termica dei vari strati.

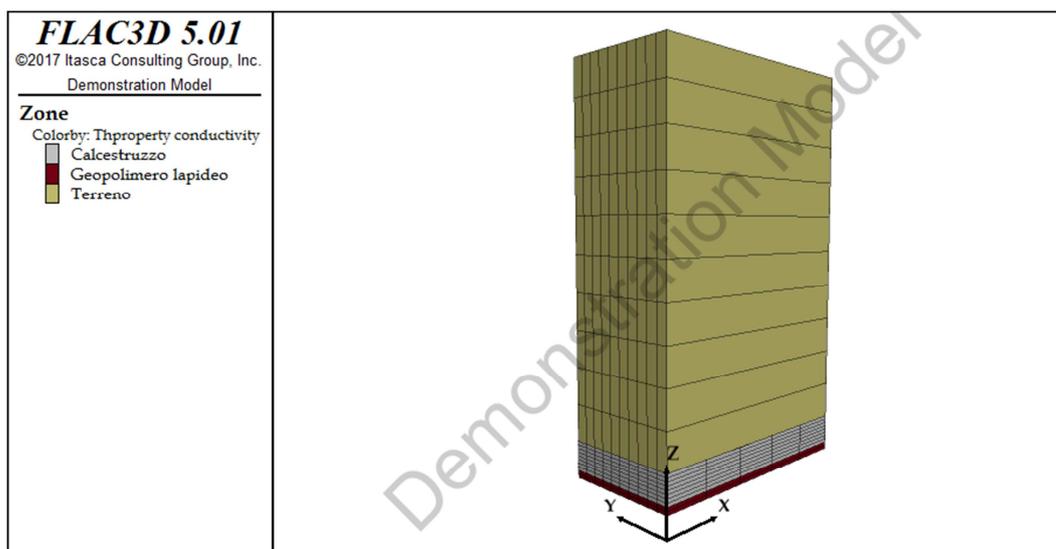


Figura 4.21: modello concio energetico geopolimerico e terreno

Nelle Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25 sono rappresentati i modelli in base alle proprietà di densità e conduttività termica, in seguito è riportata la Tabella 4.15 per il confronto diretto dei valori definiti per le diverse proprietà.

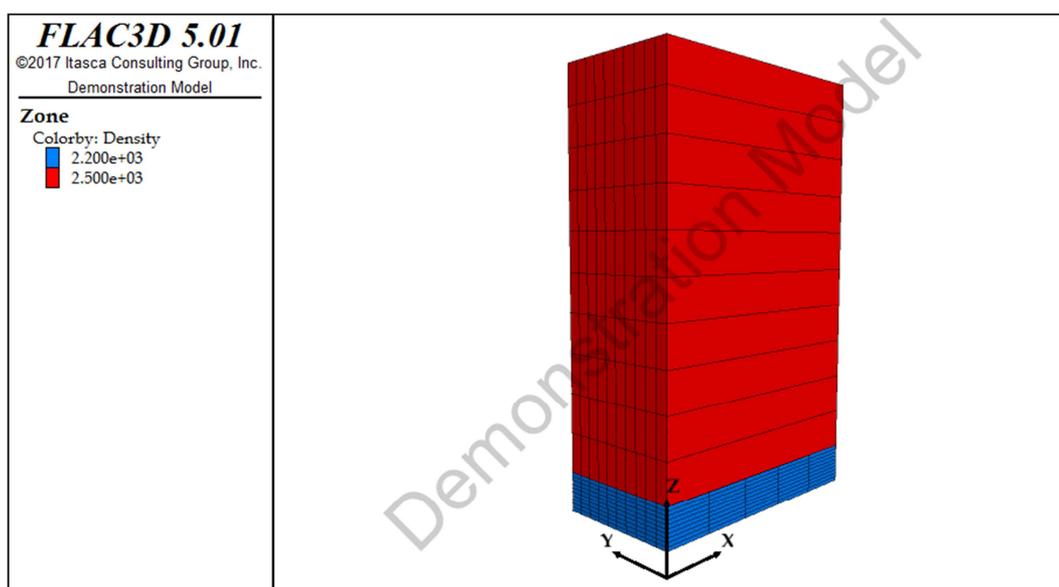


Figura 4.22: densità, modello concio cls

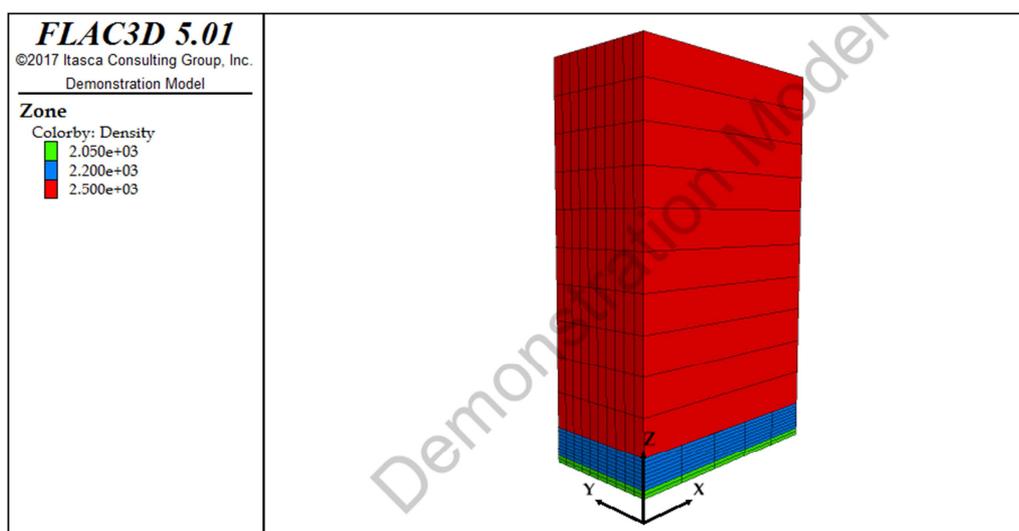


Figura 4.23: densità, modello concio geopolimerico

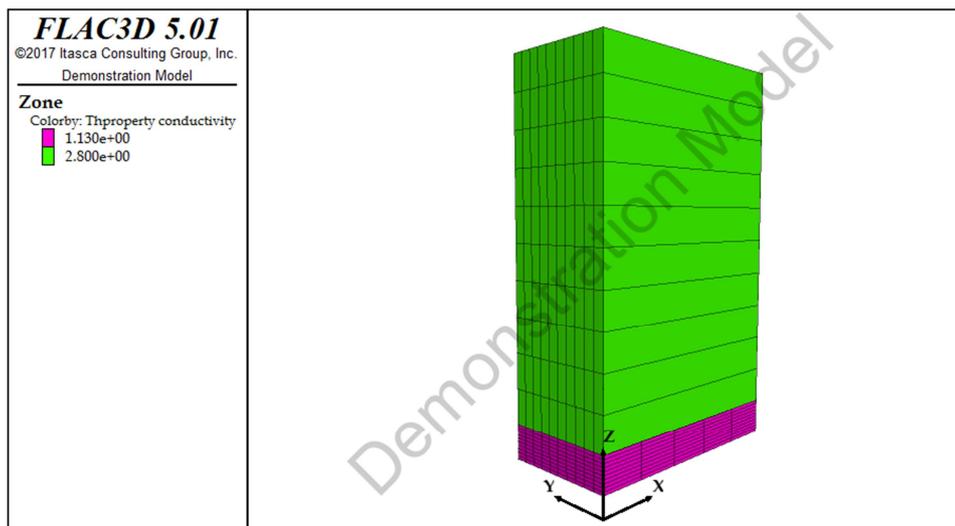


Figura 4.24: conducibilità termica, modello concio cls

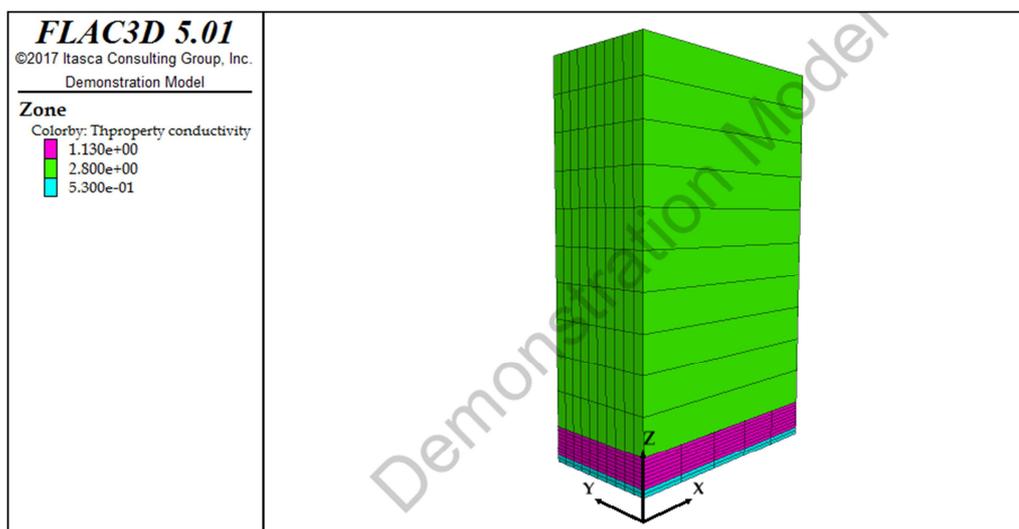


Figura 4.25: conducibilità termica, modello concio geopolimerico

		Cls	Geopolimero	Terreno
Conduttività, λ	W/mK	1.1	0.5	2.8
Densità, ρ	kg/m ³	2200.0	2050.0	2500.0

Tabella 4.15: proprietà a confronto

È stato quindi possibile procedere con le analisi termiche. In particolare sono state svolte due analisi per ogni modello: la prima arrestata dopo 24 h di funzionamento e la seconda fino al raggiungimento dello stato stazionario del flusso, come se l'impianto fosse in funzione a regime.

Il confronto degli output del software per quanto riguarda le temperature della zona del terreno limitrofe al concio permette un controllo diretto del compor-

tamento termico del concio. Sono stati tenuti sotto controllo le temperature dei punti che si trovano sull'asse centrale del concio, in particolare sono stati presi in considerazione i punti sulla superficie inferiore e superiore del modello, per avere dei riferimenti e il punto sull'interfaccia struttura terreno. Per chiarezza sono riportate le coordinate dei punti indagati in Tabella 4.16 e a titolo di esempio è riportata la Figura 4.26, relativa al concio interamente in cls, per rappresentare l'andamento delle temperature per 24 h di attivazione dell'impianto.

Punti di indagine			
Id	578	634	253
x	0.8	0.8	0.8
y	0.5	0.5	0.5
z	3.3	0.3	0.0

Tabella 4.16: coordinate punti di indagine

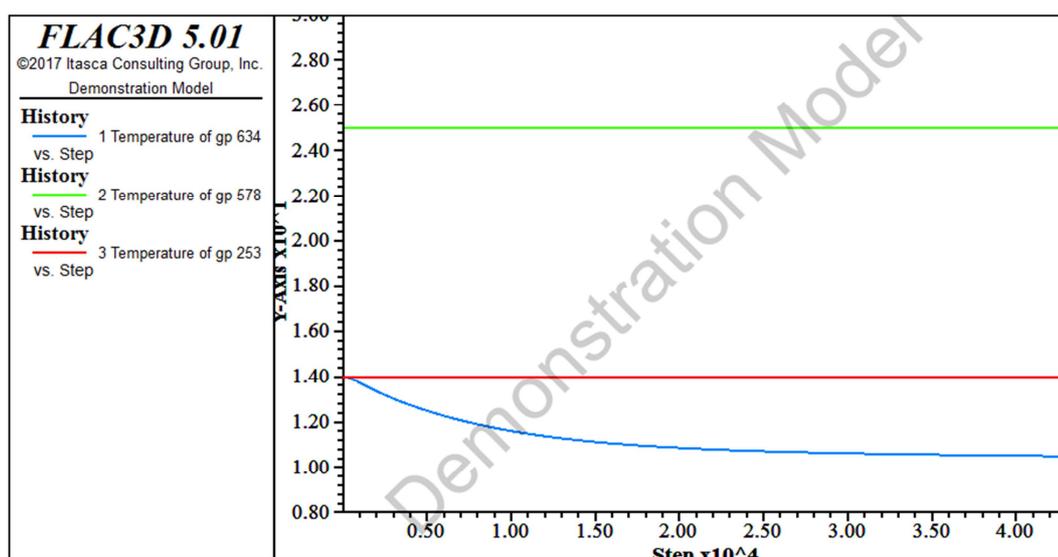


Figura 4.26: andamento temperatura, grid point centrale sull'interfaccia concio terreno

In Figura 4.27 si osserva invece la distribuzione delle temperature direttamente riportate sul modello. In questo caso l'esempio riportato fa riferimento al concio con strato geopolimerico con il raggiungimento dello stato stazionario.

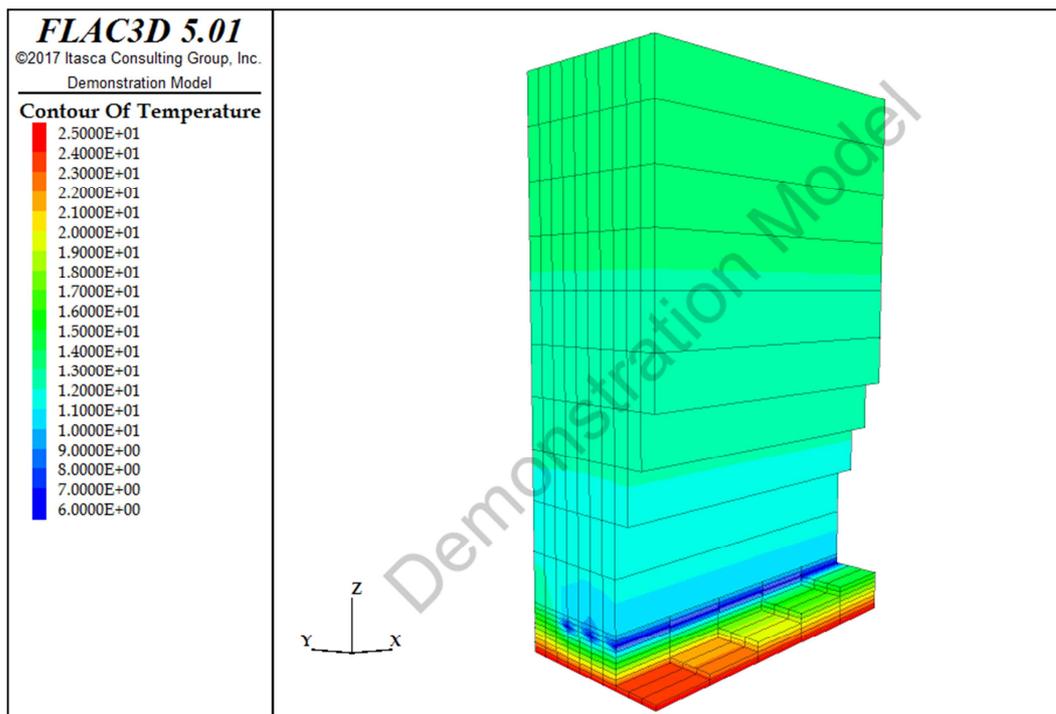


Figura 4.27: distribuzione temperatura, modello concio e terreno

Come si vedrà successivamente la differenza delle temperature dopo 24 h di funzionamento con il campione modificato sono poco evidenti con l'output del programma, motivo per il quale i dati sono stati esportati in formato Excel. Dopo aver importato i risultati su Excel è stato possibile costruire i grafici seguenti in funzione degli steps di calcolo di Figura 4.28 per il funzionamento di 24 h (86400 s) e per il funzionamento a regime Figura 4.29 (steps) in e Figura 4.30 (time).

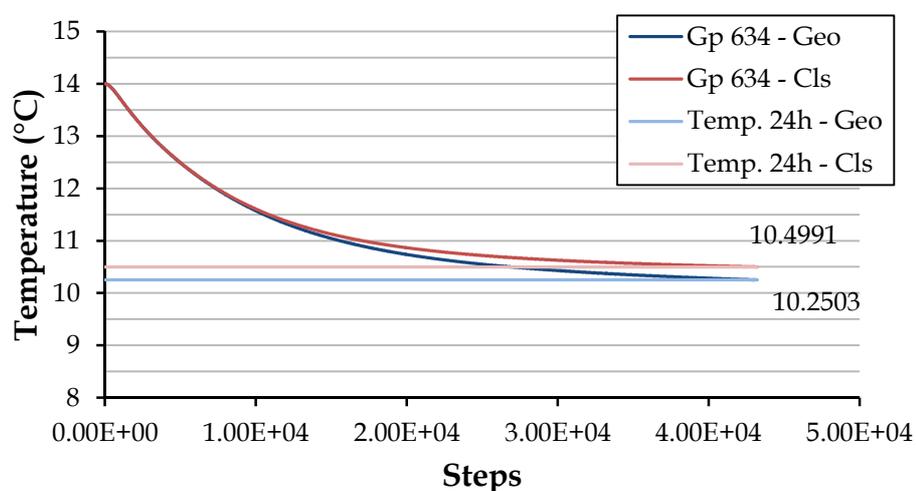


Figura 4.28: andamento temperatura grid point centrale (24 h)

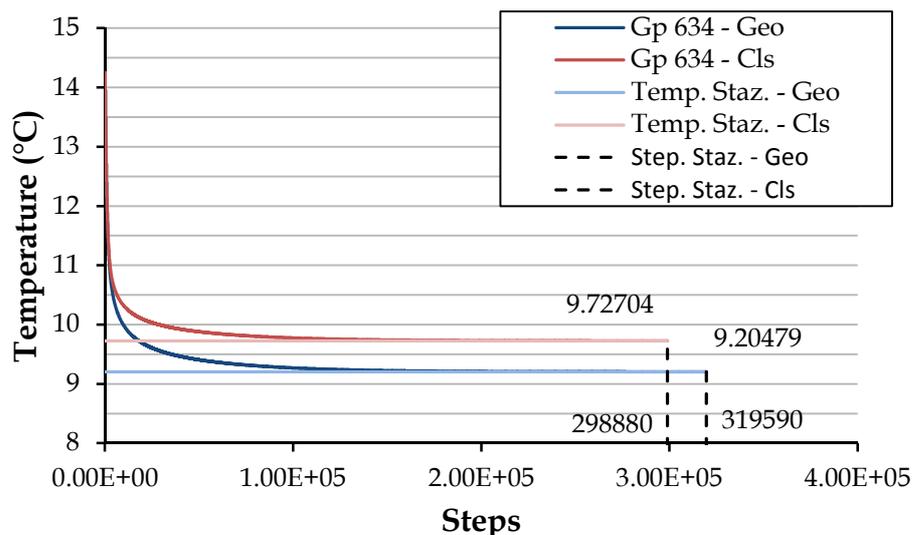


Figura 4.29: andamento temperatura grid point centrale (regime stazionario/step)

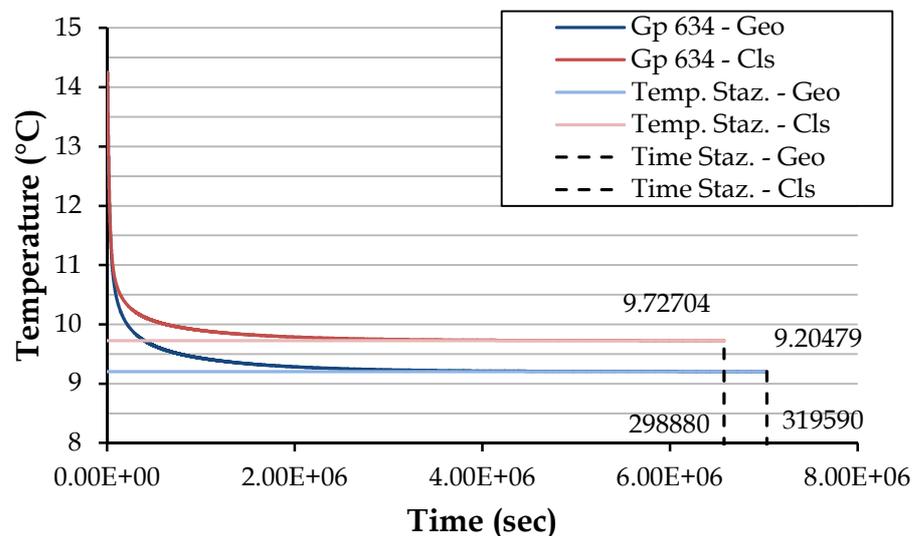


Figura 4.30: andamento temperatura grid point centrale (regime stazionario/time)

Si può evincere quindi un raffreddamento maggiore della zona del terreno a contatto con il concio considerando l'inserimento di strati geopolimerici lapidei e quindi si può sopporre un miglioramento dello scambio termico e un probabile aumento del calore assorbito.

Per rendere il modello ancora più rappresentativo è stato ulteriormente modificato. È stato realizzato un concio che effettivamente seguisse la curvatura della galleria della metro di Torino (raggio interno di 3.40 m). È stato necessario però apportare delle modifiche alle dimensioni del dominio e della sua discretizza-

zione per riuscire a sottostare alle condizioni imposte dalla versione dimostrativa e permettere la curvatura del modello. Il limite estremo dello strato di terreno è stato ridotto di 0.3 m ciò ha permesso una discretizzazione del dominio iniziale di 10x2x5 elementi.

Successivamente è stata aumentata la densità degli elementi nella zona rappresentata dal concio e si è arrivati alla definizione del dominio presentato in Figura 4.31. Quello riportato in figura fa riferimento al concio modificato cambiando le proprietà presentate in Figura 4.32 e Figura 4.33 è stato possibile eseguire le analisi anche sul concio formato interamente da calcestruzzo.

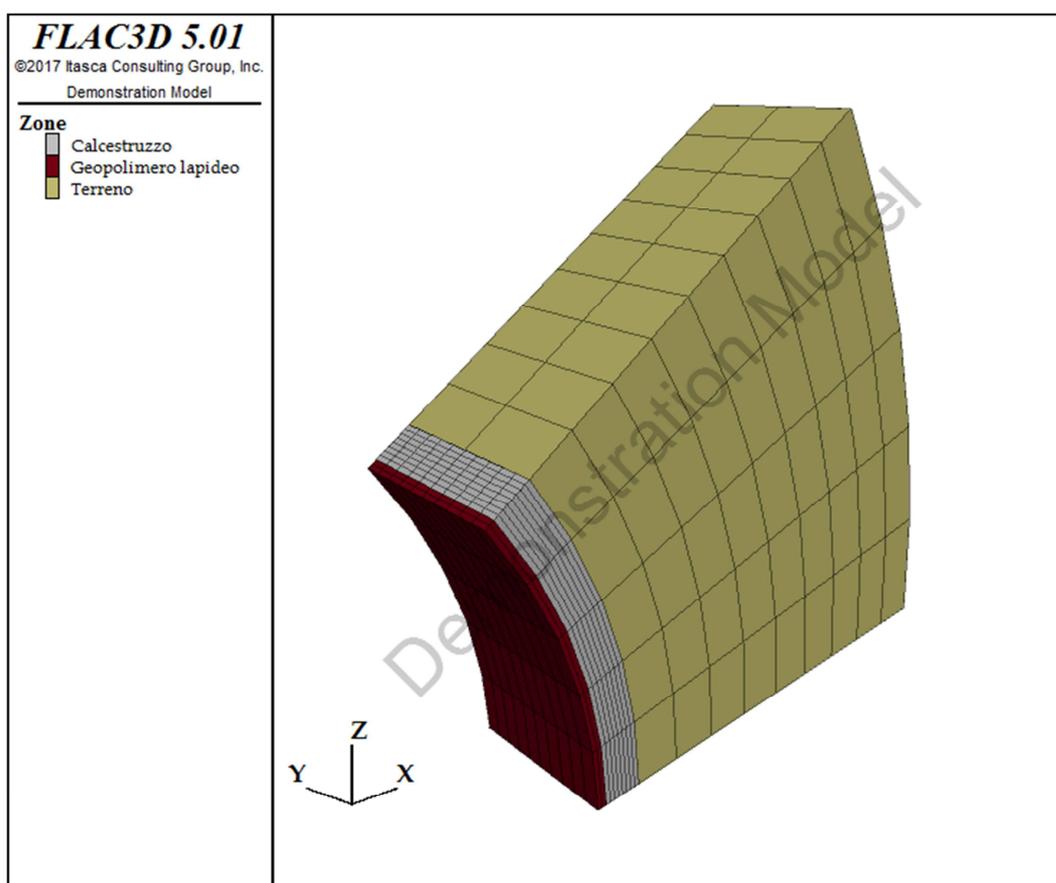


Figura 4.31: modello concio geopolimerico incurvato e terreno

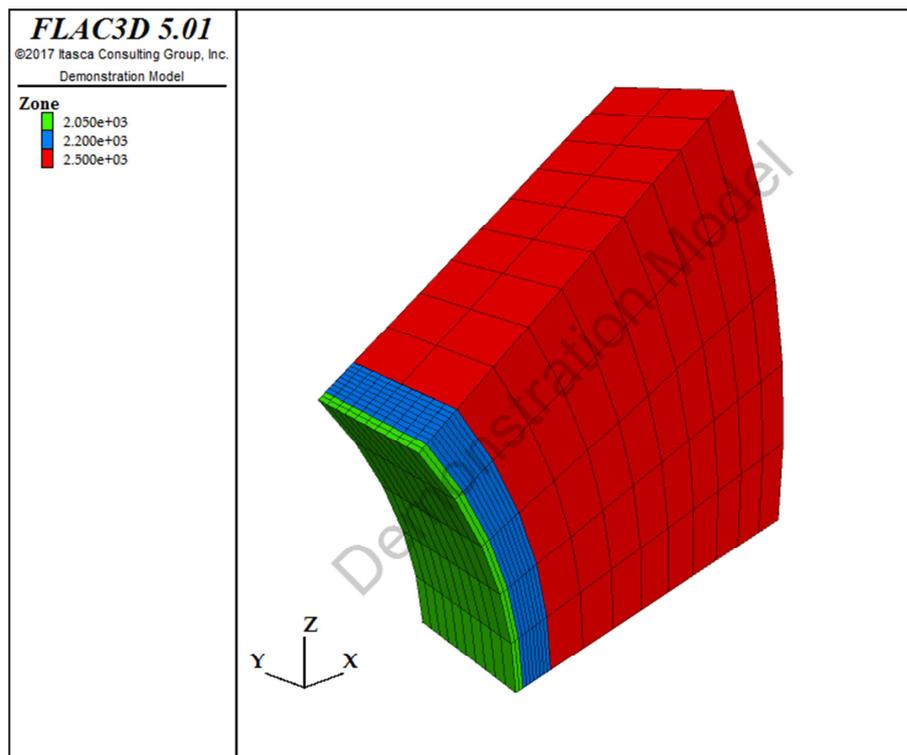


Figura 4.32: densità, modello conico geopolimerico incurvato e terreno

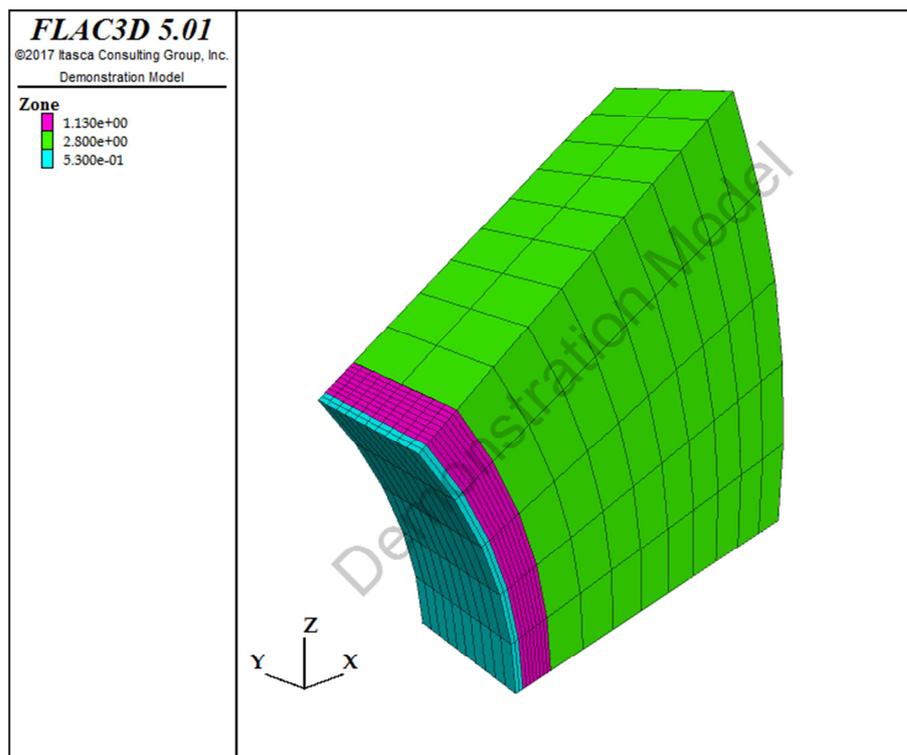


Figura 4.33: conducibilità termica, modello conico geopolimerico incurvato e terreno

Nuovamente per simulare la presenza dell'impianto di tubi scambiatori è stata fissata una temperatura su 3 linee disposta lungo lo sviluppo longitudinale (direzione z) del concio a 6 cm dall'estradosso della galleria.

Anche le condizioni al contorno hanno seguito le medesime impostazioni delle analisi precedenti (Tabella 4.17) ed è stato impostato un modello isotermico e pareti verticali del dominio ($y = 0$ m e $y = 1$ m) sono state rese adiabatiche.

Condizioni al contorno modello coocio e terreno			
Zona	Condizione		
Terreno			
$r = 6.40$	fix temperature	°C	14.0
$r = (3.7,6.4)$	ini temperature		14.0
Concio			
$r = (3.4,3.7)$	ini temperature		14.0
$r = 3.40$	fix temperature	°C	25.0
Impianto tubi scambiatori			
$r = 3.64$	$y = 0.3$ $y = 0.5$ $y = 0.7$	fix temperature	°C 6.0

Tabella 4.17: condizioni iniziali e al contorno, concio energetico curvo e terreno

Su questo modello si è poi deciso di eseguire più analisi andando a variare le temperature dei tubi e lo spessore dello strato geopolimerico isolante. In particolare sono state eseguite le analisi riportate in Tabella 4.18 per il funzionamento di 24 ore dell'impianto e fino a raggiungimento di condizioni stazionarie per osservare come varia il comportamento del concio nelle diverse condizioni.

Analisi termiche				
	Spessore strato geopolimerico (m)			
Temperatura tubi scambiatori (°C)	4;0.0	4;0.06	4;0.12	4;0.15
	6;0.0	6;0.06	6;0.12	6;0.15

Tabella 4.18: matrice delle analisi termiche

Non avendo un punto effettivamente centrale al modello sono stati indagati due punti intorno al centro del concio come indicato nella Tabella 4.19 e quindi si è eseguita la media.

Punti di indagine		
Id	70	130
x	3.59784	3.47151
y	0.5	0.5
z	0.86283	1.27926

Tabella 4.19: matrice delle analisi termiche

I risultati sono quindi riportati e divisi in base alla temperatura di utilizzo dell'impianto nell'Allegato 21. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** invece è riportato a titolo di esempio la distribuzione delle temperature sul dominio dell'analisi con spessore geopolimerico pari a 6 cm e 6 °C per i tubi scambiatori.

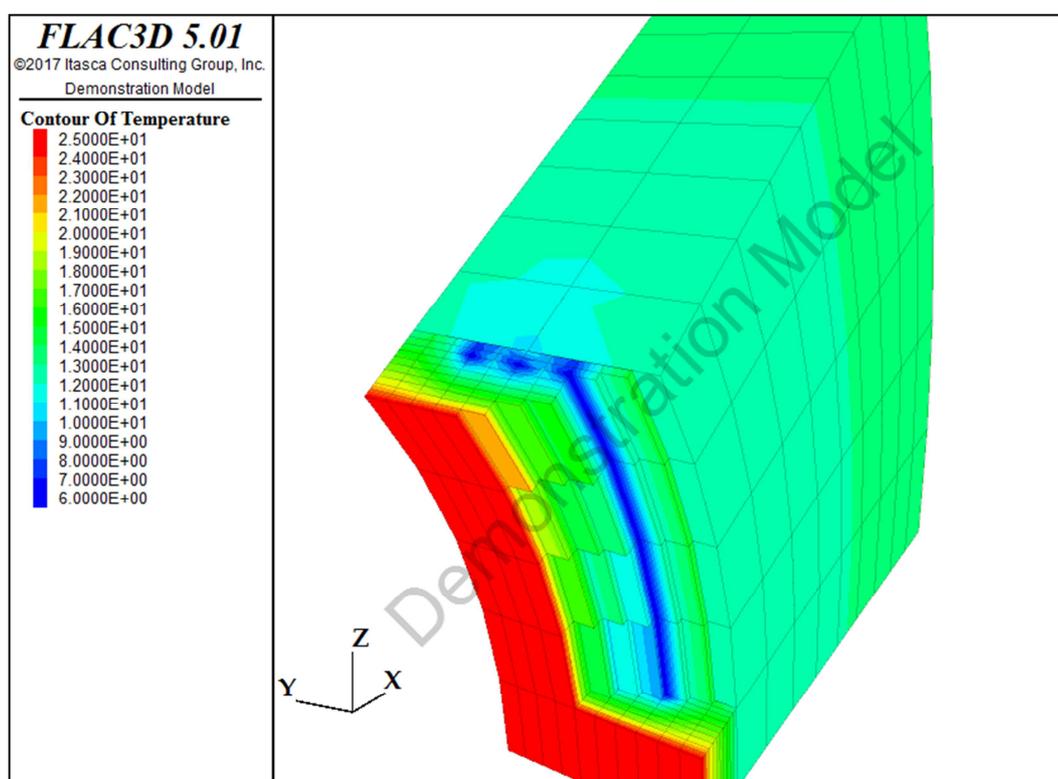


Figura 4.34: conducibilità termica, modello concio geopolimerico incurvato e terreno

Per attestare l'effettiva diminuzione di temperatura nelle zone limitrofe della temperatura si riporta in a titolo dimostrativo l'analisi fino a condizioni stazionarie impostando 6 °C del fluido all'interno dell'impianto in funzione del tempo. Si osserva come per strati maggiori di geopolimero corrispondano abbas-

samenti maggiori rilevati all'interfaccia galleria terreno e come le condizioni stazionarie siano raggiunte dopo.

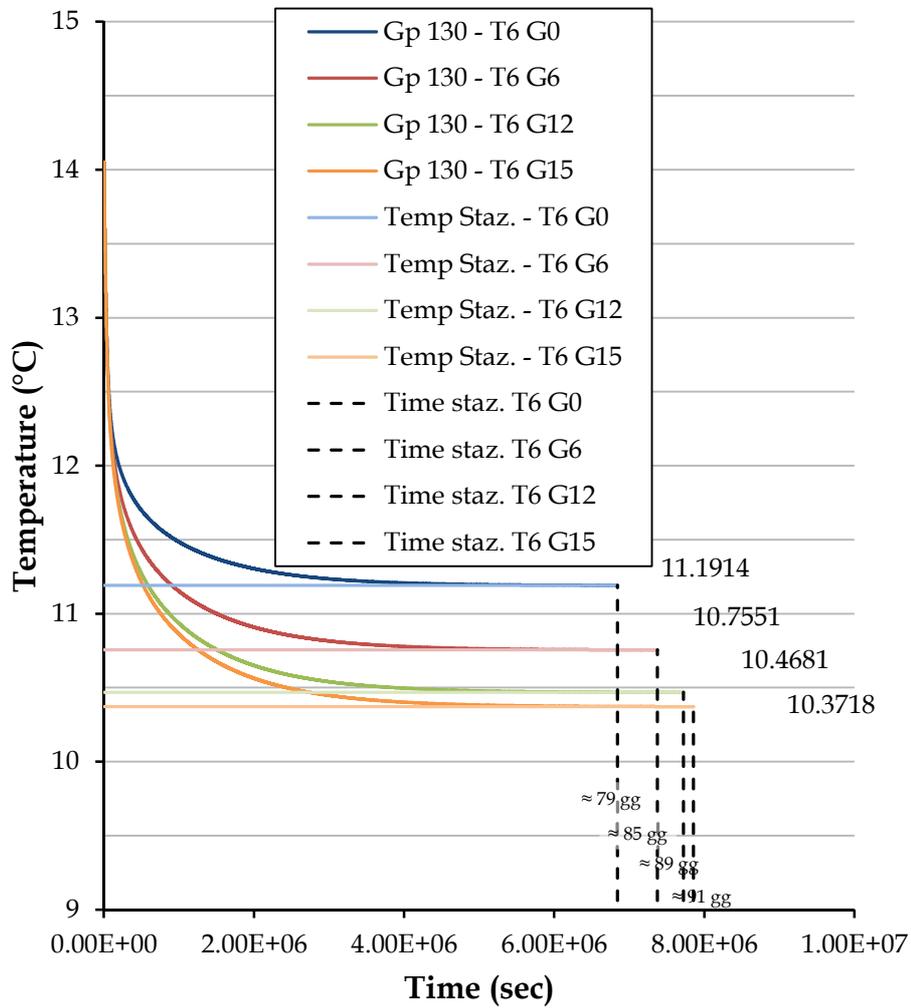


Figura 4.35: andamento temperature terreno con concio geopolimerico con 6 °C di fluido termo vettore

5. CONCLUSIONI

Il progetto di tesi ha riguardato lo studio di possibili nuove forme di impiego di un innovativo materiale geopolimerico derivante da polvere lapidea. Sono stati studiati, attraverso modellazioni numeriche, i cambiamenti e l'ottimizzazione del comportamento termico di gallerie energetiche al variare della composizione dei conci che le compongono, inserendo il materiale geopolimerico nella stratigrafia della struttura. Partendo da una composizione percentuale studiata in lavori precedenti (Palmero P. et al 2017) e con lo studio granulometrico ottimale sono stati confezionati, attraverso trattamenti termici, campioni di malta geopolimerica utilizzando polvere derivante da lavorazione lapidea come materiale base.

Si sono rese necessarie misurazioni delle proprietà di conducibilità (conduttività) e resistenza termica del materiale eseguite con l'utilizzo del termoflussimetro. In base ai risultati ottenuti (Tabella 3.12 pp. 201) si evince come il materiale geopolimerico sia caratterizzato da una conducibilità quasi dimezzata rispetto al materiale a base cementizia. Occorrono, però, alcune considerazioni. I risultati dati presentano un'incertezza di circa 10/15% poiché pur bypassando il problema con termocoppie di misura esterne, la strumentazione utilizzata è progettata per testare materiali molto più isolanti. I test però possono comunque fornire un'idea di ordine di grandezza sulle proprietà termiche dei materiali e i loro differenti comportamenti termici possono essere comunque ritenuti un valido motivo per il quale è possibile l'utilizzo del materiale geopolimerico come isolante all'interno della struttura energetica della galleria.

Per verificare l'effettiva possibilità di impiego all'interno della struttura della galleria sono state eseguite inoltre alcune prove per la determinazione di proprietà fisico meccaniche.

A riguardo dei test eseguiti nel laboratorio di Architettura Tecnica per il modulo elastico dinamico con le prove ad ultrasuoni e al MastraLab per il modulo elastico statico con prove a compressione e a flessione si sono evidenziati due

grandi differenze di comportamento legate principalmente alla qualità dei campioni e al tempo di stagionatura.

Con l'utilizzo della macchina ad ultrasuoni Allegato 17 pp. 335/Tabella 3.14 pp. 209) e il confronto tra le diverse miscele si nota come i valori più alti siano legati alla qualità del manufatto. Infatti, con le accortezze adottate nelle fasi del confezionamento, si è riuscito a ottenere campioni più lisci e compatti con la miscela n. 6 (Figura 3.38, Figura 3.39 e Figura 3.40 da pp. 190). La superficie corrugata dei campioni 4.3g3fgn.B.# e i difetti dei campioni 5.3g3fgn.B.# hanno sicuramente influenzato e inficiato i test agli ultrasuoni. Osservando invece l'evoluzione dei valori nel tempo si intuisce la relazione tra tempo di stagionatura e aumento del modulo elastico dinamico. Il fatto è probabilmente legato alla maturazione e alle reazioni che avvengono all'interno dei campioni a temperatura ambiente anche dopo il trattamento termico avvenuto in camera climatica. Questo comportamento è ben visibile per i campioni della miscela più recente n. 6 e si osserva maggiormente per i campioni che non sono stati conservati all'interno dei sacchetti di plastica.

La suscettibilità all'integrità del campione si osserva anche nel comportamento a flessione (Allegato 18 pp. 336/Tabella 3.15 pp. 211), dove valori più alti di resistenza a rottura riguardano i campioni 6.3g3fgn.B.#.

Se si prendono in esame invece i test a compressione (Allegato 20 pp. 339/Tabella 3.16 pp. 213) il comportamento che si osserva maggiormente è quello influenzato dal periodo di stagionatura infatti i valori maggiori riguardano i campioni prodotti meno recentemente. I valori più alti di resistenza a compressione riguardano la miscela n. 3 che, pur avendo subito fessurazioni e fratture durante il trattamento termico, è circa 20 giorni meno recente della miscela n. 4. Se si osserva la Figura 5.1 è possibile notare la differenza degli stadi di stagionatura delle parti più interne dei campioni che avvalorano le ipotesi precedentemente avanzate. Infatti i campioni delle miscele meno recenti e so-

prattutto quelli non conservati in sacchetti sigillati presentano gli strati interni con colorazione più chiara, meno umida.



Figura 5.1: confronto stagionatura interna, 6.3g3fgn.B.6 (sinistra) e 4.3g3fgn+.B.3 (destra)

Le ultime prove meccaniche di laboratorio hanno riguardato le prove cicliche a compressione non distruttive con l'obiettivo di definire il modulo elastico secante definito ad $1/3$ del carico a rottura del materiale. I risultati (Tabella 3.19 pp. 220) relativi ai diversi campioni, pur essendo caratterizzati da condizioni di integrità, qualità e stagionatura differenti, hanno riportato in relazione al carico a rottura comportamenti abbastanza omogenei attestando il valore di modulo elastico secante intorno a 6250 MPa.

La comparazione dei dati ottenuti in questo progetto di tesi con altri studi eseguiti su composizioni geopolimeriche non è semplice. In particolare sarebbe possibile un confronto immediato solo con composizioni geopolimeriche simili che utilizzano le medesime componenti e materie prime. Prendendo in considerazione il lavoro di ricerca (Palmero P. et al. 2017), con la quale sono stati studiati i parametri fisici e meccanici di geopolimeri la cui composizione ha previsto l'utilizzo di fanghi da lavorazione di pietra ornamentale, si nota come i dati raggiunti dal lavoro di tesi siano inferiori. I motivi sono legati ai diversi problemi riscontrati con l'aumento di scala e alla leggera differenza di composizione. Occorre considerare che, seppur avendo eseguito uno studio granulometrico

per evitare il ritiro volumetrico e la comparsa di fessure e crepe, la composizione liquida utilizzata era studiata per la produzione di campioni di dimensioni più piccole ed era considerata anche una percentuale di loppa d'altoforno. I risultati, però, di questi primi test su malte geopolimeriche si possono ritenere soddisfacenti considerando il fatto che il materiale geopolimerico studiato utilizza il materiale di scarto fangoso non come filler ma come unico materiale attivante della miscela, in completa sostituzione della polvere di cemento e senza l'utilizzo di materie per aumentare le caratteristiche idrauliche.

Infine sono state svolte le analisi termiche su modelli numerici alle differenze finite, riproducendo e confrontando il comportamento del concio di galleria in presenza o meno di strati isolanti di geopolimero lapideo. Gli output delle analisi (Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30 da pp. 284/Allegato 21 pp. 349) evidenziano una diminuzione delle temperature del terreno nell'intorno della galleria maggiori con l'inserimento di strati maggiori del materiale geopolimerico isolante all'intradosso della struttura della galleria. Prescindendo dalle condizioni di apporto termico nel terreno da azioni esterne, i risultati delle analisi fanno presupporre che l'utilizzo del geopolimero a base lapidea nella composizione della stratigrafia della galleria energetica porti a un aumento della direzionalità del calore all'estradosso della galleria aumentando lo scambio termico tra calcestruzzo e terreno.

In conclusione, senza tralasciare l'importanza dei trattamenti termici per l'attivazione chimica e la necessità di ulteriori test meccanici e studi per il miglioramento della composizione geopolimerica, i dati ottenuti dalle simulazioni numeriche e dalle prove in laboratorio sono favorevoli all'impiego e alla valorizzazione di questo materiale di scarto, con origine da lavorazioni lapidee, all'interno della struttura dei conci energetici Enertun, rendendo più competitivi e possibili i miglioramenti delle efficienze energetiche e della tecnologia geotermica.

6. ALLEGATI

6.1. Allegato 1: diario di laboratorio

Giorno 01 costruzione prototipo cassero

Giorno 02 costruzione versione definitiva cassero

Giorno 03 sgretolamento sommario fango rappreso

Giorno 04 essiccamento e inizio setacciamento

Giorno 05 e 06 completamento della preparazione del materiale

Giorno 07 test per il dosaggio dei reagenti miscela n.1

Giorno 08 caratterizzazione materiale

Giorno 09 inizio test flussimetro, provino base cementizia

Giorno 10 foto con termo camera provino base cementizia nel flussimetro preparazione dosaggi aggregati solidi

Giorno 11 test laboratori chimica e inizio preparazione soluzione idrossido di sodio per miscela n. 2

Giorno 12 giovedì 22 febbraio termine preparazione soluzione idrossido di sodio aggiustamento dosaggi aggregati solidi preparazione dosaggio sol sodio silicato miscelazione getto e inserimento camera climatica

Giorno 13 mercoledì 28 febbraio scassero e osservazioni

Giorno 14 lunedì 5 marzo consegna piastra campione 50x50x5 (cm) al Denerg

Giorno 15 lunedì 12 marzo 2018 inizio preparazione miscela n. 3 (3.GEO.B.#)

Giorno 16 martedì 13 marzo 2018 fine preparazione miscela n. 3 getto e camera climatica

Giorno 17 venerdì 16 marzo 2018 osservazione provini durante lo stagionamento e osservazioni

Giorno 18 mercoledì 21 marzo inizio caratterizzazione sabbie per definire la granulometria ideale per evitare il ritiro

Giorno 19 giovedì 22 marzo fine caratterizzazione sabbie. Estrazione provini e scoperta della temperatura non uniforme. Occorre scassere preventivamente i provini per sintetizzarli in modo uniforme. test seconda cottura su metà dei provini

Giorno 20 lunedì 26 marzo caratterizzazione polvere di fango, osservazioni seconda cottura provini

Giorno 21 mercoledì 11 aprile inizio preparazione fase liquida per miscela n.4

Giorno 22 giovedì 12 aprile fine preparazione fase liquida per miscela n.4

Giorno 23 mercoledì 18 aprile caratterizzazione curve di progetto e osservazione provini confronto miscela n.2 e miscela n.3

Giorno 24 giovedì 03 maggio preparazione miscela n.4 tentativo di cottura differente

Giorno 25 lunedì 07 maggio scassero preventivo miscela n. 4

Giorno 26 mercoledì 09 maggio controllo provini in camera climatica e preparazione miscela n. 5

Giorno 27 venerdì 11 maggio uscita provini dalla camera climatica (miscela n. 4) e preparazione miscela n. 5

Giorno 28 lunedì 14 maggio scassero parziale miscela n. 5

Giorno 29 giovedì 17 maggio scassero totale miscela n. 5

Giorno 30 lunedì 21 maggio inizio preparazione miscela n. 6

Giorno 31 mercoledì 23 maggio getto 6 campioni miscela n. 6

Giorno 32 venerdì 25 maggio scassero preventivo 6 campioni miscela n. 6

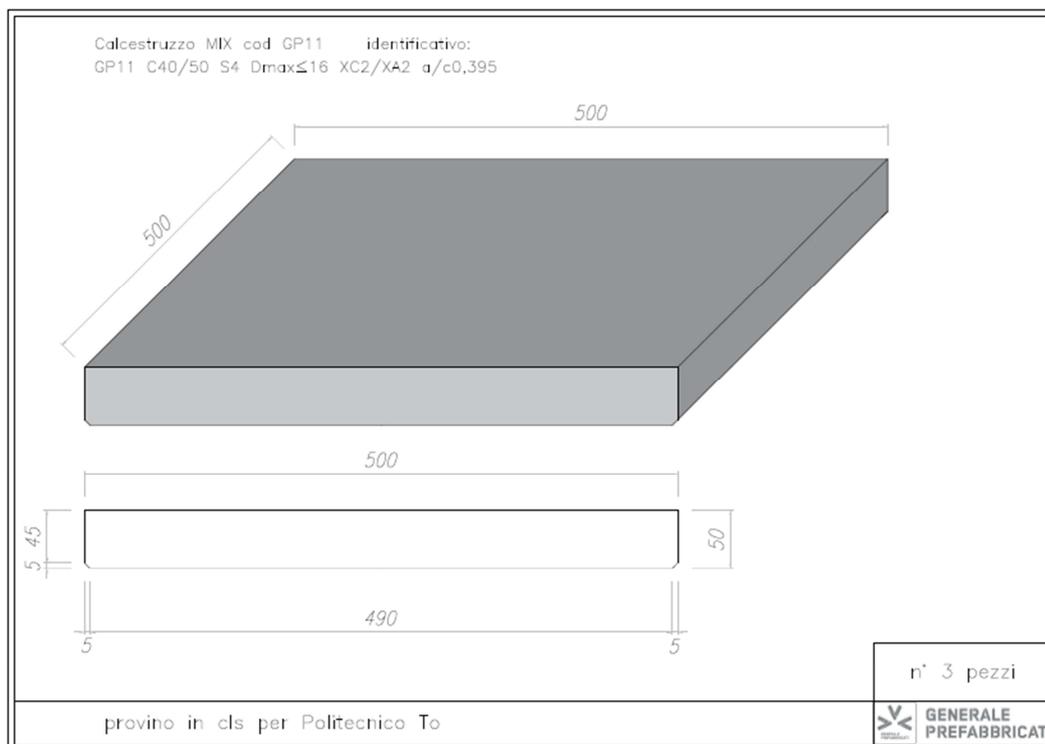
Giorno 33 martedì 29 maggio controllo campioni miscela n. 6

Giorno 34 mercoledì 30 maggio conservazione campioni in sacchetti

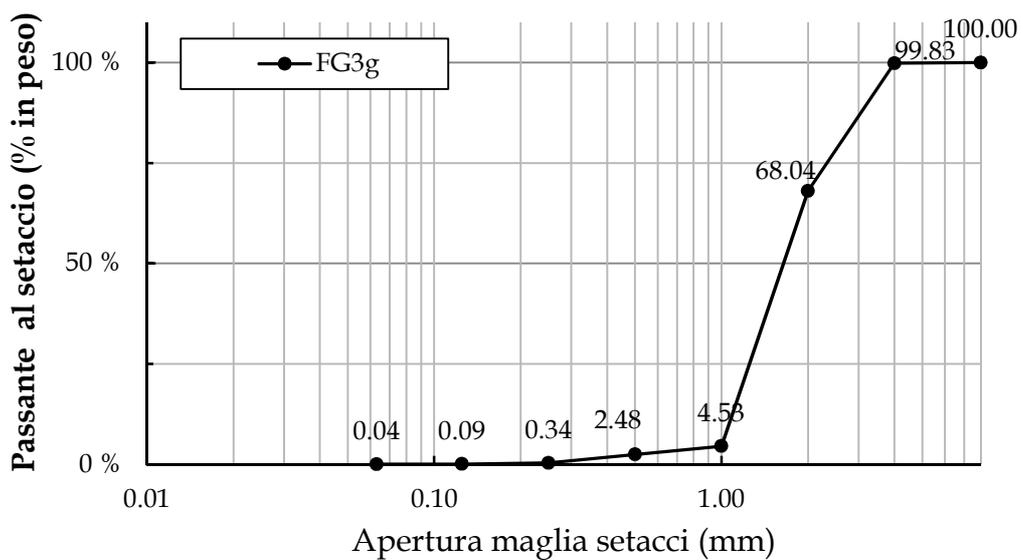
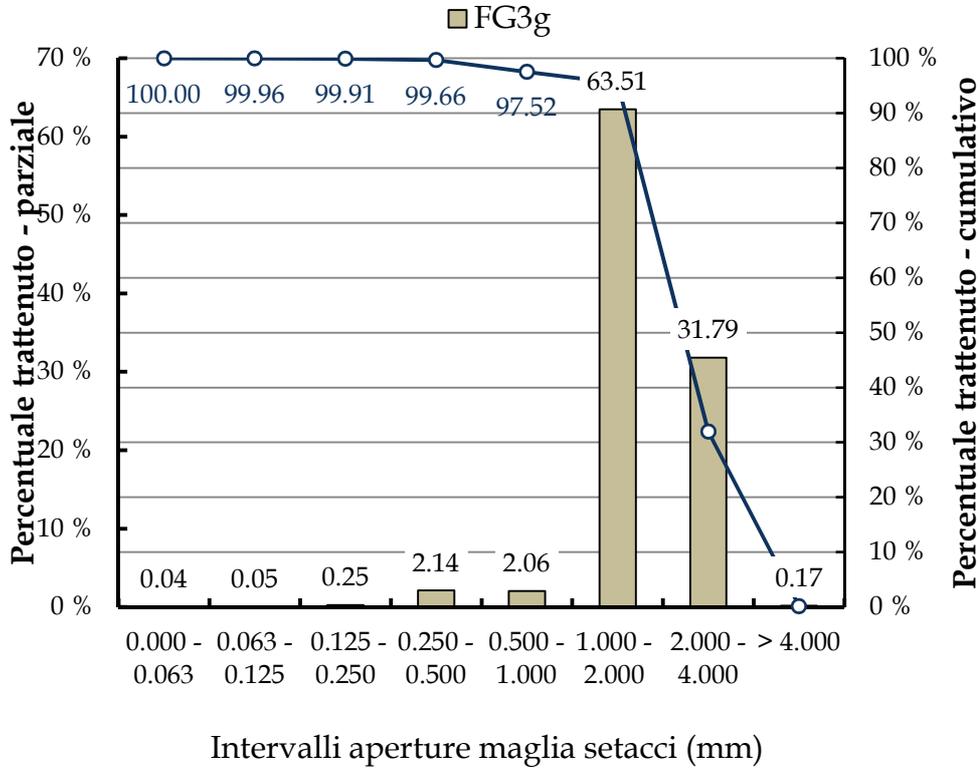
Giorno 35 giovedì 31 maggio inizio test ad ultra suoni e peso campioni

Giorno 36 venerdì 8 giugno visita cantiere piazza Bengasi e secondo test ultrasuoni

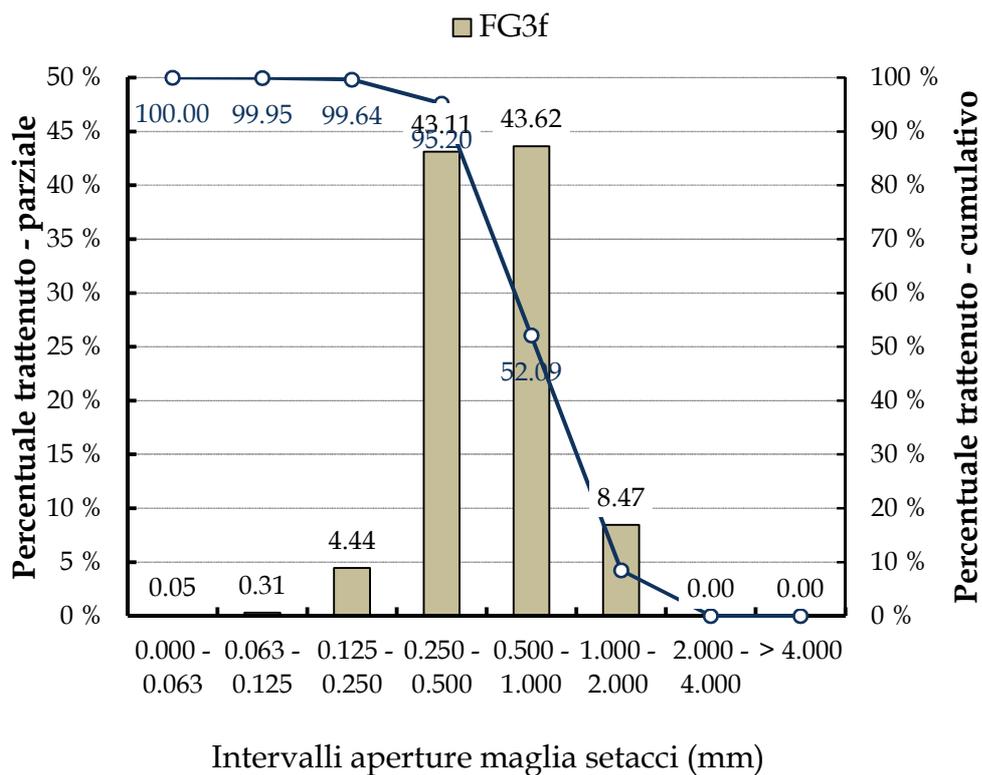
6.2. Allegato 2: scheda tecnica campione a base cementizia

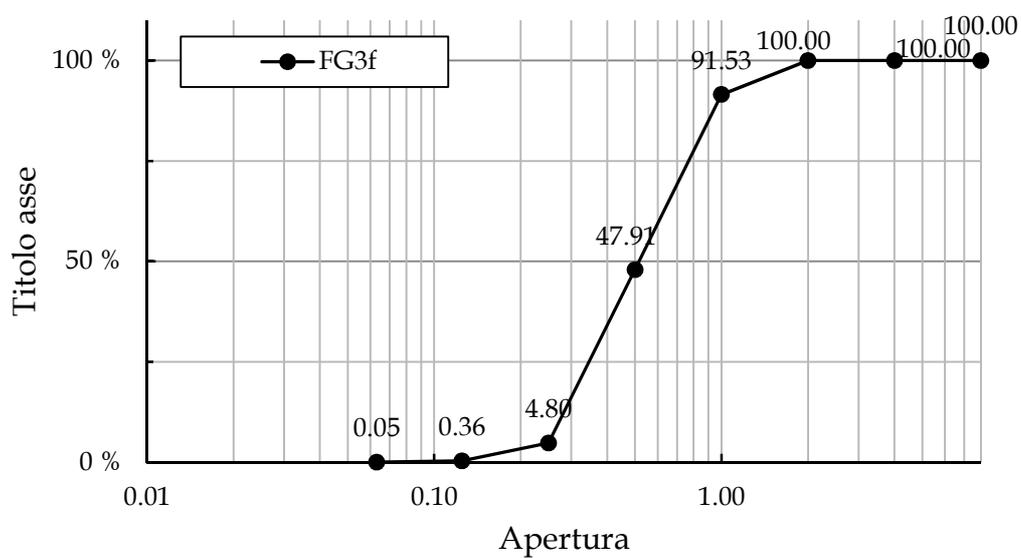


6.3. Allegato 3: composizione granulometrica e vuoti apparenti sabbie di laboratorio



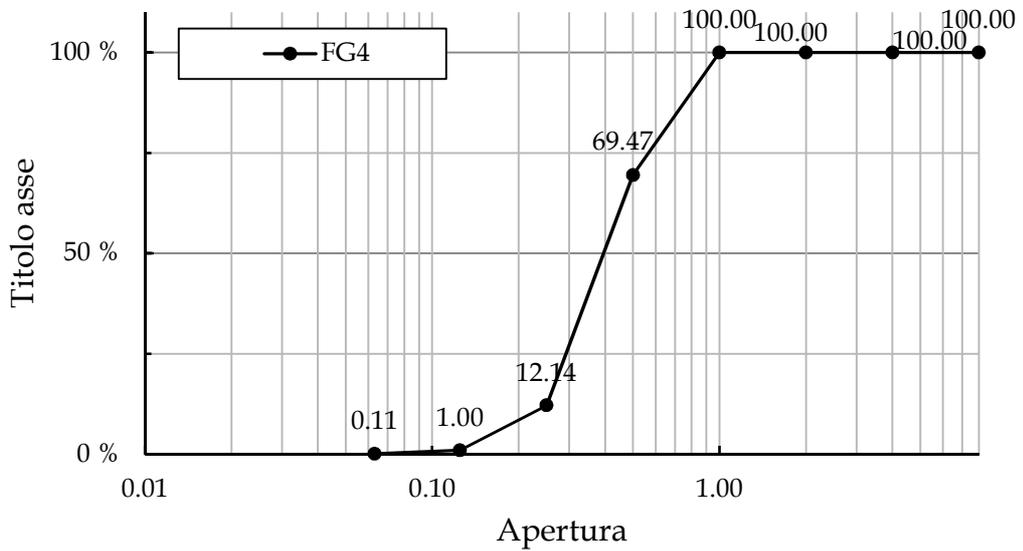
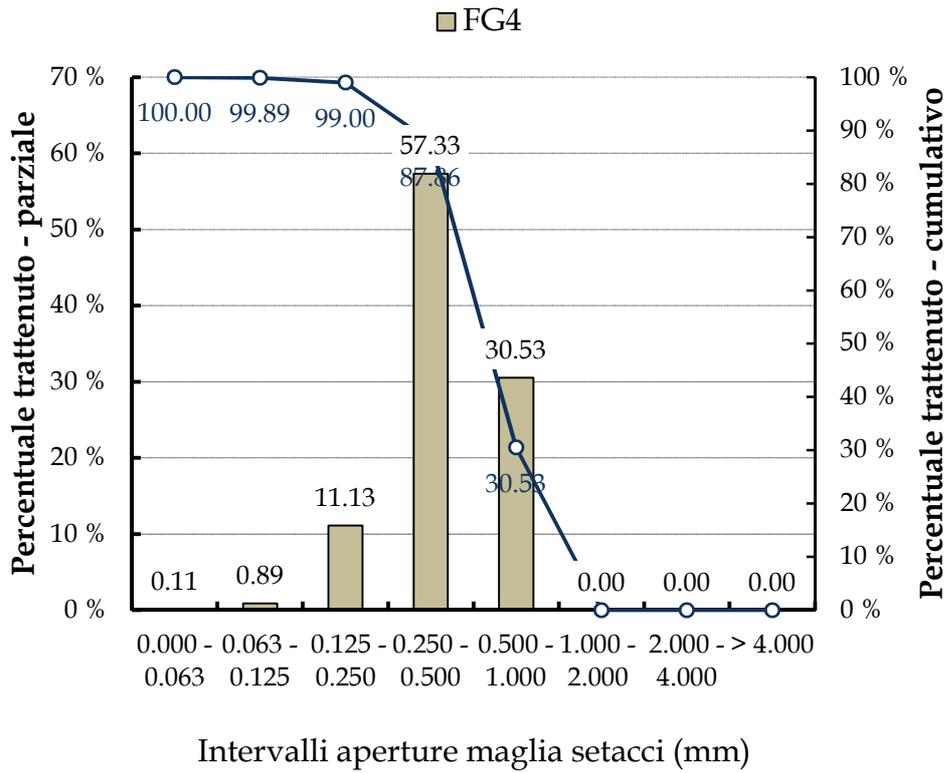
FG3g	
	% V/V
Contenuto dei vuoti 1	33.5567
Contenuto dei vuoti 2	26.84
Contenuto dei vuoti 3	22.2133
Contenuto dei vuoti (media)	27.5367



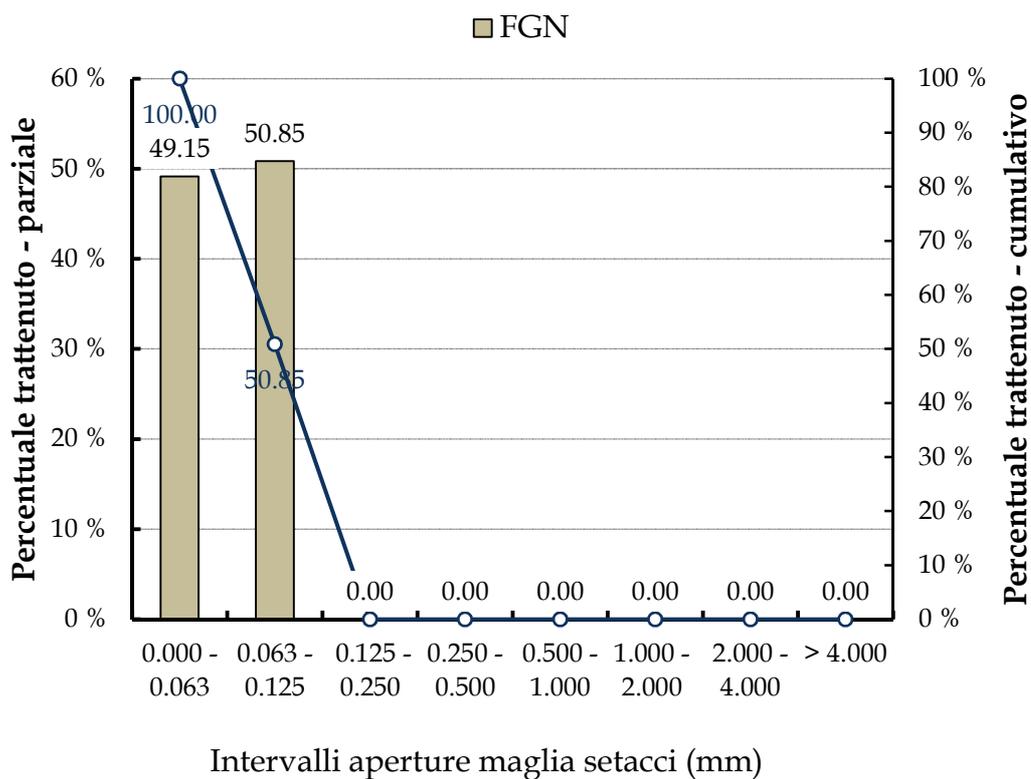


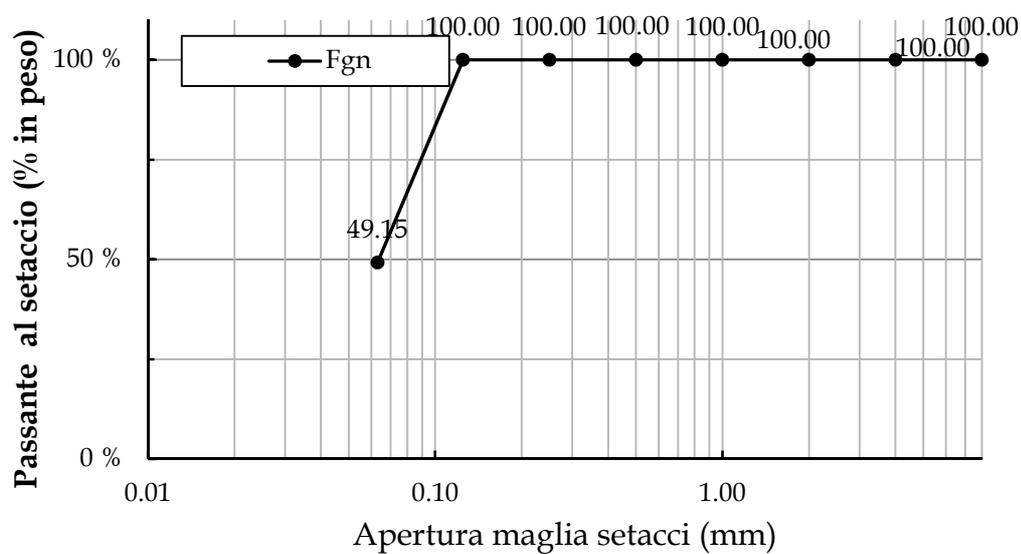
FG3f	
	% V/V
Contenuto dei vuoti 1	17.2333
Contenuto dei vuoti 2	14.8033
Contenuto dei vuoti 3	10.88
Contenuto dei vuoti (media)	14.3056





FG4	
	% V/V
Contenuto dei vuoti 1	45.6967
Contenuto dei vuoti 2	19
Contenuto dei vuoti 3	31.2
Contenuto dei vuoti (media)	31.9656





Trattandosi di granulometria molto fine il calcolo approssimativo dei vuoti apparenti risulta un'operazione oltre che difficile anche inconcludente.

6.4. Allegato 4: scheda tecnica NaOH

- Sigma-Aldrich

SIGMA-ALDRICH®

sigma-aldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

Email USA: techserv@sial.com

Outside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:
Sodium hydroxide - BioXtra, ≥98% (acidimetric), pellets (anhydrous)

Product Number: S8045
CAS Number: 1310-73-2
MDL: MFCD00003548
Formula: NaOH
Formula Weight: 40.00 g/mol

NaOH

TEST	Specification
Appearance (Color)	White
Appearance (Form)	Pellets
Titration with HCl	≥ 98 %
Solubility (Color)	Colorless
Solubility (Turbidity)	Clear
1M, H ₂ O	
Chloride (Cl)	≤ 0.005 %
Sulfate (SO ₄)	≤ 0.05 %
Insoluble matter	≤ 0.1 %
Aluminum (Al)	≤ 0.0005 %
Phosphorus (P)	≤ 0.0005 %
Lead (Pb)	≤ 0.001 %
Calcium (Ca)	≤ 0.0005 %
Magnesium (Mg)	≤ 0.0005 %
Iron (Fe)	≤ 0.0005 %
Copper (Cu)	≤ 0.0005 %
Zinc (Zn)	≤ 0.0005 %
Potassium (K)	≤ 0.02 %
Recommended Retest Period	-----
2 Years	

Specification: PRD.2.ZQ5.10000029079

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

1 of 1

- Donau Chemie

DONAU CHEMIE		WERKSCHIEDLICHE	
WERKSBESCHEINIGUNG 2.1 nach DIN EN 10204			
An:	Firma: Toscochimica spa c/o Marraccini Biagio & Figlio SRI Via Degli Stipfeti 24/26 55060 Coselli - Capannori		
Produkt	Ätznatron Artikel Nr. 1951		
	Wert	Prüfmethode	
Konzentration (NaOH)	98,5 (+/- 0,5) %	-DC 1901/01	
Natriumcarbonat (Na₂CO₃)	< 0,3 ** %	-DC 1901/01	
Eisen (Fe)	< 1 ppm	-DC 1901/07	
Aluminium (Al)	< 5 ppm	-DC 1901/07	
Calcium (Ca)	< 5 ppm	-DC 1901/07	
Magnesium (Mg)	< 1 ppm	-DC 1901/07	
Quecksilber (Hg)	quecksilberfrei	-DC 1901/07	
Schwermetalle als Blei (Pb)	< 1 ppm	-DC 1901/07	
** Kann sich durch Reaktion mit CO ₂ der Luft erhöhen.			
Transporteur	Gartner KG.	Prüfdatum	13.03.2018
Transportmittel	NST 381/V/L 659 FM	Prüfstelle	Labor Brückl
Lieferung vom	13.03.2018	Prüfung durch	Ing.Maier Qualitätskontrolle
Dieses Zeugnis wurde elektronisch erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Seite 1/1			
DONAU CHEMIE www.donau-chemie.com Telefonnummer: 158787	Zentrale Am Heumarkt 10 A-1030 Wien T: +43 1 71148-0	Werk Pischelsdorf Industriepark Pischelsdorf A-3435 Zwentendorf T: +43 2277 90500-0	Werk Brückl Klagenfurter Straße 17 A-9371 Brückl T: +43 4214 2326-0
			Werk Landeck Jubiläumsstraße 3 A-6500 Landeck T: +43 5442 64211-0



Soc. Chimica Emilio Fedeli S.p.A.

UNIPERSONALE

Società sottoposta alla attività di direzione e coordinamento di "ANGIOLA S.r.l. Società Unipersonale"

Prodotti Chimici Industriali



Certificate of Analysis No. 934

05 02 2018

SELLER: SOC. CHIMICA FEDELI S.P.A.
VIA DEL BRENNERO 48
PISA, ITALY

GOODS: CAUSTIC SODA FLAKES

QUANTITY: 23,00 MT NET
23,69 MT GROSS
23 PALLETS 1 MT
920 BAGS OF 25 KG

TRUCK NO.: NT 08 EBL / NT 08 EAB
CUSTOMS TARIFF CODE: 28151100

Analysis	Required	Lot 85 Found	Lot 87 Found	Lot 97 Found
Aspect	Flakes	Flakes	Flakes	Flakes
Color	White	White	White	White
Sodium hydroxide	min. 98%	98,5	98,5	98,5
Sodium chloride	max 500 mg/kg	307	311	303
Sodium carbonate	max 0,5%	0,28	0,28	0,27
Fe2O3	max 10 mg/kg	2,2	2,2	2,2
Nickel	max 2,5 mg/kg	1,5	1,5	1,4

Analysis report
Lot no. 85 ; 87 ; 97
Validity 36 months
Production date: 01.2018
Expiry date: 01.2021

Sede legale: Via del Brennero, 48 – 56123 Pisa - Tel + 39 050555998 (4 linee r.a.) - Fax + 39 050830554
C.F./P. IVA/R.I. Pisa 01338740506 – Cap. Soc. € 5.000.000 Vers. 3.700.000 - C.C.I.A.A. Pisa R.E.A. Pisa n° 116442 www.chimicafedeli.it

6.5. Allegato 5: certificato di analisi e conformità Sol. Sodio Silicato

Caratteristiche chimico-fisiche	Unità di misura	Dati analitici
<i>Aspetto a 25°C</i>	-	liquido viscoso privo di impurezze macroscopiche
<i>odore</i>	-	inodore
<i>Rapporto ponderale SiO₂/Na₂O</i>	-	3,36
<i>Rapporto molare SiO₂/Na₂O</i>	-	3,47
<i>SiO₂</i>	%	27,57
<i>Na₂O</i>	%	8,21
<i>Densità relativa a 20°C</i>	g/ml	1,367
<i>Densità in equivalenti Baumè</i>	°Bè	38,69
<i>pH (soluzione tal quale, 20°C)</i>	-	11,4
<i>Titolo in sodio silicato</i>	%	35,78

6.6. Allegato 6: composizione campioni miscela n.1

PREPARAZIONE MISCELA						
codice provini	n. provini	b	h	l	Vol. tot.	
1.FG4FGN+.A.#	4	2	2	8	128	
SOLUZIONE INIZIALE						
		%		%	g	
frazione liquida	Sol 50% NaOH	3.3	NaOH	1.65	5.06135	10.1227
			H2O	1.65	5.06135	53.3742
frazione solida	Sol. Sodosilicato			14.1	43.25153374	
	Fango CLS			32.6	100	
	Sabbia			50	153.3742331	
tot					306.7484663	
SOLUZIONE AGGIUNTA						
			%		g	g in base alla miscela iniziale
soluzione preparata	Sol. Sodosilicato		81.3084		87	12.19626168
				H2O	18.6916	20
tot					107	
soluzione aggiunta					15	% rispetto soluzione iniziale 4.89
SOLUZIONE FINALE						
				%	g	
frazione liquida	Sol 50% NaOH	4.01756	NaOH	1.57	5.06135	12.9264
			H2O	2.44	7.86509	68.3742
frazione solida	Sol. Sodosilicato			17.23	55.44779542	
	Fango CLS			31.08	100	
	Sabbia			47.67	153.3742331	
tot					321.7484663	

*in giallo vengono indicati i dati di input in verde la composizione finale della miscela

6.7. Allegato 7: composizione campioni miscela n.2

PREPARAZIONE MISCELA						
codice provini	n. provini	b	h	l	Vol. tot.parz.	Vol. tot.
2.FG4FGN+.B.#	6	4	4	16	1536	14036
2.FG4FGN+.C.1	1	50	50	5	12500	
SOLUZIONE INIZIALE						
				%	g	
frazione liquida	Sol 50% NaOH	3.3	NaOH	1.6	640	10.1227
			H2O	2.5	1000	
	Sol. Sodosilicato			17.2	6880	
frazione solida	Fango CLS			31.1	12440	31520
	Sabbia			47.7	19080	
			tot		40040	
SOLUZIONE AGGIUNTA						
Non è stata aggiunta nessuna soluzione poiché le percentuali della preparazione della miscela partivano dalla preparazione precedente che tien conto della frazione liquida aggiunta.						
SOLUZIONE FINALE						
				%	g	
frazione liquida	Sol 50% NaOH	3.3	NaOH	1.6	640	10.1227
			H2O	2.5	1000	
	Sol. Sodosilicato			17.2	6880	
frazione solida	Fango CLS			31.1	12440	31520
	Sabbia			47.7	19080	
			tot		40040	

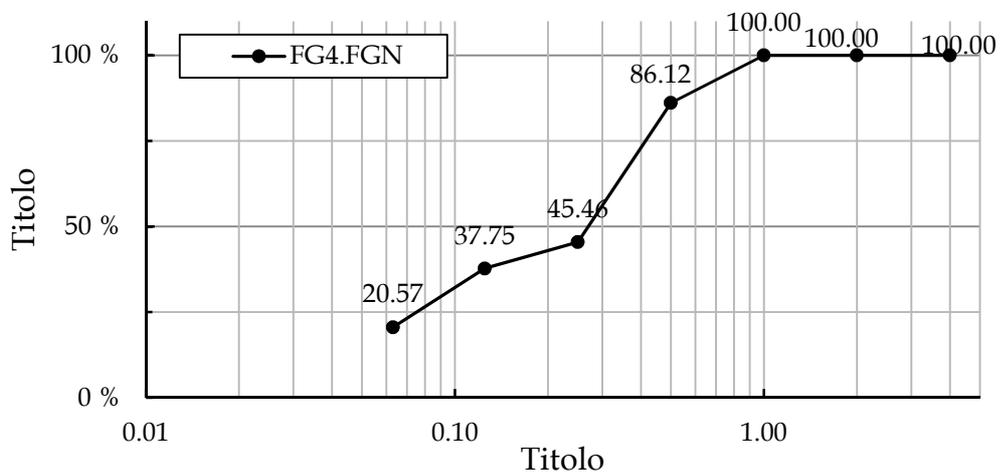
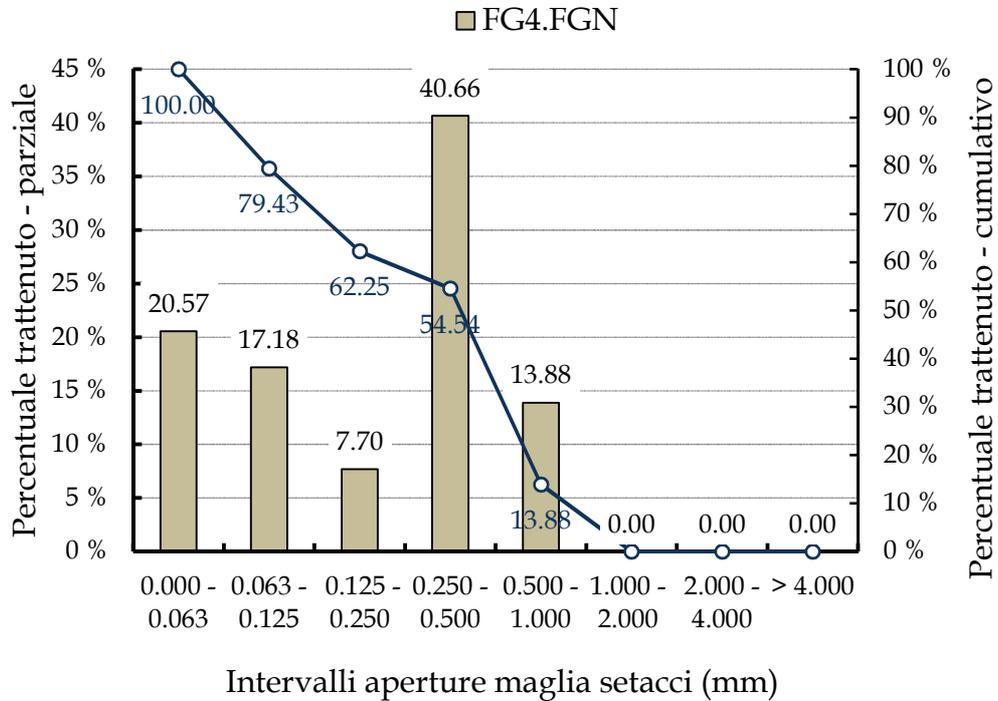
*in giallo vengono indicati i dati di input in verde la composizione finale della miscela

6.8. Allegato 8: composizione campioni miscela n.3

PREPARAZIONE MISCELA						
Codice Provini	n. provini	b	h	l	Vol. tot.	
3.FG4FGN.B.#	7	4	4	16	1792	
SOLUZIONE INIZIALE						
		%		%	g	Tot.
Frazione Liquida	Sol 50% NaOH	3.3	NaOH	1.65	70	140
			H2O	1.65	70	738.182
Frazione Solida	Sol. Sodosilicato			14.1	598.18	25377.4
	Fango CLS			32.6	1383	58674
	Sabbia			50	2121.2	89990.8
			tot			4242.42424
SOLUZIONE AGGIUNTA						
			%		g	g in base alla miscela iniziale
soluzione preparata	Sol. Sodosilicato		81.3084		87	168.6779949
	H2O		18.6916		20	38.77655055
		tot			207.45	
soluzione aggiunta	Sol. Sodosilicato + H2O				50	
	H2O				20	
SOLUZIONE FINALE						
				%	g	
frazione liquida	Sol 50% NaOH	4.0176	NaOH	1.62	70	169.346
			H2O	2.30	99.346	808.182
frazione solida	Sol. Sodosilicato			14.81	638.536	
	Fango CLS			32.07	1383.03	3504.24
	Sabbia			49.19	2121.21	
			tot			4312.424

*in giallo vengono indicati i dati di input in verde la composizione finale della miscela

6.9. Allegato 9: composizione granulometrica fase solida FG4/FGN



FG4/FGN	
	% V/V
Contenuto dei vuoti 1	33.5267
Contenuto dei vuoti 2	34.29
Contenuto dei vuoti 3	34.81
Contenuto dei vuoti (media)	34.2078

6.10. Allegato 10: definizione delle curve di progetto

Per scegliere quali sabbie utilizzare e in che percentuali nella definizione della curva granulometrica appropriata è stato seguito un metodo analitico basato su un sistema di equazioni lineari che mette in relazione, attraverso coefficienti numerici, le classi numeriche di ogni sabbia a disposizione in laboratorio andando a ricercare la combinazione di queste che si discosta di meno dalla curva ideale di riferimento. A tal proposito sono stati eseguiti gli studi delle curve granulometriche anche delle sabbie Fg5 e Fg6. In Tabella 6.1 è possibile osservare i dati di input per la ricerca della curva di progetto.

SETACCIO [mm]	FG3g [%]	FG3f [%]	FG4 [%]	FG5 [%]	FG6 [%]	FGN [%]
0.063	0.04	0.05	0.11	0.08	1.52	49.15
0.125	0.09	0.36	1.00	3.23	13.27	100.00
0.250	0.34	4.80	12.14	44.58	80.14	100.00
0.500	2.48	47.91	69.47	98.61	99.52	100.00
1.000	4.53	91.53	100.00	100.00	99.98	100.00
2.000	68.04	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.000	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabella 6.1: distribuzione granulometrica delle sabbie di laboratorio

Per ogni apertura della maglia del setaccio è stata definita un'equazione

$$\sum_{j=1}^6 P_{C_{ij_classe}} \cdot \alpha_j = P_{C_{i_prog}}$$

Dove:

- $P_{C_{ij_classe}}$ fa riferimento al passante cumulato alla i -esima apertura del setaccio per la j -classe distribuzione granulometrica a disposizione;
- α_j sono i coefficienti moltiplicativi, incognite del sistema la cui somma deve essere pari all'unità e i cui valori soluzione del sistema definiscono le percentuali di utilizzo delle diverse curve granulometriche;

$$\sum_{j=1}^6 \alpha_j = 1$$

- $P_{C_{i_prog}}$ è la percentuale di passante cumulato di progetto che, confrontata con il passante cumulato di riferimento della curva ideale, deve fornire il minor scarto (σ) possibile, con

$$\sigma = \left(P_{C_{i_ideale}} - P_{C_{i_prog}} \right)^2$$

Imponendo come vincolo l'utilizzo della polvere lapidea e attraverso lo studio degli scarti è stato possibile capire quali e come utilizzare le classi granulometriche. In Tabella 6.2 è possibile osservare uno stralcio del foglio di calcolo utilizzato per la definizione della curva di progetto nel caso di applicazione della curva di riferimento di Fuller 0.5.

Setaccio [mm]	FG3g [%]	FG3f [%]	FG4 [%]	FG5 [%]	FG6 [%]	FGn [%]	Fuller (0.5) progetto [%]	Fuller (0.5) riferimento [%]	Scarto [-]
0.06	0.04	0.05	0.11	0.08	1.52	49.15	9.87	12.55	7.17
0.13	0.09	0.36	1.00	3.23	13.27	100.00	20.27	17.68	6.73
0.25	0.34	4.80	12.14	44.58	80.14	100.00	22.94	25.00	4.25
0.50	2.48	47.91	69.47	98.61	99.52	100.00	37.17	35.36	3.31
1.00	4.53	91.53	100.00	100.00	99.98	100.00	45.28	50.00	22.25
2.00	68.04	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	81.68	70.71	120.35
4.00	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.90	100.00	0.01
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_7	somma		somma
	0.57	0.00	0.23	0.00	0.00	0.20	alpha	1.00	164.06

Tabella 6.2: esempio foglio di calcolo, definizione curva di progetto

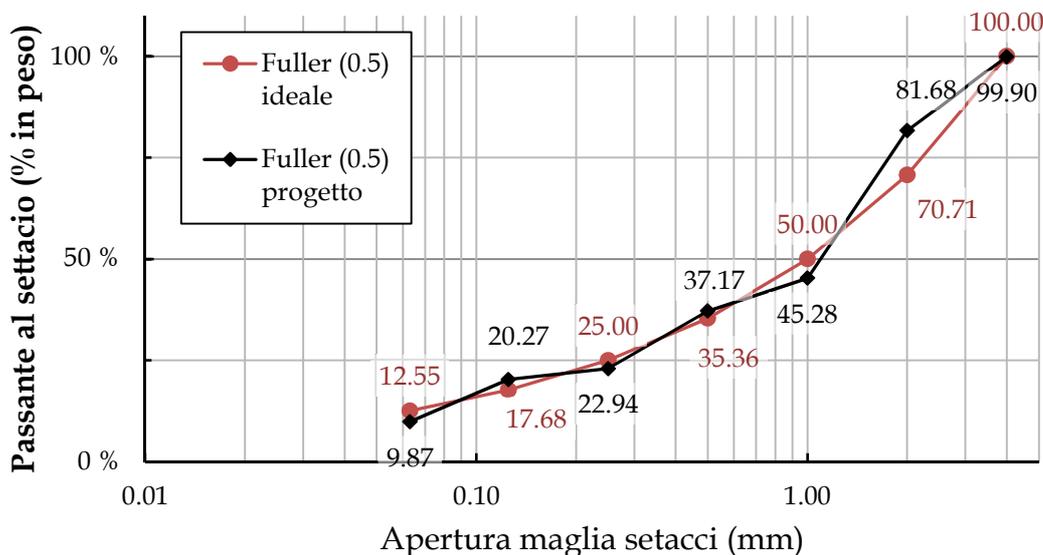
Risolvendo il sistema per ogni curva granulometrica ideale ipotizzata si ottengono le percentuali di utilizzo indicate nella Tabella 6.3.

	% utilizzate			
	FG3g	FG3f	FG4	FGN
Fuller (0.5)	57.00	-	23.00	20.00
Fuller (0.4)	49.00	-	23.00	28.00
C33/C33M - 13	30.00	46.00	-	24.00

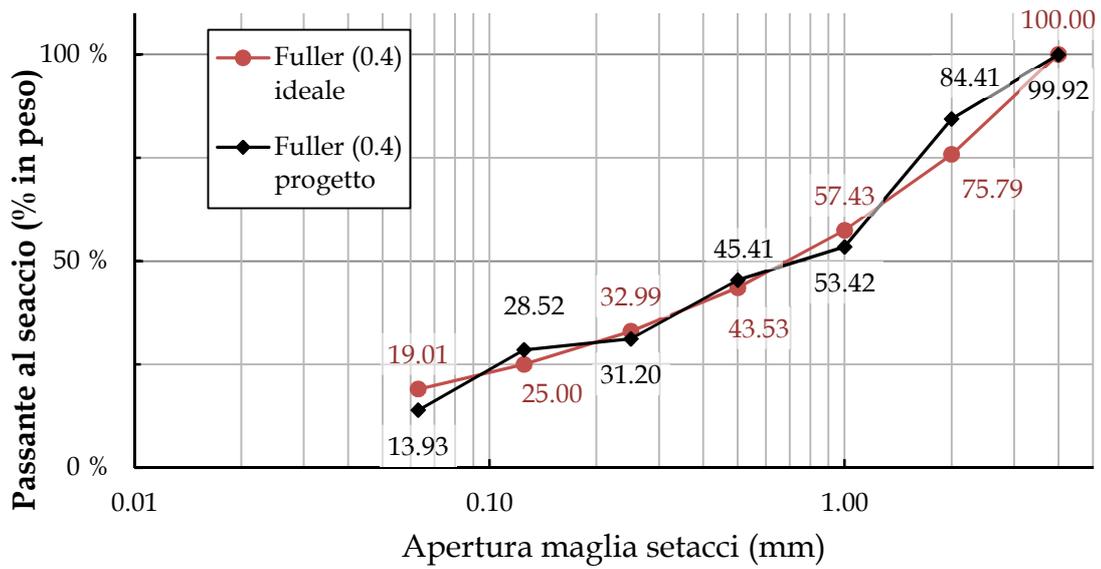
Tabella 6.3: percentuali sabbie per le curve ideali

Di seguito sono quindi riportati i grafici e le tabelle che pongono a confronto le curve di riferimento ideali e le curve di progetto.

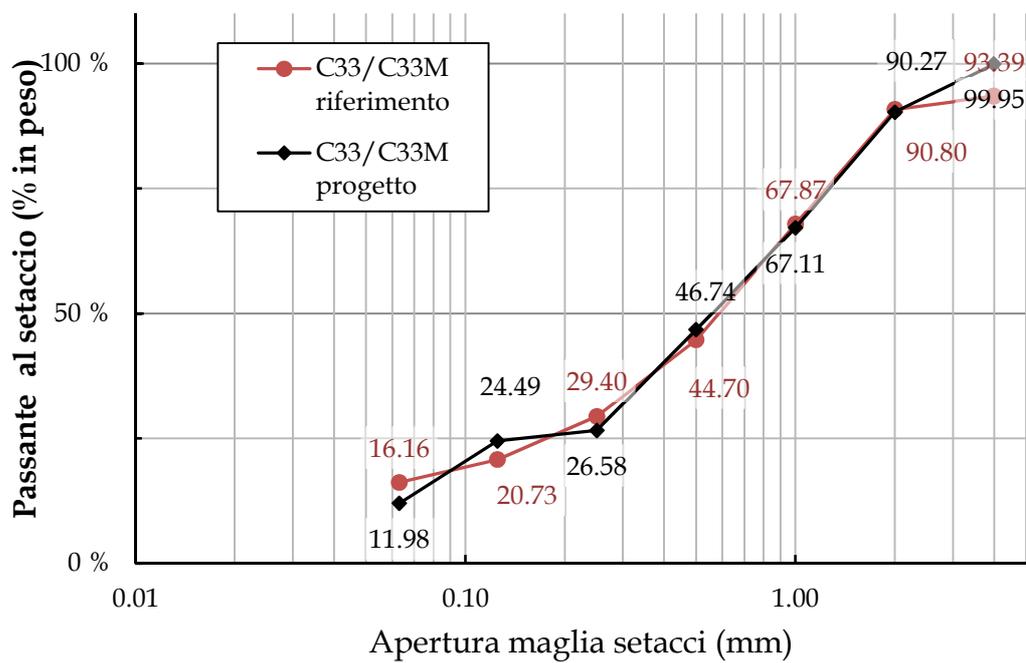
Fuller (0.5) progetto [%]	Fuller (0.5) ideale [%]	Scarto somma 164.06
9.87	12.55	7.17
20.27	17.68	6.73
22.94	25.00	4.25
37.17	35.36	3.31
45.28	50.00	22.25
81.68	70.71	120.35
99.90	100.00	0.01



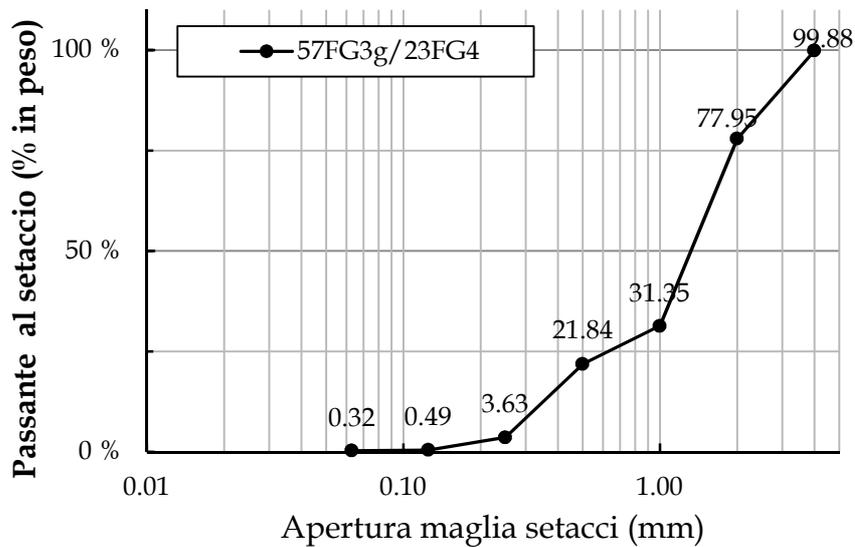
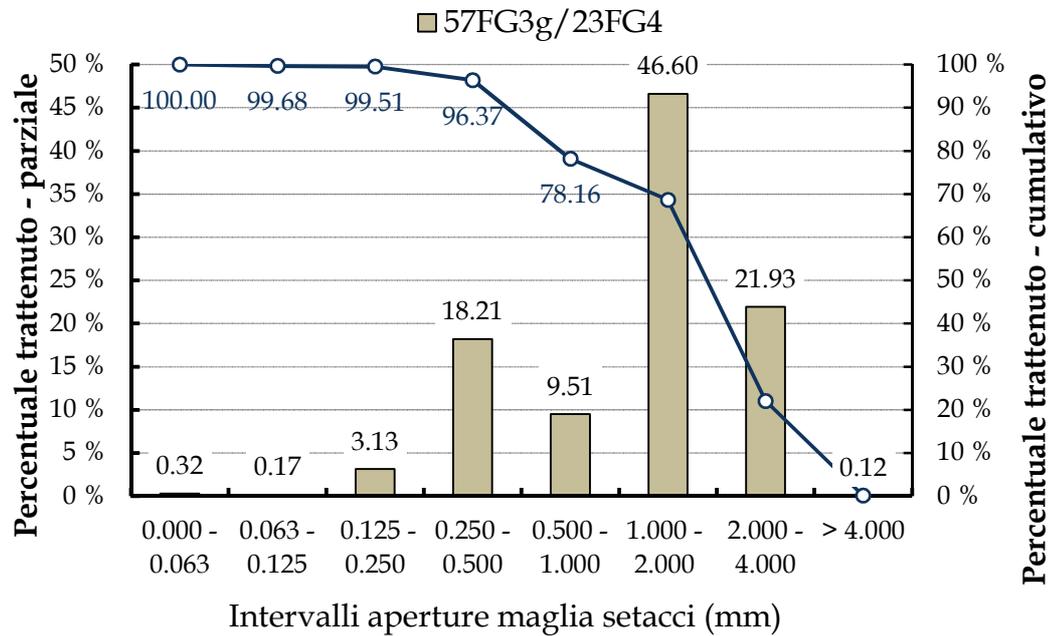
Fuller (0.4) progetto [%]	Fuller (0.4) ideale [%]	Scarto somma 135.35
13.93	19.01	25.80
28.52	25.00	12.41
31.20	32.99	3.20
45.41	43.53	3.53
53.42	57.43	16.11
84.41	75.79	74.31
99.92	100.00	0.01



C33/C33M - 13 progetto [%]	C33/C33M - 13 riferimento [%]	Scarto somma 44.67
11.98	16.16	17.51
24.49	20.73	14.14
26.58	29.40	8.00
46.74	44.70	4.18
67.11	67.87	0.56
90.27	90.80	0.28
99.95	100.00	0.00



6.11. Allegato 11: studio granulometrico curve di progetto

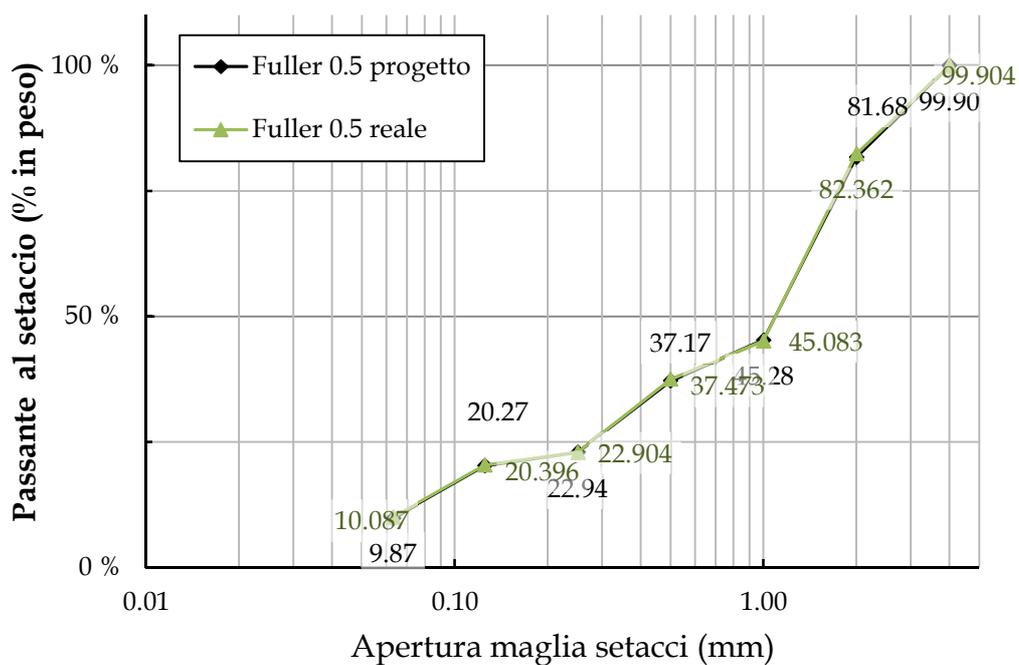


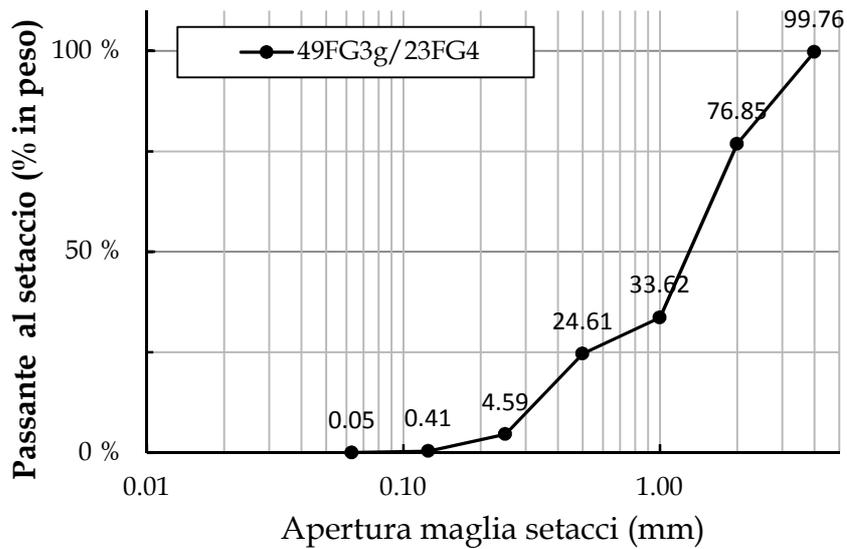
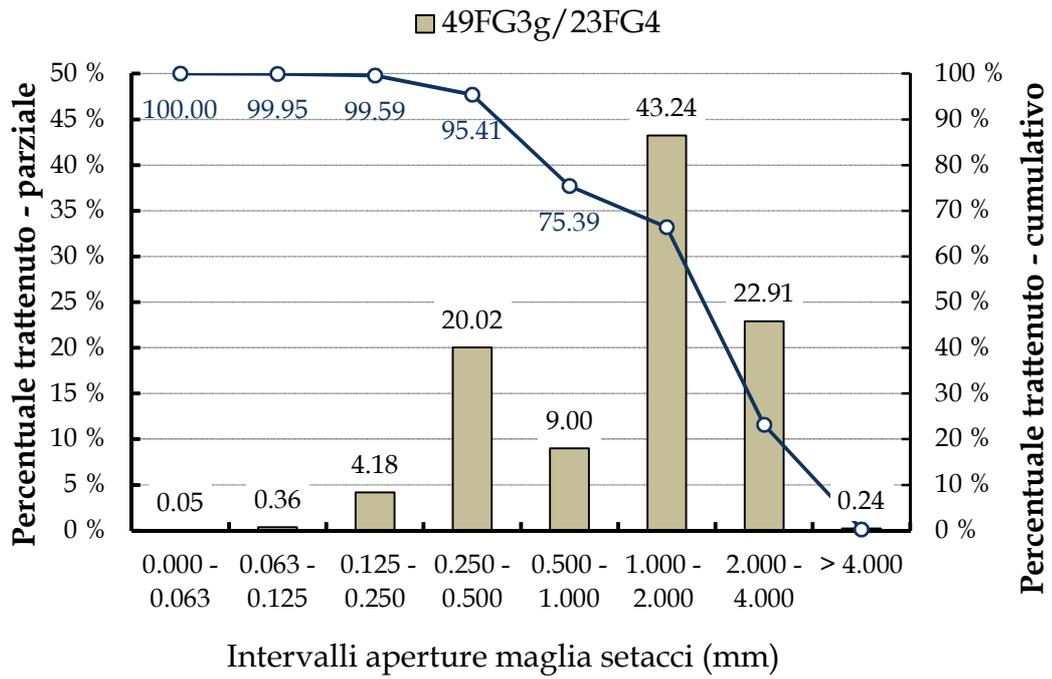
57% FG3.g/23% FG4

% V/V

Contenuto dei vuoti 1	27.5484
Contenuto dei vuoti 2	31.4033
Contenuto dei vuoti 3	33.50323
Contenuto dei vuoti (media)	30.8183

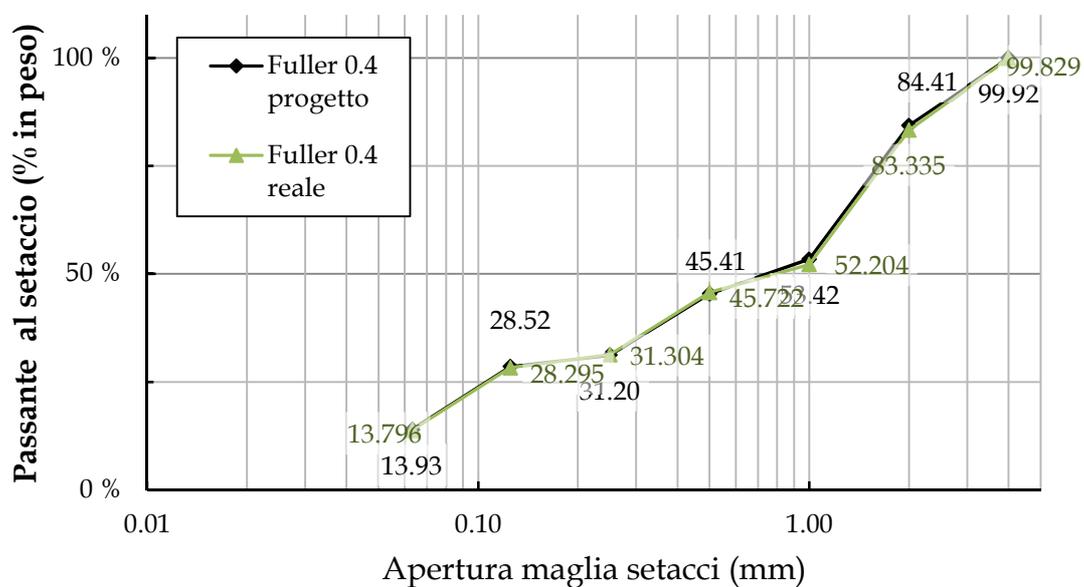
Diametro setaccio	% utilizzo		Curva di pro- getto
	80	20	
[mm]	FG3.g+FG4	FGN	[%]
0.063	0.322	49.148	10.087
0.125	0.495	100.000	20.396
0.250	3.630	100.000	22.904
0.500	21.841	100.000	37.473
1.000	31.354	100.000	45.083
2.000	77.952	100.000	82.362
4.000	99.879	100.000	99.904

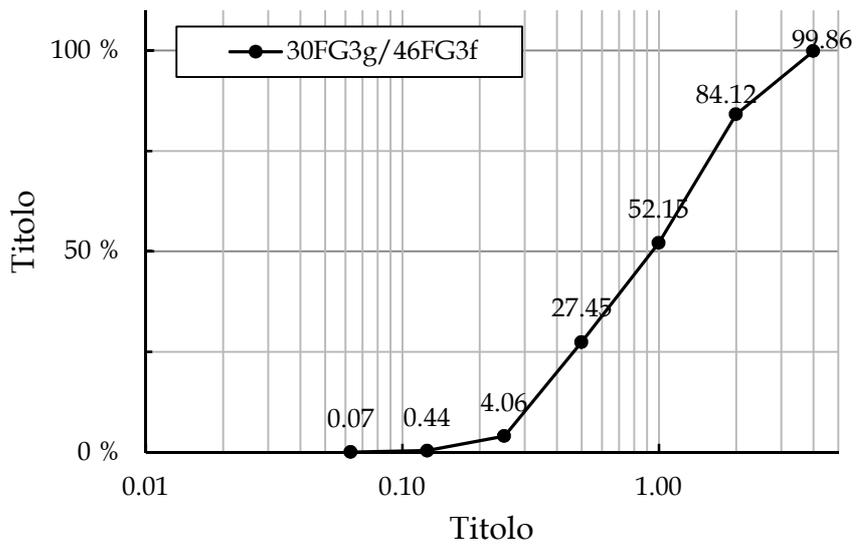
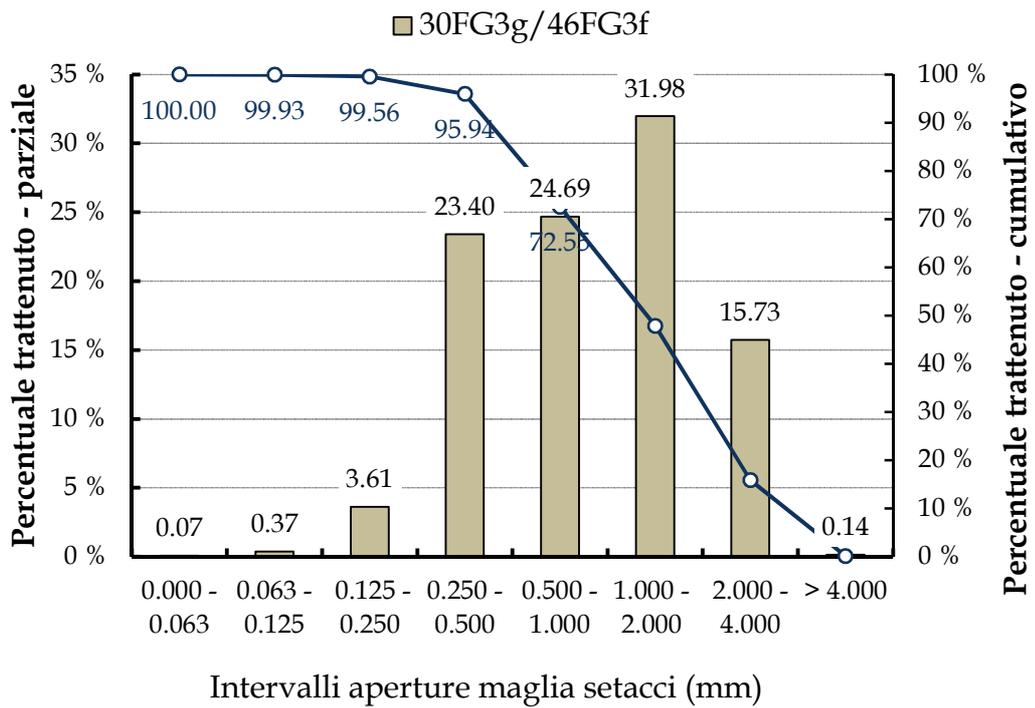




49% FG3.g/23% FG4	
	% V/V
Contenuto dei vuoti 1	31.3581
Contenuto dei vuoti 2	29.5645
Contenuto dei vuoti 3	30.56452
Contenuto dei vuoti (media)	30.4957

Diametro setaccio	% utilizzo		Curva di pro- getto
	72	28	
[mm]	FG3.g+FG3,f	FGN	[%]
0.063	0.048	49.148	13.796
0.125	0.410	100.000	28.295
0.250	4.589	100.000	31.304
0.500	24.613	100.000	45.722
1.000	33.616	100.000	52.204
2.000	76.854	100.000	83.335
4.000	99.763	100.000	99.829

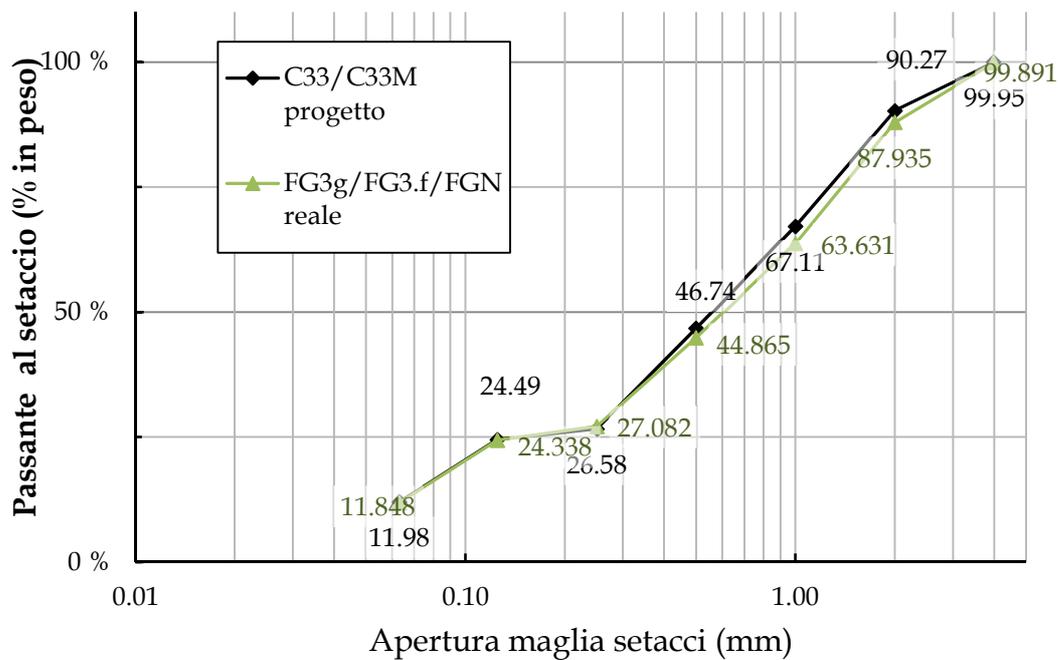




30% FG3.g/46% FG3f

	% V/V
Contenuto dei vuoti 1	91.94
Contenuto dei vuoti 2	91.36
Contenuto dei vuoti 3	94.23
Contenuto dei vuoti (media)	92.51

Diametro setaccio	% utilizzo		Curva di pro- getto
	76	24	
[mm]	FG3.g+FG3.f	FGN	[%]
0.063	0.070	49.148	11.848
0.125	0.444	100.000	24.338
0.250	4.055	100.000	27.082
0.500	27.455	100.000	44.865
1.000	52.145	100.000	63.631
2.000	84.125	100.000	87.935
4.000	99.857	100.000	99.891



6.12. Allegato 12: composizione campioni miscela n.4

PREPARAZIONE MISCELA							
Codice Provini	N. provini	B	H	L	Vol. parz.	Vol. tot.	
4.FG3gFG3FGN+.B.#	3	4	4	16	768	768	
SOLUZIONE INIZIALE							
		%		%	g		Tot.
Frazione Liquida	Sol 50% NaOH	3.3	NaOH	1.65	30		
			H2O	1.65	30	60	316.36364
Frazione Solida	Sol. Sodosilicato			14.1	256.363636		
	Fango CLS	19.82			360.363636		
	Sabbia	62.78	FG3g		450.532109		1501.8182
			FG3f		690.922436		
					1141.45455		
			tot			1818.181818	
SOLUZIONE AGGIUNTA							
		%		g		g	
Soluzione Preparata	Sol. Sodosilicato + H2O	4.89	88.9091	Sol. Sodosilicat	81.3084112	72.29056924	
				H2O	18.6915888	16.61852167	
Soluzione Aggiunta	Sol. Sodosilicato + H2O	1.21	22	Sol. Sodosilicat	81.3084112	17.8878505	
				H2O	18.6915888	4.11214953	
				H2O	0	0	
SOLUZIONE FINALE							
		%		%	g		
frazione liquida	Sol 50% NaOH	3.3	NaOH	1.63	30	10.1226994	338.36364
			H2O	1.85	34.1121495		
	Sol. Sodosilicato			14.90	274.2514868		
frazione solida	Fango CLS			19.58	360.3636364		1501.8182
	Sabbia			62.03	1141.454545		
			tot			1840.181818	

*in giallo vengono indicati i dati di input in verde la composizione finale della miscela

6.13. Allegato 13: composizione campioni miscela n.5

PREPARAZIONE MISCELA						
Codice Provini	N. provir B	H	L	Vol. par:	Vol. tot.	
5.FG3gFG3FGN+.B.#	3	4	4	16	768	768
SOLUZIONE INIZIALE						
		%		%	g	Tot.
Frazione Liquida	Sol 50% N	3.3	NaOH	1.65	30	60
			H2O	1.65	30	
Frazione Solida	Sol. Sodosilicato			14.1	256.364	1501.82
	Fango CLS	19.82			360.364	
	Sabbia	62.78	FG3g		450.532	
			FG3f		690.922	
					1141.45	
			tot			1818.181818
SOLUZIONE AGGIUNTA						
		%		g		g
Soluzione Preparata	Sol. Sodic	4.89	88.90909	Sol. Sodos:	81.3084	72.29056924
				H2O	18.6916	16.61852167
Soluzione Aggiunta	Sol. Sodic	1.21	22	Sol. Sodos:	81.3084	17.8879
				H2O	18.6916	4.11215
				H2O	0	0
SOLUZIONE FINALE						
				%	g	
frazione liquida	Sol 50% N	3.3	NaOH	1.63	30	338.364
			H2O	1.85	30	
frazione solida	Sol. Sodosilicato			14.90	256.3636364	1501.82
	Fango CLS			19.58	360.3636364	
	Sabbia			62.03	1141.454545	
			tot			1818.181818

*in giallo vengono indicati i dati di input in verde la composizione finale della miscela

6.14. Allegato 14: composizione campioni miscela n.6

PREPARAZIONE MISCELA						
Codice Provini	N. provi B	H	L	Vol. parz	Vol. tot.	
6.FG3gFG3FGN.B.#	6	4	4	16	1536	1536
SOLUZIONE INIZIALE						
		%		%	g	Tot.
Frazione Liquida	Sol 50%]	3.3	NaOH	1.65	60	120
			H2O	1.65	60	632.727
Frazione Solida	Sol. Sodosilicato			14.1	512.727	
	Fango CLS	19.82			720.727	
	Sabbia	62.78	FG3g		901.064	3003.64
			FG3f		1381.84	
			tot		3636.363636	
SOLUZIONE AGGIUNTA						
		%		g		g
Soluzione Preparata	Sol. Sodi	4.89	88.9091	Sol. Sodi	81.3084	72.29056924
				H2O	18.6916	16.61852167
Soluzione Aggiunta	Sol. Sodi	1.21	22	Sol. Sodi	81.3084	0
				H2O	18.6916	0
				H2O	0	0
SOLUZIONE FINALE						
				%	g	
frazione liquida	Sol 50%]	3.3	NaOH	1.63	60	
			H2O	1.85	60	338.364
frazione solida	Sol. Sodosilicato			14.90	512.7272727	
	Fango CLS			19.58	720.7272727	
	Sabbia			62.03	2282.909	1501.82
			tot		1818.181818	

*in giallo vengono indicati i dati di input in verde la composizione finale della miscela

6.15. Allegato 15: scheda tecnica camera climatica Challenge 250

3 CARATTERISTICHE TECNICHE

3.1 DATI TECNICI CAMERE CLIMATICHE

Le camere climatiche effettuano test con il controllo della temperatura e umidità relativa

MOD. SERIE CHALLENGE	CH250	CH340	CH600	CH1200	CH1600	CH2000
Volume utile (l)	224	336	557	1152	1535	2040
Campo di temperatura (°C)	-40 +180	-40 +180	-40 +180	-40 +180	-40 +180	-40 +180
Precisione (± °C)	0,25 ÷ 0,3	0,25 ÷ 0,3	0,25 ÷ 0,3	0,25 ÷ 0,3	0,25 ÷ 0,3	0,25 ÷ 0,3
Campo di umidità (con temperatura da +5 a +95°C)	10 ÷ 98%	10 ÷ 98%	10 ÷ 98%	10 ÷ 98%	10 ÷ 98%	10 ÷ 98%
Precisione UR (comunque non meno di +/- 0,25°C sulla differenza psicrometrica)	1% ÷ 3%	1% ÷ 3%	1% ÷ 3%	1% ÷ 3%	1% ÷ 3%	1% ÷ 3%
Campo punto di rugiada da prove continuative (°C)	+2 +94 °C	+2 +94 °C	+2 +94 °C	+2 +94 °C	+2 +94 °C	+2 +94 °C
Campo punto di rugiada da prove non continuative (°C)	-20 +2°C	-20 +2°C	-20 +2°C	-20 +2°C	-20 +2°C	-20 +2°C
Tensione di alimentazione (°) (V)	400 +6/-10% 50Hz 3+N+T	400 +6/-10% 50Hz 3+N+T	400 +6/-10% 50Hz 3+N+T	400 +6/-10% 50Hz 3+N+T	400 +6/-10% 50Hz 3+N+T	400 +6/-10% 50Hz 3+N+T
Assorbimento elettrico massimo (°) (A)	14	14	20,5	26,3	26,3	26,3
Potenza nominale (°) (kW)	4,8	4,8	6,8	8,7	8,7	8,7
Potenza impegnata (°) (kW)	7,7	7,7	11,4	14,6	14,6	14,6
Massimo carico termico interno (W)	400 (-25 °C)	400 (-25 °C)	1000 (-25 °C)	1300 (-25 °C)	1300 (-25 °C)	500 (-25 °C)
Gas refrigerante	R404 A	R404 A	R404 A	R404 A	R404 A	R404 A
Dimensione esterne (LxPxH) senza ruote (con ruote H Tot = H+ h _r) (mm)	850x1460 x1516 (h _r = 47)	850x1725x1516 (h _r = 47)	1100x1705x1911 (h _r = 58)	1250x2160x2036 (h _r = 58)	1250x2534x2040 (h _r = 70)	1250x3035x2040 (h _r = 70)
Dimensione interne utili (LxPxH) (mm)	600x535x700	600x800x700	850x733 x895	1000x1130 x1020	1000x1505x1020	1000x2000x1020
Peso massimo caricabile su ogni piano di appoggio (kg)	50	50	50	50	50	50
Peso complessivo con imballo standard (°) (kg)	530	600	800	1060	1370	1470
Peso complessivo senza imballo (kg)	490	550	750	990	1300	1400
Carico a pavimento (kg/m ²)	400	375	400	367	410	369
Rumore aereo con condensatore ad aria (dB A)	59	59	64	65	65	65
Condensatore ad aria	x	x	x	x	x	x
Condensatore ad acqua	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)

(°) L'imballo standard si intende in cartone o plastica, adatto per trasporto via terra o via aerea. Per il trasporto via mare si consiglia di consultare il produttore o il suo mandatario per ottenere tutte le informazioni in merito.

(°) Su richiesta in fase di ordinazione.

(°) In casi di alimentazioni speciali vedere allegati.

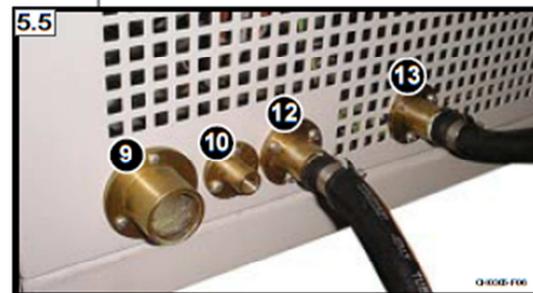
- 1 Cavo di alimentazione
- 2 Oblò (opzionale)
- 3 Presa per lampada U.V. (opzionale)
- 4 Pannello comandi
- 5 Pannello interfaccia
- 5.1 Termostato elettronico allarmi (fig. 8.3)
(permette di bloccare il funzionamento dell'apparecchiatura quando la temperatura supera i limiti preimpostati)
- 5.2 Connettore DIGITAL IN/OUT (fig. 6.10) collegamento ingresso/uscita segnali digitali contatti ausiliari (abilita eventuali azionamenti del cliente)
- 5.3 Connettore ANALOGIC IN/OUT (fig. 6.11) collegamento per ingressi analogici (collegamento sonde ausiliarie dell'utente)
- 5.4 Connettore RS 232/485 IN (fig. 6.12) Seriale RS 232 (RS 485 su richiesta)
- 5.5 Connettore RS 232/485 OUT (fig. 6.13) Seriale RS 232 (RS 485 su richiesta)
- 5.6 Interruttore generale (sezionatore)
- 6 Foro passante
- 7 Contenitore acqua demineralizzata con tubo di immissione.
- 8 Ripiano interno
- 9 Scarico condensa
- 10 Ingresso acqua umidificazione
- 11 Vano prova
- 12-13 Collegamenti acqua per condensazione
- 14 Porta vano camera
- 15 Maniglia con chiusura
- 16 Sportello inferiore
- 17 Ventilatore interno ricircolo aria
- 18 Sonde
- 18.1 Sonda capacitiva: presente solo su macchine in esecuzione speciale^(*)
- 19 Luce interna
- 20 Presa 10A alimentazione provino (opzionale)
- 21 Foro alloggiamento lampada U.V.



Macchine con condensatore ad aria



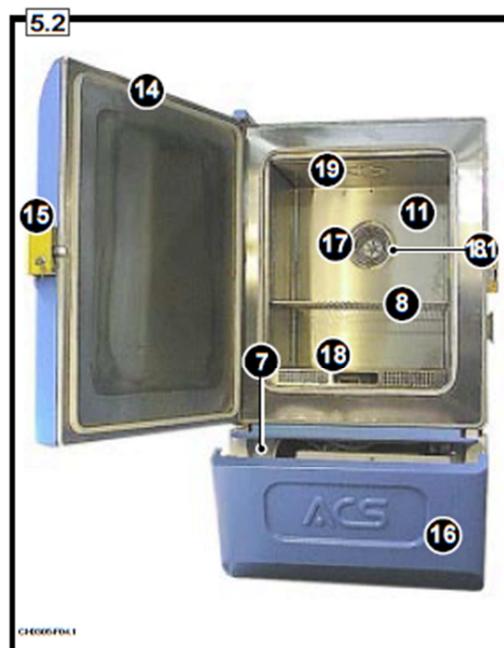
Macchine con condensatore ad acqua



^(*) NB: Nel caso che questa sonda sia presente, viene a sostituire la sonda a bulbo umido e quindi non vi è il sistema psicrometrico e la garza. Perciò non tenete conto delle istruzioni successive di questi sistemi.

5 DESCRIZIONE DEL SISTEMA

5.1 VISTA GENERALE

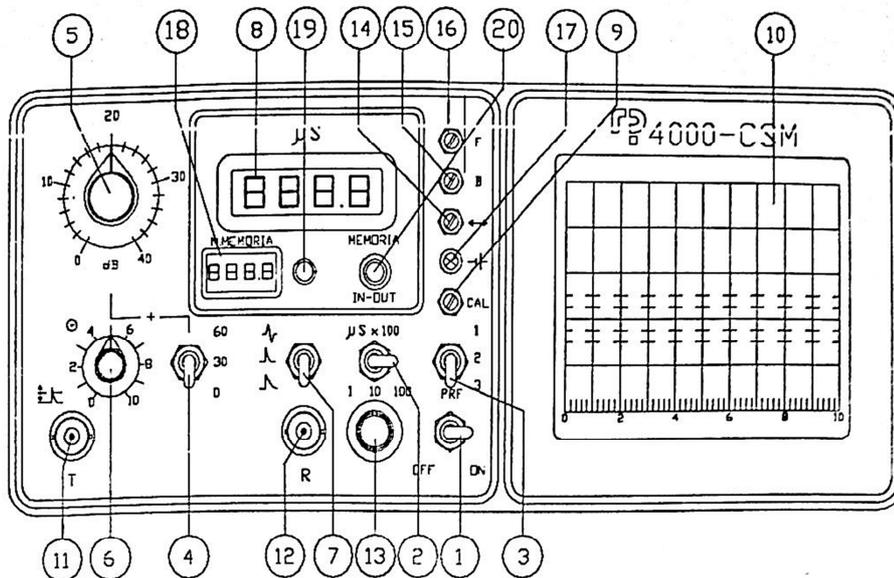


6.16. Allegato 16: scheda tecnica Sirio RP 4000 CSM

CARATTERISTICHE TECNICHE

- Dimensioni	: 260 x 112 x 390 mmc;
- Peso	: 8,5 Kg con batteria;
- Autonomia batterie	: 8 ore circa;
- Visualizzazione della misura tempo	: su display a 4 digit LCD;
- Campi di misura	: 3 scale 100 - 1000 - 10.000 u sec.
- Risoluzione	: 0,1 u sec. per Fs 100 - 1000us; 1 usec. x Fs 10.000us;
- Frequenza di campionamento	: 15 - 30 - 60 impulsi/sec.
- Rappresentazione del segnale	: su tubo a raggi catodici (TRC) di grandi dimensioni 80 x 60 mmad alta risoluzione e luminosità.
- Tipo visualizzazione segnale	: = RF Radio Frequenza; = Raddrizzato positivo + negativo; = Come sopra integrato;
- Trasmettitore	: Potenza fissa 5000 VA - 1,5 KV - 80 nsec. tempo di discesa.
- Amplificazione max	: 130 dB;
- Range di regolazione amplificazione calibrata	: 0 -100 dB a scatti di 2 dB;
- Filtro "soglia"	: 2 tipi di soppressione L=lineare N=normale 0-80% ampiezza segnali di disturbo.
- Batteria	: 6V 9,5 A/h al Pb ricaricabile;
- Alimentatore Carica batterie	: incorporato 220 : 110 V (cambia tensione interno).

DESCRIZIONE COMANDI RP4000-CSM



1	INTERRUTTORE ACCENSIONE/SPEGNIMENTO
2	SELETTORE A 3 POSIZIONI DI FONDO SCALA (FS) =100-1000-10000 US
3	SELETTORE A 3 POSIZIONI DEL RITMO DI CAMP. : 1=15 2=30 3=60 IMP/SEC.
4	SELETTORE A TRE POSIZIONI DI AMPLIFICAZIONE =0 - 30 - 60 dB
5	SELETTORE FINE DI AMPLIFICAZIONE A 20 SCATTI DI 2 dB = 0-40 dB
6	REGOLATORE SOPPRESSIONE SEGNALI DI DISTURBO=0-80% AMP. VERT.VIDED (TRC)
7	SELETTORE TIPO DI VISUALIZZAZIONE DEL SEGNALE SUL TRC
8	DISPLAY A CRISTALLI LIQUIDI PER LA MISURA DEL TEMPO DI TRANSITO
9	REGOLATORE DI CALIBRAZIONE MISURA "TEMPO"
10	SCHERMO VIDED (TRC)
11	CONNETTORE BNC SONDA TRASMITTENTE
12	CONNETTORE BNC SONDA RICEVENTE
13	REGOLATORE POSIZIONE CURSORE MISURA MANUALE
14	REGOLATORE POSIZIONE ORIZZONTALE DELL'ASSE DEI TEMPI SUL TRC
15	REGOLATORE MESSA A FUOCO-VIDED
16	REGOLATORE LUMINOSITA'-VIDED
17	INDICATORE LUMINOSO DI SCARICA BATTERIA
18	DISPLAY LOCAZIONE DI MEMORIA
19	PULSANTE VISUALIZZAZIONE DISPLAY MEMORIA
20	PULSANTE MEMORIZZAZIONE/LETTURA DATI PROGRESSIVI

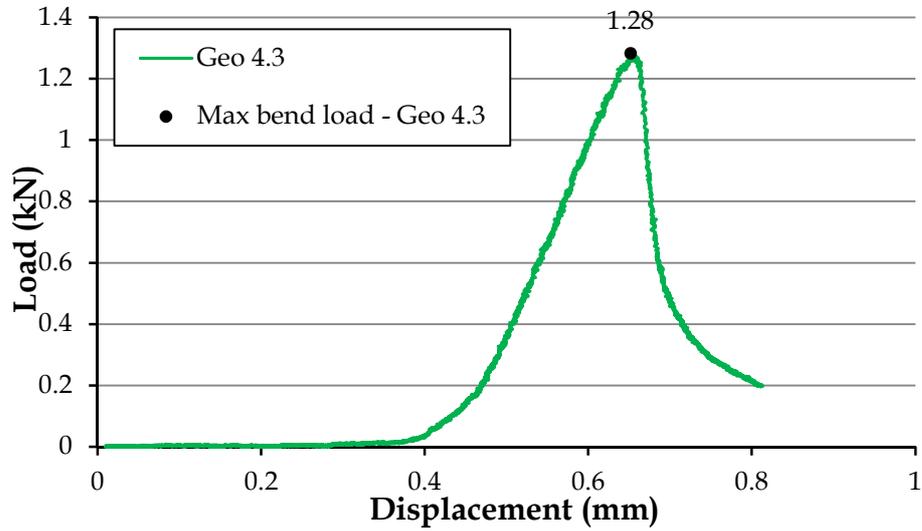
6.17. Allegato 17: MODULO ELASTICO DINAMICO

campione	Modulo elastico dinamico			
	1 gior- no MPa	7 gior- ni MPa	14 gior- ni MPa	20 gior- ni MPa
6.3g3fgn.B.1	16669.4	21675.6	24087.4	24910.8
6.3g3fgn.B.2	16669.4	21505.3	23987.3	25123.3
6.3g3fgn.B.3	16844.1	22198.9	24493.9	26000.9
6.3g3fgn.B.4	16611.8	18480.4	21253.5	22649.7
6.3g3fgn.B.5	16106.3	19906.9	19317.1	20367.2
6.3g3fgn.B.6	16669.4	18548.0	18082.3	20212.0
5.3g3fgn.B.1	16784.6	19428.3	19657.1	20780.1
5.3g3fgn.B.2	18135.8	20948.4	20864.0	21291.1
5.3g3fgn.B.3	19055.8	20531.5	20449.6	20531.5
4.3g3fgn+.B.1	16391.1	18834.9	18765.6	19549.6
4.3g3fgn+.B.2	16735.0	20620.6	20151.1	20700.5
4.3g3fgn+.B.3	17210.6	19403.5	19549.6	20228.2

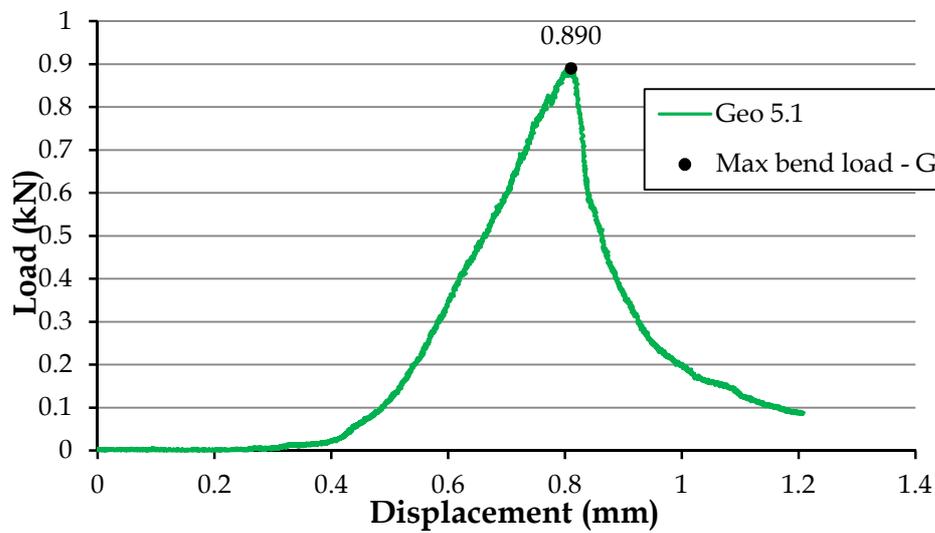
* in verde sono evidenziati i campioni che fino al momento della misurazione erano conservati in appositi sacchetti di plastica

6.18. Allegato 18: COMPORTAMENTO A FLESSIONE

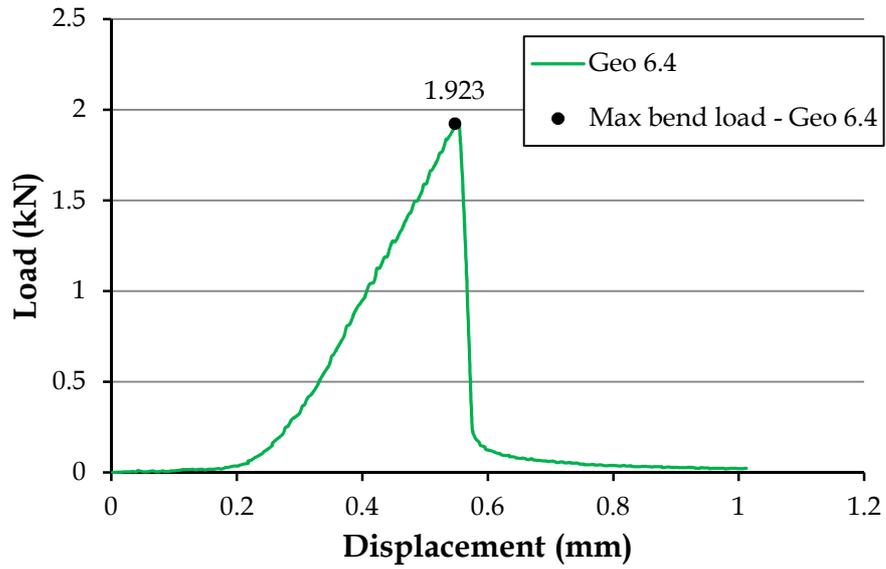
- 4.3g3fgn.B.3



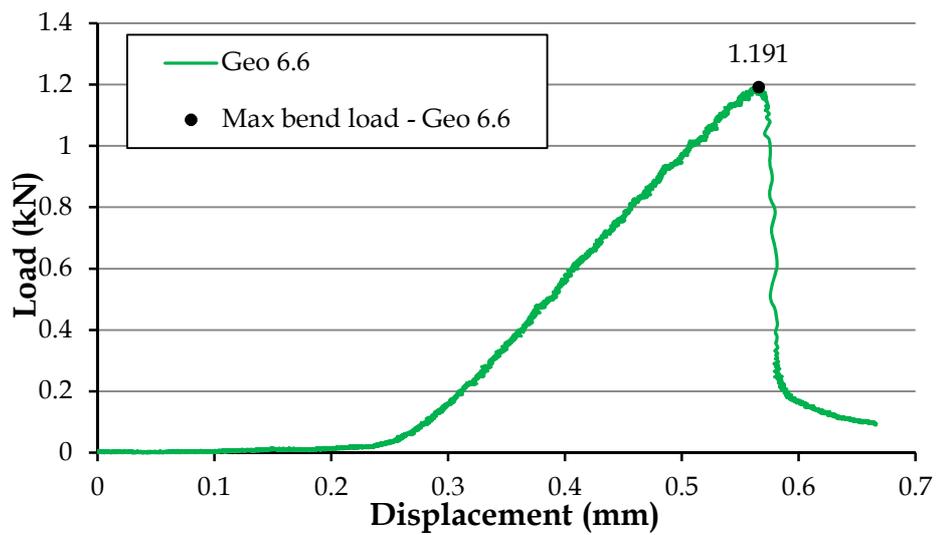
- 5.3g3fgn.B.1



- 6.3g3fgn.B.4



- 6.3g3fgn.B.6



6.19. Allegato 19: metodo B normativa UNI EN 12390 - 13

Metodo B – Determinazione del modulo di elasticità secante stabilizzato

Si effettuano tre cicli di applicazione del carico. Il controllo del posizionamento del provino (*primo controllo*) e il controllo della stabilità del cablaggio (*secondo controllo*) si effettuano alla fine del secondo e del terzo ciclo. Il modulo di elasticità secante stabilizzato è determinato al terzo ciclo.

Collocare il provino, con gli strumenti di misura applicati assialmente, centralmente sulla macchina di prova. Applicare lo *sforzo di precarico* σ_p . Tenere lo sforzo di precarico per un periodo non maggiore di 20 s. Alla fine di questo periodo, rimettere a zero gli strumenti di misura della deformazione.

Primo ciclo

Aumentare lo sforzo applicato al provino a una velocità di $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s dallo *sforzo di precarico* allo *sforzo superiore* σ_a . Tenere lo sforzo superiore entro ± 5 % del valore nominale per un periodo non maggiore di 20 s. Alla fine di questo periodo, registrare la deformazione lungo ciascuna linea di misurazione e calcolare la deformazione media $\epsilon_{a,1}$.

Ridurre lo sforzo a una velocità di $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s fino allo *sforzo di precarico*, tenere lo *sforzo di precarico* per un periodo non maggiore di 20 s. Alla fine di questo periodo, registrare la deformazione lungo ciascuna linea di misurazione e calcolare la deformazione media, $\epsilon_{p,1}$.

Secondo ciclo

Aumentare lo sforzo a una velocità di $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s dallo *sforzo di precarico* allo sforzo superiore. Tenere lo *sforzo superiore* entro ± 5 % del valore nominale per un periodo non maggiore di 20 s. Alla fine di questo periodo, registrare la deformazione lungo ciascuna linea di misurazione e calcolare la deformazione media $\epsilon_{a,2}$.

Ridurre lo sforzo a una velocità di $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s fino allo *sforzo di precarico* tenere lo *sforzo di precarico* per un periodo non maggiore di 20 s. Alla fine di questo periodo, registrare la deformazione lungo ciascuna linea di misurazione e calcolare la deformazione media, $\epsilon_{p,2}$.

Primo controllo

Al secondo ciclo, la deformazione ϵ_a su ciascuna linea di misurazione non deve differire dalla media $\epsilon_{a,1}$ di oltre il 20 %.

Se il limite non è raggiunto, centrare di nuovo il provino e ricominciare la prova. Se non è possibile ridurre la differenza al di sotto del 20 % la prova deve essere interrotta e il provino scartato.

Terzo ciclo

Aumentare lo sforzo a una velocità di $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s dallo *sforzo di precarico* allo *sforzo superiore*. Tenere lo *sforzo superiore* entro $\pm 5\%$ del valore nominale per un periodo non maggiore di 20 s. Alla fine di questo periodo, registrare la deformazione lungo ciascuna linea di misurazione e calcolare la deformazione media $\epsilon_{a,3}$.

Secondo controllo

Su ciascuna linea di misurazione la variazione di ϵ_a dal secondo al terzo ciclo non deve essere maggiore del 10 %.

Se la differenza di deformazione è maggiore del 10 %, interrompere la prova; regolare gli strumenti di misura e ricominciare. Se non è possibile ridurre la differenza al di sotto del 10 % dopo aver ricominciato, la differenza deve essere inclusa nel rapporto di prova.

Il valore misurato dello sforzo di precarico σ_p^m deve essere registrato.

Il valore misurato dello sforzo superiore σ_a^m deve essere registrato.

Una volta completate tutte le misurazioni a livello dello sforzo superiore, si deve determinare la resistenza a compressione del provino in conformità al procedimento di applicazione del carico indicato nella EN 12390-3. Registrare la resistenza a compressione al più prossimo 0,1 MPa.

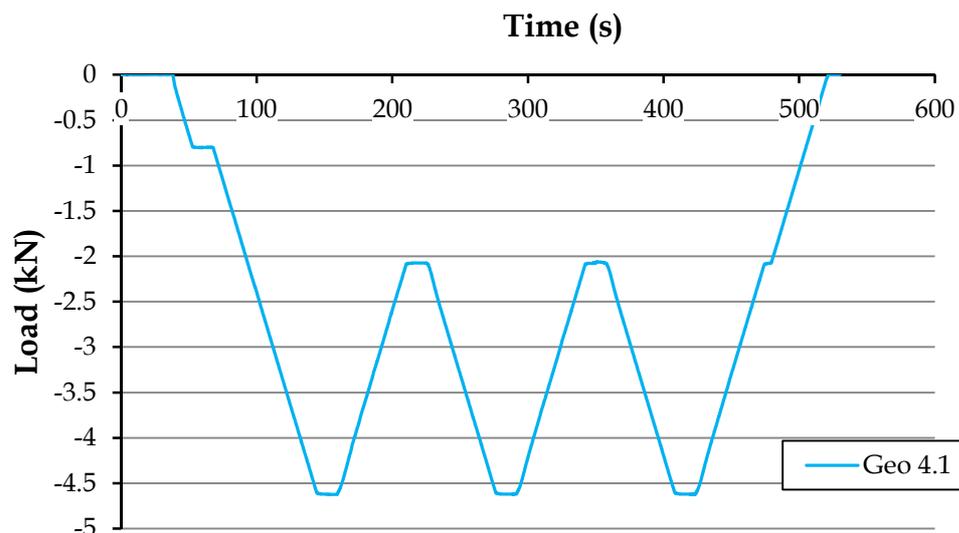
Al fine di evitare di danneggiare in modo permanente i calibri di misura, può essere opportuno rimuoverli dal provino prima di aumentare il carico a rottura. Ciò dovrebbe avvenire in sicurezza.

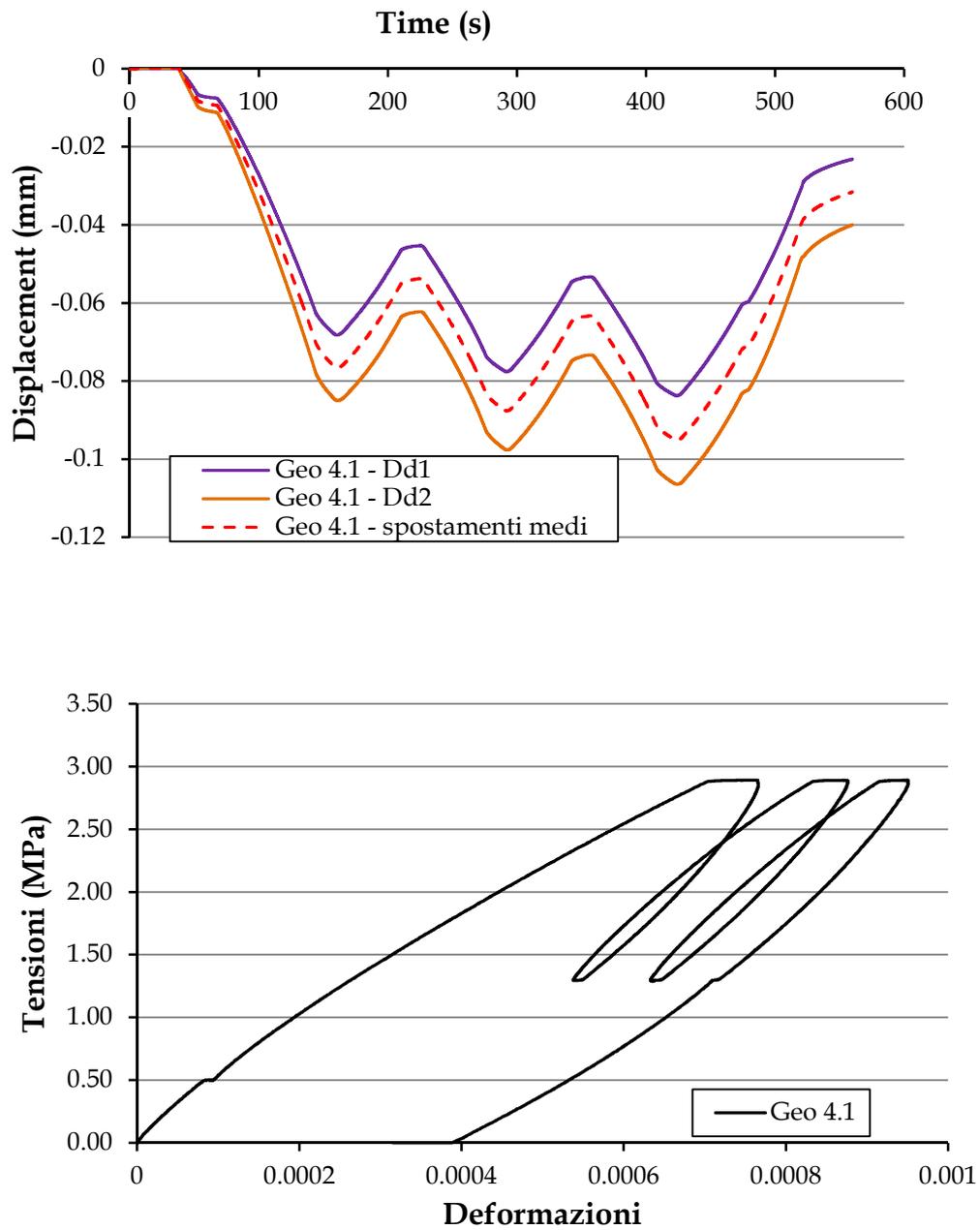
Se la resistenza a compressione misurata differisce da f_c più del 20 %, ciò deve essere annotato nel rapporto di prova.

Il ciclo di prova per la determinazione del modulo elastico è rappresentato nella figura 3.

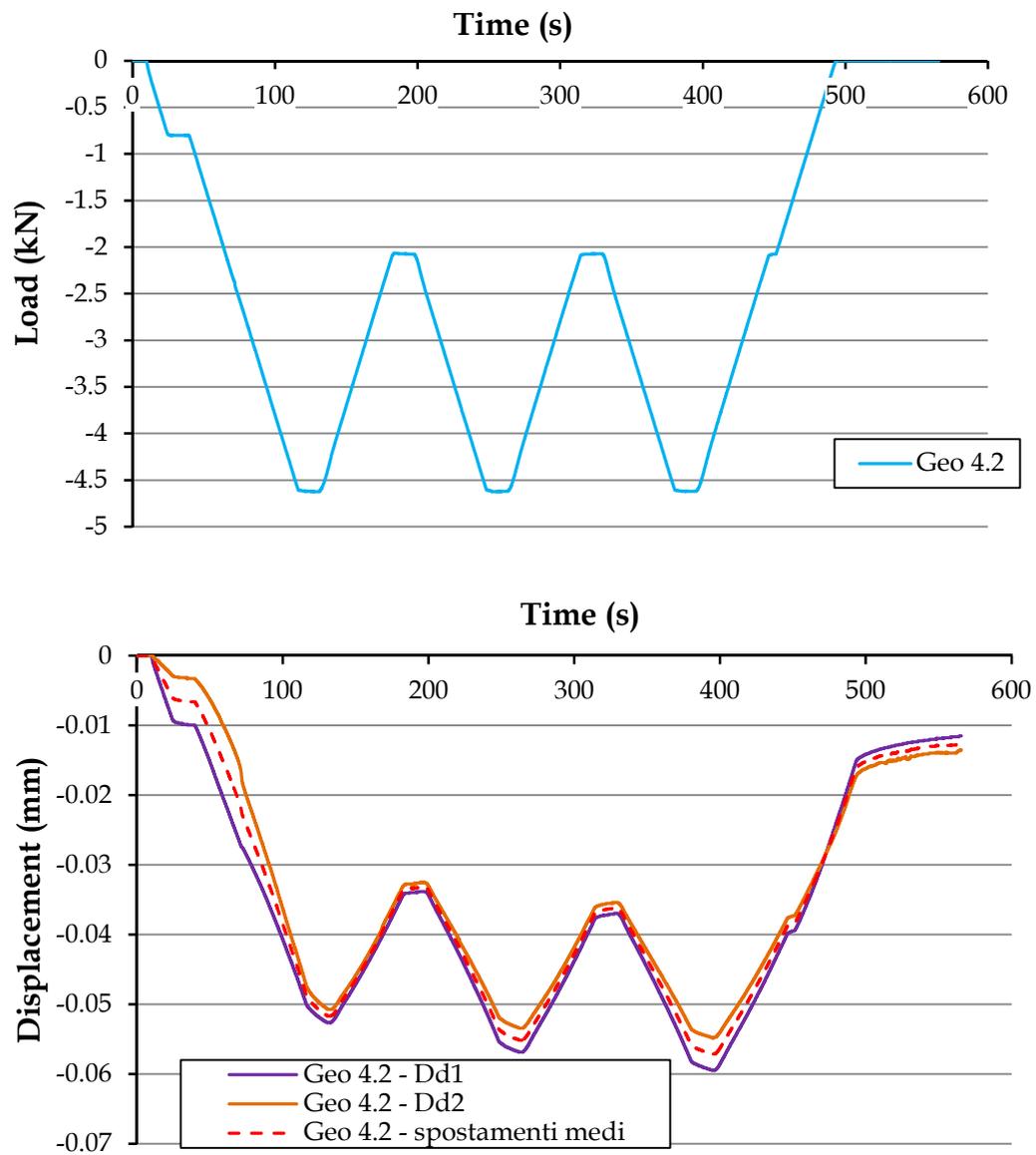
6.20. Allegato 20: MODULO ELASTICO SECANTE

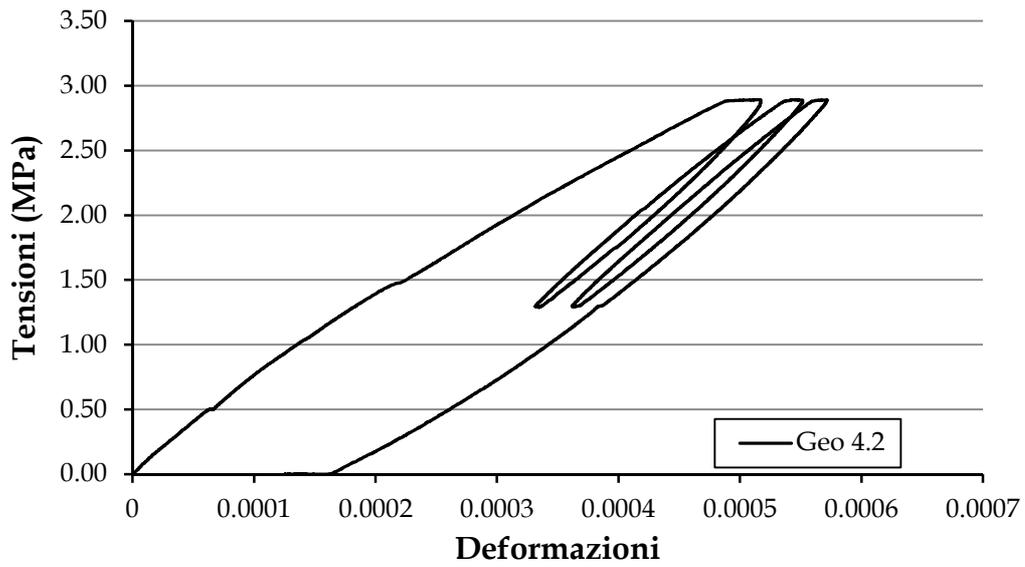
- 4.3g3fgn.B.1



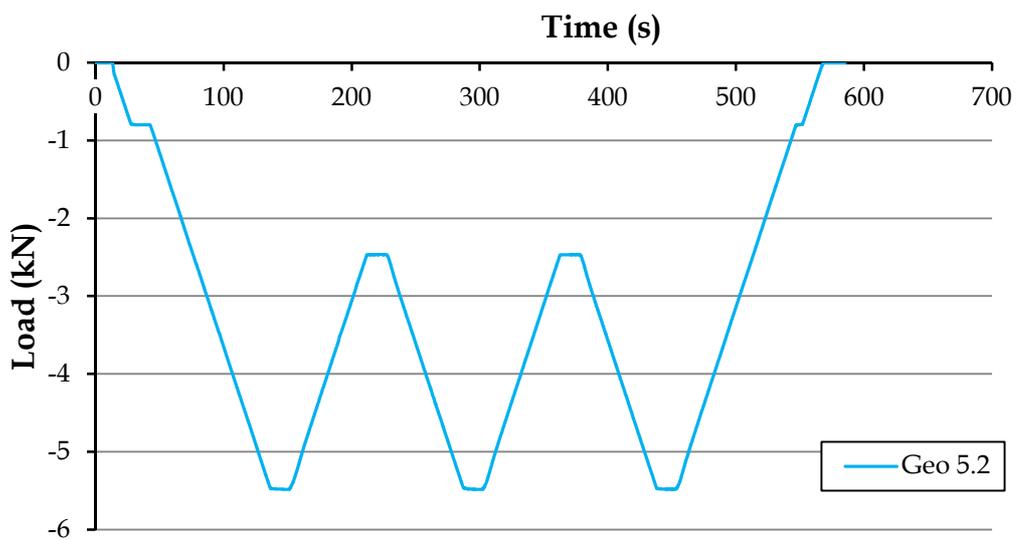


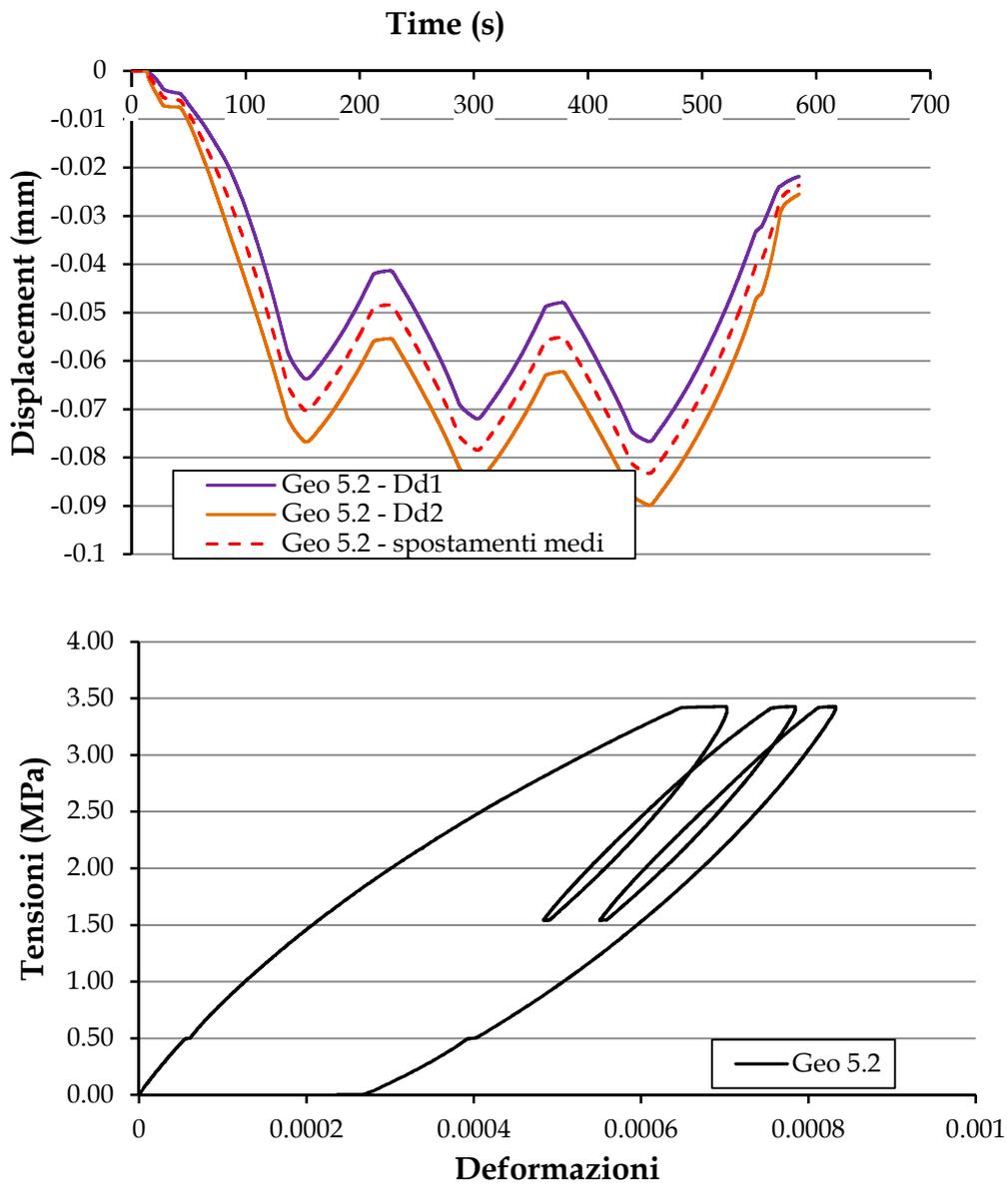
- 4.3g3fgn.B.2



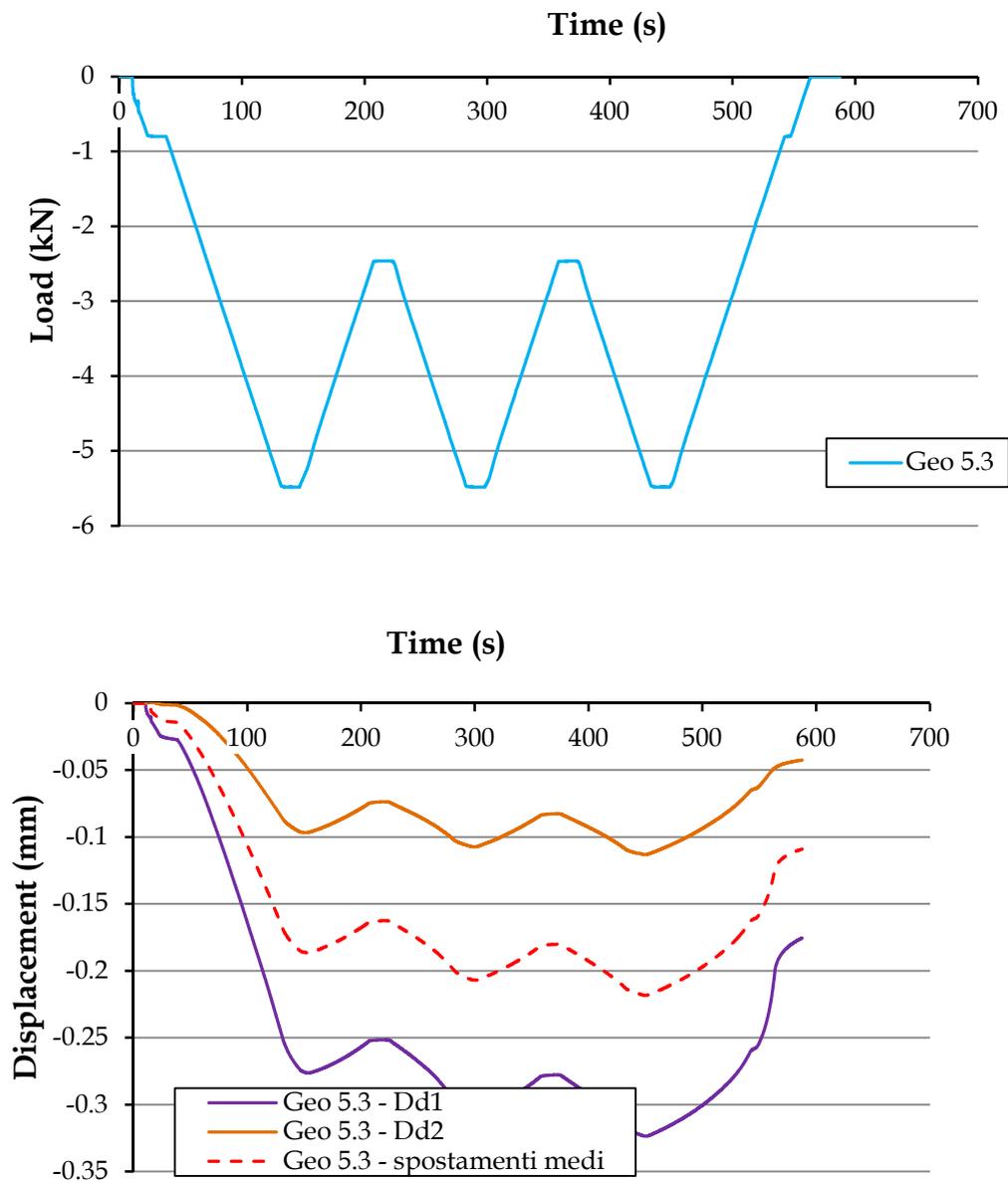


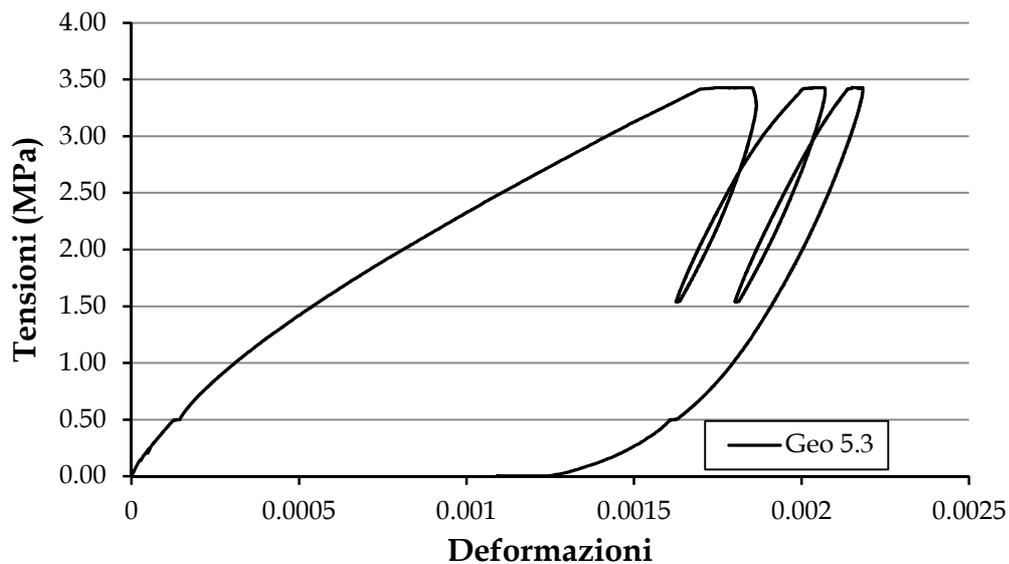
- 5.3g3fgn.B.2



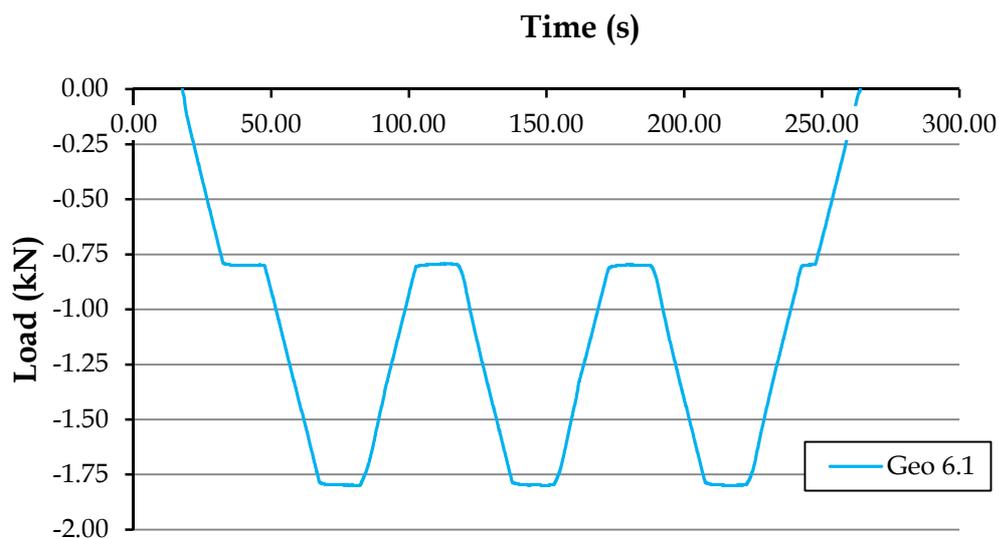


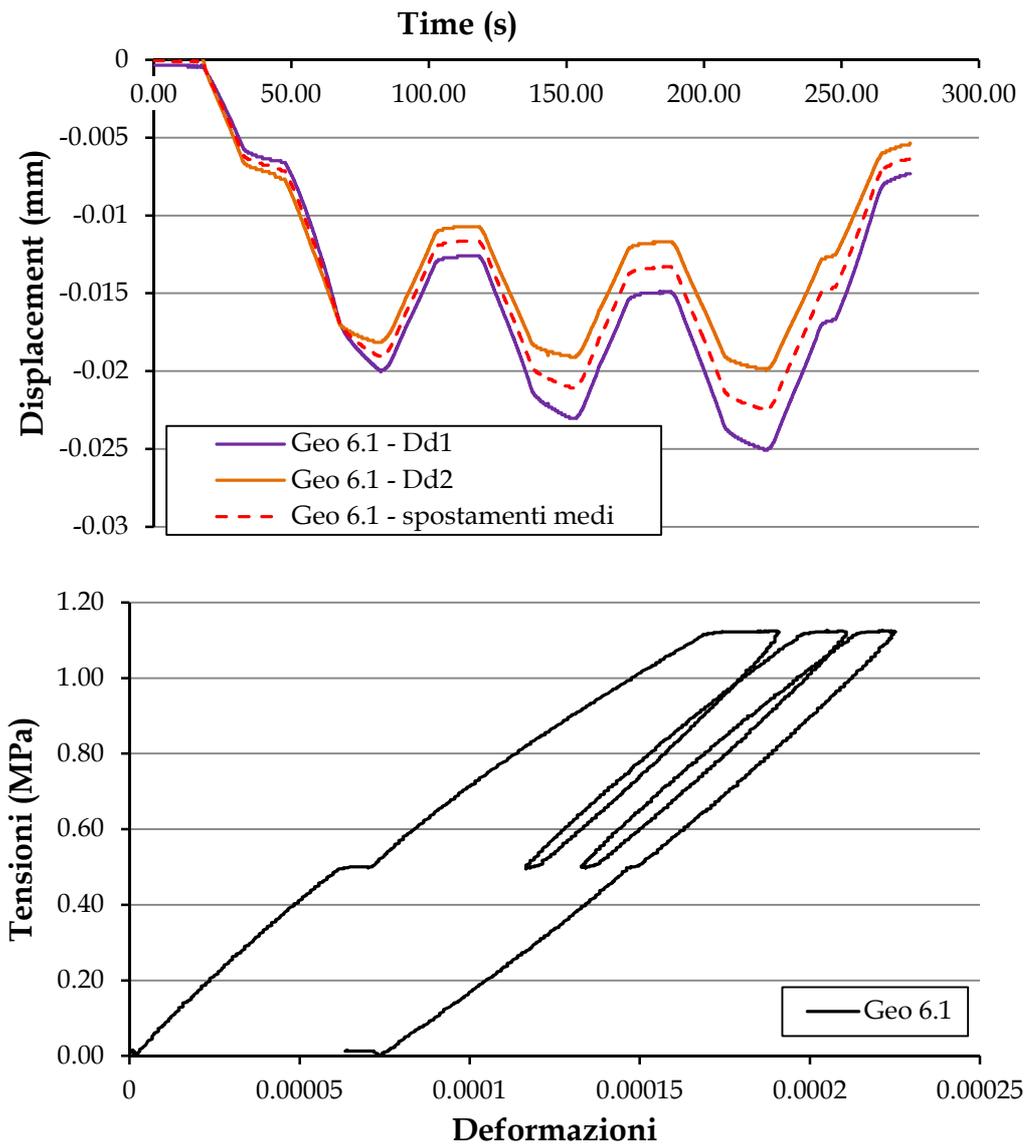
- 5.3g3fgn.B.3



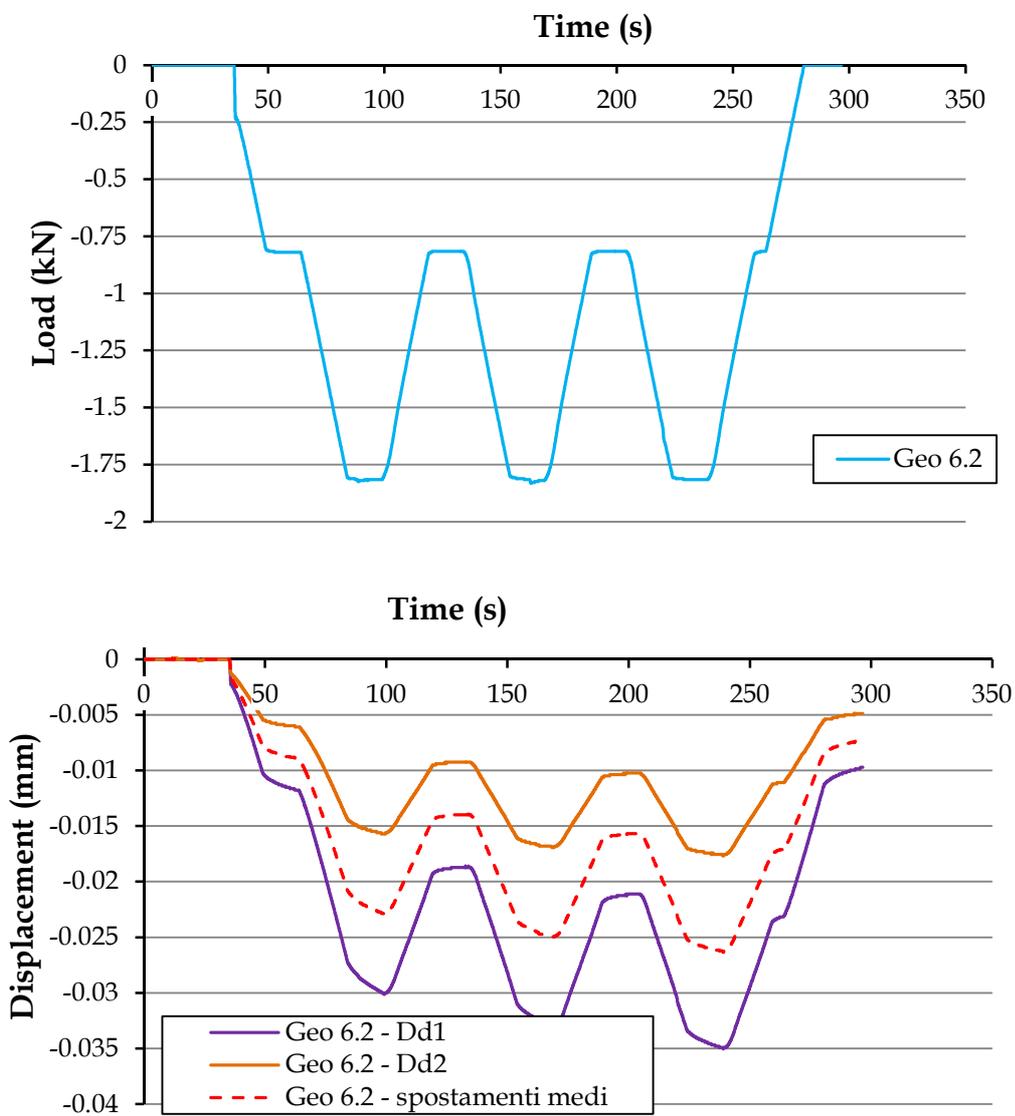


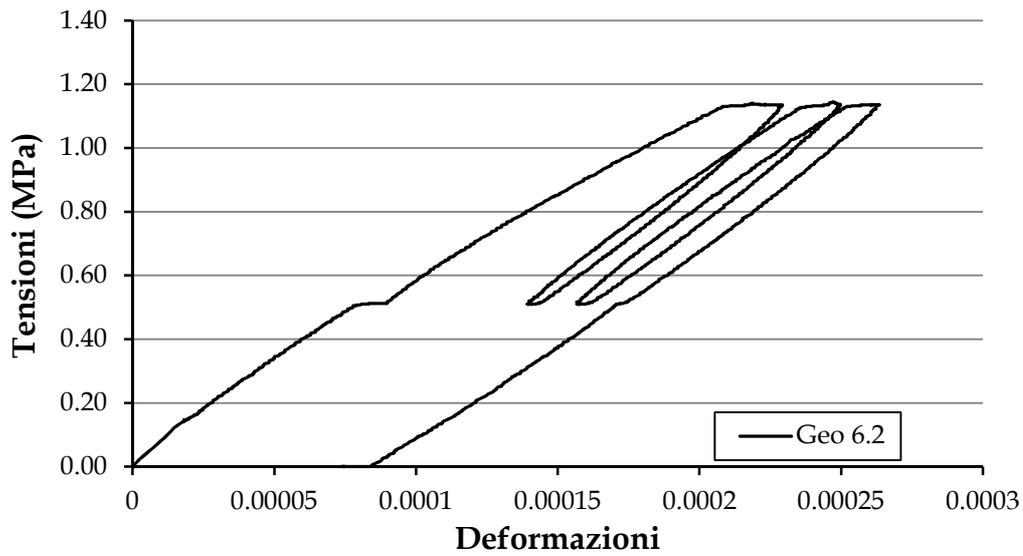
- 6.3g3fgn.B.1





- 6.3g3fgn.B.2

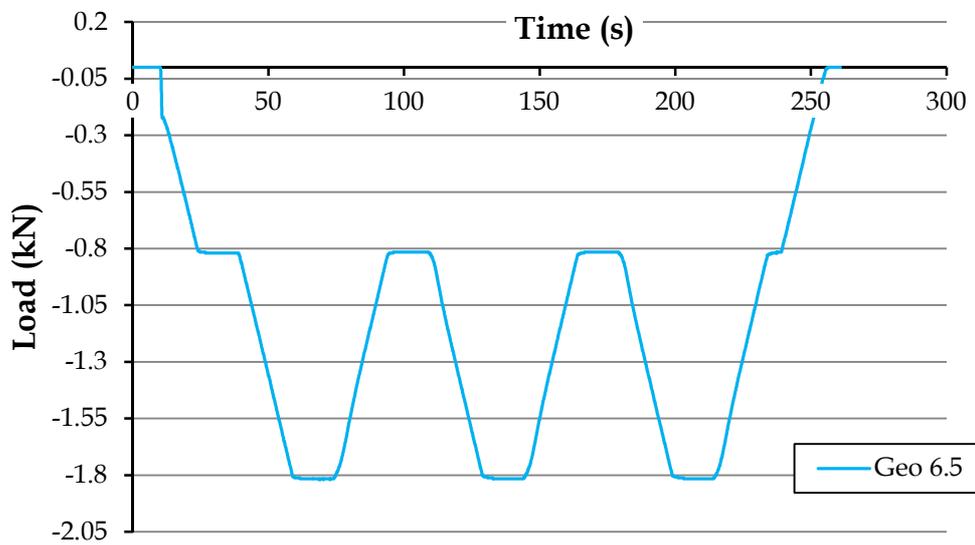


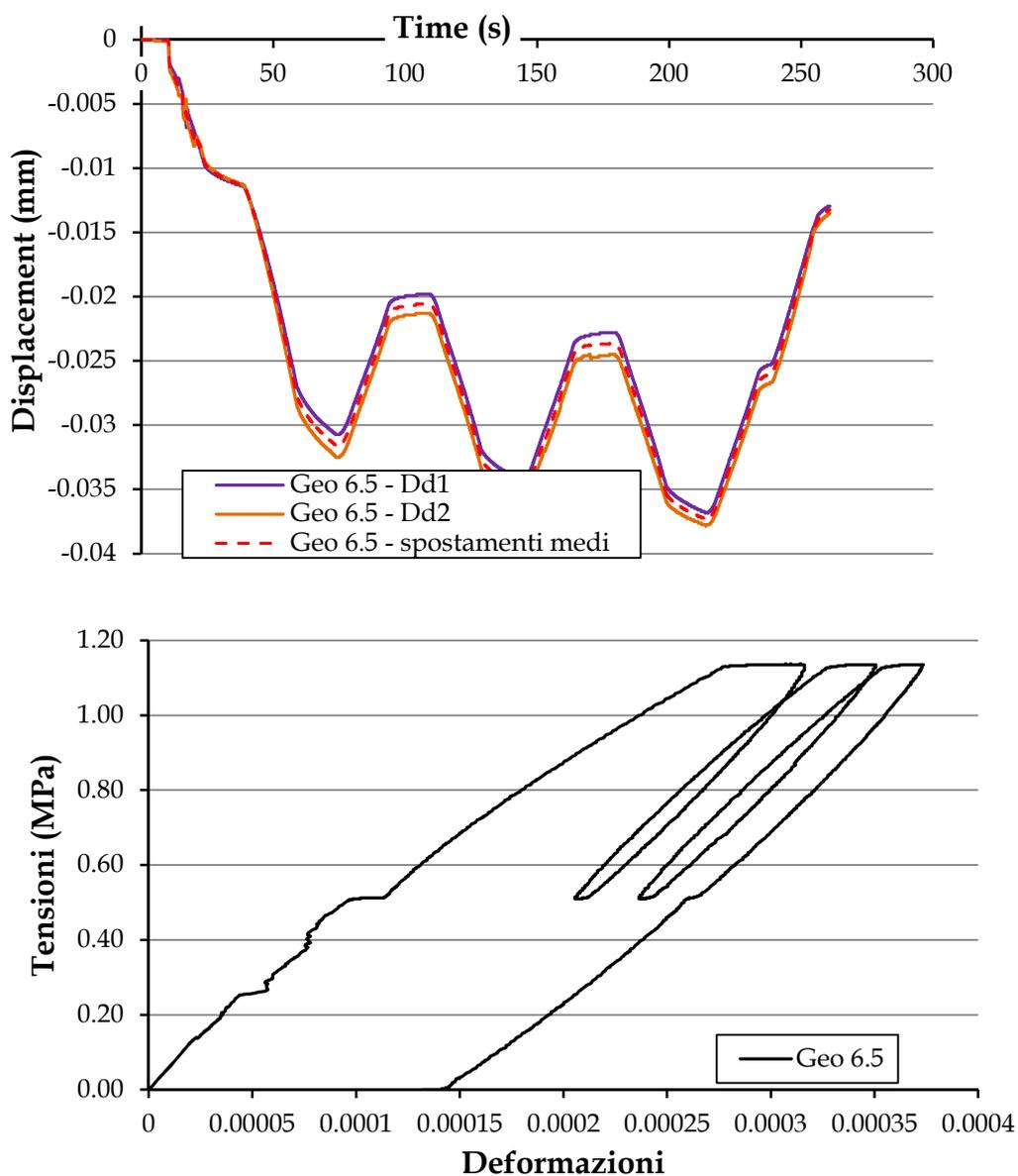


- **6.3g3fgn.B.3**

Non è stato possibile eseguire le misure poiché durante la cottura ha subito deformazioni rilevanti, tali da inficiare la prova a compressione ciclica.

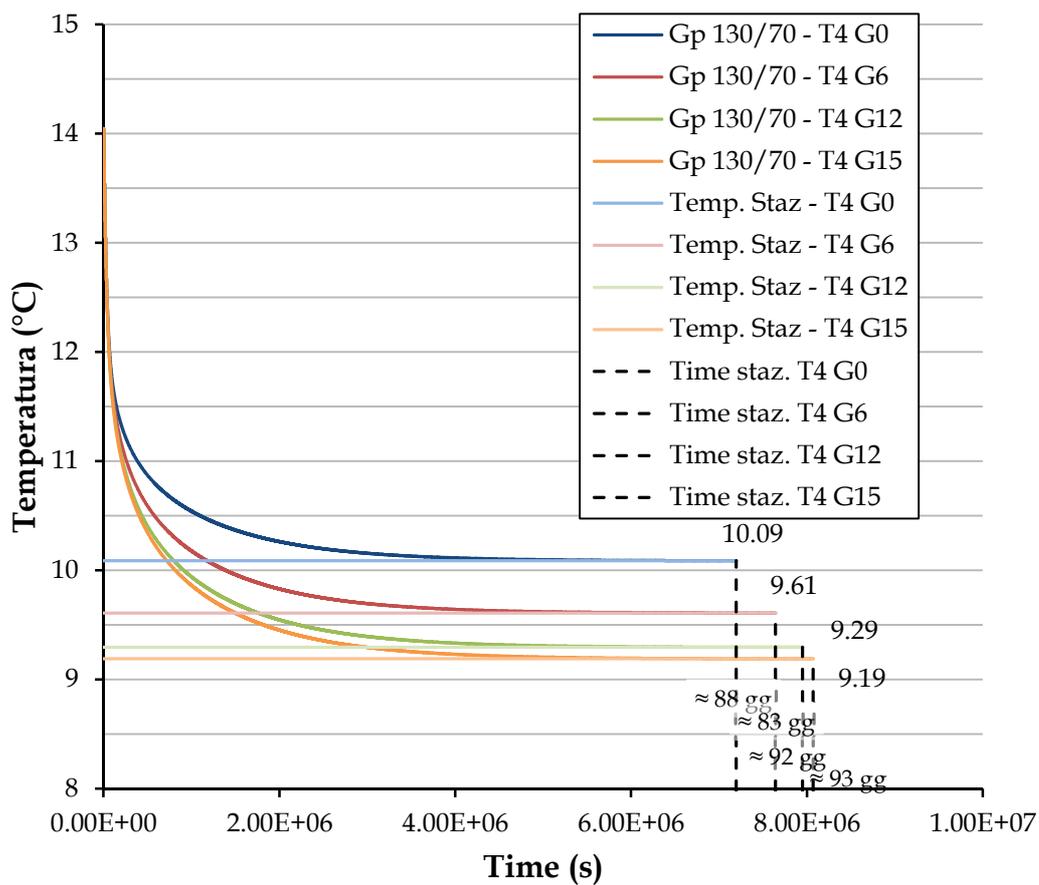
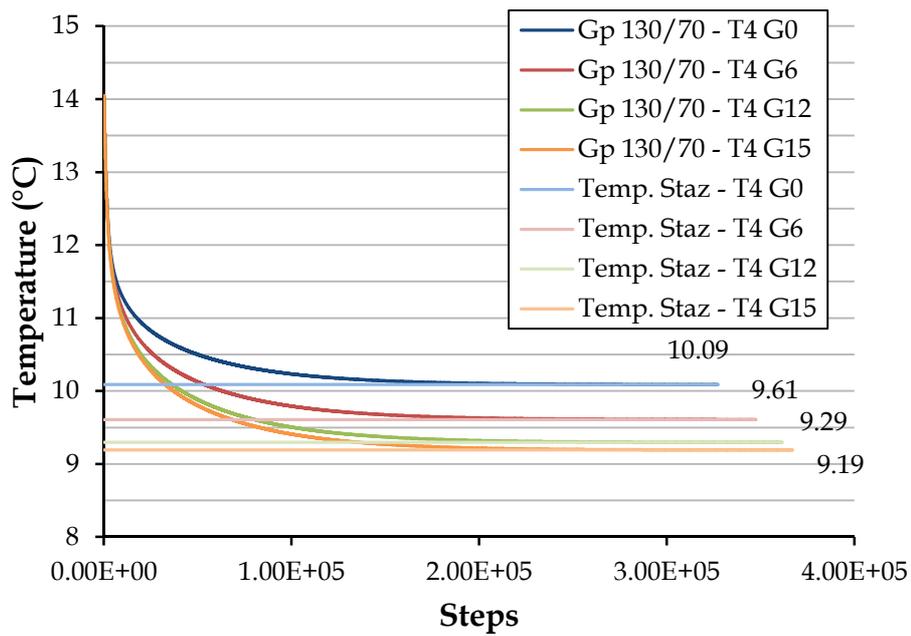
- **6.3g3fgn.B.5**

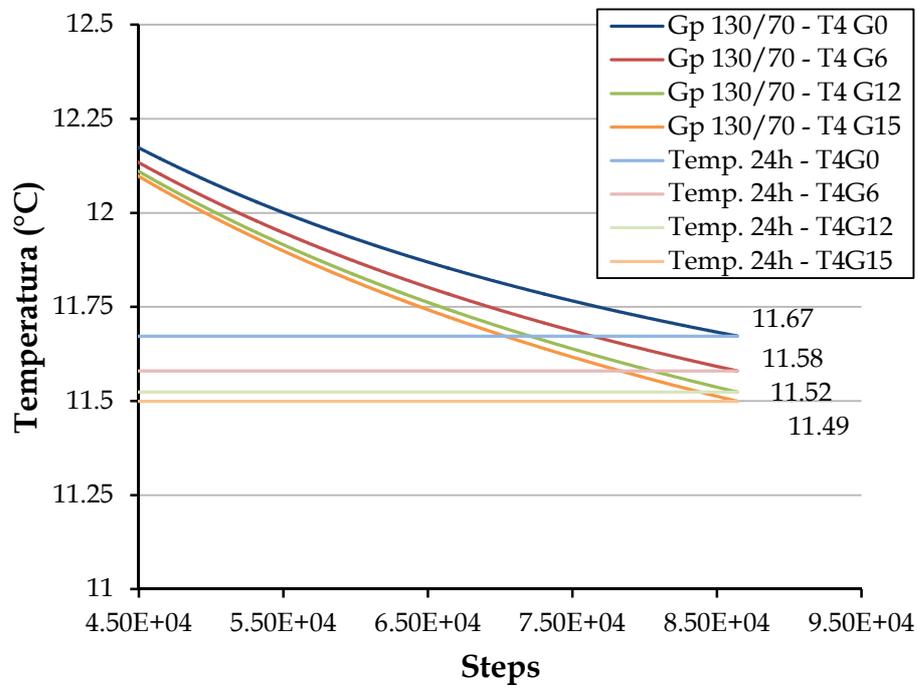
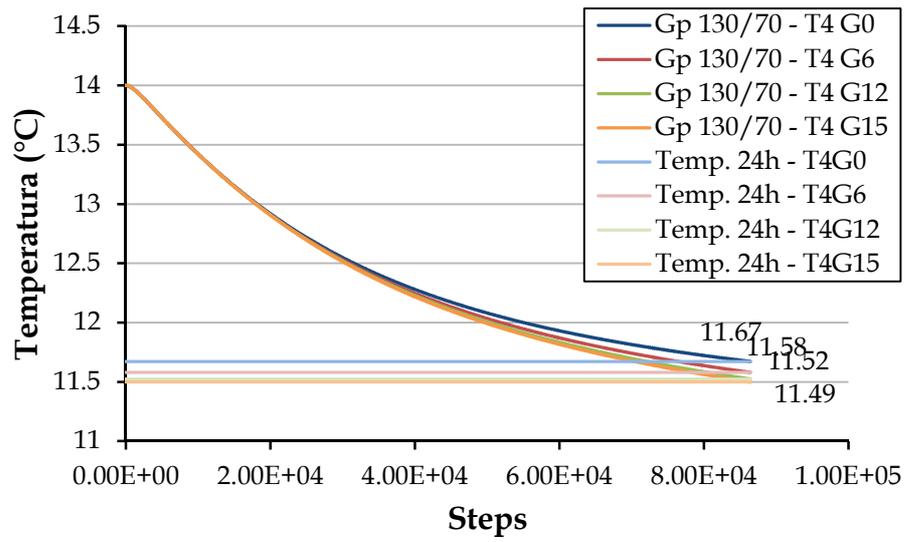




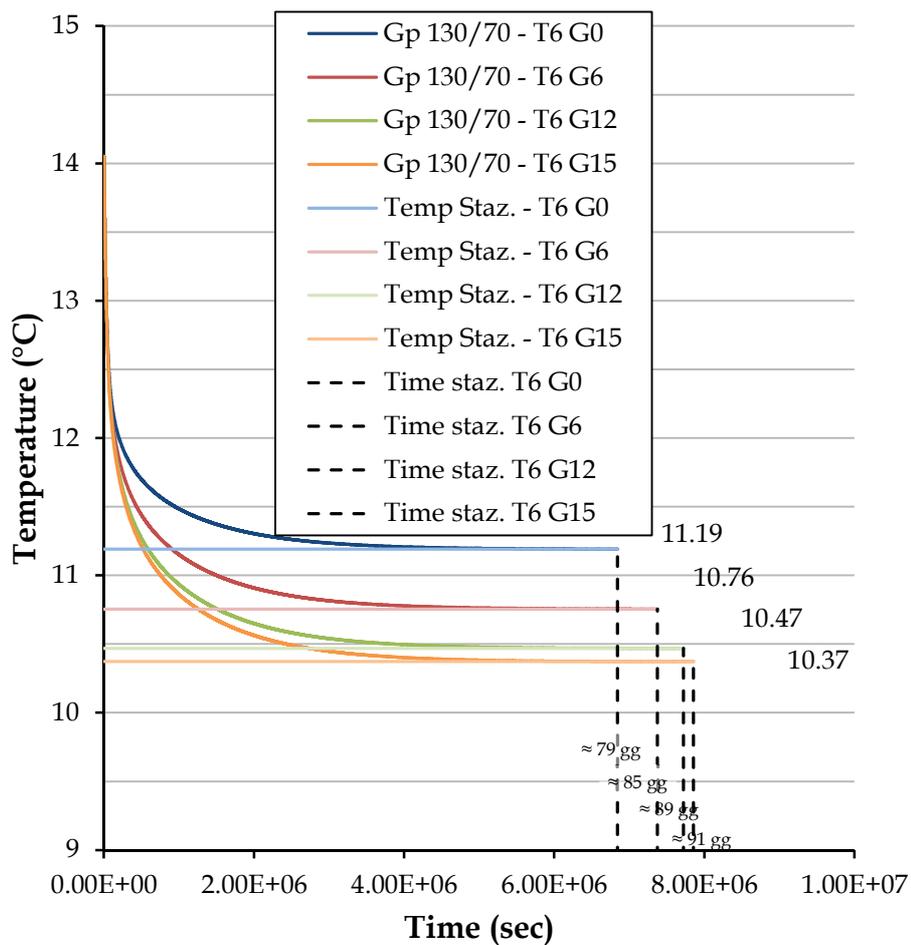
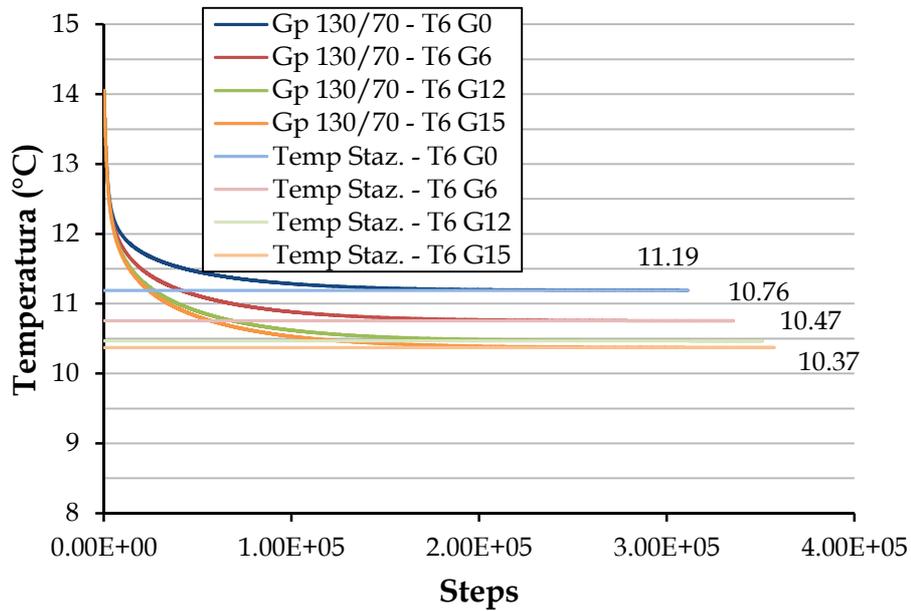
6.21. Allegato 21: OUTPUT ANALISI NUMERICHE

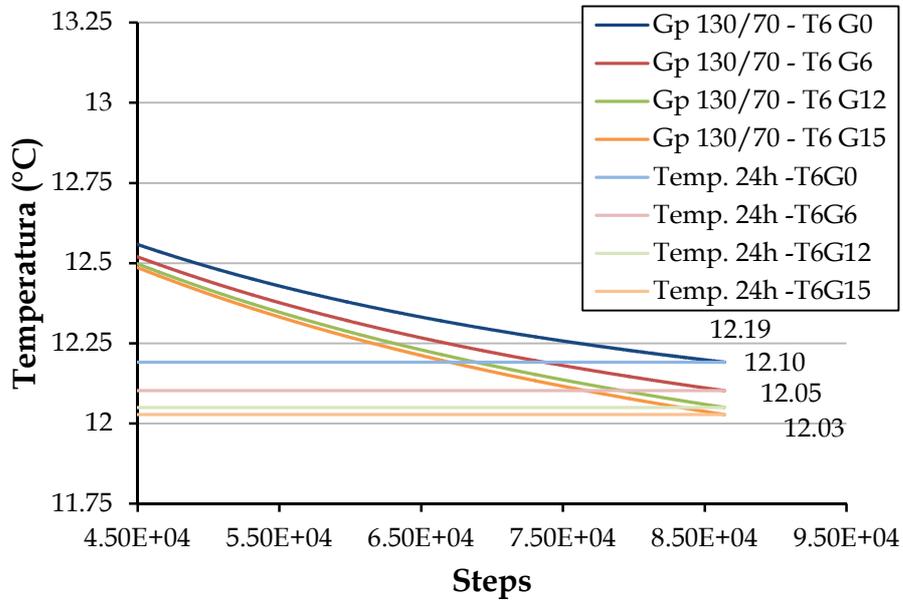
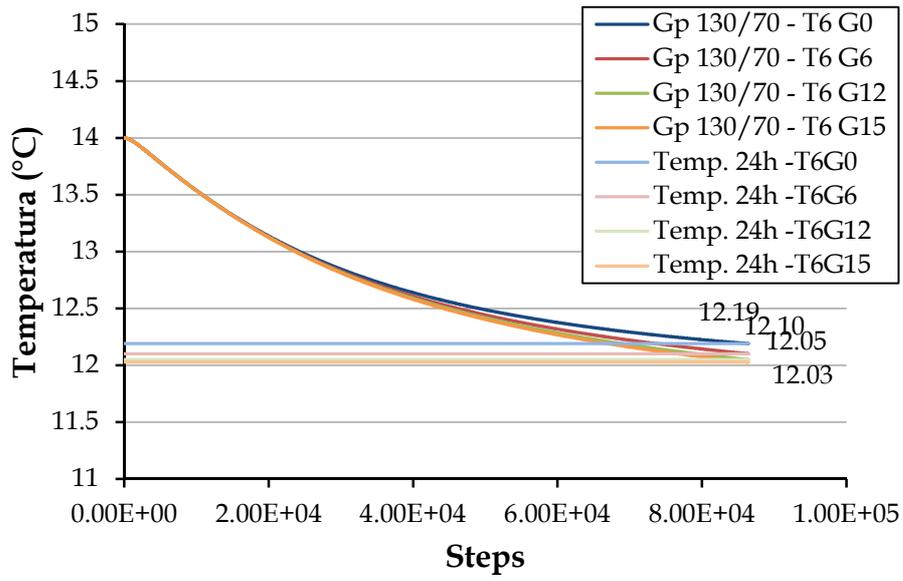
- Temperatura impianto 4 °C





• Temperatura impianto 6 °C





INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: minimo LCOE nel 2020 per la produzione di 21.2 TWh (Van Wees et al., 2013).....	19
Figura 1.2: minimo LCOE nel 2030 per la produzione di 34 TWh (Van Wees et al., 2013).....	20
Figura 1.3: minimo LCOE nel 2050 per la produzione di 2750 TWh (Van Wees et al., 2013).....	20
Figura 1.4: stratificazione, densità e pressioni all'interno della Terra secondo Bullen (1967).....	22
Figura 1.5: andamento nel sottosuolo fino allo strato neutro della temperatura nelle fasi stagionali (Brandl H. 2009).....	24
Figura 1.6: variazioni di temperatura all'interno della terra secondo Marchetti (1986) (Venzo G.A. 2006)	25
Figura 1.7: modelli teorici di circolazione convettiva nel mantello terrestre secondo Marchetti (1986).....	27
Figura 1.8: zolle crostali, dorsali, fosse oceaniche, zone di subduzione e campi geotermici (Dickson M. H. et al. 2004)	28
Figura 1.9: diagrammi di predimensionamento per fondazioni energetiche (Brandl H. 2006) ...	32
Figura 1.10: rappresentazione schematica di un sistema geotermico (Dickson M. H. et al. 2004)	34
Figura 1.11: sistema geotermico ad acqua dominante (Lund J. W. 2009).....	37
Figura 1.12: sistema geotermico a vapore dominante (Lund J. W. 2009)	38
Figura 1.13: diagramma con le diverse categorie di risorse geotermiche (Dickson M. H. 2004) .	40
Figura 1.14: applicazioni della risorsa geotermica in base al livello entalpico (Lindal B. 1973) ..	43
Figura 1.15: componenti di un impianto geotermico a bassa entalpia (Karytsas S. 2017)	44
Figura 1.16: trasmissione del calore in una pompa di calore (Geotermia a bassa entalpia, (appunti di) Ing. Olivieri T.).....	46
Figura 1.17: schematizzazione flusso di calore, funzionamento nel periodo invernale e estivo (Karytsas S. 2017).....	48
Figura 1.18: schema funzionale pompa di calore (Brandl H. 2006).....	48
Figura 1.19: ciclo inverso di Carnot	50
Figura 1.20: funzionamento di una pompa di calore geotermica (Doninelli M. 2007)	52
Figura 1.21: sistema open loop con sfruttamento di acqua di falda (Karytsas S. 2017).....	58
Figura 1.22: sistema open loop con sfruttamento di laghi sotterranei (Karytsas S.2017).....	58
Figura 1.23: sonde geotermiche a singola U, doppia U e coassiali (Karytsas S.2017).....	60
Figura 1.24: sistema di geoscambio close loop, sonde geotermiche verticali (Karytsas S. 2017) .	62
Figura 1.25: sistema di geoscambio close loop, sonde geotermiche orizzontali parallele (a) e in serie (b) (Karytsas S.2017).....	63
Figura 1.26: sistema di geoscambio close loop, sonde geotermiche orizzontali a spirale (a) e in trincea (b) (Karytsas S. 2017)	63

Figura 1.27: esempi di geostrutture energetiche (Bourne-Webb P. et al. 2016)	66
Figura 1.28: numero pali energetici installati in Austria (Brandl H. 2006).....	67
Figura 1.29: numero pali energetici installati in Inghilterra (Laloui L. e Di Donna A. 2011).....	67
Figura 1.30: esempio di circuito a spirale in un palo energetico (Brandl H. 2006).....	69
Figura 1.31: valvola e manometro per i tubi scambiatori dei pali energetici (Suckling T. P. et al. 2004).....	70
Figura 1.32: cantiere aperto per la costruzione di una platea su pali (Brandl H. 2006).....	70
Figura 1.33: particolare del raccordo in una fondazione energetica (Brandl H. 2006).....	71
Figura 1.34: armatura di un palo energetico con impianto termoscambiatore prima del getto di calcestruzzo (Brandl H. 2006).....	72
Figura 1.35: tubi scambiatori in pali di acciaio riempiti con calcestruzzo (Brandl H. 2006)	73
Figura 1.36: vista parziale dei pali energetici ancorati sul pendio instabile a Bad Schallerbach, Austria (Brandl H. 2013)	74
Figura 1.37: disposizione pali di fondazione a Bad Schallerbach, Austria (Brandl H. 2013).....	75
Figura 1.38: andamento dei carichi alla base e in testa del palo energetico (Brandl H. 2013).....	76
Figura 1.39: particolare del muro di contenimento e dello scavo (Suckling T. P. et al. 2002).....	76
Figura 1.40: disposizione pali energetici Keble College, Oxford (Suckling T. P. et al. 2002).....	77
Figura 1.41: schema campo sperimentale all'Università di Chiba, Giappone (Ooka R. 2007).....	78
Figura 1.42: disposizione tubi scambiatori attorno ai pali di fondazione all'Università di Chiba, Giappone (Ooka R. 2007).....	79
Figura 1.43: confronto COP di GSHP e ASHP a Chiba, Giappone (Ooka R. 2007).....	80
Figura 1.44: disposizione dei pali energetici al di sotto dell'hotel a Geneva, New York (Henderson H. I. et al. 1999).....	80
Figura 1.45: rappresentazione dell'estensione del tratto U2 metro line, il riquadro riporta la collocazione degli impianti geotermici (Adam D. et al. 2009).....	82
Figura 1.46: trave di fondazione della stazione U2/4 Meße strumentata con i tubi scambiatori (Adam D. et al. 2009).....	82
Figura 1.47: sezione della stazione U2/2-Taborstraße con indicati gli strumenti di misurazione (Adam D. et al. 2009).....	84
Figura 1.48: sezione della struttura dell'Art Center di Bregenz, Austria (Brandl H. 2006).....	85
Figura 1.49: Uniqa Tower a Vienna, Austria (Brandl H. 2006)	86
Figura 1.50: sezione trasversale con ancoraggi, Lianzer tunnel (Mimouni T. 2014)	89
Figura 1.51: rappresentazione schematica di una sezione generica del tratto sperimentale LT24, Lainzer tunnel (Brandl H. 2006)	93
Figura 1.52: andamenti dell'energia estratta e consumo di elettricità dell'impianto sperimentale LT24 (Adam D. et al. 2009)	94

Figura 1.53: andamento temperature dei pali energetici nel tratto sperimentale LT24, Lainzer tunnel (Brandl H. 2006).....	95
Figura 1.54: andamento deformazioni di un palo energetico nel tratto sperimentale LT24, Lainzer tunnel (Brandl H. 2006).....	96
Figura 1.55: dettaglio del geotessile energetico installato nel rivestimento del tratto LT22, Lainzer Tunnel (Adam D. et al. 2009).....	97
Figura 1.56: dettaglio della sezione con misuratori di temperatura nella linea 6, tunnel di Fasanenhof (Geimer C. et al. 2013).....	98
Figura 1.57: sviluppo e sezioni del tunnel di accesso al BBT a Mules (Tinti F. et al. 2017).....	99
Figura 1.58: disposizione ottimale impianto di tubi scambiatori, sezione della galleria di Mules (Tinti F. et al. 2017).....	101
Figura 1.59: modello digitale della galleria con conci energetici “Energietübbing” (Pralle N. et al. 2011).....	103
Figura 1.60: preparazione del concio energetico “Energietübbing” (Pralle N. et al. 2011).....	104
Figura 1.61: particolare delle connessioni idrauliche tra conci energetici (Frodl S. et al. 2010).....	105
Figura 1.62: conci energetici attivati termicamente, campo sperimentale Germania (Pralle N. et al. 2011).....	106
Figura 1.63: andamento temperatura nelle diverse fasi, campo sperimentale Germania (Pralle N. et al. 2011).....	107
Figura 1.64: schema dell’impianto integrato nell’anello della galleria, Jenbach (Frodl S. et al. 2010).....	109
Figura 1.65: particolare dei collettori termici prima dell’installazione della trave di base (Frodl S. et al. 2010).....	111
Figura 1.66: localizzazione galleria energetica di Jenbach e utenze (Pralle N. et al. 2011).....	112
Figura 1.67: confronto disposizione tubi scambiatori (Barla M. e Di Donna A. 2016).....	112
Figura 1.68: configurazioni concio ENERTUN (Barla M. e Di Donna A. 2016).....	114
Figura 1.69: termine prolungamento linea 1 Metro di Torino (foto autoprodotta).....	115
Figura 1.70: pompa di calore e dissipatore esterni alla galleria (foto autoprodotta).....	116
Figura 1.71: particolare della sezione con sistema di monitoraggio, campo sperimentale Torino (Barla M. e Di Donna A. 2016).....	117
Figura 1.72: centralina wireless per raccolta dati, campo sperimentale Enertun (Barla M. e Di Donna A. 2016).....	117
Figura 2.1: cunei e tasselli utilizzati per la separazione dei blocchi di roccia in cava (http://drystonegarden.com).....	121
Figura 2.2: agglomerati di fango di segagione dopo la disidratazione (fotografia autoprodotta).....	125

Figura 2.3: schema della depurazione delle acque dal fango di segazione (Mancini R. et al. 2005, rielaborata).....	128
Figura 2.4: inquadramento dei materiali attivati con alcali (Van Deventer J.S.J. et al. 2010).....	132
Figura 2.5: meccanismi di deidrossilazione durante il processo di calcinazione del caolino (Leonelli C. et al. 2011).....	136
Figura 2.6: effetti della temperatura di stagionatura sulla resistenza a compressione (Satpute Manesh B. et al. 2012).....	142
Figura 2.7: processo di geopolimerizzazione schematizzato (Leonelli C. et al. 2011).....	143
Figura 2.8: variazione resistenza a compressione in funzione del rapporto molare Si/Al (Leonelli C. et al. 2011).....	145
Figura 2.9: variazione resistenza meccanica in funzione del rapporto molare Si/Al (Duxson P. et al. 2007).....	145
Figura 2.10: comportamento elastico dei geopolimeri nella prova a flessione su 3 punti (Leonelli C. et al. 2011).....	147
Figura 2.11: variazione modulo elastico in funzione del rapporto molare Si/Al (Duxson P. et al. 2007).....	147
Figura 2.12: variazione resistenza a compressione, confronto tra geopolimeri e cemento Portland (Leonelli C. et al. 2011).....	148
Figura 2.13: confronto tra proprietà dei geopolimeri e altri materiali da costruzione (Leonelli C. et al. 2011).....	149
Figura 2.14: esempio diagramma di Ashby, densità/resistenza a compressione (Leonelli C. et al. 2011).....	149
Figura 3.1: campioni di cemento (foto autoprodotta).....	155
Figura 3.2: cassero per campione geopolimerico, prototipo 1 a sinistra e prototipo 2 a destra (foto autoprodotte).....	156
Figura 3.3: cassero per campione geopolimerico, progetto definitivo (foto autoprodotta).....	157
Figura 3.4: conglomerato fangoso a base di polvere lapidea (foto autoprodotta).....	158
Figura 3.5: fase di essiccazione del materiale lapidea (foto autoprodotta).....	159
Figura 3.6: polvere lapidea fine inferiore a 125 μm (foto autoprodotta).....	159
Figura 3.7: spettro a diffrazione, analisi XRF (Palmero P. 2017).....	160
Figura 3.8: curva granulometrica, polveri lapidee (Palmero P. 2017).....	161
Figura 3.9: procedimento della quartatura (foto autoprodotte).....	162
Figura 3.10: passanti percentuali, sabbie FG3g, FG3f e FG4.....	165
Figura 3.11: curva costipamento in funzione dell'apporto lapideo.....	165
Figura 3.12: NaOH, Sigma Aldrich a destra e Donua Chemie a sinistra (foto autoprodotta).....	168
Figura 3.13: preparazione campioni per test nuova composizione (foto autoprodotta).....	169

Figura 3.14: risultato campioni per test nuova composizione (foto autoprodotta).....	170
Figura 3.15: quantità componenti solidi, miscela n. 2 (foto autoprodotta)	171
Figura 3.16: preparazione fase liquida, miscela n. 2 (foto autoprodotta).....	172
Figura 3.17: prodotto finale, miscela n. 2 (foto autoprodotta)	173
Figura 3.18: getto nelle casseforme, miscela n. 2 (foto autoprodotta).....	173
Figura 3.19: fratture e fessurazioni, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta).....	174
Figura 3.20: materiale adeso alla cassaforma, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta).....	174
Figura 3.21: ritiro volumetrico, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta).....	175
Figura 3.22: ritiro volumetrico, campioni miscela n. 2 (foto autoprodotta).....	175
Figura 3.23: mixer Hobart v. 50 (foto autoprodotta)	176
Figura 3.24: tavola a scosse ad azione manuale (foto autoprodotta)	177
Figura 3.25: mantenimento ambiente umido camera climatica (foto autoprodotta).....	177
Figura 3.26: fessurazioni, miscela n. 3 (foto autoprodotta)	179
Figura 3.27: stagionatura inadatta, miscela n. 3 (foto autoprodotta)	179
Figura 3.28: rottura campioni, miscela n. 3 (foto autoprodotta).....	180
Figura 3.29: parti sottoposte al nuovo ciclo termico, miscela n. 3 (foto autoprodotta)	180
Figura 3.30: stagionatura a temperatura ambiente, miscela n. 2 (foto autoprodotta).....	181
Figura 3.31: stagionatura a temperatura ambiente, miscela n. 1 (foto autoprodotta).....	181
Figura 3.32: requisiti aggregati fini (ASTM C33/C33M - 13).....	184
Figura 3.33: requisiti aggregati fini (ASTM C33/C33M - 13).....	185
Figura 3.34: confronto curva C33/C33M ASTM e UNI.....	186
Figura 3.35: confronto curva C33/C33M ideale, di progetto e reale.....	187
Figura 3.36: carta da forno per mantenere separato materiale e cassero (foto autoprodotta)	188
Figura 3.37: scasseramento anticipato, miscela n. 4 (foto autoprodotta).....	189
Figura 3.38: soluzione liquida in eccesso concentrata sulla superfici dei campioni, miscela n. 4 (foto autoprodotta).....	190
Figura 3.39: materiale adeso al cassero, miscela n. 5 (foto autoprodotta)	190
Figura 3.40: campioni, miscela n. 6 (foto autoprodotta)	191
Figura 3.41: componenti principali FOX 600 (LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide).....	193
Figura 3.42: rappresentazione grafica di una cella di Peltier (Caterina Piccoli 2014).....	194
Figura 3.43: funzionamento di una cella di Peltier (http:// www.z-max.jp/ peltier_it/ peltier/ experience/experience2.html).....	195
Figura 3.44: encoder ottici motorizzati (modificata da LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide)	197

Figura 3.45: trasduttore di flusso (LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide).....	198
Figura 3.46: termocoppie esterne (LaserComp Thermal Conductivity instrument: technical specification's guide).....	199
Figura 3.47: preparazione campione cementizio inserito nel flussimetro (foto autoprodotta) ..	200
Figura 3.48: camera climatica Challenge 250 (foto autoprodotta)	202
Figura 3.49: pannello di controllo, camera climatica (foto autoprodotta)	203
Figura 3.50: tecnica per il mantenimento dell'ambiente umido (foto autoprodotta).....	203
Figura 3.51: tecnica per il mantenimento dell'ambiente umido (foto autoprodotta e modificata)	205
Figura 3.52: esempio segnale output test ultra suoni (foto autoprodotta)	207
Figura 3.53: calibrazione macchina agli ultrasuoni (foto autoprodotta).....	208
Figura 3.54: comportamento reale a compressione	210
Figura 3.55: prova a flessione su 3 punti (foto autoprodotta)	212
Figura 3.56: comportamento a flessione campione 6.3g3fgn.B.4	212
Figura 3.57: prova a compressione per il carico a rottura (foto autoprodotta).....	213
Figura 3.58: prova a compressione miscela n. 3	214
Figura 3.59: prova a compressione per il modulo elastico (foto autoprodotta).....	217
Figura 3.60: metodo B, determinazione modulo elastico secante (UNI EN 12390 - 13).....	218
Figura 3.61: grafico dei carichi, prova a compressione ciclica	219
Figura 3.62: grafico spostamenti estensimetri, prova a compressione ciclica	219
Figura 3.63: grafico sforzo/deformazione, prova a compressione per la determinazione del modulo elastico	220
Figura 4.1: terminologia FLA3D (Manuale FLAC3D, Getting started).....	228
Figura 4.2: convezione dei segni di tensione in FLA3D (Manuale FLAC3D, Getting started)...	233
Figura 4.3: convezione dei segni di pressione in FLA3D, (a) positiva e (b) negativa (Manuale FLAC3D, Getting started).....	234
Figura 4.4: scema generico per la risoluzione di analisi numeriche (Manuale FLAC3D, Getting started)	236
Figura 4.5: prospetto di situazioni nella modellazione (Manuale FLAC3D, problem solving whit FLAC3D)	238
Figura 4.6: fasi per analisi numerica (Manuale FLAC3D, problem solving whit FLAC3D)	238
Figura 4.7: dominio modello delle prove di laboratorio, termoflussimetro.....	263
Figura 4.8: prospetto di situazioni nella modellazione (Manuale FLAC3D, problem solving whit FLAC3D)	264
Figura 4.9: distribuzione delle temperature, validazione modello	267

Figura 4.10: flusso termico, validazione modello	267
Figura 4.11: distribuzione temperature nel tempo, soluzione numerica.....	269
Figura 4.12: distribuzione temperature confronto soluzione numerica e analitica	269
Figura 4.13: distribuzione temperature, campione cementizio	271
Figura 4.14: flusso di calore, campione cementizio.....	271
Figura 4.15: distribuzione temperature, campione geopolimerico	273
Figura 4.16: flusso di calore, campione cementizioopolimerico.....	273
Figura 4.17: modello 1, concio energetico.....	275
Figura 4.18: mdello 2, concio energetico.....	276
Figura 4.19: posizione sorgenti di calore	277
Figura 4.20: concio energetico e terreno.....	278
Figura 4.21: modello concio energetico geopolimerico e terreno	280
Figura 4.22: densità, modello concio cls.....	281
Figura 4.23: densità, modello concio geopolimerico	281
Figura 4.24: conducibilità termica, modello concio cls	282
Figura 4.25: conducibilità termica, modello concio geopolimerico.....	282
Figura 4.26: andamento temperatura, grid point centrale sull'interfaccia concio terreno.....	283
Figura 4.27: distribuzione temperatura, modello concio e terreno	284
Figura 4.28: andamento temperatura grid point centrale (24 h).....	284
Figura 4.29: andamento temperatura grid point centrale (regime stazionario/step).....	285
Figura 4.30: andamento temperatura grid point centrale (regime stazionario/time).....	285
Figura 4.31: modello concio geopolimerico incurvato e terreno	286
Figura 4.32: densità, modello concio geopolimerico incurvato e terreno.....	287
Figura 4.33: conducibilità termica, modello concio geopolimerico incurvato e terreno	287
Figura 4.34: conducibilità termica, modello concio geopolimerico incurvato e terreno	289
Figura 4.35: andamento temperature terreno con concio geopolimerico con 6 °C di fluido termo vettore	290
Figura 5.2: confronto stagionatura interna, 6.3g3fgn.B.6 (sinistra) e 4.3g3fgn+.B.3 (destra)	294

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1: produzione di energia geotermoelettrica (International energy agency OECD, 2010)	15
Tabella 1.2: produzione di calore geotermico a bassa entalpia per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)	17
Tabella 1.3: produzione di energia geotermica profonda per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)	17
Tabella 1.4: capacità energetica degli impianti geotermici per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)	18
Tabella 1.5: produzione e capacità di energia geotermica installata per EU-28 nel 2012 e confronto con NREAP target del 2012 e 2020 (Sigfússon B., Uihlein A., 2015)	18
Tabella 1.6: suddivisione sistemi geotermici (White D. E., Williams D. L. 1975).....	37
Tabella 1.7: classificazione delle risorse geotermiche in base all'entalpia (Dickson M. H. 2004).	42
Tabella 1.8: proprietà termiche terreni non permeabili e poco permeabili (Dickson M. H. 2004)	91
Tabella 1.9: Confronto in termini di scambio di calore tra le due tipologie di concetti proposti (Barla M. e Di Donna A. 2016)	113
Tabella 2.1: composizione chimica dei fanghi di segazione, ossidi (Colombo A. et al. 2006)	130
Tabella 2.2: composizione chimica dei fanghi di segazione, elementi pericolosi (Colombo A. et al. 2006)	131
Tabella 2.3: composizione mineralogica dei fanghi di segazione (Colombo A. et al. 2006)	131
Tabella 2.4. Composizione media di una loppa espressa in percentuali in peso. (Leonelli C. et al. 2011)	137
Tabella 2.5: corrispondenza rapporto molare Si/Al con dimensione dei pori (Leonelli C. et al. 2011)	142
Tabella 3.1: percentuali composizione malta geopolimerica (Ghiotti S. 2017)	157
Tabella 3.2: percentuali in peso di componenti ossidi e mineralogici del fango CSL (Palmero P. 2017)	160
Tabella 3.3: masse proporzionali al diametro massimo dell'aggregato, analisi granulometrica (norma UNI EN 933-2).....	163
Tabella 3.4: confronto massa iniziale inserito e somma dei tratti parziali	164
Tabella 3.5: curve ideali di Fuller	183
Tabella 3.6: curva ideale C33/C33M	184
Tabella 3.7: curva riferimento C33/C33M (UNI).....	185
Tabella 3.8: apporti percentuali componenti per la curva di progetto C33/C33M.....	187
Tabella 3.9: specifiche tecniche della piastra calda Lasercomp FOX600 (Pennacchio R. 2015) ..	192

Tabella 3.10: spessori misurati dalla macchina	197
Tabella 3.11: set point termoflussimetro	201
Tabella 3.12: conducibilità termiche calcolate	201
Tabella 3.13: impostazioni esempio del programma della sintesi geopolimerica	204
Tabella 3.14: modulo elastico dinamico	209
Tabella 3.15: carico a rottura per flessione	211
Tabella 3.16: carichi a rottura, la prova a compressione	213
Tabella 3.17: resistenze a flessione e compressione geopolimeri CLS e SRM (Palmero P. et al. 2017).....	216
Tabella 3.18: valori carichi imposti nel programma per la prova a compressione.....	217
Tabella 3.19: modulo elastico secante	220
Tabella 4.1: unità di misura, parametri meccanici (Manuale FLAC3D, Getting started)	235
Tabella 4.2: unità di misura, parametri idraulici (Manuale FLAC3D, Getting started)	235
Tabella 4.3: unità di misura, parametri termici (Manuale FLAC3D, Getting started)	235
Tabella 4.4: proprietà utilizzate per la validazione del modello.....	266
Tabella 4.5: dati input, modello campione cementizio.....	270
Tabella 4.6: flusso di calore sperimentazione termoflussimetro, campione cementizio	270
Tabella 4.7: flusso di calore, campione cementizio	271
Tabella 4.8: dati input, modello campione geotermico	272
Tabella 4.9: flusso di calore sperimentazione termoflussimetro, campione geopolimerico	272
Tabella 4.10: flusso di calore, campione geopolimerico.....	273
Tabella 4.11: dimensioni principali, concio energetico	274
Tabella 4.12: posizionamento sorgenti di calore	277
Tabella 4.13: condizioni al contorno, concio energetico e terreno	279
Tabella 4.14: condizioni iniziali e al contorno, concio energetico e terreno	280
Tabella 4.15: proprietà a confronto	282
Tabella 4.16: coordinate punti di indagine	283
Tabella 4.17: condizioni iniziali e al contorno, concio energetico curvo e terreno	288
Tabella 4.18: matrice delle analisi termiche	288
Tabella 4.19: matrice delle analisi termiche	289
Tabella 6.1: distribuzione granulometrica delle sabbie di laboratorio.....	316
Tabella 6.2: esempio foglio di calcolo, definizione curva di progetto.....	317
Tabella 6.3: percentuali sabbie per le curve ideali	317

BIBLIOGRAFIA

Capitolo 1

Adam D., Markiewicz R., (2009), "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers" in *Géotechnique*, vol. 59, n. 3, pp. 229-236, Vienna.

Anstett M., Hubbuch M., Laloui L., Matthey B., Morath M., Pahud D., Parriaux A., Rybach L., Schönbächler M., Tacher L., Wilhelm J., (2005), "Utilisation de la Chaleur du sol par des ouvrages de fondation et des out ènementen béton", Svizzera: Société suisse des ingénieurs et des architectes.

Armstead H.C.H., Gorhan H.L., Müller H., (giugno 1974), "Systematic approach to geothermal development Original research" (abstract), in *Geothermics*, vol. 3,n. 2, pp. 41-52.

Baietto A., Pochettino M., Salvatici E., (2010), "Progettazione di Impianti Geotermici: sonde verticali e pozzi d'acqua", Palermo.

Barla M., Di Donna A., Perino A. (2016), "Application of energy tunnels to an urban environment" in "Geothermics", vol. 61, pp. 104-113.

Barla M., Di Donna A., (2016) "Nuovi conci prefabbricati per lo fruttamento energetico delle gallerie", Italia: Dept. of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino.

Bouazza A., Adam D., (2002), "Turning geostructures into sources of renewable energy", tratto dalla tesi di dottorato, Vienna.

Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures" in *Géotechnique*, vol. 56, n. 2, pp. 81-122, Vienna.

Brandl H. (2009), "Geothermal Heating and Cooling of Buildings", Austria: Vienna Technical University.

Brandl H. (2013), "Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling", in MBMST 2013 Procedia Engineering vol. 57, pp. 9 - 18 (dal "11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques")

Buona G., Cataldi R. Passaleva G. (novembre 2007) "La Geotermia - ieri, oggi e domani", ed. seconda, Consiglio Nazionale dei Geologi e Unione Geotermica Italiana.

Dickson M. H., Mario F., (Febbraio 2004), "Che cos' è la geotermia?" Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy.

Doherty P.S., Al-Huthaili S., Riffat S.B., Abodahab N., (2003), "Ground source heat pump, description and preliminary results of the Eco House system", Nottingham: School of the Built Environment, Institute of Building Technology, University of Nottingham.

Doninelli M. e M., Ardizoia C., Prini E., Tadini M. e C., Carnevali G., Planca R., (2007) *“Le pompe di calore”*, Idraulica n°33, Novara: Caleffi - Poligrafica Moderna S.p.a..

Doninelli M. e M., Ardizoia C., Prini E., Tadini M. e C., Carnevali G., Planca R., Soldarini A., Mazzetti D., Tommaoni M., (2010) *“Impianti a pompe di calore geotermiche”*, Idraulica n°38, Novara: Caleffi, Poligrafica Moderna S.p.a..

European Commission, Sigfússon B., Uihlein A., (2015), *“2014 Joint Research Centre Science for Policy Report, Technology, market and economic aspects of geothermal energy in Europe”*, JRC science and policy reports.

European Commission, Sigfússon B., Uihlein A., (2015), *“2015 Joint Research Centre Science for Policy Report, Technology, market and economic aspects of geothermal energy in Europe”*, JRC science and policy reports.

Frodl S., Franzius J. N., Bartl T., (2010), *“Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach”*, Germania: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, in *“Geomechanics and Tunnelling”*, vol 5, pp. 3.

Geimer C., (2013), *“Metro tunnels enable geothermal-air conditioning – BINE information service”*, Germany: Leibniz Institute for Information Infrastructure.

Henderson H. I., Carlson S. W., Walburger A. C., (1999) *“North American monitoring of a hotel with room size GSHPs”*.

Hochstein, M.P., (1990), *“Classification and assessment of geothermal resources”* in *“Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization”*, pp. 31 -57, New York: Unitar.

Huttrer Gerald H., (1997), *“Geothermal heat pumps: an increasingly successful”* in *Renewable Energy*, vol. 10, n. 2/3, pp. 481-488, Colorado.

Karytsas S., Choropanitis I., (2007), *“Barriers against and actions towards renewable energy technologies diffusion: A Principal Component Analysis for residential ground source heat pump (GSHP) systems”*, Atene: Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRES), Geothermal Energy Department.

Kovačević M. S., Bačić M., Arapov I., (2012), *“Possibilities of underground engineering for the use of shallow geothermal energy”* in *“Gradevinar”*, vol. 64, pp. 1019-1028, Zagabria.

Laloui, L., Nuth, M. and Vulliet, L., (2006), *“Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile”* in *“International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics”*, vol. 30, pp. 763-781.

Laloui L., Di Donna A., (2011), *“Understanding the behaviour of energy geo-structures”* in *“ICE Civil Engineering”*, vol. 164, pp. 184-191.

Lindal B., (1973) *“Industrial and other applications of geothermal energy”* in *“Geothermal Energy”*, Parigi: Unesco.

- Lund J. W., Boyd T. L., (2005), "Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review" in "Geothermics", vol. 34, pp. 691-727.
- Lund J. W., (2009), "Utilisation of geothermal resources" in *Energy*, vol. 162, n. 2, pp. 3-12, Oregon Institute of Technology, USA.
- Lupia, Palmieri, Parotto, Saraceni, Strumia, (2010), "Idee per insegnare le Scienze integrate", Zanichelli.
- Luzzini F., (2012), Università degli Studi del Piemonte Orientale, Dipartimento di Studi Umanistici, Vercelli, "L'industria principesca. Piero Ginori Conti e l'impianto geotermico di Larderello", in "Acque Sotterranee, Italian Journal of Groundwater", pp 97 - 098.
- Mimouni T., Dupray F., Laloui L., (2014), "Estimating the geothermal potential of heat-exchanger anchors on a cut-and-cover tunnel", in "Geothermics", vol. 51 pp. 380-387.
- Mir, (2017), "Innovazioni nella progettazione realizzazione e gestione delle opere in sottterraneo", Cap. 12, tratto da 16° ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce.
- Oberhauser A. (2006), "Verfahrens- und Komponentenentwicklung zur Planung von Tunnelthermie", tratto dalla tesi di dottorato, Vienna: University of Technology.
- Ooka R., Sekine K., Yokoi M., Shiba Y., Smith P. E.H., Hwang S., (2007), "Development of a ground source heat pump system with ground heat exchanger utilizing the cast-in-place concrete pile foundation of a building", Japan: University of Tokyo, ASHRAE.
- Pralle N., Franzius J. N., (2011), "Turning segmental tunnels into sources of renewable energy", in "Civil Engineering", vol. 164, pp. 35-40, Paper 10-00034.
- Ranalli G., Rybach L., (2004), "Heat flow, heat transfer and lithosphere rheology in geothermal areas: Features and examples", Ottawa: Department of Earth Sciences and Ottawa-Carleton Geoscience Centre.
- Rybach L., (2012), "Shallow Systems: Geothermal Heat Pumps", Zurigo: GEOWATT AG.
- Sorgia L. (2008) "Descrizione, funzionamento e analisi prestazionale delle macchine di scavo meccanizzato", Italia: Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento Ingegneria e Tecnologie Ambientali di Cagliari, tratto da tesi di dottorato "XX Ciclo dottorato di ricerca in Geoingegneria".
- Stacey F.D., Loper D.E., (1988), "Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology", in "Phys. Earth. Planet. Inter.", vol. 53, pp. 167 - 174.
- Suckling T. P., Smith P. E.H., (2002), "Environmentally friendly geothermal piles at Keble College, Oxford, UK", UK: Deep Foundations Institute, NAEGELEBAU company literature.
- Suckling T. P., Cannon R., (2004), "Energy piles for Pallant house, Chichester, UK", UK: Cementation Foundations Skanska GRUND ENGINEERING.

Tinti F., Boldini D., Ferrari M., Lanconelli M., Kasmaee S., Bruno R., Egger H., Voza A., Zurlo R., (2017), "Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel – BBT", in "Tunnelling and Underground Space Technology", vol. 70, pp. 182–203.

Tommaso O., "Geotermia a bassa entalpia (appunti di)", Firenze: Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco".

Van Wees J.D., Boxem T., Angelino L., Dumas P., (2013), "A prospective study on the geothermal potential in the EU".

Venzo G.A., (2006), "Il calore interno della terra: una fonte gigantesca di energia", Contributi della classe di scienze matematiche, fisiche e naturali, Acc. Rov. Agiati.

Webb P. B., Burlon S., Javed S., Kürten S., LOveridge F., (2016), "Analysis and design methods for energy geostructures" in *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 65, pp. 402-419, Vienna, tratto dal workshop internazionale "Thermo active geotechnical systems for near-surface geothermal energy", École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.

White D. E., Williams D. L., (1975), "Assessment of Geothermal Resources of the United State". US: Geological Survey Circular 72, Government Printing Office, Washington, DC.

Capitolo 2

Allahverdi A., Mehrpour K., Najafi Kani E., (2008), "Taftan pozzolan-based geopolimer cement", in "IUST International Journal of Engineering Science", vol. 19, pp.1-5.

Amar S. B., Srinivas N., (2016), "Effect of curing temperature on compressive strength of geopolimer concrete", in "International Journal of Recent Scientific Research", vol. 7, pp. 12377-12381, India.

Bell J.L., Gordon M., Kriven W.M., (2005), "Use of geopolimeric cements as a refractory adhesive for metal and ceramic joins", in "Ceram. Eng. Sci. Proc", vol. 26, pp. 407- 413.

Bondar D., Lynsdale C.J., Milestone N.B., Hassani N., Ramezani pour A.A., (2010), "Engineering properties of alkali activated natural pozzolan Concrete", tratto da "The Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies", Ancona, Italy.

Colombo A., Tunesi A., Barberini V., Galimberti L., Cavallo A., (2006), "Caratterizzazione chimica e mineralogica dei fanghi di segazione".

Davidovits J., (1991), "Geopolimer: inorganic polymeric new materials" in "Thermal Analysis", vol. 37, pp. 1633-56.

Davidovits J. (2008), *“Geopolymers – Chemistry and Applications”*, France: Ed. Institute Géopolymère, St. Quentin.

Davidovits J., (2013), *“Geopolymere cement: a review”*, Institut Géopolimère,

De Gennaro M., (2007), *“Alta formazione e ricerca in tema di utilizzo degli scarti dell’industria lapidea”*, Italia: Università degli studi di Napoli Federico II, Dipartimento Scienze della terra, tratto da *“Presentazione progetto internazionale Italia/Brasile “Alta formazione e ricerca in tema di utilizzo degli scarti dell’industria lapidea”*.

Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Mallicoat S.W., Kriven W.M., Van Deventer J.S.J., (2005), *“Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties”*, in *“Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects”*, vol. 296, pp. 47-58.

Duxson P., Lukey G.C., van Deventer J.S.J., (2006), *“Thermal conductivity of metakaolin geopolymers used as a first approximation for determining gel interconnectivity”*, in *“Ind. Eng. Chem. Res.”*, vol. 45, pp. 7781-88.

Duxson P., Mallicoat S.W., Lukey G.C., Kriven W.M., Van Deventer J.S.J., (2007), *“The effect of alkali and Si/Al ratio on development of mechanical properties of metakaolinbased geopolymers”*, in *“Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects”*, vol. 292, pp. 8-20

Fernández-Jiménez A., Palomo A., Revuelta D., (2009), *“Alkali activation of industrial byproducts to develop new earth-friendly cements”*, tratto da *“11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies”*, Bath, UK.

García-Lodeiro I., Palomo A., Fernandez-Jimenez A., (2007), *“Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems”*, in *“Cem. Concr. Res.”*, vol. 37, pp.175-83.

Glukhovskiy V.D., Rostovskaja G.S., Rumyna G.V., (1980), *“High Strength Slag-Alkaline cements”*, tratto da *“7th International Congress on the Chemistry of Cement”*, vol 3, pp. 164.

Kamseu E., Leonelli C., Perera D., Melo U.C., Lemougna P.N., (2009), *“Investigation of volcanic ash based geopolymers as potential building materials”*, in *“Interceram”*, vol. 58, pp. 136-40.

Khale D., Chaudhary R., (2007), *“Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review”*, in *“Mater. Sci.”*, vol. 42, pp. 729-46.

Kriven W.M., Bell J.L., Gordon M., (2003), *“Microstructure and microchemistry of fully reacted geopolymers and geopolymer matrix composites”*, in *“Ceram. Trans”*, vol. 153, pp. 227-50.

Krivenko P.V., (1994), *"Alkali cements"*, Ukraine: Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev.

Krivenko P.V., (2010), *"Status and Prospects of research and application of alkali-activated materials"*, in *"Advances in Science and Technology"* vol. 69, pp 1-10.

Leonelli C., Romagnoli M., (2013), *"Definizione, preparazione, proprietà ed applicazioni, in Geopolimeri: Polimeri inorganici chimicamente attivati"* Italia: Bologna, I.Cer.S., p.1-18.

Malone P.G., Randall C.J., Kirkpatrick T., (1985), *"Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations"*, USA: Geotechnical Laboratory Department of the Army, Washington D.C..

Mark A. C., (1999), *"Architectural Stone: Fabrication, Installation, and Selection"*, Wiley, 1st Edition, ISBN-13: 978-0471246596.

Mancini R., Fornaro M., Dino G. A., (2005), *"Applicazioni e trattamenti in campo ingegneristico e industriale"*, Italia: Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Ambiente e Geotecnologie e Dipartimento di Scienze della Terra.

Medri V., Fabbri S., Dedecek J., Sobalik Z., Tvaruzkova Z., Vaccari A., (2010), *"Role of the morphology and the dehydroxylation of metakaolins on geopolymerization"*, in *"Appl. Clay Sci."*, vol. 50, pp. 538-45.

Mick R. Smith M. R., *"Stone: Building Stone, Rock Fill and Armour stone in construction"*, in *"Engineering Geology"*, special publication, no. 16

Miranda J.M., Fernandez-Jimenez A., González J.A., Palomo A., (2005), *"Corrosion resistance in activated fly ash mortars"*, in *"Cem. Concr. Res."*, vol. 35, pp. 1210-1217.

Muntingh Y., (2006), *"Durability and diffusive behavior evaluation of geopolymeric material"*, tratto da Master's Thesis, University of Stellenbosch, South Africa.

Palomo A., Blanco-Valera M.T., Granizo M.L., Puertas F., Vazquez T., Grutzeck M.W., (1991), *"Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin"*, in *"Cem. Concr. Res."*, vol. 29, pp. 997-1004.

Phair J.W., Van Deventer J.S.J., (2001), *"Effect of Silicate Activator pH on the Leaching and Material Characteristics of Waste-Based Inorganic Polymers"*, in *"Miner Eng"*, vol. 14, pp. 289-304.

Radulovi Z., (2012), *“Mining of the Cave Arch Using the CARDOX Procedure”*, Master of Sciences in Mining.

Rowles M.R., O'Connor B.H., (2009), *“Chemical and structural microanalysis of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite”*, in *“J. Amer. Ceram. Soc.”*, vol. 92, pp. 54-61.

Satpute Manesh B., Wakchaure Madhukar R., Patankar Subhash V., (2012), *“Effect of Duration and Temperature of Curing on Compressive Strength of Geopolymer Concrete”*, in *“International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)”*, vol. 1, Issue 5, May 2012

Torres P., Fernandes H.R., Olhero S., Ferreira J.M.F., (2009), *“Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles”*, in *“J. Eur. Ceram. Soc.”*, vol. 29, pp. 23-30.

Van Deventer J.S.J., Provis J.L., Duxson P., Brice D.G., (2010), *“Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials”* in *“Waste Biomass Valor”*, vol. 1, pp. 145-55.

Van Deventer J.S.J., Provis J.L., Duxson P., (2012), *“Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement”*, in *“Minerals Engineering”*, vol. 29, pp. 89- 104.

Van Jaarsveld J.G.S., Lukey G.C., (2003), *“The characterization of source materials in fly ash-based geopolymers”* in *“Materials Letters”*, vol. 57, pp. 72-80.

Wachtman J.B., (1996), *“Mechanical Properties of Ceramics”*, USA: New York, John Wiley & Sons, Inc..

Wang H., Li H., Yan F., (2005), *“Reduction in wear of metakaolinite-based geopolymer composite through filling of PTFE”*, in *“Wear”*, vol. 258, pp. 1562-66.

Wastiels J., Wu X., Faignet S., Patfoort G., (1993), *“Mineral polymer based on fly ash”*, USA: *“9th Intl. Conf. Solid Waste Management”*, Philadelphia.

Xu H., (2001), *“Geopolymerisation of aluminosilicate minerals”*, tratto da PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Melbourne, Australia

Capitolo 3

Abdel-Jawad Y.A., W.S. Abdullah, (2002), *“Design of maximum density aggregate grading”* In *“Construction and Building Materials”*, vol. 16, pp. 495-508, Elsevier Science Ltd.

“Analisi Granulometrica degli Inerti”, Parte I.

Ahmari S., Zhang L., (2012), "Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization", in "Construction and Building Materials", vol. 29, pp. 323-331.

Andini S., Cioffi R., Colangelo F., Grieco T., Montagnaro F., Santoro L., (2008), "Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products", in "Waste Management", vol. 28, Issue 2, pp. 416-423.

Commissione europea, Rapporto tecnica acciaio, (1997), "Riduzione dei minerali di ferro: valorizzazione della loppa di altoforno come materia prima secondaria; suo impiego per manufatti in calcestruzzo e maioliche ad alto valore aggiunto", EUR 16742, Lussemburgo: Centro sviluppo materiali SpA Ufficio delle pubblicazioni ufficiali delle Comunità europee.

Coppola L. Prof. Ing., "La produzione del cemento Portland, le aggiunte minerali e i cementi comuni", Università degli studi di Bergamo facoltà di Ingegneria "Materiali Pozzolatici a Comportamento Idraulico".

De Larrard F. (1999) "Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach".

Ghiotti Stefano Tesi di laurea magistrale, Polito 2017.

Granizo M. L., Blanco-Varela M. T., Martínez-Ramírez S., (2007), "Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties", in "Journal of Materials Science", vol. 42, Issue 9, pp 2934-2943.

Haecker C.J., Garboczi E.J., Bullard J.W., Bohn R.B., Sun Z., Shah S.P., Voigt T., (2005), "Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste", in "Cem. Concr. Res.", vol. 35, pp. 1948-1960.

Kriven W.M., Bell J.L., Gordon M., (2003), "Microstructure and microchemistry of fullyreacted geopolymers and geopolymer matrix composites", in "Ceram. Trans.", vol. 153, pp. 227-50.

Mouhamadou B., Diop M., Grutzeck W., (2008), "Low temperature process to create brick", in "Construction and Building Materials", vol. 22, Issue 6, pp. 1114-1121.

Muñiz-Villarreal M.S., Manzano-Ramírez A., Sampieri-Bulbarela S., RamónGasca-Tirado J. R., Reyes-Araiza J.L., Rubio-Ávalos J.C., Pérez-Bueno J.J., Apatiga L.M., Zaldivar-Cadena A., Amigó-Borrás V., (2011), "The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer", in "Materials Letters", vol. 65, Issue 6, pp. 995-998.

Ozer I., Soyer-Uzun S., (2015), "Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios", in "Ceramics International", vol. 41, Issue 8, pp. 10192-10198.

Pennacchio Tesi di dottorato 2015.

Palmero P., Formia A., Tulliani J. M., Antonaci P., (2017), "Valorisation of alumino-silicate stone muds: From wastes to source materials for innovative alkali-activated materials", in "Cement and Concrete Composites", vol. 83, pp. 251-262.

Shakhmenko G., Birsh J., (1998) "Concrete Mix Design and Optimization".

Sobole, K. et al. "The modelin of dense packing of aggregates as an approach to optimizing the proportioning of concrete mixtures".

Yan D., Chen S., Zeng Q., Xu S., Li H., (2016), "Correlating the elastic properties of metakaolin-based geopolymer with its composition", in "Materials & Design", vol. 95, pp. 306-318.

Capitolo 4

Abramowitz M. e Stegun I., (1964) "Handbook of Mathematical Functions", Dover, Nueva York.

Karlekar B. V., Desmond R. M., (1982) "Heat Transfer" 2nd Ed. St. Paul: West Publishing Co.

Marti, J., Cundall P. A., (1982). "Mixed Discretization Procedure for Accurate Solution of Plasticity Problems" in "Num. Methods and Anal. Methods in Geomech", vol. 6, pp. 129-139.

Perrochet, P., Bérod D., (1993) "Stability of the Standard Crank-Nicolson-Galerkin Scheme Applied to the Diffusion-Convection Equation: Some New Insights," Water Resources Research, vol. 29(9), pp. 3291-3297.

Quarteroni A., Sacco R., Saleri F., (2008), "Risoluzione di sistemi lineari con metodi iterativi", in "Matematica numerica", 3a edizione, Milano, Springer Verlag, pp. 111-158.

Whittaker E. T., Robinson G., (1924) "The Calculus Of Observations: A Treatise On Numerical Mathematics", Blackie and Sons, Londra.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

REGIO DECRETO 29 Luglio 1927, n. 1443 NORME DI CARATTERE LEGISLATIVO PER DISCIPLINARE LA RICERCA E LA COLTIVAZIONE DELLE MINIERE NEL REGNO

DECRETO LEGISLATIVO 13 gennaio 2003, n. 36: "Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti". Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 12 Marzo 2003, n. 59.

DECRETO LEGISLATIVO 3 agosto 2005: "Definizione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica". Pubblicato su Gazzetta Ufficiale n. 201 del 30 Agosto 2005

DECRETO .LEGISLATIVO 5 febbraio 1997, n. 22: "Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio". Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale del 15 febbraio 1997, n. 38 - Supplemento Ordinario, n. 33.

DECRETO MINISTERIALE 25 ottobre 1999, n. 471: "Criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modifiche ed integrazioni"

DECRETO LEGISLATIVO del 11 maggio 1999, n. 152: "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole". Pubblicato sul Supplemento Ordinario n. 101/L alla Gazzetta Ufficiale del 29 maggio 1999, n. 124.

UNI 10006/2002: "Costruzione e manutenzione delle strade. Tecnica d'impiego delle terre".

LEGGE n. 319 del 10 maggio 1976 (Legge Merli): "Norme per la tutela delle acque dall'inquinamento coordinate con le modifiche ed integrazioni apportate dalla Legge 8/10/1976 n.690, dalla Legge 24/12/1979, n.650, dalla Legge 23/4/1981, n.153. G.U. n.48 del 21/2/1977", pubblicata in Gazzetta Ufficiale 29 maggio 1976 n. 141.

ASTM C518 e ASTM C33/C33M - 13: standard specification for concrete aggregates

ISO 8301

UNI EN 12667 e UNI EN 197/1 e UNI EN 933-1/2 e UNI EN 1097-3 e UNI EN 12504-4:2005 e UNI EN 12390 - 13: 2013

SITOGRAFIA

- <http://geothermalcommunities.eu/elearning/chapters>
- https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Geothermal_Essentials.pdf
- <http://www.daub-ita.de/en/tunnel-projects/oesterreich/brenner-railway-axis-main-contract-section-h8-jenbach/>
- <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=867589>
- <http://drystonegarden.com/index.php/2012/07/bgs-quarry-photos/>