



**POLITECNICO
DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**Modellazione numerica 3D con
tassellatura di Voronoi del processo
di stimolazione dei giacimenti
geotermici profondi**

Tesi di Laurea Magistrale

Relatori:

Prof. Marco BARLA

Ing. Alessandra INSANA

Candidata:

Marina Giovina FINA

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

Sommario	i
Indice delle figure	iv
Indice delle tabelle	viii
Introduzione	9
Obiettivo dello studio	9
Struttura della tesi.....	11
Capitolo 1	13
I sistemi geotermici	13
1.1 Introduzione.....	13
1.2 L'energia geotermica	13
1.3 Il sistema geotermico	15
1.4 I sistemi geotermici non convenzionali	18
1.4.1 Storia.....	20
1.4.2 Maggiori progetti	22
1.4.3 Riepilogo	41
1.5 Lezioni imparate e problemi da superare	43
1.6 Creazione e gestione di un sistema EGS	48
1.6.1 Creazione del serbatoio.....	48
1.6.2 Fattori che caratterizzano il serbatoio geotermico	51
1.6.3 L'estrazione del calore	52
1.6.4 Gestione a lungo termine.....	54
1.6.5 Produzione di energia	55
1.7 Conclusioni.....	56
Capitolo 2	57
Metodi numerici applicati alla fratturazione idraulica	57
2.1 Introduzione.....	57

2.2	Innesco e propagazione della frattura nei pozzi geotermici	57
2.3	Fratturazione nei sistemi EGS	59
2.3.1	Riepilogo dei test di fratturazione	60
2.4	La necessità del modello numerico.....	61
2.5	Metodi agli elementi discreti	64
2.5.1	Simulazione della fratturazione	65
2.6	Simulazioni con HYDRA 2D e 3D.....	69
2.7	HYDRA (HYDRaulic fracturing Algorithm)	73
Capitolo 3		75
La tassellatura di Voronoi per la simulazione di una prova di laboratorio		75
3.1	Introduzione	75
3.2	La prova di compressione monoassiale	76
3.3	Generazione del modello su 3DEC	78
3.3.1	Generazione della geometria.....	78
3.3.2	Proprietà dei materiali e dei contatti.....	80
3.3.3	Condizioni al contorno	84
3.4	Simulazione della prova e calibrazione dei parametri.....	87
3.5	Conclusioni	89
Capitolo 4		91
Dalla scala di laboratorio alla scala del sito.....		91
4.1	Introduzione	91
4.2	Cooper Basin.....	91
4.3	Costruzione del modello	92
4.3.1	Geometria	92
4.3.2	Proprietà meccaniche	93
4.3.3	Stato tensionale e condizioni al contorno	94
4.3.4	Calibrazione dei microparametri.....	95

4.4	HYDRA 3D	97
4.5	Simulazione del processo di fratturazione idraulica con HYDRA 3D aggiornata.....	99
4.5.1	Il processo di calcolo con HYDRA 3D.....	101
4.5.2	Analisi dei risultati.....	108
4.6	Variazione del modello.....	110
4.6.1	Confronto con risultati precedenti.....	112
4.7	Conclusioni.....	114
	Capitolo 5	115
	Conclusioni	115
	Bibliografia	117
	Allegati	121
A.1	HYDRA 3D (modificata).....	121

Indice delle figure

Figura 1.1: Margini delle placche (Dickson e Fanelli 2004)	14
Figura 1.2 Temperatura del sottosuolo in Italia (UGI, 2007).....	15
Figura 1.3 Sistema geotermico convenzionale (UGI, 2007)	16
Figura 1.4: Differenza tra sistemi geotermici (fonte AGEA, 2019).....	17
Figura 1.5: Schema di impianto HDR (UGI, 2007)	18
Figura 1.6: Disegni da brevetto originale.....	21
Figura 1.7: Maggiori progetti EGS nel mondo	22
Figura 1.8 Schema dei pozzi e del volume fratturato a Fenton Hill (MIT, 2006)....	23
Figura 1.9: Eventi microsismici rilevati durante la fratturazione (MIT, 2006).....	24
Figura 1.10 Registrazione microsismi durante la stimolazione di RH15 (MIT, 2006)	27
Figura 1.11 Schema pozzi di Hijiori. In rosso l'intersezione con le fratture maggiori (MIT, 2006)	29
Figura 1.12 Vista tridimensionale del serbatoio di Ogachi (MIT, 2006)	32
Figura 1.13 Schema pozzi Soultz (MIT, 2006).....	35
Figura 1.14: Perforazione del primo pozzo	49
Figura 1.15: Iniezione del fluido	50
Figura 1.16: Fratturazione dell'ammasso	50
Figura 1.17: Perforazione del pozzo di produzione	51
Figura 1.18: Perforazione di altri pozzi di produzione	51
Figura 1.19 Volume fratturato determinato da misurazioni microsismiche (MIT, 2006).....	54
Figura 1.20 Schema impianto a ciclo binario ORC (Bombarda et al., 2010).....	56
Figura 2.1 Frattura a doppia ala (Zhang et al., 2011)	58
Figura 2.2 Illustrazione di una "penny-shaped fracture" (Fairhurst, 2013).....	58

Figura 2.3 A sinistra (a) il concetto iniziale del Los Alamos National Laboratoy, a destra (b) il concetto moderno di EGS (Jung, 2013).....	60
Figura 2.4: Confronto tra immagini al microscopio e modelli 3DEC (De-Fu Zhu et al 2017).....	66
Figura 2.5: Evoluzione della modellazione del processo di fratturazione con software agli elementi distinti	68
Figura 2.6: Esempio di tassellatura Voronoi (Quei et al, 2011).....	68
Figura 2.7: Prove di compressione monoassiale con campioni di scale diverse e stesso numero di grani (Insana, 2016).....	70
Figura 2.8: Prova di compressione monoassiale su campioni di diverse scale e uguale lunghezza di bordo di grano (Insana, 2016).....	70
Figura 2.9: Risultati fratturazione idraulica (Insana, 2016)	71
Figura 2.10: Curva sforzo-deformazione prova di compressione monoassiale non confinata su provino granitico (Terramagra, 2018)	72
Figura 2.11: risultato simulazione di fratturazione su provino granitico (Terramagra,2018).	73
Figura 2.12: Schema semplificato HYDRA3D (Terramagra, 2018).....	74
Figura 3.1: Schema di monitoraggio	77
Figura 3.2: Provino tassellato generato con NEPER.....	79
Figura 3.3: Modello costitutivo dei contatti (Li X.F., 2017).....	83
Figura 3.4 Provino omogeneo senza tassellatura	85
Figura 3.5 Grafico sforzo-deformazione assiale per diverse velocità delle piastre di carico.....	86
Figura 3.6: Curve sforzo-deformazione calibrate	88
Figura 3.7 Modalità di rottura del provino.....	89
Figura 4.1: sito di Cooper Basin e schema del serbatoio (Delton, 2010)	92
Figura 4.2: Dominio iniziale	92

Figura 4.3: Dominio con pozzi	93
Figura 4.4: Condizioni al contorno iniziali.....	94
Figura 4.5: provini sottoposti a prova di simulazione di compressione monoassiale (da sinistra a destra: 1x2 m, 2x4 m, 3x6 m, 4x8 m, 5x10 m, 6x12 m	95
Figura 4.6: Confronto prove di compressione monoassiale.....	95
Figura 4.7: Diagramma di flusso HYDRA 3D modificata	99
Figura 4.8: Distribuzione delle tensioni (Insana, 2016)	100
Figura 4.9: punti di applicazione pressione stato iniziale.....	101
Figura 4.10: Applicazione delle nuove pressioni (100 MPa)	102
Figura 4.11: Apertura giunti (100 MPa)	102
Figura 4.12: Nuove pressioni applicate (150 MPa)	103
Figura 4.13: Apertura giunti (150 MPa)	103
Figura 4.14: Nuove pressioni applicate (200 MPa)	104
Figura 4.15: Apertura giunti (200 MPa)	104
Figura 4.16: Nuove pressioni applicate (250 MPa)	105
Figura 4.17: Apertura giunti (250 MPa)	105
Figura 4.18: Nuove pressioni applicate (300 MPa)	106
Figura 4.19: Apertura giunti (300 MPa)	106
Figura 4.20: Applicazione delle pressioni nella condizione iniziale	107
Figura 4.21: Applicazione delle pressioni dopo 8 cicli di HYDRA 3D	107
Figura 4.22: Applicazione delle pressioni dopo 16 cicli di HYDRA 3D	107
Figura 4.23: Rottura subcontatti.....	108
Figura 4.24: Crescita HYDRA	109
Figura 4.25: Andamento apertura media.....	109
Figura 4.26: Andamento apertura massima	110
Figura 4.27: Stato iniziale modello modificato	110
Figura 4.28: Pressioni applicate 4 cicli HYDRA 3D	111

Figura 4.29: Pressioni applicate dopo 8 cicli di HYDRA 3D	111
Figura 4.30: Pressioni applicate dopo 13 cicli di HYDRA 3D	112
Figura 4.31: Sezione dominio a 2,5 m di profondità	112
Figura 4.32: Sistema di fratture Ceria (2015)	113
Figura 4.33: Sistema di fratture Insana (2016).....	113
Figura 4.34: Risultato fratturazione Insana e Barla (2017)	114

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Progetti in corso (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)	42
Tabella 1.2: Progetti in corso generanti energia (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013).....	42
Tabella 1.3: Esperimenti conclusi (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)	42
Tabella 1.4: Progetti conclusi che generavano energia (MIT, 2006), (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013).....	43
Tabella 1.5: Progetti abbandonati (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)	43
Tabella 2.1: Riepilogo test di fratturazione svolti (Jung, 2013)	60
Tabella 3.1 Valori statistici della tassellatura calcolati da Neper.....	79
Tabella 3.2 Proprietà dei blocchi (Barre granite).....	82
Tabella 3.3: Proprietà dei contatti.....	84
Tabella 3.4 Proprietà Barre Granite	86
Tabella 3.5 Calibrazione parametri gruppo 1 Barre Granite	88
Tabella 3.6 Calibrazione parametri gruppo 2 Barre Granite	88
Tabella 3.7: Riepilogo risultati di calibrazione dei microparametri	89
Tabella 4.1: Parametri granito roccia intatta e ammasso roccioso	93
Tabella 4.2: Parametri di resistenza dell'ammasso roccioso.....	94
Tabella 4.3: rapporto tra numero di grani e resistenza del campione	96
Tabella 4.4: Proprietà dei blocchi e dei contatti dell'ammasso roccioso	96
Tabella 4.5: Stati del subcontatto.....	98
Tabella 4.6: Riepilogo risultati HYDRA	108

Introduzione

Obiettivo dello studio

L'energia geotermica è il calore contenuto all'interno della Terra ed è all'origine di molti fenomeni geologici. Esso deriva in parte dal processo di formazione primordiale dell'universo e in parte è originato dal decadimento degli isotopi radioattivi (uranio, torio e potassio) presenti nella crosta terrestre e nel mantello. Tuttavia, l'espressione "energia geotermica" è generalmente impiegata, nell'uso comune, per indicare quella parte del calore terrestre, che può, o potrebbe essere, estratta dal sottosuolo e sfruttata dall'uomo.

L'aumento di temperatura con la profondità è definito dal gradiente geotermico. Sino alle profondità raggiungibili con le moderne tecniche di perforazione, il gradiente geotermico medio è $2,5^{\circ}\text{-}3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Di conseguenza, se la temperatura nei primi metri sotto la superficie è circa pari alla temperatura media annua dell'aria esterna (15°C), si può prevedere che la temperatura sia $65^{\circ}\text{-}75^{\circ}\text{C}$ a 2000 m di profondità, $90^{\circ}\text{-}105^{\circ}\text{C}$ a 3000 m e via di seguito per alcune migliaia di metri. Vi sono inoltre vaste regioni nelle quali il valore del gradiente geotermico si discosta sensibilmente da quello medio. In aree in cui il basamento rigido sprofonda e si forma un bacino che si riempie rapidamente di sedimenti geologicamente "molto giovani", il gradiente geotermico può essere anche inferiore a $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Viceversa, in certe "aree geotermiche" il gradiente può raggiungere valori superiori a dieci volte quello medio.

È in queste zone che si possono trovare i sistemi geotermici, definiti come "sistemi acquei convettivi, che, in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasportano il calore da una sorgente termica al luogo, generalmente

la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato)” (Hochstein, 1990).

Un sistema geotermico è formato da tre elementi: la sorgente di calore, il serbatoio ed il fluido. 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”.

Nel Progetto Rocce Calde Secche (HDR Project), avviato negli Stati Uniti nei primi anni '70, sia il fluido che il serbatoio sono artificiali. Attraverso un pozzo appositamente perforato, acqua ad alta pressione viene pompata 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 circostanti, che funzionano come un serbatoio naturale. Questo serbatoio viene poi raggiunto ed intersecato da un secondo pozzo usato per estrarre l'acqua che ha acquistato calore.

Il progetto HDR di Los Alamos ha aperto la strada ad altri progetti basati su concetti simili, sviluppati in Australia, Francia, Germania, Giappone e Gran Bretagna. Ad oggi le ricerche più avanzate sono state svolte in Giappone ed in Alsazia nell'ambito del cosiddetto “Progetto Europeo”. I vari progetti iniziati in Giappone negli anni '80 (a Hijiori, Ogachi e Yunomori), largamente finanziati dal governo giapponese e dalle industrie, hanno dato risultati molto interessanti sia dal punto di vista scientifico che industriale. Il progetto HDR europeo è stato sviluppato in diverse fasi comprendenti anche la perforazione di due pozzi, uno dei quali ha raggiunto la profondità di 5060 metri. Dalla prospezione geofisica e dalle prove idrauliche sono stati ottenuti risultati molto incoraggianti, ed il progetto europeo sembra essere quello più promettente.

La presente tesi intende contribuire allo studio della fratturazione idraulica per lo sfruttamento dell'energia geotermica profonda sviluppando un modello numerico agli elementi discreti.

Per esaminare la resistenza ed il processo di rottura della roccia viene proposto il software commerciale Three-dimension Distinct Element Code (3DEC 5.0), un codice numerico tridimensionale basato sul metodo agli elementi distinti.

In particolare, si utilizzerà la tassellatura di Voronoi per creare blocchi poligonali di varie dimensioni interagenti lungo il loro contorno. 3DEC tuttavia non permette di creare una tassellatura Voronoi tridimensionale pertanto la geometria del problema verrà creata in Neper (3.3.0), software per la generazione di policristalli, e verrà poi importata.

Questo tipo di modellazione dipende molto dalle proprietà meccaniche dei contatti, cui nel seguito si farà riferimento come microparametri. Pertanto, prima di costruire il modello del caso di studio, si affronterà la questione dei microparametri da assegnare, scopo raggiunto tramite un processo preliminare di calibrazione basato sulla simulazione di prove di compressione monoassiale.

Il confronto dei risultati ottenuti in termini di resistenza e deformabilità con i dati di laboratorio mostra una buona corrispondenza.

Analizzata la scala di laboratorio, si studierà la scala del sito per capire se i microparametri calibrati su un campione di 50x100 mm siano in grado di riprodurre il corretto comportamento alla scala del sito.

Dopodiché si procederà alla simulazione della fratturazione idraulica in un sistema EGS con l'intento di produrre uno strumento utile per stimare la pressione idraulica necessaria per fratturare l'ammasso roccioso e creare un sistema di fratture continuo.

Si introdurrà il sistema EGS di Cooper Basin, in Australia, descrivendone le caratteristiche in termini di geometria, stato tensionale e proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso (Barre granite). Si riprodurrà quindi un semplice campo geotermico artificiale composto da due fori circolari di diametro di 50 cm. Dopo lo scavo dei pozzi, si simulerà il processo di fratturazione idraulica. Per tale scopo si utilizzerà la funzione FISH scritta prima da Insana (2016) in 2D e poi estesa da Terramagra (2018) alla modellazione 3D. Tale FISH verrà poi migliorata sulla base dell'articolo di Insana et al., 2017.

Struttura della tesi

La tesi è composta da 5 capitoli.

Il primo capitolo è uno studio bibliografico sulle risorse geotermiche e in particolare sui sistemi geotermici non convenzionali. Si analizzeranno i maggiori progetti HDR e le caratteristiche, tecnologie e problemi di questi sistemi.

Nel Capitolo 2 si tratterà della fratturazione idraulica applicata ai pozzi geotermici. Dopodiché si spiegherà la necessità di costruire un modello numerico per simulare la fratturazione idraulica e si illustreranno alcuni modelli sviluppati in passato. Infine, ci si concentrerà sul metodo numerico che verrà utilizzato in questo studio, il Discrete Element Method, introdotto da Cundall nel 1971.

Nel Capitolo 3 si simulerà una prova di compressione monoassiale su un provino di laboratorio di diametro 0.05 m e altezza 0.1 m di granito. L'obiettivo è di trovare un modello adatto a simulare il comportamento meccanico di un materiale roccioso.

Si costruirà un modello numerico di un provino cilindrico utilizzando la tassellatura Voronoi per la generazione dei grani. Il provino così costruito sarà utilizzato per la simulazione di prove di compressione monoassiale al fine di confrontare la risposta del materiale intatto con quella del materiale in grani. Inoltre, si calibreranno i microparametri confrontando il modello con le prove di laboratorio.

Nel Capitolo 4 si applicherà la tassellatura Voronoi a un caso reale, in particolare al sistema EGS di Cooper Basin. Si considererà un dominio parallelepipedo di dimensione 15mx10mx5m e si perforeranno due pozzi di diametro 50 cm distanti 5 m tra loro. Calibrati i microparametri del materiale si applicherà la FISH HYDRA 3D per simulare la fratturazione idraulica. Infine, si apporteranno delle modifiche alla FISH e si elaboreranno i risultati.

Nel Capitolo 5 si riassumeranno i risultati ottenuti e le conclusioni.

Capitolo 1

I sistemi geotermici

1.1 Introduzione

Il capitolo seguente tratterà delle risorse geotermiche descrivendone le caratteristiche principali. Dopodiché si approfondiranno i sistemi HDR e EGS, oggetto di studio, ripercorrendo i maggiori progetti in tutto il mondo col fine di comprendere meglio i traguardi raggiunti e i problemi da superare prima della commercializzazione. Infine, si analizzeranno le caratteristiche principali dei sistemi geotermici profondi, gli step da seguire per la loro creazione e le modalità di sfruttamento dell'energia estratta.

1.2 L'energia geotermica

L'energia geotermica è l'energia immagazzinata sotto forma di calore sotto la superficie della terra. Si tratta di una fonte rinnovabile, praticamente infinita, che fornisce energia termica ed elettrica in modo ininterrotto e con potenza costante. Inoltre, è rispettosa dell'ambiente in quanto contribuisce a ridurre le emissioni di CO₂, necessita di una limitata occupazione di suolo e riduce le vulnerabilità derivanti dalle importazioni di energia.

L'enorme quantità di energia racchiusa al di sotto della superficie terrestre deriva in parte dal processo di formazione primordiale dell'universo e in parte è originata dal decadimento degli isotopi radioattivi (uranio, torio e potassio) presenti

nella crosta terrestre e nel mantello. Dal centro della terra, la cui temperatura è stimata superiore a $5.000\text{ }^{\circ}\text{C}$, si origina un flusso termico verso la superficie che va a sommarsi al flusso termico di origine radiogenica, dando luogo ad una potenza termica complessiva emanata dalla terra pari, secondo le stime (Stacey e Loper 1988 come citato in Bombarda et al, 2010), a $42 \times 10^{12}\text{ W}$ e ad un flusso termico terrestre medio pari a 65 mW/m^2 in corrispondenza della crosta continentale e a 101 mW/m^2 in corrispondenza della crosta oceanica (Pollack et al. 1993 in Bombarda et al, 2010).

Malgrado tale calore sia in quantità enorme e praticamente inesauribile, esso tuttavia è assai disperso e sovente a profondità troppo elevate per essere sfruttato industrialmente. Esistono però nella crosta terrestre, a profondità accessibili (1-4 km), alcune zone in cui il gradiente è molto più alto di quello medio. Ciò si verifica in aree con la presenza, non lontano dalla superficie, di masse magmatiche fluide o già solidificate e in via di raffreddamento oppure in corrispondenza dei margini delle placche, in particolare lungo le dorsali oceaniche e le zone di subduzione (Figura 1.1). Queste sono zone di fragilità e forte fratturazione della crosta e sono caratterizzate da elevata sismicità, fenomeni vulcanici e da un flusso di calore terrestre elevato.

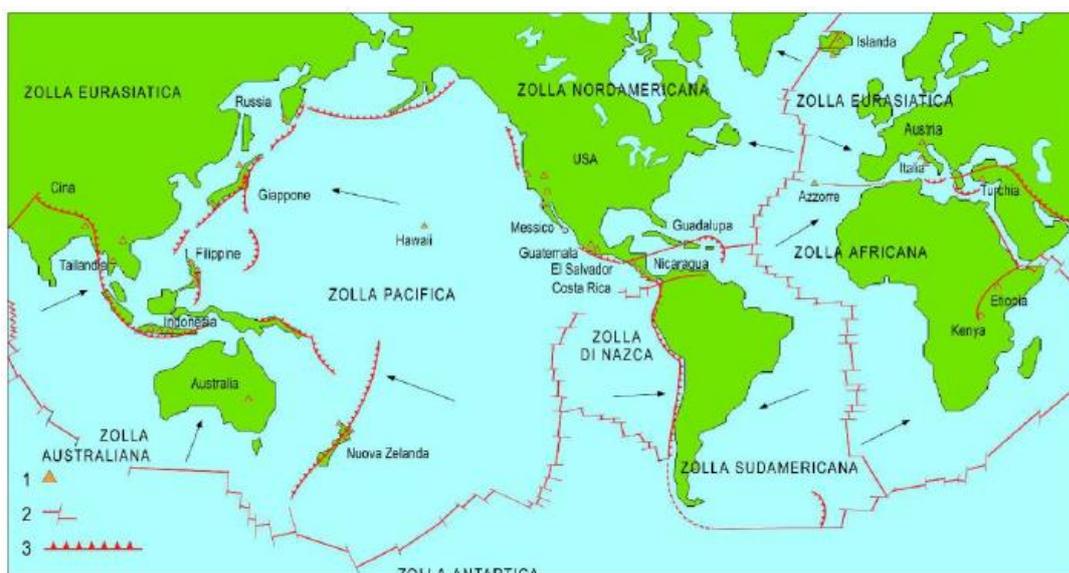


Figura 1.1: Margini delle placche (Dickson e Fanelli 2004)

In queste zone il flusso di calore può arrivare fino a 450 mW/m^2 (Buonasorte 2008 come citato in Bombarda et al, 2010), e costituiscono quindi un'area privilegiata per lo sfruttamento dell'energia geotermica (Bombarda et al., 2010). Ad esempio, l'Italia, geologicamente giovane, ha un flusso di calore superiore alla media, in particolare nelle aree vulcaniche della Toscana e del Lazio ed è interessata da

diverse anomalie geotermiche. Infatti, come si può osservare nella Figura 1.2, ci sono zone in cui a profondità di 2000 metri si trovano rocce a temperature pari a 100°C.

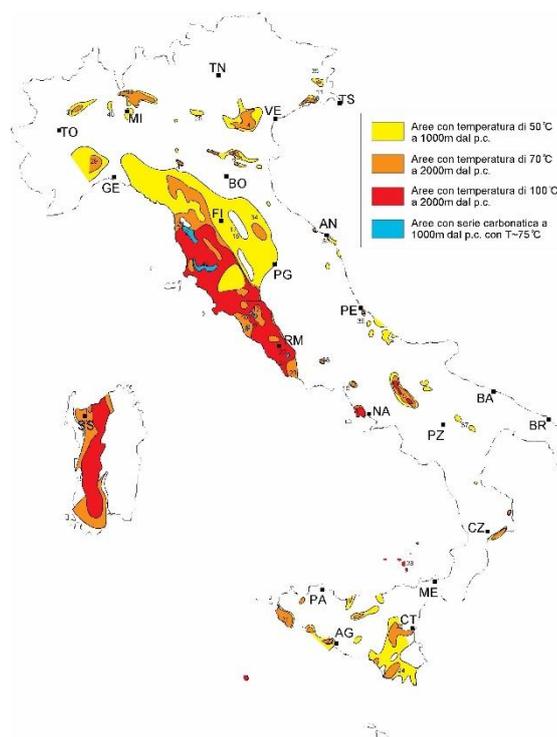


Figura 1.2 Temperatura del sottosuolo in Italia (UGI, 2007)

1.3 Il sistema geotermico

Un sistema geotermico è formato da tre elementi: la sorgente di calore, il serbatoio e il fluido (Figura 1.3).

La sorgente di calore può essere un'intrusione magmatica a temperatura molto alta (>600°C), posizionata a piccole profondità (5-10 km) oppure il calore normale della Terra. I fluidi geotermici presenti nella crosta terrestre sono formati prevalentemente da acqua meteorica, penetrata nel sottosuolo nel corso di centinaia di migliaia di anni, che si è riscaldata a contatto con le rocce calde. Si formano quindi acquiferi caldi, i serbatoi geotermici, con temperature che possono raggiungere i 300°C. I serbatoi geotermici sono costituiti da rocce permeabili all'interno delle quali, per effetto della sottostante sorgente di calore, il fluido geotermico (acqua o vapore) si riscalda innescando una circolazione convettiva. I confini dei serbatoi geotermici nel corso dei millenni sono generalmente resi impermeabili per effetto di tali circolazioni che innescano fenomeni di deposizione dei minerali nelle discontinuità e nei pori delle rocce. Ciò garantisce la conservazione della temperatura della risorsa.

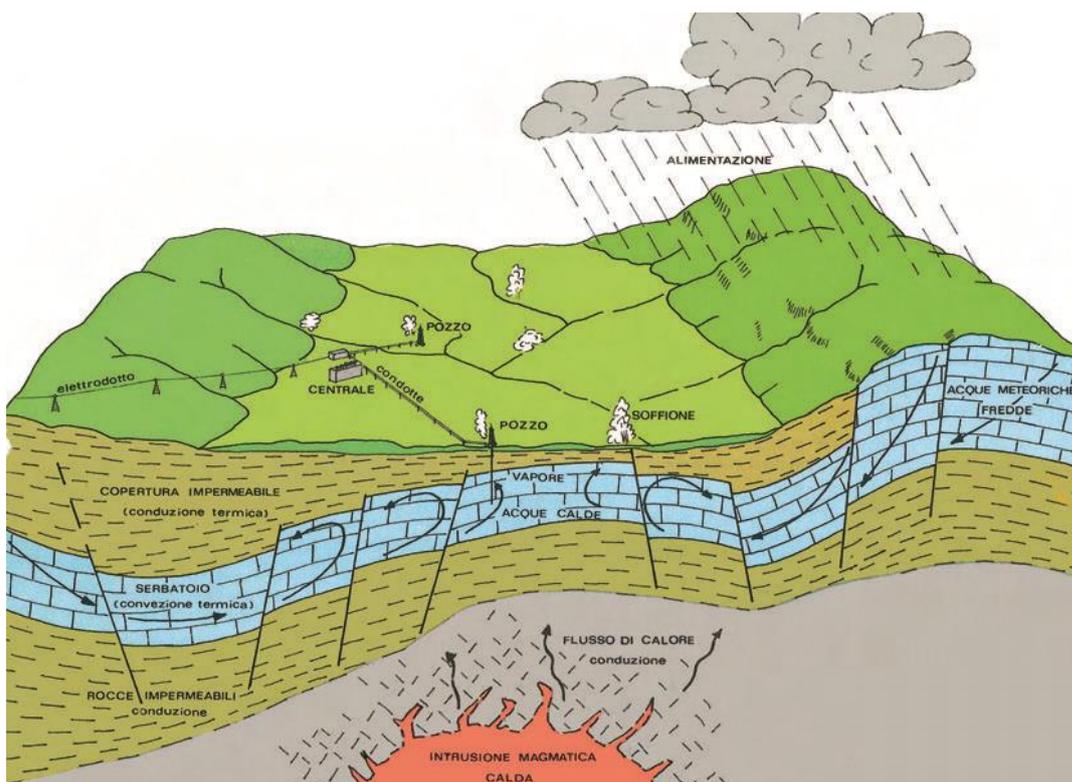


Figura 1.3 Sistema geotermico convenzionale (UGI, 2007)

Se uno di questi elementi non è disponibile, la risorsa così com'è non può essere utilizzata:

- Senza una grande fonte di calore il fluido geotermico non sarebbe abbastanza caldo da poter essere utilizzato per la generazione di energia
- Senza una sufficiente permeabilità della roccia il fluido non potrebbe muoversi attraverso essa e non potrebbe accumulare calore
- Senza fluido non sarebbe possibile scambiare calore con la roccia
- Senza una copertura impermeabile il fluido geotermico raggiungerebbe facilmente la superficie e la sua energia verrebbe velocemente dissipata
- Senza la ricarica di fluido geotermico il serbatoio si esaurirebbe in breve tempo.

Come si può immaginare, non è facile che si verifichino tutte queste condizioni contemporaneamente e pertanto l'utilizzo convenzionale dell'energia geotermica è limitato dalla scarsa presenza di serbatoi naturali o dal fatto che questi non sono economicamente raggiungibili. Nasce quindi l'esigenza di creare un sistema geotermico costituito dagli stessi elementi di quello idrotermale classico, ma in cui si sopperisce artificialmente quando uno o più di questi è scarso. In particolare, esiste un altro tipo di risorsa geotermica in cui il calore è immagazzinato nel

basamento cristallino in rocce di scarsa permeabilità, in altre parole si parla di rocce calde secche (Hot Dry Rock).

L'idea di sfruttare queste risorse è nata nel 1970 al Los Alamos National Laboratory. Secondo il concetto HDR, acqua ad alta pressione viene pompata in un pozzo perforato in un ammasso roccioso caldo, profondo e compatto provocando la fratturazione idraulica (Garnish, 1987 come citato in Insana, 2016). L'acqua scorre attraverso queste fratture estraendo calore dalle rocce circostanti. Il serbatoio viene poi intercettato da un altro pozzo utilizzato per recuperare il fluido riscaldato.

Il vantaggio è che queste zone ad alto gradiente geotermico sono molto più frequenti dei serbatoi geotermici convenzionali: zone vulcaniche, zone con flusso di calore elevato, fonti di calore radiometrico localizzato. In Figura 1.4 la differenza tra i diversi sistemi geotermici.

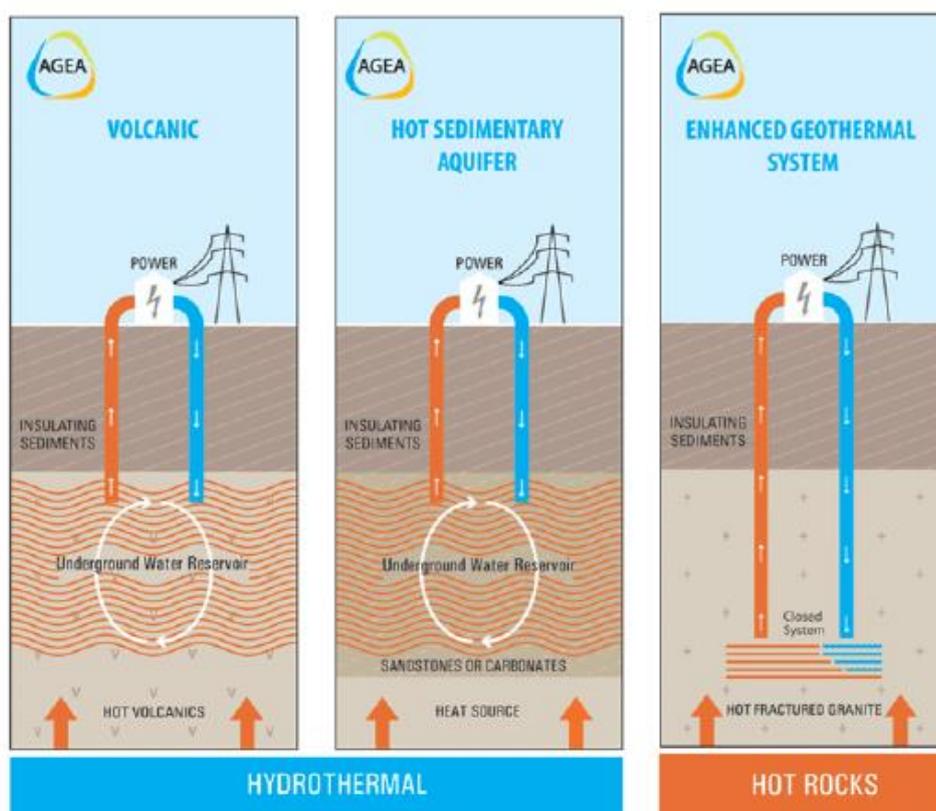


Figura 1.4: Differenza tra sistemi geotermici (fonte AGEA, 2019)

Dopo i test positivi degli esperimenti svolti dal Los Alamos Laboratory anche altre nazioni come Australia, Francia, Germania, Giappone e Gran Bretagna hanno avviato dei progetti per la commercializzazione dei sistemi HDR.

1.4 I sistemi geotermici non convenzionali

Le numerose perforazioni per la ricerca petrolifera, geotermica e mineraria durante l'ultimo secolo, hanno dimostrato che la gran parte del calore terrestre è contenuto in rocce di bassa permeabilità naturale. La ricerca per l'estrazione di questo calore a tassi commerciali è iniziata negli anni '70 al Los Alamos Scientific Laboratory in New Mexico dove nacque l' Hot Dry Rock (HDR) Project dopodiché l'interesse per questa nuova forma di energia si è brevemente diffusa in tutto il mondo.

Con il termine HDR si indicano complessi geologici profondi ad alte temperatura caratterizzati da permeabilità nulla o molto bassa e privi perciò di circolazione naturale. La profondità a cui i suddetti complessi possono trovarsi varia da zona a zona in funzione del gradiente di temperatura e del flusso conduttivo di calore.

In questi sistemi sia il fluido che il serbatoio sono artificiali: attraverso un pozzo appositamente perforato, acqua ad alta pressione viene pompata 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 circostanti che funzionano come un serbatoio naturale. Questo serbatoio viene poi raggiunto da un secondo pozzo usato per estrarne l'acqua che ha acquistato calore. Il fluido circola quindi in un circuito chiuso in cui la pressione è mantenuta a un livello tale da prevenire l'ebollizione e l'elettricità viene prodotta in un impianto con sistema binario. In questo modo non vengono rilasciati gas tossici. (Figura 1.5).

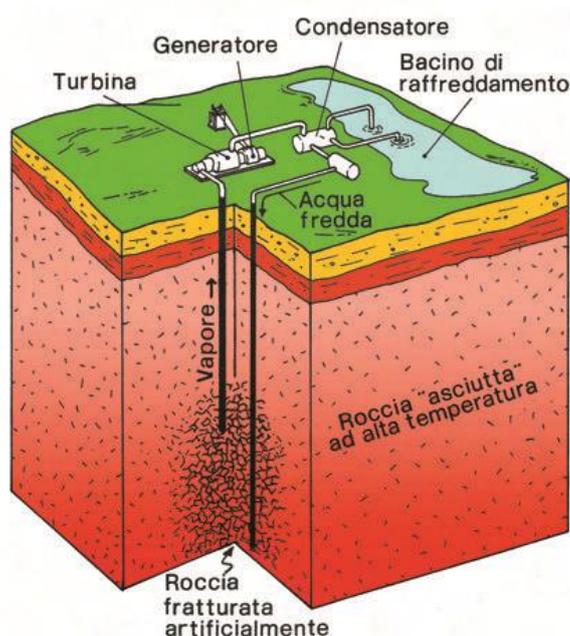


Figura 1.5: Schema di impianto HDR (UGI, 2007)

Condizione necessaria è che si crei un'adeguata connessione tra i pozzi attraverso la fratturazione di un volume di roccia abbastanza grande per sostenere tassi di sfruttamento della risorsa economicamente accettabili.

Il vantaggio di questi sistemi è che non è necessario trovarsi in una zona vulcanica o con anomalie geotermiche per utilizzarla ma è sufficiente che il sottosuolo profondo abbia un gradiente termico di circa 40°C ogni 1000 metri e che le rocce profonde siano disposte in maniera tale da poter essere fessurate e rese permeabili al fluido.

L'attuale concetto di sistema HDR si è notevolmente evoluto rispetto all'idea iniziale proposta dal Los Alamos: il primo foro viene utilizzato per pressurizzare i giunti naturali sigillati dalla deposizione di minerali in modo da riaprirli per la circolazione del fluido. Quando la pressione dell'acqua supera la tensione in sito, un fluido viscoso contenente sabbia, frammenti di vetro o altri proppant viene iniettato nelle fratture affinché non si richiudano. In questo modo si formano dei canali permeabili in cui far circolare il fluido geotermico.

Il sistema di fratture così creato viene poi intercettato dai pozzi di produzione attraverso i quali viene estratto il fluido riscaldato.

Infatti, al contrario di ciò che pensavano gli scienziati del Los Alamos, ora è noto che il basamento cristallino profondo non è omogeneo e isotropo e che, anche in profondità, è presente una rete di giunti preesistenti che controlla le deformazioni dell'ammasso durante la fratturazione idraulica e richiedono meno pressione per essere aperti.

Per questo oggi più frequentemente si parla di EGS, "Enhanced Geothermal System" identificando con questo termine tutti i sistemi geotermici che richiedono l'intervento dell'uomo.

Il problema è che il termine EGS non è universalmente definito e spesso porta ad inglobare indirettamente nel termine addirittura classici sistemi idrotermali (anche a vapore dominante, come Larderello e The Geysers) nei quali sono stati effettuati interventi di pressurizzazione e/o di stimolazione del serbatoio, o reiniezione del fluido utilizzato o in generale interventi di miglioramento delle capacità produttive.

Alcuni esperti considerano EGS anche altri sistemi geotermici, diversi da quelli idrotermali ad acqua o a vapore dominante come i sistemi geopressurizzati (acquiferi profondi in sovrappressione per effetto non del carico idrostatico ma di quello litostatico delle formazioni a tetto del serbatoio), i sistemi magmatici, i fluidi supercritici e i sistemi a salamoia calda.

In questa tesi si è scelto di non includere nella definizione i sistemi idrotermali o gli altri sistemi non convenzionali, pertanto con EGS si definiscono i sistemi in cui il serbatoio viene creato in tutto o in parte artificialmente con operazioni di idrofratturazione di rocce con permeabilità quasi nulla o scarsa, con fratture chiuse o sigillate da circolazione idrotermale fossile, ubicate in aree con o senza anomalie termiche. In tali serbatoi viene iniettato fluido da un pozzo di iniezione e estratto da uno o più pozzi di produzione e tale fluido viene poi utilizzato per la produzione di energia o per usi diretti del calore.

Di grande importanza la ricerca svolta dal team di ricerca dell'MIT (Tester J.W., Anderson B.J., Batchelor A.S., Blackwell D.D., DiPippo R., Drake E.M., Garnish J., Livesay B., Moore M.C., Nichols K., Petty S., Toksöz M.N., Veatch R.W.) il cui articolo *"The Future of geothermal energy - impact of enhanced geothermal systems on the United States in the 21st Century"* descrive in dettaglio i sistemi EGS compresi gli impatti ambientali ed economici.

Da questa ricerca sono tratti i paragrafi seguenti che passano in rassegna e analizzano i principali progetti di ricerca EGS internazionali finalizzati a dimostrarne la fattibilità. Ciò ha lo scopo di inquadrare storicamente la nascita e l'evoluzione della scoperta e di riassumere le lezioni imparate da ciascun progetto per poter identificare i traguardi raggiunti e le sfide da superare prima della commercializzazione.

1.4.1 Storia

L'idea di estrarre calore da serbatoi geotermici artificiali nacque nei primi anni '70 al Los Alamos Scientific Laboratory in New Mexico. Istituito dall'US Army e poi passato all' Atomic Energy Commission (AEC) negli anni '40, il Laboratorio aveva come scopo iniziale quello di progettare e testare armi nucleari. Ciò richiedeva la presenza contemporanea di diversi studiosi come ingegneri, chimici, fisici, geologi, geofisici e idrologi che, unito all'ambiente "research-friendly", rese possibile lo sviluppo di nuove idee e ricerche.

Sotto la direzione di Norris Bradbury (1945-1970) i ricercatori vennero incoraggiati a sviluppare nuove idee, sfida che fu accettata, tra gli altri, da una commissione creata ad hoc da Eugene S. Robinson per studiare nuove tecniche per le perforazioni profonde. Tra questi c'era anche Bob Potter, un influente e creativo membro della squadra, interessato da lungo tempo nell'applicazione delle perforazioni di profondità per l'estrazione dell'energia geotermica. La creatività di Potter venne innescata da un articolo sul "Journal of Geophysical Research" che descriveva gli esperimenti sulla fratturazione idraulica condotti dall'Oak Ridge

National Laboratory. Utilizzando la fratturazione idraulica, già sviluppata dall'industria petrolifera, l'ORNL stava studiando la sua applicazione alla creazione di fratture nelle rocce sedimentarie. Potter si chiese allora se tale tecnologia potesse essere applicata anche alle rocce cristalline per poter sfruttare il calore del substrato impermeabile.

Sulla base dell'idea di Potter, Mort Smith suppose che, a causa dell'aumento di temperatura, dell'aumento del sovraccarico, dell'alterazione dei minerali e della deposizione di minerali secondari, sia la porosità che la permeabilità delle rocce della crosta diminuisca progressivamente con la profondità. Smith credeva che queste condizioni geologiche fossero diffuse e comuni in tutto il mondo al contrario dei rari serbatoi geotermici naturali. L'ultimo tassello fu messo da Don Brown, esperto di tecniche di perforazione convenzionali. Nacque quindi l'HDR Project (Brown et al., 2012).

Il progetto venne sottoposto al direttore del laboratorio nel novembre del 1970 e venne lanciato nel marzo del 1971. Tre anni dopo l'HDR venne brevettato (Potter et al., 1974). La Figura 1.6 mostra la prima concezione del sistema HDR.

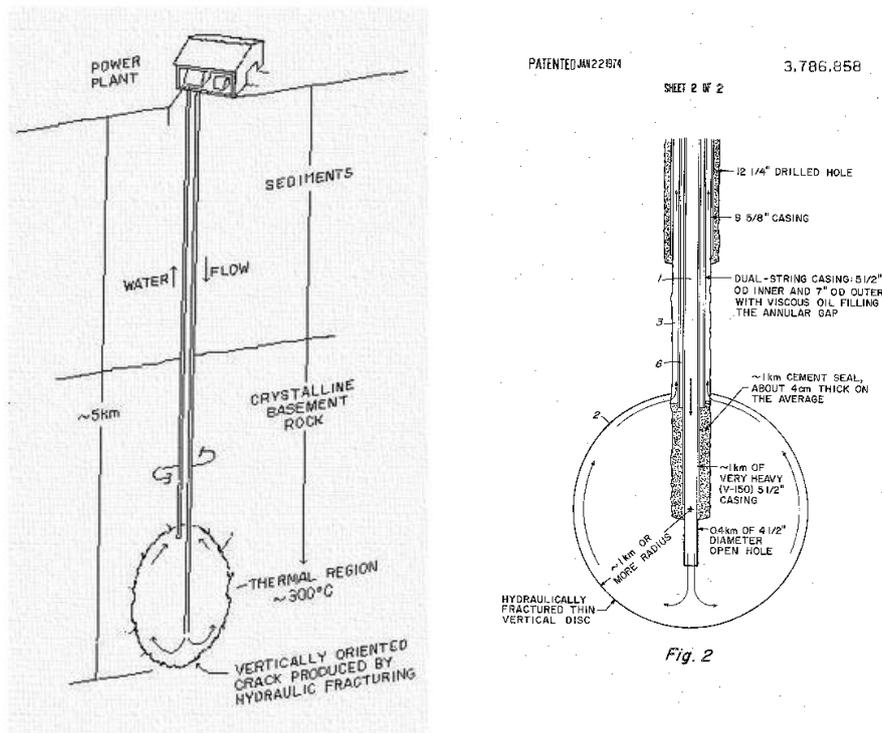


Figura 1.6: Disegni da brevetto originale

1.4.2 Maggiori progetti

Nella Figura 1.7 si osserva il grande interesse rivolto ai sistemi EGS in tutto il mondo:

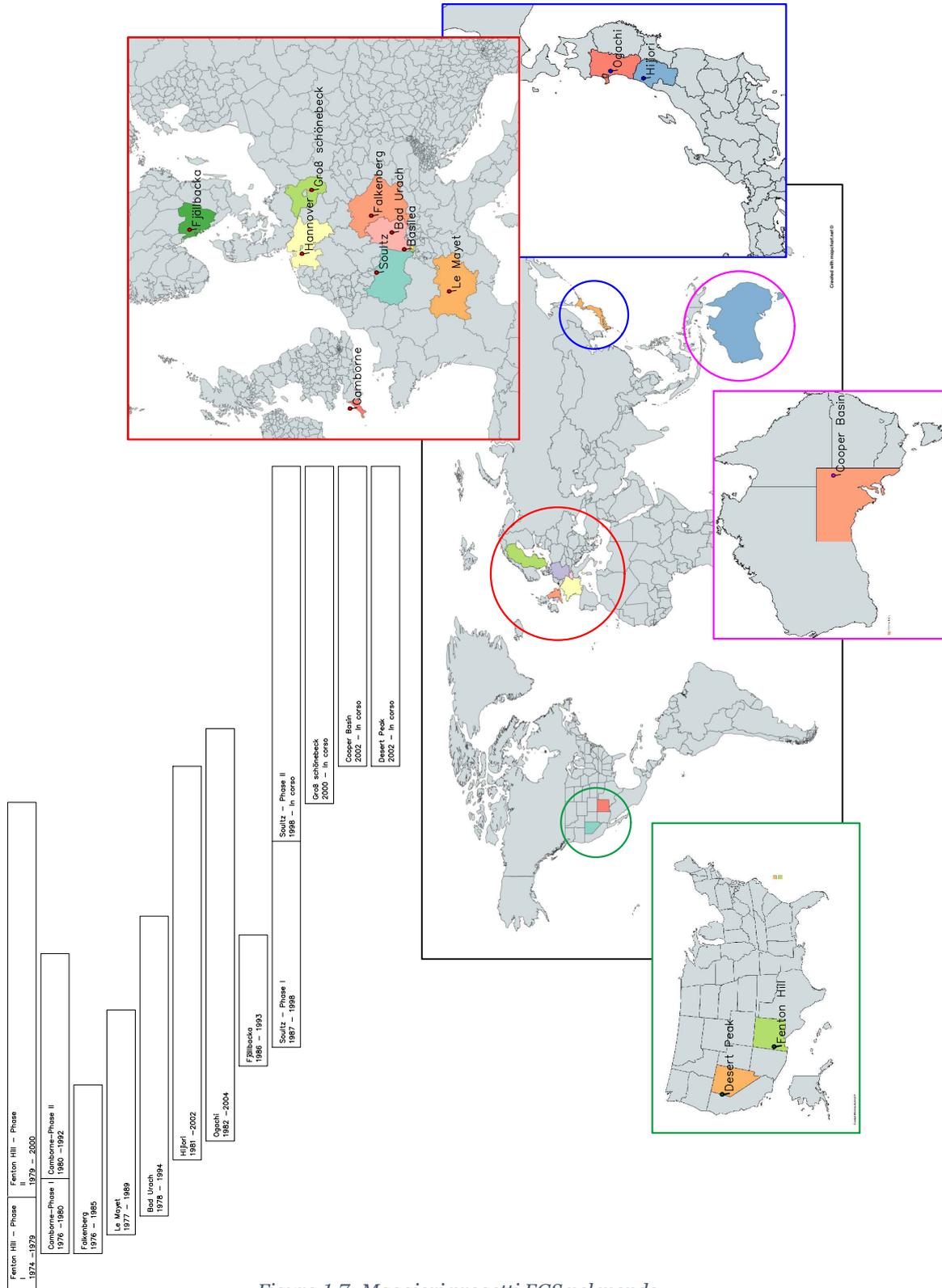


Figura 1.7: Maggiori progetti EGS nel mondo

1.4.2.1 Fenton Hill

Il progetto di Fenton Hill fu il primo esperimento in assoluto con lo scopo di testare e sviluppare metodi per creare un sistema HDR nel basamento cristallino.

Il programma di sperimentazione fu diviso in due fasi principali. La prima, Phase I, iniziò nel 1974 perforando nel basamento cristallino a 3 km di profondità raggiungendo una temperatura di 200°C. Phase II iniziò nel 1979 con la perforazione del pozzo EE-2 a una profondità di 4,4 km e una temperatura del serbatoio di 300°C.

La perforazione del primo pozzo a Fenton Hill, GT-2 (Granite Test-2), iniziò nel 1974 e si fermò a una profondità intermedia di 2042 m dove vennero condotte le prime prove di fratturazione. Successivamente venne approfondito a 2932 m raggiungendo temperature a fondo foro (BHT) di 180°C.

Nel 1975 venne perforato il secondo pozzo, EE-1 (Energy Extraction Hole-1) a una profondità di 3064 m e venne effettuata un'ulteriore fratturazione idraulica ma non si riuscì a realizzare un'adeguata connessione tra i due pozzi. Si stabilì che altre stimolazioni non avrebbero creato il collegamento desiderato pertanto venne riperforato GT-2 direzionandolo in modo da intercettare il serbatoio. Il nuovo pozzo venne chiamato GT-2B e con esso si ottenne la connessione desiderata alla profondità di 2673 m. Tra il giugno 1977 e il dicembre 1980 vennero condotti cinque esperimenti di circolazione del fluido nel sistema Phase I della durata di 417 giorni. Si sono prodotti tra i 3 e i 5 MWt che hanno alimentato una turbina a ciclo binario da 60 kW. La Figura 1.8 mostra il profilo verticale dei pozzi e l'area perforata (Tester and Albright, 1979).

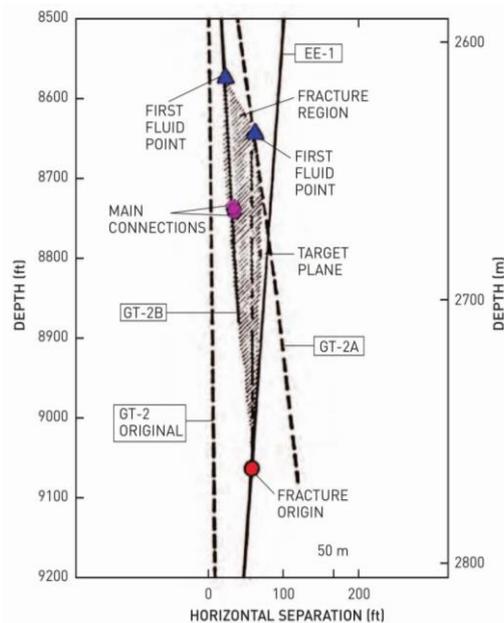


Figura 1.8 Schema dei pozzi e del volume fratturato a Fenton Hill (MIT, 2006)

Nell'aprile del 1979 iniziò la seconda fase del progetto con la perforazione di un nuovo set di pozzi EE-2 e EE-3 più profondi dei precedenti, inclinati di 35° e distanti 380 m. Il più profondo, EE-2, raggiunse una profondità di 4390 m e una BHT (temperatura a fondo foro) di 327°C.

Tra il 1982 e il 1984 i due pozzi vennero fratturati idraulicamente a diverse profondità e la crescita del serbatoio venne monitorata misurando la microsismicità (Figura 1.9).

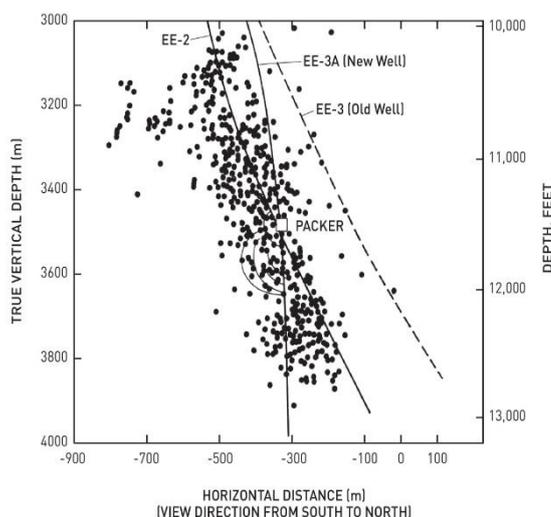


Figura 1.9: Eventi microsismici rilevati durante la fratturazione (MIT, 2006)

Ma il serbatoio non si sviluppò nella direzione prevista e non si riuscì a stabilire un'adeguata connessione tra i due pozzi. È stato determinato che ciò è stato probabilmente causato da uno spostamento imprevisto nel campo di stress, una scoperta importante in questo esperimento.

Sembrava improbabile che ulteriori stimolazioni avrebbero connesso i due pozzi quindi si è riperforato EE-3 direzionandolo verso il serbatoio a partire dalla profondità di 2830 m e arrivando fino a 4018 m con una BHT di 265°C e venne ribattezzato EE-3A. Il nuovo pozzo intercettò diverse fratture realizzando la connessione sufficiente per realizzare dei test di circolazione.

Il primo test di flusso a circuito chiuso del sistema Phase II iniziò nel maggio 1986 e durò per 30 giorni. Durante il test 37000 m³ d'acqua furono pompate nel sistema con una portata compresa tra 10,6 e 18,5 kg/s con pressione di iniezione tra 26,9 e 30,3 MPa. Il 66% del fluido iniettato venne estratto a una temperatura media di 192°C.

Alla fine del test, EE-2 subì un crollo parziale a 3200 m, venne quindi sigillato e riperforato e venne chiamato EE-2A. Dopodiché vennero effettuati nuovi esperimenti per pianificare un test a lungo termine. Venne effettuato un esperimento

alla pressione di equilibrio cioè a pressione inferiore a quella di rottura della frattura (stimata pari a 19 MPa) e durante la prova ci fu una ridotta perdita di fluido e il serbatoio non si ingrandì ulteriormente.

Il primo test di flusso a lungo termine del sistema Phase II iniziò nell'aprile 1992 e continuò per 112 giorni fino a uno stop forzato a causa di un guasto alle pompe di iniezione. L'acqua fredda è stata pompata a portate comprese tra 12,5 e 15 kg/s e ha prodotto temperature superiori a 180°C (Duchane, 1993). Durante questa prima fase le pompe erano di tipo alternativo, azionate da motori diesel. Per la seconda fase si utilizzarono pompe rotative azionate da motori elettrici e la prova durò altri 55 giorni. Durante tutto il test la temperatura a fondo foro rimase la stessa.

A causa della mancanza di fondi gli esperimenti a Fenton Hill sono stati chiusi nel 2000 e il sito è stato dismesso.

Dagli esperimenti svolti a Fenton Hill si sono imparate alcune importanti lezioni:

- È possibile perforare pozzi profondi e direzionati in roccia cristallina compatta e abrasiva ed è possibile adattare le tecniche convenzionali anche nelle zone ad alta temperatura
- Le rocce cristalline a bassa permeabilità possono essere stimulate per creare fratture
- I metodi di pressurizzazione idraulica possono creare sistemi di fratture in grandi volumi di roccia (> 1 km³) sufficienti per sostenere l'estrazione di energia per lungo tempo senza cali di temperatura nel serbatoio
- Il serbatoio HDR può essere utilizzato per periodi di tempo prolungati e utilizzato per generare elettricità
- La connessione tra i pozzi è più semplice da stabilire mappando il volume fratturato e perforando il secondo pozzo nella zona individuata
- Il serbatoio di Phase I, anche se ridotto, fu un utile banco di prova per i test successivi
- Sono stati sviluppati modelli di flusso e di trasferimento del calore che, uniti ai dati raccolti durante i test, possono essere utilizzati per prevedere il comportamento di un pozzo HDR
- Le alte pressioni necessarie per tenere aperte le fratture hanno causato problemi operativi e richiesto una grande quantità di energia

- Tecniche che utilizzando traccianti chimici, emissioni acustiche e geofisica possono essere utilizzate per mappare le fratture create
- È possibile far circolare il fluido nel serbatoio ottenendo fluido a temperature economicamente utilizzabili
- Il modello di fratturazione osservato non corrispondeva a quello previsto dalla modellazione
- Per ridurre le perdite di fluido e la crescita non desiderata del serbatoio l'acqua deve circolare a pressioni non troppo alte
- Abbassando la pressione di iniezione si riduce la perdita di fluido e la crescita del serbatoio ma si riducono anche le portate estratte perché aumenta l'impedenza e quindi il calo di pressione. Al contrario, ad alte portate, le fratture vengono tenute aperte, riducendo l'impedenza e aumentando le portate estratte ma contemporaneamente aumenta la perdita di fluido e la crescita del serbatoio.

1.4.2.2 *Rosemanowes (Camborne)*

Visti gli ottimi risultati ottenuti a Fenton Hill, la Camborne School of Mines intraprese un progetto sperimentale presso Rosemanowes Quarry in Cornovaglia nel granito Carnmenellis. Il progetto fu finanziato dal dipartimento di energia del Regno Unito e dalla Comunità Europea. La temperatura di progetto fu volutamente limitata a 100°C per minimizzare problemi alla strumentazione, quindi sin dal principio l'intento della sperimentazione non fu quello di produrre energia. Il sito venne scelto poiché, grazie all'attività mineraria, era già stata caratterizzata la roccia fino a oltre 1000 m di profondità. Il gradiente geotermico dell'area era di 30-40 C/km e il regime tettonico prevalente è di faglie trascorrenti.

La prima fase del progetto iniziò nel 1977 con la perforazione di un certo numero di pozzetti di prova a una profondità di 300 m con lo scopo di effettuare test di fratturazione.

Per la fase 2A del progetto sono stati perforati due pozzi con una profondità verticale totale di circa 2000 m dove la temperatura prevista era di 80-90°C, entrambi inclinati di 30° rispetto alla verticale e distanti 300 m. Nel 1980 iniziò la perforazione di RH11 (produzione) e RH12 (iniezione) che durò 116 giorni. La temperatura massima raggiunta fu di 79°C. La stimolazione in RH12 iniziò prima con esplosivi e poi con perforazione idraulica con una portata di 100 kg/s e pressione in testa al pozzo di 14 MPa. A causa della natura verticale dei giunti del granito in

quella zona, si pensava che la fratturazione idraulica avrebbe provocato rottura per trazione con formazione di un serbatoio verticale, perpendicolare al minimo stress principale, “a forma di penny”. Tuttavia, il monitoraggio microsismico dimostrò che la maggior parte della rottura era avvenuta a taglio e non a trazione (Batchelor et al., 1983; Pine and Batchelor 1984; Baria et al., 1989). Inoltre, il serbatoio non si sviluppò verso l’alto come previsto ma verso il basso e continuò a crescere in questa direzione per i successivi nove mesi di test di circolazione e si ritenne inadatto a modellare un serbatoio HDR commerciale.

La fase 2B iniziò nel 1983 con la perforazione di un terzo pozzo (RH15) per intercettare il serbatoio creato nella fase precedente. La profondità raggiunta fu di 2600 m con temperature di 100°C. RH12 fu utilizzato come pozzo di iniezione e RH15 come pozzo di produzione primario (Figura 1.10).

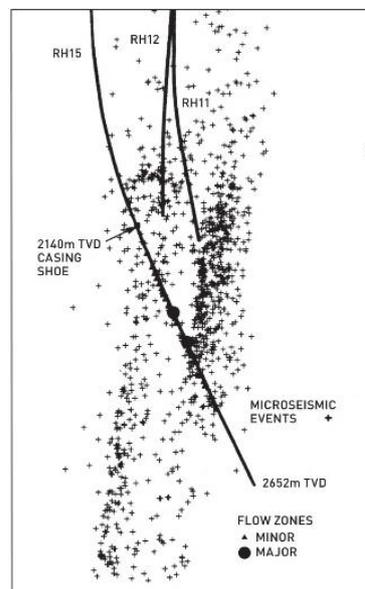


Figura 1.10 Registrazione microsismi durante la stimolazione di RH15 (MIT, 2006)

Una serie di test di flusso sono stati effettuati a partire dal settembre 1986 con portate in aumento graduale. Il serbatoio è stato poi fatto circolare a portate variabili tra i 5 e i 25 kg/s per i successivi 4 anni. Nel caso dei 5 kg/s al pozzo di produzione tornavano 4 kg/s con pressione in testa al pozzo di 4 MPa. Nel caso di 25 kg/s il ritorno al pozzo di produzione era di 15 kg/s con pressione in testa al pozzo di 10,5 MPa. Analisi sui percorsi di flusso dimostrarono che ad alte pressioni il fluido circolava in un percorso preferenziale (corto circuito) tornando in superficie troppo in fretta, senza essersi sufficientemente riscaldato. Al termine dell’esperimento la temperatura del pozzo è scesa da 80,5°C a 70,5°C.

Il lavoro sperimentale di Rosemanowes proseguì con la fase 3A (senza ulteriori perforazioni) con nuovi test. Si ridusse la pressione nel pozzo della fase 2C ma questo provocò la chiusura di alcune fratture vicino al pozzo aumentando l'impedenza. Si pensò allora di utilizzare sabbia come proppant per mantenere aperti i giunti con una stimolazione secondaria utilizzando un gel ad alta viscosità. Questo ridusse significativamente le perdite di acqua e l'impedenza ma abbassò anche la temperatura del flusso. Si concluse che la tecnica vada utilizzata con cautela per la manipolazione dei sistemi HDR.

Un ulteriore esperimento è stato effettuato nella fase 3A: si cercò di isolare la parte di pozzo collegata al cortocircuito con dei packer temporanei. Vennero condotti dei test di flusso ma si ottennero basse portate quindi venne effettuata un'ulteriore stimolazione che però non portò a miglioramenti. Una successiva interpretazione dei risultati ha dimostrato che la più recente zona stimolata aveva provocato una frattura parallela alla precedente ma in gran parte non collegata a questa (Parker, 1989).

Anche dall'esperienza di Rosemanowes si sono imparate lezioni importanti:

- È possibile stimolare fratture naturali per migliorare la permeabilità
- Le fratture create con la stimolazione idraulica non si formano con rottura a trazione ma per scorrimento di giunti preesistenti
- Le fratture naturali sono pervasive nelle rocce cristalline a tutte le profondità e anche se sigillate tendono a scorrere a pressioni inferiori alla roccia intatta
- Il vantaggio dello scorrimento delle fratture è che, grazie alla loro natura irregolare tendono, a rimanere aperte
- Una pressione troppo alta applicata provoca perdita di fluido
- La previsione della crescita della frattura è difficile quindi è preferibile creare prima il serbatoio e poi intercettarlo
- La caduta di pressione (impedenza) dovuta alla bassa permeabilità e alle perdite per attrito è un parametro critico per due motivi: (i) maggiore è la caduta di pressione, maggiore è la potenza di pompaggio richiesta con conseguenti problemi economici (ii) un'alta impedenza richiede maggiori pressioni per ottenere le portate richieste e maggiori pressioni provocano perdite di fluido e crescita della frattura
- A Rosemanowes, è diventato chiaro che tutto ciò che si fa per pressurizzare un serbatoio è irreversibile e non necessariamente utile per l'estrazione di

calore. Ad esempio, pompando troppo a lungo, a una pressione troppo alta si possono provocare movimenti irreversibili della roccia che potrebbero causare cortocircuiti e percorsi preferenziali per l'acqua nel campo lontano.

1.4.2.3 Hijiori

Dal 1981 al 1986 la New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) partecipò allo sforzo di ricerca per lo sviluppo di energia geotermica da sistemi HDR a Fenton Hill. Sulla base di questa ricerca la NEDO condusse studi a Hijiori per determinare se la tecnologia sviluppata potesse essere adattata alle condizioni geologiche del Giappone. Il progetto era situato sul limite meridionale della caldera di Hijiori, zona ad alto gradiente geotermico per la recente attività vulcanica. La zona è stata mappata nel dettaglio e sono state effettuate alcune perforazioni per misurare il gradiente geotermico. Lo stato di stress vicino al bordo della caldera è molto complesso con grandi variazioni di tensione orizzontale e verticale in brevi distanze.

Inizialmente si creò un serbatoio superficiale. Quattro pozzi vennero perforati tra il 1989 e il 1991: uno di iniezione (SKG-2) e tre produttori (HDR-1, HDR-2 e HDR-3). Tutti i pozzi avevano una profondità di circa 1800 m eccetto HDR-1 che arrivò a 2151 m. Tutti i pozzi perforati intersecarono fratture naturali a profondità compresa tra 1550 e 1800 metri e la temperatura massima raggiunta fu di 250°C. La distanza tra i pozzi è stata mantenuta piuttosto ridotta: la distanza da SKG-2 a HDR-1 è di circa 40 m, a HDR-2 di circa 50 m, e a HDR-3 di circa 55 m (Tenma et al., 2001). Poi si creò un serbatoio più profondo, a circa 2200 m usando HDR-1 come pozzo di iniezione e i pozzi HDR-2 e HDR-3 vennero approfonditi (Figura 1.11).

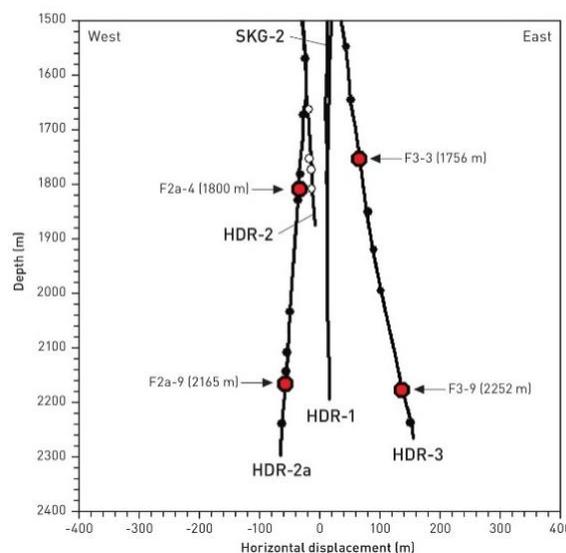


Figura 1.11 Schema pozzi di Hijiori. In rosso l'intersezione con le fratture maggiori (MIT, 2006)

Gli esperimenti di fratturazione idraulica del serbatoio superficiale iniziarono nel 1988 con 2000 m³ di acqua iniettati in SKG-2. La stimolazione è stata effettuata in quattro fasi a velocità di 1, 2, 4 e 6 m³/min. In seguito, è stato effettuato un test di circolazione di 30 giorni iniettando in SKG-2 una portata compresa tra i 17 e i 34 kg/s producendo vapore ed acqua calda da HDR-2 e HDR-3. Durante il test un totale di 44500 m³ d'acqua sono stati iniettati e se ne sono recuperati solo 13000 m³ con una perdita del 70%. Le dimensioni del serbatoio hanno continuato a crescere durante l'intero periodo del test.

Dopo che l'HDR-1 fu approfondito a 2205 m nel 1991, il serbatoio più profondo fu fratturato idraulicamente iniettando 2115 m³ di acqua in tre stadi a velocità di 1, 2, e 4 m³/min. Dopo la stimolazione HDR-2 e HDR-3 vennero approfonditi a 2302 m e vennero effettuati test di circolazione per 25 giorni. L'acqua venne iniettata in HDR-1 a 1-2 m³/min e vapore ed acqua calda vennero prodotti da HDR-2 e HDR-3. In tutto sono stati iniettati 51500 m³ di acqua ma solo il 50% è stato recuperato.

Nel corso del 1996 sono stati effettuati ulteriori test a breve termine in preparazione a quelli a lungo termine nel tentativo di connettere meglio HDR-3 ad HDR-1 nel serbatoio profondo e ridurre le perdite di fluido.

Nel 2000 iniziò un test della durata di un anno con iniezione di acqua a 36°C in HDR-1 a 15-20 kg/s.

Nella seconda fase si iniettò acqua in SKG-2 permettendo di testare sia il pozzo profondo che quello superficiale. La produzione da HDR-2 fu di 5 kg/s a 163°C e da HDR-3 di 4 kg/s a 172°C. La produzione totale di energia termica fu di circa 8 MWt e venne utilizzata per gestire una centrale elettrica binaria da 130 kW. L'analisi dei test mostrò che entrambi i serbatoi erano produttivi (Marsunaga et al., 2000).

A Hijiori si riscontrarono problemi di interazione fluido – roccia. Infatti, durante il test a causa di problemi di incrostazione fu necessario pulire i pozzi di produzione. Inoltre, si osservò che, sebbene la portata di iniezione rimase costante e pari a circa 16 kg/s, la pressione necessaria per iniettarla diminuì da 8,4 MPa a 7 MPa, probabilmente a causa di fenomeni di dissoluzione. Questi fenomeni non sempre sono positivi in quanto possono creare percorsi preferenziali per il fluido. La produzione totale fu di 8,7 kg/s con un tasso di perdita del 45% (Okabe et al., 2000).

Il pozzo HDR-2 si raffreddò drammaticamente da una temperatura di 163°C a circa 100°C durante il test di flusso a lungo termine e pertanto venne interrotto. La variazione di temperatura misurata era più grande di quella prevista dalla modellazione numerica (Yamaguchi et al., 2000).

Con gli esperimenti di Hijiori si dimostrò che:

- Il serbatoio continuò a crescere durante il test di circolazione
- Se le fratture naturali sono già collegate, un'ulteriore stimolazione potrebbe peggiorare la situazione creando percorsi troppo brevi per il fluido che non riesce a riscaldarsi soprattutto se i pozzi sono vicini
- Con la tecnologia attuale è difficile prevedere quale sarà lo stress in sito prima della perforazione e nelle zone lontane dal pozzo rendendo difficoltosa la predizione dell'evoluzione del serbatoio
- Il progetto di Hijiori ha anche mostrato l'importanza di comprendere non solo il campo di stress ma anche il sistema di faglie naturale. Infatti, ai margini delle caldere sicuramente si hanno alti gradienti che permettono la perforazione di pozzi non troppo profondi, ma le condizioni in sito complesse possono rendere la progettazione, costruzione e gestione molto impegnativa.

1.4.2.4 *Ogachi*

Il progetto Ogachi, in Giappone, iniziò nel 1982 ai margini dell'area geotermica di Akinomiya.

Il pozzo di iniezione OGC-1 fu perforato nel 1990 a una profondità di circa 1000 m e a una temperatura di 230°C e vennero effettuate due stimolazioni idrauliche a 10 m dal fondo del foro e a 700 m circa. Il pozzo di produzione OGC-2 venne perforato nel 1992 a una distanza di 100 m dal primo e a una profondità di 1100 m con una temperatura di 240°C.

Nel primo test di circolazione solo il 3% dell'acqua iniettata in OGC-1 riusciva a raggiungere OGC-2 a causa della cattiva connessione. Entrambi i pozzi allora furono ripetutamente stimolati aumentando la connessione tra loro fino a raggiungere un 25% di fluido recuperato.

Prima della fratturazione la permeabilità era di 10^{-6} - 10^{-7} cm/s mentre dopo la stimolazione si è arrivati a 10^{-4} - 10^{-5} cm/s.

Si è inoltre rilevato che solo il 15% del fluido prodotto arrivava dal serbatoio superiore mentre l'85% arrivava dall'inferiore. Il volume fratturato del serbatoio superiore era di 10 m³ mentre quello inferiore di 250 m³.

Vista la scarsa connessione tra i pozzi nel 1999 se ne perforò un terzo, dopo aver mappato la zona fratturata (Figura 1.12).

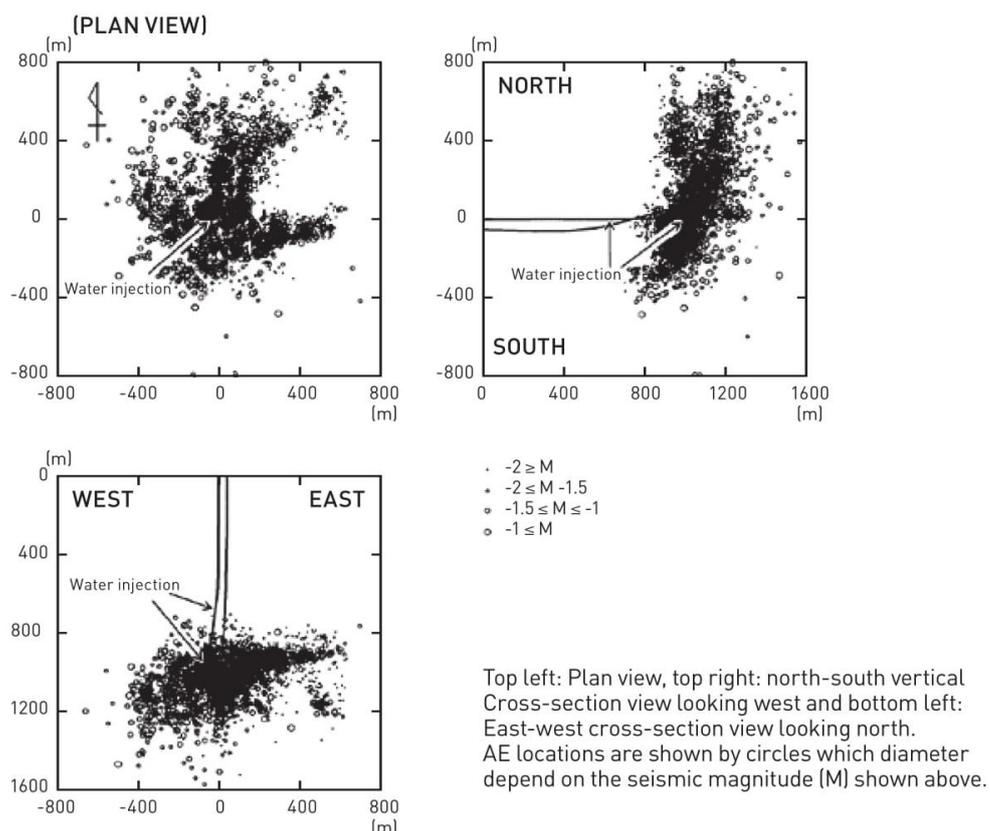


Figura 1.12 Vista tridimensionale del serbatoio di Ogachi (MIT, 2006)

1.4.2.5 Soutz

Il sito di Soutz-sous-Forets, nell'alta valle del Reno, venne scelto poiché, essendo sito dell'ex giacimento petrolifero di Pechelbron, la geologia era molto ben caratterizzata fino a 1500 m. Il gradiente di temperatura nei primi 1000 m era di 110°C/km. Il substrato granitico è stato individuato dalle compagnie petrolifere con indagini di sismica a riflessione a una profondità di 1400 m.

L'obiettivo era quello di sviluppare un progetto europeo condiviso per portare a una produzione commerciale. Inizialmente finanziato dalla Commissione Europea e da importanti ministeri dell'energia di Francia, Germania, Regno Unito, successivamente coinvolse team di ricerca italiani, svizzeri e norvegesi. Successivamente si unirono anche numerosi ricercatori degli Stati Uniti e del Giappone.

Nel 1987 venne perforato il primo pozzo, GPK1, a 2002 m di profondità (Baria et al., 2005). La perforazione incontrò diversi problemi quali controllo direzionale e perdite di circolazione e il budget venne superato. La profondità venne scelta sulla base delle misurazioni effettuate aspettandosi di raggiungere temperature di 200°C a 2000 m ma in realtà si arrivò a 140°C.

Nel 1988 tre ex pozzi petroliferi vennero approfonditi in modo da raggiungere il granito e venne creata una rete di monitoraggio sismico simile a quella realizzata a Fenton Hill e Rosemanowes.

Nel 1990, un pozzo petrolifero esistente, denominato EPS1, venne approfondito da 930 m a 2227 m raggiungendo temperature di 150°C. A causa di problemi di perforazione non si raggiunse la profondità pianificata di 3200 m ma fornì comunque una buona caratterizzazione della rete di fratturazione naturale.

Nel 1991 iniziò la fratturazione in GPK1 con portate elevate nelle sezioni tra i 1420 m e i 2002 m. Sulla base della mappatura microsismica si individuò un volume fratturato di 10000 m³. Probabilmente si intersecò una faglia impedendo ulteriore crescita del serbatoio e perdita di fluido.

Successivamente GPK1 venne approfondito fino a 3590 m grazie anche al lavoro di personale esperto di perforazioni che aveva già lavorato a Los Alamos e Rosemanowes. A questo punto venne nuovamente stimolato nelle sezioni tra 2850 e 3590 m.

Nel 1995, a 450 m da GPK1, venne perforato GPK2 raggiungendo 3876 m e 168°C. Le analisi microsismiche mostrarono che a 2000-3000 m di profondità il granito era interessato da un gran numero di giunti e fratture. I test di fratturazione inoltre mostrarono che a tale profondità la tensione principale orizzontale massima σ_H era quasi pari a σ_V . La tensione principale orizzontale minima σ_h era, invece, molto bassa e vicino alla pressione idrostatica. Questo suggerì che già a bassi livelli di pressione le fratture sarebbero dovute scorrere. Infatti, fratture naturali a 2210 m e 3500 m accettarono fluido già prima della stimolazione.

Nel 1995 venne stimolato GPK2 nelle sezioni tra 3211-3876 m con una pressione massima del fluido di 10 MPa e una portata di 50 kg/s. La mappatura mostrò una crescita del serbatoio verso l'alto con un volume di 0,24 km³.

Un test di circolazione di due settimane è stato eseguito iniettando in GPK2 ed estraendo da GPK1. La portata venne fatta crescere gradualmente da 12 a 56 kg/s (Jung et al., 1996).

Durante il 1995-1996 alcuni test di circolazione hanno utilizzato una pompa elettrica sommergibile per pompare il pozzo di produzione ottenendo un tasso di circolazione di oltre 21 kg/s. L'acqua venne iniettata a 40°C e estratta a 136°C con un'energia termica prodotta di 9 MW_t. Quindi l'utilizzo di una pompa di produzione ha contribuito a massimizzare la potenza estratta nel caso di grandi fratture aperte. Nel 1996 GPK2 è stato nuovamente stimolato con una portata massima di 78 kg/s con un volume totale di acqua di 58'000 m³. Nel 1997 è stato condotto un test di

flusso a ciclo chiuso della durata di quattro mesi iniettando in GPK2 ed estraendo da GPK1 con iniezione e produzione di 25 kg/s con nessuna perdita di fluido. Per la produzione di 10 MW_t era necessaria una potenza di pompaggio di 250 kW_e.

Nel 1997-1998 con l'obiettivo di commercializzare il progetto, nuovi partecipanti vennero coinvolti tra cui Shell e diverse compagnie francesi e tedesche. Con i nuovi finanziamenti si progettò di raggiungere con GPK2 una profondità di 5000 m e una temperatura di 200°C. Questo richiese l'utilizzo di cemento ad alta temperatura e nuovi packer di metallo. La temperatura di 200°C è stata misurata a una profondità di 4950 m.

Quindi GPK2 venne nuovamente stimolato utilizzando 23400 m³ di acqua iniettata a 30-50 kg/s con pressione massima in testa al pozzo di 14.5 MPa. La mappatura mostrò la formazione di un serbatoio di 1,125 km³.

A partire dal 2001 venne perforato il pozzo di produzione GPK3 a una profondità di 5093 m per intercettare l'area fratturata da GPK2. GPK3 venne poi stimolato per migliorare la connessione con GPK2. Il serbatoio è stato testato iniettando in GPK3 e producendo da GPK2. I test hanno stabilito che vi era un eccellente collegamento tra i due pozzi con indice di produttività di 3,5 kg/s/MPa.

Durante i test e la stimolazione di GPK2 e GPK3, si sono verificati eventi sismici indotti che sono stati avvertiti dalla popolazione locale. Non ci sono stati danni, ma il potenziale per eventi più grandi era sconosciuto, pertanto si sono condotti esperimenti per determinare quali condizioni avessero generato gli eventi più grandi e se potevano essere controllati.

Il pozzo deviato GPK4 è stato perforato nel 2003 raggiungendo la profondità di 5105 m. Dopo il completamento, GPK4 è stato stimolato iniettando salamoia pesante per indurre lo sviluppo di fratture in profondità ma non si riuscì a connetterlo agli altri due pozzi probabilmente a causa di una faglia naturale che impedisce la propagazione della frattura e del fluido. In (Figura 1.13) è mostrato lo schema finale dei pozzi a Soultz. Si osserva che partono tutti da uno stesso pozzo e poi si diramano distanziandosi di circa 500 metri.

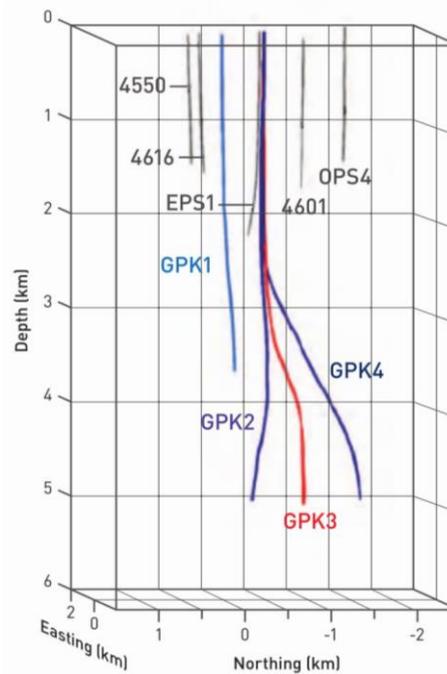


Figura 1.13 Schema pozzi Soultz (MIT, 2006)

Il progetto è giunto nel 2008-2009 alla fase pre-conclusiva con l'installazione di un gruppo geotermoelettrico pilota a ciclo binario da 1,5 MWe con fluido di lavoro costituito da un composto organico. L'acqua iniettata a 5000 metri di profondità viene vaporizzata a 200°C. Il vapore prodotto arriva in superficie ad una temperatura di 175°C con una portata di 35 litri/secondo. Il sistema è a ciclo chiuso e il vapore che ha ceduto il calore al fluido organico, condensa per poi essere re incanalato in profondità. Dopo questa fase di sperimentazione, una volta confermati i dati di produzione previsti dal progetto, la centrale è stata ampliata fino a 10 MW nel 2015.

Il progetto di Soultz ha chiaramente beneficiato dell'esperienza acquisita in altri progetti creando un serbatoio artificiale di dimensioni principali con buoni tassi di produzione.

1.4.2.6 Cooper Basin

L'intero continente australiano è sottoposto a grande stress tettonico, pertanto non è il sito adatto per la creazione di un sistema HDR poiché potrebbe richiedere pressioni elevate e le perdite di fluido potrebbero non essere trascurabili. Tuttavia, la grande estensione del basamento granitico e l'alto gradiente geotermico e la presenza di zone ben caratterizzate geologicamente potrebbero compensare questo aspetto.

Infatti, nel 2002, l'interesse della Geodynamics Limited si concentrò nel Cooper Basin, nell'Australia meridionale, dove le perforazioni di petrolio e gas indicavano

temperature prossime ai 250°C a una profondità di 4 km. Si è stimata la presenza di un substrato granitico di almeno 1000 km². L'esplorazione petrolifera ha incontrato alti gradienti di temperatura e diversi pozzi hanno intersecato il substrato roccioso contenente elevate quantità di elementi radiogenici e altre rocce ricche di uranio che potrebbero portare a temperature elevate a profondità relativamente basse nella crosta.

L'obiettivo del progetto è di dimostrare la fattibilità di un sistema EGS in un'area con un grande basamento granitico ad alta temperatura per la produzione di grandi quantità di energia utilizzando la tecnologia a ciclo binario.

Il primo pozzo di iniezione Habanero-1 è stato completato nell'ottobre 2003 a una profondità di 4421 m e intersecando il granito a 3668 m. I dati raccolti dai pozzi di petrolio e gas e da Habanero-1 stesso suggeriscono che le fratture critiche a scorrimento sono suborizzontali. Alcune fratture incontrate erano soggette a una sovrappressione di 35 MPa oltre la pressione idrostatica e pertanto la perforazione richiese un'attenzione in più. La BHT è di 250°C.

Dopo il completamento, il pozzo è stato stimolato con pressioni del fluido fino a 70 MPa e sono stati pompati 20000 m³ di acqua a portate comprese tra 13,5 e 26 kg/s. Questa prima stimolazione ha creato un volume fratturato di 0,7 km³ a forma di ellissoide con l'asse principale diretto in direzione nordest.

Dopodiché venne perforato Habanero-2 con l'obiettivo di intersecare il serbatoio e ci riuscì a 4325 m. Nel 2005 venne testato ottenendo portate fino a 25 kg/s e una temperatura di 210°C. Nel settembre 2005 Habanero-1 è stato nuovamente stimolato con 20000 m³ di acqua estendendo il vecchio serbatoio di un altro 50%. Nel maggio del 2013 venne installato un primo impianto di 1 MW_e che venne esteso a 40 MW_e nel 2015. L'obiettivo finale è quello di raggiungere i 450 MW_e.

Riassumendo le principali caratteristiche del progetto di Cooper Basin:

- Le sorgenti di calore nel granito radiogenico sono ideali
- Individuare un basamento di granito uniforme ha un grande potenziale come risorsa di calore
- La condizione di overthrust è ideale per la stimolazione e porta allo sviluppo di un serbatoio orizzontale
- Un serbatoio orizzontale consente l'utilizzo di molti pozzi di produzione.

1.4.2.7 Altri progetti

Desert Peak (USA)

Il progetto, promosso e finanziato in parte dal DOE (Dipartimento dell'Energia del Governo degli Stati Uniti) ed eseguito da un pool di Partners privati e pubblici, è

stato avviato nel 2002 partendo da un'area del campo geotermico di Coso dove erano stati già perforati diversi pozzi a 2-3 km di profondità con risultati deludenti, dovuti non alla temperatura, che è anzi di circa 250°C, ma alla scarsa permeabilità del serbatoio, con portata specifica dei pozzi molto ridotta.

Pertanto, per incrementare la portata totale di fluido dell'area attraverso l'aumento della produttività dei pozzi è stato deciso di procedere con operazioni di fratturazione idraulica. La fratturazione diede buoni risultati e ora il sistema EGS produce 1,7 MWe da vecchi pozzi geotermici con profondità media di 1700 metri (Shy-Min, 2018).

Fjällbacka (Svezia)

Il sito di Fjällbacka si trova a nord di Uddevalla, sulla costa occidentale della Svezia, dove il granito Bohus affiora.

Il progetto iniziò nel 1984 come struttura di ricerca sul campo per lo studio degli aspetti idromeccanici legati allo sviluppo dei giacimenti HDR e per affrontare gli aspetti geologici e idrogeologici. Inizialmente si sono effettuati tre sondaggi (Fjb0, Fjb1 e Fjb2) a profondità di 200, 500 e 700 m rispettivamente per caratterizzare il potenziale serbatoio. Una serie di test superficiali e iniezioni in profondità sono state effettuate per valutare la risposta dell'ammasso roccioso. Questi sono culminati nel tentativo di creare un serbatoio a 450 m di profondità per mezzo di un'iniezione accuratamente pianificata in Fjb1 di acqua, gel e proppant.

La microsismicità è stata monitorata con 15 strumenti a componente verticale sull'affioramento di granito e uno strumento a tre componenti bloccato al fondo di Fjb0. Un pozzo aggiuntivo Fjb3 fu perforato a 500 m di profondità nel 1988 per intercettare la frattura creata da Fjb1. La comunicazione tra i pozzi è avvenuta con successo sebbene le prove di flusso indicassero la presenza di un'impedenza di flusso nelle vicinanze di Fjb3. Pertanto, è stata effettuata un'ulteriore stimolazione in Fjb3 riducendo tale impedenza. Una circolazione di 40 giorni del sistema è stata condotta nel 1989 iniettando acqua a 7°C con una pressione di 5 MPa e una portata di 1,8 kg/s ottenendo acqua a 16°C a una portata di 0,9 kg/s con una perdita di fluido del 50%. Si è concluso che: (i) una caratterizzazione dettagliata del serbatoio ha portato a una progettazione dettagliata del programma di stimolazione (ii) essendo situato in una struttura tettonica a scudo in cui alla profondità del serbatoio lo stress minore è quello verticale, si sono formate fratture suborizzontali (iii) la stimolazione idraulica in Fjb1 ha determinato un netto aumento della trasmissività fino a 100 m dal pozzo (iv) le fratture naturali dominano il risultato della stimolazione (v) l'utilizzo del monitoraggio microsismico è stato fondamentale per la collocazione del secondo

pozzo (vi) l'impedenza è un problema che va risolto per consentire una circolazione economicamente accettabile.

Falkenberg (Germania)

Il sito di prova di Falkenberg fu fondato nel nord-est della Baviera nel 1978, dove il granito di Falkenberg si estende essenzialmente fino alla superficie. Lo scopo era quello di condurre esperimenti a piccole profondità con un alto grado di controllo per comprendere maggiormente i sistemi HDR. Il programma di ricerca Falkenberg durò fino al 1983 (Tenzer, 2001). Gli esperimenti principali erano volti a determinare le proprietà idromeccaniche delle nuove fratture create. Utilizzando dei packer è stata stimolata una zona del foro HB4a alla profondità di 252-255 m.

Dopodiché sei ulteriori fori di sondaggio hanno intercettato la frattura creata. La fratturazione iniziò nel 1979 iniettando 6 m³ di acqua nel pozzo HB4a a una portata di 3,5 kg/s con una pressione di 18 MPa. La microsismicità è stata monitorata da quattro pozzi con sismometri a 3 componenti installati all'interno. I dati raccolti suggerirono la formazione di una struttura planare in direzione E-W che immerge di 45° verso sud. Nel 1981 la frattura è stata estesa con una iniezione di 33 m³ e di nuovo nel 1983 con 52 m³. La più lunga prova di circolazione effettuata durò 14 ore a 3,4 kg/s.

Bad-Urach (Germania)

Tra il 1977 e il 1980, fu intrapresa un'indagine su larga scala dell'anomalia geotermica nell'area di Urach, a circa 50 km a sud di Stoccarda. Oltre a esaminare la portata e la natura dell'anomalia, l'intenzione era di valutare la possibilità di usare le falde acquifere calde per il riscaldamento e di esaminare le rocce del substrato per l'eventuale sviluppo di un progetto HDR (Tenzer, 2001). Il lavoro è stato condotto dal Forschungs-Kollegium Physik des Erdkörpers (FKPE), un gruppo comprendente istituti di ricerca accademici e governativi.

I primi lavori consistevano in un'intensa indagine geofisica e geologica dell'area. Questo includeva la perforazione di due pozzi di esplorazione geotermica profondi 800 m (Urach I e II), nel 1970 e 1974, nella formazione del Muschelkalk del Triassico medio.

Nell'ottobre del 1977 si perforò il pozzo esplorativo Urach III. Questo è stato completato dopo 231 giorni di perforazione, raggiungendo una profondità di 3.334 m e penetrando di circa 1.700 m nel basamento cristallino.

Nell'agosto 1979 una sezione di mica-sienite nel substrato cristallino è stata stimolata 7 volte su quattro intervalli di profondità. Di queste quattro una è stata stimolata a foro aperto e tre in zone limitate del foro a una distanza verticale di circa

70 m. Un anello di circolazione è stato stabilito tra le fratture create a foro aperto, 3320 m-3334 m, e la zona isolata a 3292 m-3298 m. Sono stati condotti diversi test di circolazione di cui quello di maggior successo durò 12 ore. Quindi la stimolazione collegò una sezione all'altra di un singolo pozzo.

In caso di applicazioni per uso diretto del calore può essere conveniente per ridurre i costi di installazione.

Basilea (Svizzera)

A Basilea venne sviluppato un impianto pilota per utilizzare l'energia estratta da un sistema EGS per la generazione di energia elettrica e calore per il teleriscaldamento locale. Il nucleo del progetto, chiamato Deep Heat Mining Basel era composto da tre pozzi di 5000 m più due pozzi di monitoraggio superficiali. Ma il sito del progetto si trovava in un ambiente sismicamente attivo e oltretutto nelle vicinanze del centro abitato. L'iniezione di acqua legata all'attività di fratturazione idraulica ha provocato un sisma di magnitudo 3,0 suscitando grande preoccupazione tra il pubblico, pertanto il progetto venne sospeso (Majer et al., 2011).

Le Mayet de Montagne (Francia)

Il sito di Le Mayet si trova a 25 km a sud-est di Vichy in Francia. Verso la fine degli anni Ottanta due pozzi verticali 111-8 a 780 m di profondità e 111-9 a 840 m di profondità sono stati perforati. Si sono utilizzati dei packers per isolare delle porzioni di foro per effettuare multipli esperimenti di stimolazione producendo vari collegamenti tra i due pozzi. Si effettuarono test di stimolazione (30 kg/s), test di fratturazione (70 kg/s) e test di circolazione. I dati microsismici sono stati monitorati da 15 stazioni principalmente a tre componenti che hanno registrato più di 35 eventi.

Un altro aspetto innovativo del lavoro di Le Mayet è stato l'utilizzo di tiltmeters per monitorare la deformazione superficiale che si verifica in risposta all'iniezione di fluido. Questa deformazione riflette il campo elastico derivante dalla dilatazione delle articolazioni/fratture e dovrebbe essere rilevabile se le fratture si dilatano.

In sintesi: (i) i packers sono stati utilizzati per isolare diverse zone in modo da creare diverse zone stimulate (ii) il risultato fu una grande area di scambio termico con buona connessione tra i due pozzi (iii) i tiltmeters sono stati utilizzati con successo per monitorare la crescita delle fratture.

Hannover (Germania)

A causa della loro bassa trasmissività, la maggior parte delle formazioni sedimentarie nel nord della Germania non sono considerate idonee per l'estrazione dell'energia geotermica. Per superare queste limitazioni, il progetto GeneSys è stato

avviato al GEOZENTRUM di Hannover (Behrens et al., 2006) con lo scopo di applicare la tecnica HDR per fornire calore al complesso di edifici del GEOZENTRUM di Hannover.

La tecnica di fratturazione idraulica è stata utilizzata con successo per la creazione di un sistema HDR. Poiché è necessaria una potenza termica di soli 2 MWt per il fabbisogno del GEOZENTRUM si è realizzato l'one-well concept cioè l'idea è di usare uno stesso pozzo per iniezione e produzione, sufficiente ed abbastanza economico per utilizzi diretti del calore. Questa soluzione si dimostrò adatta a fornire calore a grandi edifici o distretti dove è disponibile un sistema di teleriscaldamento.

Per testare il concetto, nel 2003 sono stati condotti una serie di test in situ nel pozzo Hosterberg Z1 in precedenza utilizzato per l'estrazione di gas.

Massicci test di idrofratturazione sono stati eseguiti su uno strato di arenaria nella formazione di Buntsandstone a una profondità di circa 3800 m iniettando più di 20000 m³ di acqua dolce con portate di 50 kg/s e con pressione in testa di 33 MPa. Si è creato un volume di 1000 m³/MPa indicando che la frattura non solo si è propagata nello strato di arenaria ma ha anche fratturato gli orizzonti di argilla adiacenti.

Si è anche dimostrato che la frattura si mantiene aperta durante il rilascio di pressione. Analisi a lungo termine hanno però dimostrato che la portata desiderata di 6,9 kg/s non può essere mantenuta per tempo prolungato perché la resa complessiva della formazione a cui accede la frattura è troppo bassa.

I risultati di test ciclici consistenti in un periodo di iniezione-riscaldamento-sfiato furono molto promettenti dimostrando che questo può essere un concetto alternativo per estrarre calore. Per monitorare la microsismicità indotta è stata installata una rete sismica composta da otto stazioni installate su due cerchi concentrici al pozzo di 800 e 1600 m più una rete di 60 geofoni in superficie. Ognuna delle stazioni era installata in un pozzo profondo 100 m con un ulteriore geofono all'interno. Ma gli eventi misurati sono stati molto pochi rispetto agli esperimenti in granito.

Riassumendo: (i) questo progetto dimostra i benefici della stimolazione in ambiente sedimentario, (ii) il concetto di utilizzare un singolo pozzo non ha funzionato perfettamente perché non c'era connessione tra zona di produzione e di iniezione e quindi la zona di produzione non è stata ricaricata e non è stata in grado di sostenere la produzione a lungo termine, (iii) pochi eventi microsismici sono stati rilevati rispetto alle rocce cristalline.

Groß Schönebeck (Germania)

Il sito di Groß Schönebeck si trova a 50 km a nord di Berlino ed è un importante progetto pilota per lo sviluppo di tecnologie geotermiche in Europa. In tutto il mondo è l'unico progetto per l'applicazione della tecnologia HDR a rocce sedimentarie. Lo sviluppo del progetto EGS di Groß Schönebeck è guidato dal Centro tedesco di ricerca sulla scienza della terra (GeoForschungsZentrum Potsdam, GFZ).

Nel 2003, test di fratturazione idraulica sono stati condotti in vecchi pozzi di esplorazione del gas, approfonditi a 4309 metri e nel 2006 sono stati perforati pozzi di produzione a 4440 metri.

Nel 2007 è stato eseguito un secondo test di fratturazione idraulica. Diversi generatori di elettricità a ciclo binario sono stati installati in sito (550 kWe, 350 kWe e 150 kWe). La potenziale risorsa geotermiche di questo campo è stata stimata approssimativamente pari a 10 MWe.

La caratteristica di questo progetto è l'installazione di un vero e proprio laboratorio in sito collegato a un sistema che permette misurazioni della temperatura con dispositivi elettrici e fibre ottiche. Tuttavia, il trasferimento dei dati alla superficie è problematico e può essere fatto solo in modo discontinuo (Huenges 2013). Inoltre, utilizzando un nuovo metodo per il monitoraggio del fluido, le proprietà fisiche e chimiche di questo vengono misurate durante i test.

Un test di flusso a lungo termine è stato completato nell'aprile del 2012 fornendo importanti dati per le simulazioni numeriche. Un test di corrosione consentirà la verifica a lungo termine del sistema (Shy-Min, 2018).

1.4.3 Riepilogo

Per avere un quadro complessivo, si riepilogano in Tabella 1.1 Tabella 1.2 Tabella 1.3 Tabella 1.4 Tabella 1.5 i risultati e le caratteristiche dei progetti precedentemente illustrati.

In particolare, in Tabella 1.1 si riepilogano i progetti in corso; in Tabella 1.2 i progetti in corso che generano energia elettrica; in Tabella 1.3 e

Tabella 1.4 gli esperimenti conclusi e quelli conclusi che generavano elettricità e in Tabella 1.5 i progetti abbandonati.

Tabella 1.1: Progetti in corso (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)

Progetto	Profondità Pozzi [m]	Descrizione	Tipo di roccia	BHT (°C)	Eventi sismici
Le Mayet	200-800	Ricerca e sviluppo	Granito	22	Microsismi
Groß Schönebeck	4309	Primo laboratorio in sito	Arenaria e roccia vulcanica	145	Trascurabili
Soultz	5093	Ricerca e dimostrazione	Granito	165	M=-2 to 2,9
Desert Peak	1067	Ricerca e sviluppo	Vulcanica e metamorfica	179-196	M=0,03 to 1,7
Cooper Basin	4421	Più grande progetto nel mondo	Granito	242-278	M<3,7

Tabella 1.2: Progetti in corso generanti energia (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)

Progetto	Tipo Impianto	Portata (l/s)	Capacità elettrica installata	Problemi
Groß Schönebeck	Ciclo binario	Non noto	Tre generatori da 550 kW, 350 kW, 150 kW	Non noti
Soultz	Organic Rankine Cycle	30	1,5 MWe (10 MWe nel 2015)	Corrosione dovuta al contenuto di Sali
Desert Peak	Non noto	100	1,7 MWe	Instabilità del pozzo per stimolazione chimica
Cooper Basin	Non noto	30	1 MWe (40 MWe nel 2015, 450 MWe in progetto)	Non noto

Tabella 1.3: Esperimenti conclusi (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)

Sito	Descrizione	Tipo di roccia	BHT (°C)	Profondità pozzo [m]	Eventi sismici
Falkenberg	fratturazione idraulica in superficie	Granito	13,5	500	Microsismi
Hannover	test one well concept	Sedimentaria	150	3800	Non misurati
Fjallbacka	progetto sperimentale	Granito	16	70-500	Microsismi
Rosemanowes	progetto sperimentale	Granito	79-100	2000-2600	Magnitudo max 3,1
Fenton Hill	primo EGS nel mondo	Granito	327	4390	Microsismi
Ogachi	test EGS superficiale	Granodiorite	60-228	400-1100	Microsismi
Hijiori	Sviluppo tecnologia EGS	Granodiorite	190	1805-1910	Microsismi

Tabella 1.4: Progetti conclusi che generavano energia (MIT, 2006), (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)

Progetto	Tipo impianto	Portata (l/s)	Capacità elettrica	Capacità termica	Problemi
Hijiori	Binario	17	130 kWe	8 MWt	Grandi perdite di fluido
Fenton Hill I	Binario	Non nota	60 kWe	3-5 MWt	Crescita del serbatoio diversa da quanto previsto

Tabella 1.5: Progetti abbandonati (MIT, 2006; Shy-Min, 2018; Breede et al., 2013)

Progetto	Descrizione	Periodo	Tipo di roccia	Eventi sismici	Profondità pozzi [m]	Causa
Bad Urach	Singolo pozzo	1977-1981	Gneiss	Microsismi	3334-4445	Collasso parti del pozzo
Basel	Sviluppo EGS	1996-2009	Granito	Frequenti terremoti	5000	Sismicità indotta elevata

Si può dedurre che i progetti EGS sono in fase di sviluppo e apprendimento. Si cerca di superare problemi, acquisire esperienza e introdurre tecnologie avanzate. I progetti già conclusi forniscono lezioni importanti per gli sviluppi futuri e i progetti interrotti offrono una panoramica dei problemi da evitare in futuro.

1.5 Lezioni imparate e problemi da superare

I progressi tecnologici per lo sviluppo della risorsa EGS su scala commerciale sono stati molti negli ultimi anni. Si è ormai perfettamente in grado di perforare pozzi profondi comunicanti per far circolare fluidi a portate ragionevolmente alte (10-30 kg/s) per lunghi periodi di tempo. Si è in grado di mappare le fratture, monitorare la temperatura e la pressione dei pozzi e determinare lo stato di stress con un grado molto alto di precisione.

Si riepilogano le principali nozioni imparate durante gli anni di sperimentazione:

- Sono necessarie grandi portate e lunghi percorsi del fluido. Inoltre, occorre una grande zona di scambio termico o un tempo di permanenza prolungato del fluido per dar tempo all'acqua di riscaldarsi.
- La stimolazione avviene attraverso un'azione di taglio sulle fratture preesistenti. Benché l'obiettivo iniziale fu quello di rompere la roccia a trazione, sembra essere più efficace stimolare le fratture esistenti per farle rompere a taglio. Pertanto, è cruciale comprendere l'orientamento del campo

di stress per progettare una stimolazione di successo. Fortunatamente anche nelle zone tettoniche meno promettenti è stato possibile creare un idoneo volume fratturato. Un altro vantaggio è che una volta provocato lo spostamento relativo, le fratture, per la loro natura irregolare, rimangono aperte. Inoltre, essendo i campi di stress anisotropi non sono richieste alte pressioni per far scorrere giunti favorevolmente inclinati.

- Le fratture che vengono stimulate sono quelle che accettano fluido già nella fase di valutazione del pozzo prima della stimolazione e sono queste che portano alla formazione di un serbatoio di grandi dimensioni. Al momento non si è in grado di creare nuove fratture né si può prevedere se porterebbero alla formazione di un serbatoio di dimensioni sufficienti pertanto occorre uno studio approfondito delle fratture preesistenti e la spaziatura iniziale e finale. Infatti, il calore totale che può essere estratto è regolato dalla spaziatura della frattura poiché la temperatura scende rapidamente lontano dalla faccia della frattura che è a contatto con il fluido iniettato
- Al momento non si dispone di un packer a foro aperto affidabile per isolare alcune zone per la stimolazione. Questa è routine nell'industria petrolifera ma non sono adatti per le alte temperature raggiunte in campo geotermico quindi spesso si stimola l'intero pozzo anche se i test condotti a Soultz con dei packers gonfiabili in alluminio hanno avuto successo ci sarà bisogno di ulteriori studi prima della commercializzazione. Se si vogliono stimolare alcune zone più di altre o se si vogliono creare nuove fratture sarà necessario utilizzare packers adatti alle alte temperature
- La fratturazione idraulica è molto efficace nelle zone vicino al pozzo ma va migliorata per le zone più distanti. Fluidi viscosi, proppant e alte pressioni sono stati utilizzati con successo ma spesso sono limitati dalle alte temperature o molto costosi. Quindi il metodo attuale per stimolare i pozzi consiste nel pompare grandi volumi di acqua dalla testa del pozzo andando a influenzare quelle fratture già predisposte ad accettare fluido e questo non necessariamente è un vantaggio dato che stimolando più fratture di altre si potrebbero creare cortocircuiti
- Per la corretta progettazione del sistema occorre perforare e stimolare il primo pozzo, mappare il volume fratturato e perforare il secondo pozzo. Dopodiché anche il secondo pozzo va stimolato per realizzare una connessione ottimale. Inizialmente si perforavano entrambi i pozzi e si

cercava di connetterli con la fratturazione. Ma l'orientazione dello stress cambia con la profondità o con la presenza di fratture naturali per cui resta complicato determinare a priori il volume stimolato. Quindi è importante scegliere accuratamente la posizione del primo pozzo sulla base della caratterizzazione dello stress in sito, fratture preesistenti, litologia ecc.

- Il monitoraggio delle emissioni acustiche e dei microsismi è fondamentale per la mappatura del volume fratturato e per la successiva generazione del sistema. Per la determinazione dell'efficacia del collegamento tra i pozzi sono utili anche test con traccianti
- L'interazione tra fluido e roccia può avere un effetto negativo sul funzionamento a lungo termine del serbatoio a causa della deposizione di minerali secondari o a causa della dissoluzione poiché fluido e roccia non sono in equilibrio chimico. La dissoluzione non necessariamente porta a miglioramenti poiché potrebbe creare percorsi preferenziali per il fluido e quindi cortocircuiti. Anche la deposizione potrebbe creare problemi come incrostazioni di calcare o corrosione.
- Il pompaggio del pozzo di produzione per evitare perdite di fluido o crescita incontrollata del serbatoio durante i test con portate elevate sembra essere una buona soluzione per evitare il rischio di cortocircuiti. Pompando i pozzi di produzione il liquido circolante è attratto dai produttori da tutto il volume fratturato, riducendo al minimo la perdita di fluido verso il campo lontano e la crescita indesiderata del serbatoio.
- La circolazione per periodi prolungati senza calo di temperatura è possibile a patto che il serbatoio sia abbastanza grande. I primi serbatoi erano piuttosto piccoli quindi era possibile misurare il calo di temperatura mentre nei serbatoi odierni non c'è sufficiente variazione di temperatura misurabile nel tempo per convalidare modelli numerici. Per questo è difficile prevedere per quanto tempo saranno sfruttabili i grandi serbatoi.
- Sono disponibili modelli per la caratterizzazione delle fratture e per la gestione del serbatoio. La simulazione numerica può modellare il flusso del fluido nelle fratture e lo scambio di calore con esse. È possibile variare i parametri come permeabilità, temperatura, pressione di iniezione ecc. per elaborare modelli predittivi. Si possono elaborare anche modelli di interazione fluido-roccia ma i risultati sono incerti.

- In diversi siti, primo tra tutti quello di Basilea, i microsismi generati nel il serbatoio durante la stimolazione e la circolazione sono stati percepiti fino in superficie. Si stanno studiando modelli predittivi che collegano proprietà del serbatoio e parametri operativi come portata, volume iniettato e pressione con la possibilità di generare micro-terremoti.

Ci sono ancora molti aspetti da migliorare per rendere il processo più economico e meno rischioso.

- Selezione del sito: i metodi di esplorazione che possano descrivere il campo tensionale in profondità dalla superficie non sono ancora sviluppati. Diverse perforazioni sono state effettuate dall'industria degli idrocarburi ma spesso i dati raccolti sono privati e non dettagliati a meno che una certa area non sia stata già esplorata per l'energia geotermica. Nuovamente i dati dei pozzi petroliferi sono privati e non disponibili
- Strumentazione: l'imaging del pozzo prima e dopo la stimolazione è necessaria per comprendere e valutare il potenziale sistema e progettare la stimolazione ma questo è complicato in caso di temperature superiori ai 225°C perché le apparecchiature disponibili non sono utilizzabili a temperature così alte. Pertanto, è necessario lo sviluppo di strumentazioni soprattutto di monitoraggio in grado di resistere ad alte temperature.
- Pompe a fondo foro: l'esperienza ha dimostrato che il pompaggio nel pozzo di produzione è essenziale per la gestione a lungo termine del serbatoio. Tuttavia, attualmente solo le pompe ad albero lineare sono in grado di funzionare a lungo termine a temperature maggiori di 175°C e possono essere installate a profondità fino a 600m. si possono utilizzare elettropompe sommergibili ma queste non sono state sufficientemente testate nell'industria geotermica.
- Packers ad alta temperatura o altri sistemi di isolamento: si sa dall'esperienza che quando pompiamo dalla superficie, stimoliamo preferenzialmente le fratture che hanno già accettato liquido prima della stimolazione. Ma se vogliamo stimolare fratture sigillate o crearne di nuove è necessario isolare delle sezioni di pozzo per poter stimolare solo alcune zone. Al momento non ci sono packer affidabili per questo scopo. Alcuni utilizzano elementi elastomerici con temperatura limitata a 225°C o altri completamente in metallo ma essendo dispositivi poco richiesti non sono ben sviluppati e testati.

- Prevenzione e riparazione dei cortocircuiti: il cortocircuito, ovvero lo sviluppo di percorsi preferenziali in serbatoi stimolati, è uno dei principali problemi dei sistemi EGS. I cortocircuiti possono svilupparsi a causa della fratturazione iniziale o durante la circolazione a lungo termine.
- Modelli di progettazione della frattura: modelli in grado di simulare la fratturazione idraulica, la propagazione e l'interazione con il sistema di fratture naturali.
- Quantificazione delle proprietà della roccia: sono necessari metodi per determinare proprietà delle rocce non solo nell'area vicina al pozzo ma anche a una certa distanza. Questi sono necessari per validare modelli sulla fratturazione, sulla circolazione, sull'interazione roccia-fluido.
- Perdita di fluido: il comportamento del serbatoio durante l'iniezione del fluido e durante la circolazione e la relativa perdita di fluido non sono ben compresi soprattutto quelle relative ai comportamenti poroelastici e termoelastici
- Metodi di mappatura delle fratture: il monitoraggio degli eventi microsismici ci fornisce immagini 3d in tempo reale del volume fratturato ma non si ha una comprensione quantitativa di come questo si lega ai percorsi di flusso che definiscono l'estensione dello scambiatore di calore.
- Ci sono ancora diversi problemi legati all'adeguata connessione tra pozzi di produzione e iniezione. Alcune parti possono essere isolate a causa di faglie preesistenti, fratture e cambi di litologia che possono impedire la connessione o renderla troppo forte. Ad esempio, come è accaduto a Soultz dove non è stato possibile collegare GPK4 al resto della circolazione. Sarebbe bene poter fare predizioni prima della perforazione per poterne tener conto durante la pianificazione
- Ridurre le cadute di pressione senza diminuire la vita utile del serbatoio. Infatti, non possiamo scegliere in quali fratture far circolare il fluido e la creazione di un percorso preferenziale può portare al rapido calo della temperatura
- I minerali nelle rocce possono dissolversi o i minerali disciolti nell'acqua possono precipitare cambiando la permeabilità della roccia nel tempo. A Hijiori durante il test di flusso a lungo termine l'ebollizione nel pozzo e nel serbatoio ha causato la deposizione e l'incrostazione nei pozzi ed è stato

necessario pulirli. A Rosemanowes la circolazione a lungo termine migliorò la permeabilità in alcune fratture ma ridusse l'area di trasferimento del calore e il tempo di permanenza provocando un cortocircuito. Dal momento che il fluido circolante non si trova in equilibrio geochimico con la roccia con cui scambia calore si avranno impatti a lungo termine sia sulle proprietà del serbatoio che sull'economia del progetto. Esistono modelli per prevedere alcuni aspetti dell'interazione fluido-roccia. Tuttavia, nessun sistema EGS ha operato ancora abbastanza a lungo per verificare se il comportamento previsto si verifica effettivamente. Questa è una delle aree con maggiore incertezza per la fattibilità dei sistemi EGS. Gli studi di laboratorio in corso dovrebbero aiutare a far luce su questo argomento, ma saranno necessari test a lungo termine in diversi serbatoi reali per verificare i risultati su scala di laboratorio

- Va perfezionato l'utilizzo di fluidi reologici che potrebbero essere utili per deviare la stimolazione nelle aree interessate o per la riparazione dei cortocircuiti

1.6 Creazione e gestione di un sistema EGS

1.6.1 Creazione del serbatoio

L'esplorazione per i sistemi geotermici idrotermali è una proposta ad alto rischio. Non solo la risorsa deve avere una temperatura elevata a una profondità accessibile ma deve anche essere sufficientemente permeabile. Con i sistemi EGS questo sforzo si riduce perché è necessaria solo alta temperatura. Tuttavia, l'economia del progetto può essere migliorata selezionando un sito con le giuste caratteristiche geologiche:

- Siti vicini a centri abitati con infrastrutture (strade, linee elettriche, approvvigionamento idrico) sono da preferire.
- Gradiente di temperatura elevati consentono di raggiungere alte temperature a profondità inferiori riducendo i costi di perforazione.
- Il primo pozzo dovrebbe essere perforato direzionalmente per massimizzare l'intersezione con giunti criticamente orientati
- Grande volume di roccia: è preferibile un sito con un grande volume di roccia omogenea in modo da poter estendere le informazioni ricavate dal primo pozzo al resto della formazione riducendo i rischi

- Spessa copertura sedimentaria: che isola la roccia cristallina con conseguente aumento della temperatura media.
- Presenza di pozzi preesistenti per l'installazione di una rete di monitoraggio microsismico: i pozzi perforati per l'esplorazione per la produzione di petrolio e gas o per l'estrazione mineraria possono essere utilizzati per installare apparecchiature di monitoraggio microsismiche. Siti che possiedono già questi fori possono far risparmiare sull'installazione delle attrezzature. Un sito dove tale sistema di monitoraggio è già attivo fornirebbe dati di base e ridurrebbe i costi.
- Comprensione della litologia e delle fratture preesistenti: se ci sono dati su perforazioni già effettuate si può ridurre il rischio del progetto.

L'obiettivo principale della ricerca EGS è lo sviluppo di test sul campo per migliorare ripetibilità e affidabilità dei metodi di stimolazione dal momento che perforazione e stimolazione sono le fasi più onerose. Il concetto originale sviluppato negli anni '70 che prevedeva di migliorare la permeabilità residua della roccia in situ iniettando il fluido sotto alta pressione in sezioni successive del pozzo non è ancora stato testato adeguatamente a causa di difficoltà tecniche.

Gli step da seguire per la creazione del serbatoio sono i seguenti:

1. Praticare il primo pozzo profondo di iniezione a profondità tale da raggiungere temperature sufficienti (Figura 1.14)

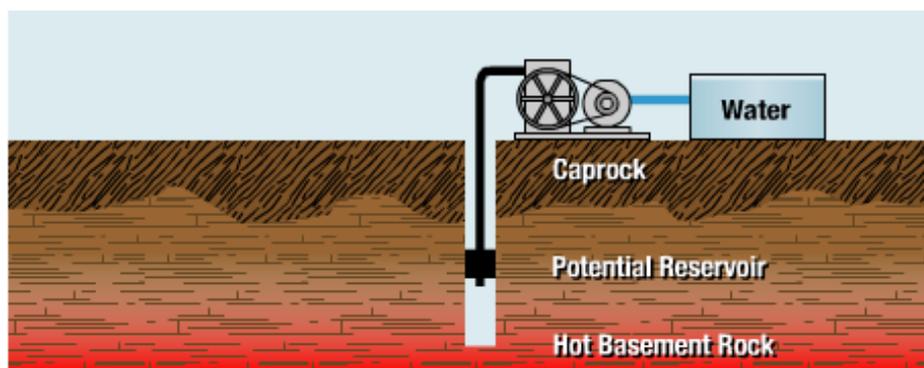


Figura 1.14: Perforazione del primo pozzo

2. Ricavare le proprietà fondamentali del sottosuolo come campo di stress, caratteristiche dei giunti, identificazione di faglie o zone aperte
3. Posizionare il sistema di monitoraggio per controllare la crescita del serbatoio e le condizioni operative

4. Effettuare le iniezioni aumentando gradualmente la portata fino a quando la pressione per ogni fase diventa costante (Figura 1.15)

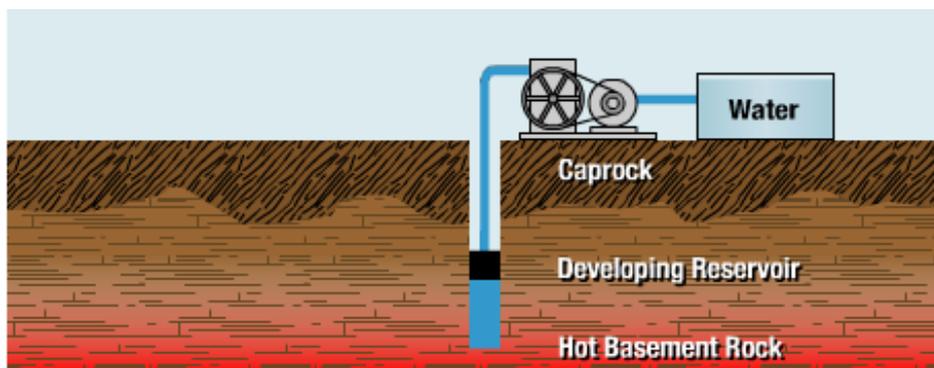


Figura 1.15: Iniezione del fluido

5. Mantenere un'alta pressione di iniezione finché i dati microsismici non mostrano la crescita del serbatoio desiderata (Figura 1.16)

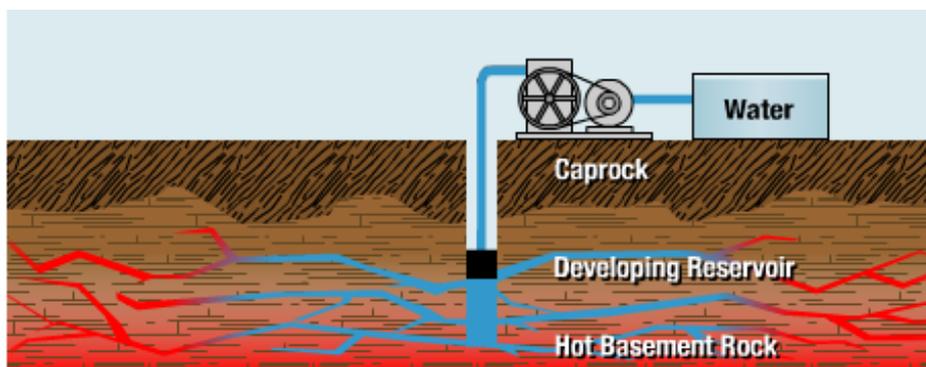


Figura 1.16: Fratturazione dell'ammasso

6. Se necessario utilizzare fluidi con densità appropriata per direzionare la crescita del serbatoio
7. Eseguire un test per valutare le dimensioni del serbatoio e identificare le zone di scorrimento principali
8. Lasciare svuotare il serbatoio ed effettuare test di iniezione a portate inferiori per valutare il miglioramento della permeabilità
9. Perforare il secondo pozzo nella periferia della zona fratturata, distanziandolo sufficientemente dall'altro pozzo e fornirlo di una pompa di produzione (Figura 1.17)

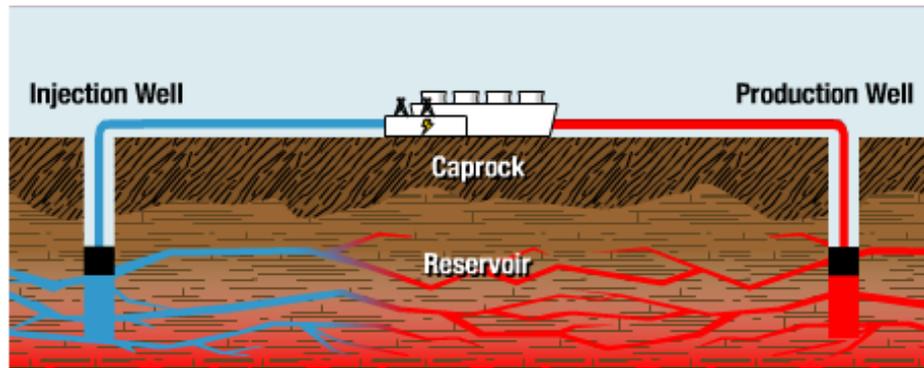


Figura 1.17: Perforazione del pozzo di produzione

10. Stimolare il secondo pozzo gradualmente come il primo per connetterlo meglio al sistema
11. Valutare la connettività tra iniettore e produttore con test di flusso a breve termine
12. Effettuare test con traccianti per valutare il percorso del fluido nel serbatoio e valutare il tempo di residenza e identificare eventuali percorsi di cortocircuito
13. Ripetere i passaggi per eventuali altri pozzi di produzione (Figura 1.18).

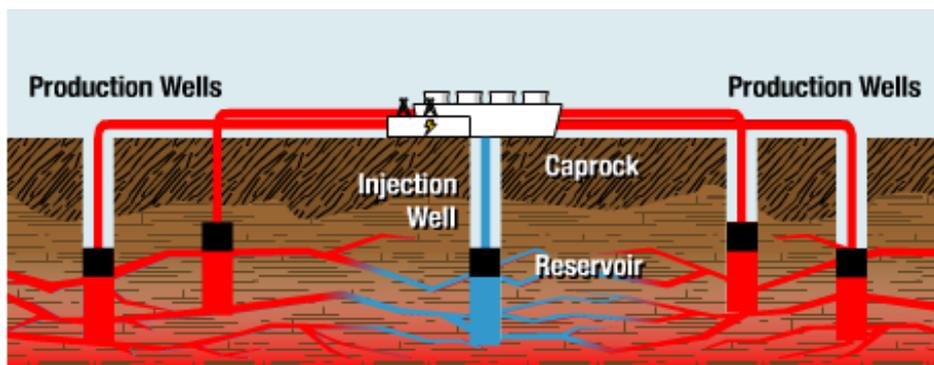


Figura 1.18: Perforazione di altri pozzi di produzione

I passaggi sopra descritti sono molto rudimentali e forse semplificati eccessivamente ma servono per fornire un approccio generale. Ogni area o regione avrà diverse caratteristiche e proprietà e queste dovranno essere prese in considerazione nel progetto di creazione del serbatoio.

1.6.2 Fattori che caratterizzano il serbatoio geotermico

Il serbatoio geotermico funziona come uno scambiatore di calore sotterraneo. La quantità di calore estratto e la conseguente temperatura del fluido dipendono dalla portata massica del fluido e dalla superficie di roccia a contatto con tale fluido. Il

calore è trasferito per conduzione all'interno della roccia, perpendicolarmente alla direzione delle fratture e viene poi trasferito per convezione al fluido. Più è grande questa superficie rispetto alla portata più velocemente il calore verrà trasferito al fluido che in uscita avrà una temperatura circa pari a quella della roccia. Ci sono diversi parametri che influenzano la grandezza di quest'area:

- La spaziatura tra i pozzi
- La spaziatura tra le fratture
- La lunghezza e profondità delle fratture
- La configurazione dei pozzi

Per mantenere la temperatura del serbatoio è necessario un grande volume fratturato con numerosi e lunghi percorsi di frattura.

I percorsi preferenziali di flusso sono un problema poiché l'estrazione di calore da quel percorso sarà molto più grande della capacità conduttiva della roccia necessaria per riscaldarla.

La configurazione dei pozzi può essere di un pozzo di produzione per uno di iniezione, due di produzione e uno di iniezione, quattro di produzione e uno di iniezione. Le condizioni di stress in sito determineranno forma e direzione della fratturazione e sulla base di questo verrà scelta la configurazione di pozzi ottimale. Il vantaggio di avere più pozzi di produzione è quello di non avere "zone morte" in cui il volume è fratturato ma non sfruttato.

1.6.3 L'estrazione del calore

La quantità di calore estraibile dipende da diversi fattori come il gradiente di temperatura, la porosità naturale, la permeabilità della roccia, le sue proprietà fisiche e la suscettività alla sismicità. Questi fattori non solo controllano il processo fisico di estrazione del calore ma in ultima analisi anche la determinazione del costo per la produzione di energia. Per determinare la produttività del progetto occorre definirne la profondità, la temperatura e la portata estraibile.

La percentuale di calore estratto dalle rocce dipende dalla differenza tra la temperatura della roccia e la temperatura dell'acqua circolante nel serbatoio. Più è grande questa differenza più è possibile far circolare velocemente il fluido e di conseguenza è maggiore la quantità di calore estratto. Però se l'acqua fredda iniettata raggiunge il pozzo di produzione senza essersi sufficientemente scaldata, il calore estratto sarà inferiore.

Idealmente, si vuole massimizzare la quantità di energia utile estraibile dal serbatoio. L'energia totale estratta è data dall'integrale nel tempo del tasso di estrazione del calore dal serbatoio. Per un serbatoio EGS, questo valore è legato alla portata del fluido estratta e alla differenza di entalpia tra il fluido prodotto e quello reiniettato. Se si aumenta troppo la portata, la temperatura del fluido diminuisce e di conseguenza la differenza di entalpia specifica. Occorre quindi trovare un giusto bilanciamento.

La roccia compatta è eccellente per immagazzinare calore ma estrarlo è più complicato a causa della bassa conduttività termica. Solo la parte del volume resa accessibile dalla stimolazione può essere considerata parte attiva del serbatoio. Il trasferimento di calore è un processo complesso, non facile da modellare.

Sanyal e Butler (2005) hanno svolto studi di sensitività sull'impatto di diverse proprietà come volume fratturato, spaziatura tra le fratture, permeabilità, porosità e configurazione dei pozzi sulla produzione di un serbatoio. Hanno utilizzato un 3D finite element model partendo da una geometria di fratture predefinita e considerando un volume omogeneamente fratturato. Hanno scoperto che il parametro che influenza maggiormente la produzione di energia è il volume fratturato. Infatti, forse la più importante scoperta del loro studio è che la potenza elettrica netta che può essere ricavata da un volume di roccia fratturata è di 26 MWe/km³. Questo fattore sembra tenersi pressoché costante al variare delle configurazioni di pozzi (2-3-5), spaziatura tra le fratture (3-30 m) e permeabilità (10-100 mD). Hanno modellato il flusso in un sistema fratturato per determinare l'impatto che diversi parametri quali temperatura della roccia, volume fratturato, spaziatura delle fratture hanno sul tasso di calore estraibile e hanno scoperto che per diverse spaziature delle fratture, geometria dei pozzi e permeabilità, la percentuale di calore estraibile da un volume di 10⁸ m³ sotto condizioni di produzione economiche, è pari a circa il 40% del calore contenuto nella roccia. Questo fattore è indipendente da tutti gli altri fattori se il volume stimolato supera i 10⁸ m³, condizione già ampiamente superata a Fenton Hill, Soultz e Cooper Basin dove si ha un volume fratturato di almeno 1 km³.

In realtà per evitare la rapida riduzione di temperatura della risorsa si consiglia un volume fratturato due tre volte più grande. Ottenere una percentuale di estrazione più alta richiederebbe portate non economiche o altre condizioni che accorcerebbero la durata della vita della risorsa.

Questo non è un problema data la capacità raggiunta di stimolare volumi sempre più grandi (Figura 1.19).

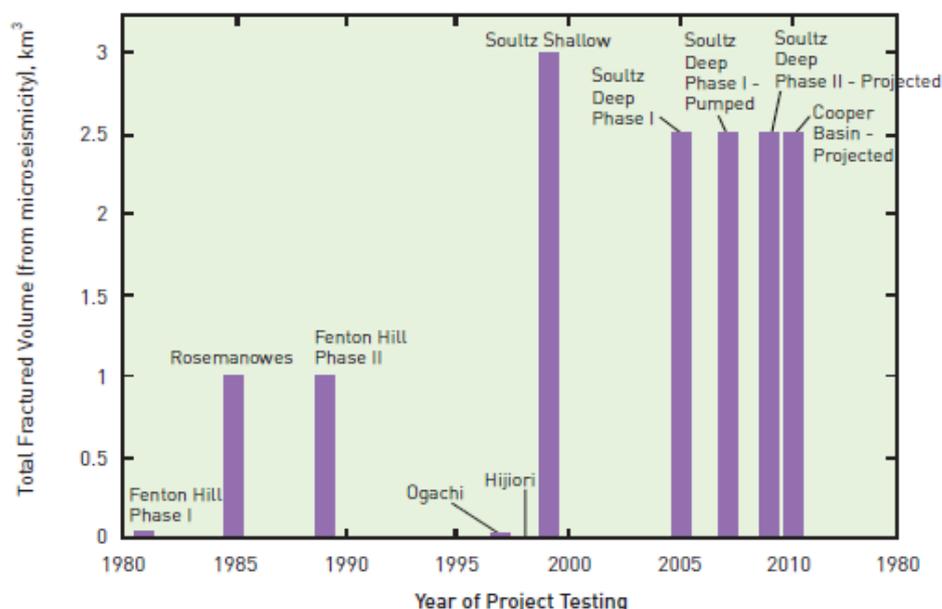


Figura 1.19 Volume fratturato determinato da misurazioni microsismiche (MIT, 2006)

1.6.4 Gestione a lungo termine

Poiché nessuna delle risorse di dimensioni commerciali è stata testata per più di qualche mese non ci sono dati sufficienti per trarre conclusioni sulla gestione a lungo termine.

Un aspetto chiave è la caduta di temperatura nel serbatoio: se eccessivo il serbatoio dovrà essere riperforato e rifratturato o la produzione di energia ne risentirà. Occorre stabilire quanto calo di temperatura può essere tollerato dagli impianti. Un impianto può funzionare con un calo di temperatura del 50% ma la quantità di energia prodotta potrebbe non essere sufficiente neanche per azionare le pompe del sistema di circolazione. Si fissa quindi un limite del 10-15% che permette all'impianto di funzionare senza riduzione dell'efficienza (MIT, 2006).

La gestione del giacimento a lungo termine richiede dei modelli in grado di prevedere l'andamento della temperatura, la pressione e il comportamento chimico dei fluidi e tali modelli devono essere convalidati da dati raccolti. Questi modelli possono essere utilizzati per prevedere il comportamento del serbatoio e apportare modifiche a pressioni portate e al volume fratturato.

Il sistema di circolazione è costituito da pompe di iniezione, pompe di produzione, sistema di conversione superficiale, pozzi, serbatoio fratturato e tubazioni per spostare il fluido. Ognuno di questi elementi porta a cali di pressione e occorre tenerne conto perché rappresenta una perdita di energia per il sistema.

Altri fattori che influenzano la durata del sistema includono i cortocircuiti creati tra i pozzi di iniezione e di produzione, la quantità di acqua permanentemente persa

nella roccia circostante, e la quantità e la gravità dell'attività sismica generata durante il funzionamento del serbatoio. Lo sviluppo di percorsi preferenziali nel serbatoio attraverso i quali i fluidi possono bypassare porzioni della massa rocciosa di frattura è una delle grandi sfide per lo sviluppo del sistema EGS. Per valutare i cortocircuiti si possono utilizzare test con traccianti e modellazione numerica ma occorre un'ulteriore ricerca in questo campo.

Basse perdite di fluido sono auspicabili sia perché aggiungere acqua è una perdita economica sia perché se continua a circolare sempre la stessa acqua a un certo punto si troverà in equilibrio chimico con le rocce del serbatoio limitando deposizione e dissoluzione di minerali. Inoltre, l'acqua aggiunta sarà più fredda dell'acqua circolante contribuendo al raffreddamento del serbatoio.

1.6.5 Produzione di energia

Già dal primo brevetto presentato era chiaro che l'impianto a ciclo binario fosse il più adatto per la conversione dell'energia termica in energia elettrica poiché permette di produrre elettricità lavorando a temperature compresa fra 85°C e 150°C. L'energia proveniente dai fluidi geotermici viene trasmessa, attraverso uno scambiatore di calore, ad un fluido (isobutano, isopentano, ammoniaca) avente la caratteristica di vaporizzare ad una temperatura inferiore rispetto all'acqua. Il vapore prodotto aziona una normale turbina a flusso assiale collegata a un generatore. Dopodiché viene raffreddato, tornando allo stato liquido e il ciclo ricomincia.

La scelta del fluido di lavoro è particolarmente importante e divide in due categorie i sistemi a ciclo binario: i cicli ORC - Organic Rankine Cycle a fluido organico e i cicli a miscela di acqua e ammoniaca, comunemente chiamati cicli di Kalina. La tecnologia degli impianti ORC è commercialmente matura, pur se suscettibile di ulteriori miglioramenti in termini di prestazioni e soprattutto di costi, mentre il ciclo di Kalina, nonostante sia stato proposto già molti anni orsono, è in realtà di recente introduzione nel mondo geotermico.

In un ciclo ORC il fluido geotermico proveniente dal pozzo, ed eventualmente spinto da una apposita pompa sommersa ivi situata, alimenta in controcorrente l'evaporatore e il preriscaldatore e viene successivamente reiniettato nel sottosuolo; all'uscita dell'evaporatore, il vapore del fluido organico entra in turbina, dove si espande trascinando il generatore che produce energia elettrica, e successivamente esso viene condensato ed inviato ad una pompa che ne eleva la pressione fino a

raggiungere il valore di ingresso del preriscaldatore, per poi riprendere così il ciclo (Figura 1.20).

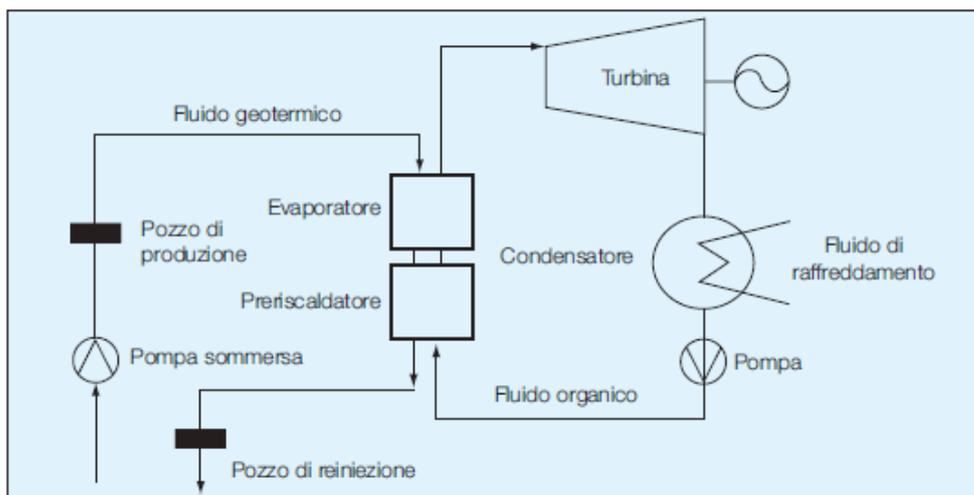


Figura 1.20 Schema impianto a ciclo binario ORC (Bombarda et al., 2010)

Si osserva che, in un ciclo binario, il fluido geotermico cede la sua energia termica senza venire a contatto con l'ambiente, con evidenti vantaggi: le eventuali sostanze nocive presenti (e anche l'eventuale CO₂ disciolta) vengono reiniettate direttamente nel sottosuolo. Un altro vantaggio dei cicli binari, conseguente all'utilizzo del fluido geotermico in fase liquida, è legato ai ridotti problemi di incrostazioni dei componenti: evitando il processo di flash, ed utilizzando eventualmente una pompa sommersa che mantenga allo stato liquido il fluido geotermico, si evita che la concentrazione di sostanze incrostanti superi il limite di precipitazione.

1.7 Conclusioni

Al termine di questa trattazione si può concludere che i problemi che è necessario risolvere prima della commercializzazione dei sistemi HDR, possono essere divisi in due categorie:

- Problemi tecnologici, legati alla mancanza di dispositivi idonei a lavorare ad alte temperature
- Problemi legati alla creazione del serbatoio: non sono ancora sviluppati modelli numerici in grado di predire con sufficiente precisione il processo di fratturazione idraulica e l'evoluzione del serbatoio nel tempo.

Per questo motivo in questa tesi si cercherà di dare un contributo modellando il processo di fratturazione con un software agli elementi distinti.

Capitolo 2

Metodi numerici applicati alla fratturazione idraulica

2.1 Introduzione

Nei sistemi EGS, la funzione principale della fratturazione idraulica è di stabilire una rete di fratture sufficientemente grande e in grado di connettere il pozzo di iniezione a quelli di produzione. Questi obiettivi non sono banali da raggiungere quindi occorre comprendere come si comporta la roccia intatta durante la stimolazione.

Nel capitolo che segue, dopo un'introduzione sul processo di fratturazione idraulica, si spiegherà la necessità di costruire un modello numerico per simulare la fratturazione idraulica e si illustreranno alcuni modelli sviluppati in passato. Dopodiché ci si concentrerà sul metodo numerico che verrà utilizzato in questo studio, il Discrete Element Method, introdotto da Cundall nel 1971.

2.2 Innesco e propagazione della frattura nei pozzi geotermici

Le fratture idrauliche sono normalmente innescate perforando un pozzo nel serbatoio e aumentando la pressione in una zona limitata del pozzo fino a rompere le pareti. Un valore approssimato della pressione necessaria per fratturare si può valutare come:

$$p = 2\sigma_h - p_f + T_0 \quad (1)$$

Dove σ_h è la tensione principale minore, p_f la pressione del fluido e T_0 la resistenza a trazione della roccia. Quando il valore di rottura viene superato si innesca la frattura.

Il fenomeno che usualmente si osserva è la formazione di una frattura a doppia ala in direzione perpendicolare alla tensione principale minore (Figura 2.1):

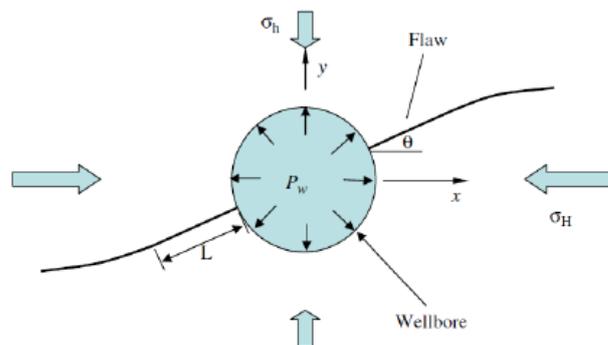


Figura 2.1 Frattura a doppia ala (Zhang et al., 2011)

In realtà le fratture si innescano in punti con difetti locali e poi tendono ad allinearsi in direzione normale allo stress minore.

Considerando una roccia omogenea ideale, le fratture tenderanno a propagarsi in direzione normale alla minima tensione principale. Questo accade perché quando una frattura si genera, aumenta il volume che occupa la roccia e tenderà quindi a espandersi nella direzione che richiede meno lavoro quindi perpendicolarmente alla tensione minore.

Si genera quindi un serbatoio di forma ellissoidale con l'asse principale diretto come la tensione principale maggiore (Figura 2.2):

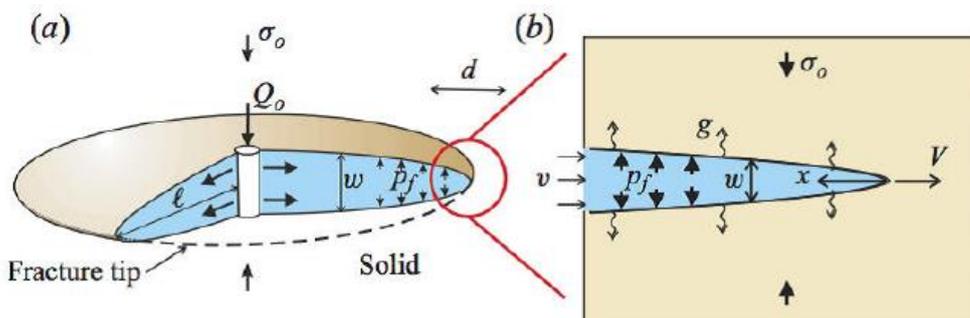


Figura 2.2 Illustrazione di una "penny-shaped fracture" (Fairhurst, 2013)

Un criterio semplificato per la propagazione della frattura:

$$\sigma - p_f < T_0 \quad (2)$$

dice che la pressione del fluido deve superare lo stress agente e la resistenza a trazione della roccia. Pertanto, la propagazione della frattura dipende dal flusso del fluido e dal comportamento della massa rocciosa in sito.

Ma ci sono altri effetti secondari che possono influire sul comportamento della frattura limitando la previsione e la comprensione del processo di fratturazione. Uno di questi effetti è la resistenza a trazione della roccia, valore da superare per innescare la frattura. Ma questo valore è spesso più alto della pressione necessaria a rompere a taglio le fratture ed è per questo che avviene prima lo scorrimento su giunti preesistenti che la rottura a trazione.

Inoltre, la crosta terrestre è stata esposta per milioni di anni ad alterazioni e cambiamenti come stress dovuti ai movimenti tettonici, cambiamenti mineralogici ecc. che hanno causato eterogeneità nelle proprietà della roccia. Tutti questi fattori possono influenzare il comportamento della frattura, deviandola o arrestandola.

Questi effetti vanno previsti per poter fratturare con successo il serbatoio, evitando che la frattura si diriga in direzioni non desiderate o che non si propaghi per la distanza desiderata. In questo modo i pozzi potrebbero non essere efficacemente collegati.

Per conoscere questa eterogeneità abbiamo a disposizione pochi dati sismici e i dati ricavati dalla perforazione e non sono sufficienti per comprendere il comportamento di un serbatoio di 1 km³.

2.3 Fratturazione nei sistemi EGS

Nei primi progetti si credeva che il basamento cristallino fosse intatto e praticamente impermeabile. Seguendo questa ipotesi si cercavano di creare percorsi artificiali da iniettore al produttore perforando pozzi paralleli alla tensione principale minore e stimolando sezioni isolate del pozzo per rompere la roccia a trazione. Questo concetto è stato applicato a Fenton Hill con scarso successo (Figura 2.3a).

Successivamente si è scoperto che anche il substrato cristallino presenta fessure e fratture naturali e che era più semplice stimolare queste che crearne di nuove (Figura 2.3b).

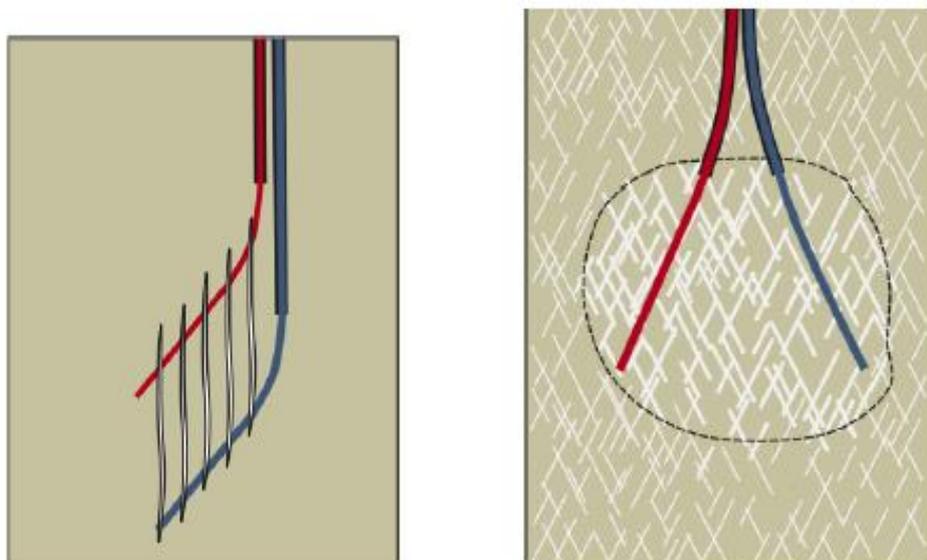


Figura 2.3 A sinistra (a) il concetto iniziale del Los Alamos National Laboratory, a destra (b) il concetto moderno di EGS (Jung, 2013)

2.3.1 Riepilogo dei test di fratturazione

Si riepilogano in Tabella 2.1 i risultati e le procedure degli esperimenti di fratturazione condotti indicando con V il volume iniettato, Q la portata, P la pressione e A l'area fratturata (si indica l'area e non il volume vista la natura bidimensionale della frattura) (Jung, 2013):

Tabella 2.1: Riepilogo test di fratturazione svolti (Jung, 2013)

Progetto	Stato tensionale	Nome pozzo	Viniett [m3]	Qiniett [l/s]	P [MPa]	A [km2]
Falkenberg	normal	HB4	25	3,5	2,2	0,014
Fenton Hill II	normal	EE2	22000	108	38	0,7
Rosemanowes	strike slip	RH12	18500	20-90	14	0,6
Rosemanowes	strike slip	RH15	5700	200	15	0,04
Hijiori	normal	SKG-2	2000	17-100	15	0,15
Hijiori	normal	HDR-1	2100	17-67	26	0,25
Ogachi	reverse	OGC-1	10140	11	19	0,5
Ogachi	reverse	OGC-1	5440	8	22	0,3
Soultz I	strike slip	GPK1	25300	0,2-36	9	1
Soultz I	strike slip	GPK2	28000	12 to 50	12	0,8
Soultz II	strike slip	GPK2	58000	78 kg/s	-	-
Soultz II	strike slip	GPK2	23400	30-50	14,5	3
Cooper Basin	reverse	Hab1	20000	14-26	70	3
Basel	strike slip	Basel1	11650	0,2-55	30	0,9

Si può osservare che le condizioni dei test sono molto variabili. Le uniche costanti per quasi tutti i test sono il tipo di roccia (granito e granodiorite) e il fluido. In tutti gli altri test i parametri e le condizioni sono abbastanza variabili: la condizione di stress varia da normale a inversa, la pressione va dai 2 ai 70 MPa, volume iniettato da 20 m³ a 35.000 m³, portate da 0,2 l/s a 200 l/s. Inoltre, alcuni test sono stati eseguiti con portata costante, altri con portate incrementate gradualmente. In tutti i casi le nubi sismiche sono approssimativamente bidimensionali. Rapporto larghezza-lunghezza dell'asse varia da 0.3 a 3.

Le nubi sismiche nelle regioni di strike-slip sono verticali o subverticali con una tendenza generale leggermente al di fuori della direzione dello sforzo orizzontale massimo. Per le condizioni di stress normali (Hijiori, HDR-1 e Fenton Hill, EE2) le nuvole sismiche si sono immerse di 60 ° o 65 ° rispettivamente verso la direzione della tensione orizzontale minima. Per le condizioni di reverse stress (Cooper Basin e molto probabilmente Ogachi) le nubi sismiche sono orizzontali o suborizzontali.

2.4 La necessità del modello numerico

Le formazioni sotterranee sono caratterizzate da un complesso sistema di variabili che fanno della fratturazione idraulica un problema non compiutamente definito che richiede ulteriori ricerche.

La geometria del volume fratturato è dominata da vari fattori come le proprietà meccaniche delle rocce, le condizioni in sito, le proprietà reologiche del fluido di fratturazione e l'eterogeneità locale come le fratture naturali e i piani di faglia. Per poter controllare la creazione del serbatoio è importante avere un appropriato modello di propagazione.

Il modello concettuale classico della fratturazione idraulica prevede il propagarsi una singola frattura a partire dal pozzo (McClure, 2012) trascurando l'effetto delle fratture preesistenti che svolgono un ruolo critico nei sistemi EGS. Questo modello concettuale è ancora utilizzato nella progettazione e nella modellazione di fratture idrauliche in contesti convenzionali (McClure, 2012). Tuttavia, nei casi di complesse reti di fratture questo approccio può risultare eccessivamente semplificato.

Infatti, come visto nel Capitolo 1, in molti progetti EGS si è dimostrata la grande influenza che le fratture preesistenti esercitano nella creazione del serbatoio ma i dettagli non sono completamente compresi.

Prima della commercializzazione della risorsa EGS ci sono ancora diverse sfide da superare compresa la capacità di prevedere in modo affidabile la fratturazione idraulica e l'interazione con il sistema di fratture naturale, come creare un efficiente

scambiatore, come stimolare e sostenere nel tempo il flusso di fluidi, come stimare l'evoluzione del serbatoio nel tempo.

È molto difficile studiare analiticamente il problema quindi diventa indispensabile la modellazione numerica.

I fattori critici che controllano l'estensione e l'interazione tra le fratture idrauliche e il sistema naturale includono: (1) la rete naturale stessa compreso il suo orientamento relativo al campo tensionale e la sua connettività (2) le proprietà meccaniche delle fratture compreso angolo d'attrito, eventuale cementazione, resistenza a trazione e apertura iniziale (3) le condizioni tensionali in sito (4) i parametri operativi come la velocità di iniezione, la viscosità del fluido, il volume iniettato che influiscono sul campo tensionale.

La rapida crescita della potenza del computer e della modellazione ha portato allo sviluppo di tecniche numeriche che possono fornire un approccio potente per l'analisi sistematica e approfondita di questi problemi.

Considerando molte variabili diverse la simulazione numerica della fratturazione idraulica offre un mezzo per prevedere l'interazione delle fratture idrauliche indotte e naturali, fattore necessario per la progettazione della stimolazione e del comportamento del serbatoio a lungo termine.

I metodi di modellazione numerica permettono di rappresentare con un'adeguata precisione la geometria di un sistema tenendo conto del suo comportamento tenso-deformativo. Nel campo dell'ingegneria sono stati sviluppati diversi approcci di analisi numerica che si possono classificare in due gruppi:

- I metodi al continuo (Finite Element Method (FEM), Boundary Element Method (BEM), Finite Difference Element Method (FDM)): permettono di schematizzare il sistema in unità elementari le quali, pur deformandosi, non possono separarsi
- I metodi al discontinuo (Discrete Element Method (DEM), Finite Distinct Element Method (FDEM)): si può modellare il sistema come un assemblaggio di corpi rigidi o deformabili che interagiscono tra loro nei punti di contatto

Il vantaggio dei metodi al discontinuo è che i blocchi possono separarsi o creare nuovi contatti. In questo modo è possibile simulare il processo di fratturazione.

Al fine di comprendere il corretto comportamento di un ammasso roccioso fratturato un modello numerico deve rappresentare due tipi di comportamento meccanico:

quello del materiale solido dei blocchi e quello delle discontinuità (Nagel et al., 2013).

Un buon modello di fratturazione idraulica dovrebbe anche essere in grado di riprodurre la deformazione dei blocchi, il flusso di fluido all'interno della frattura e la pressione che il fluido applica al solido, insomma un classico esempio di problema accoppiato.

Esiste un'incredibile diversità in letteratura nella modellazione della stimolazione idraulica. Questa diversità riflette la profonda incertezza che interessa i meccanismi di stimolazione del sottosuolo, la difficoltà di convalidare i modelli con i dati, il gran numero di metodi numerici disponibili e il diverso bilanciamento tra simulazione del problema reale ed efficienza.

I primi modelli applicati dall'industria petrolifera erano basati su modelli semi-analitici basati su risultati sperimentali (Hubbert e Willis, 1957) e vennero successivamente integrati con simulatori numerici (Settari, 1979). Ma con questi modelli non sono facilmente gestibili le eterogeneità delle rocce.

Il codice agli elementi distinti è stato sviluppato per studiare la fratturazione e successivamente esteso per studiare la fratturazione idraulica (Al-Busaidi et al., 2005).

I modelli che trattano la stimolazione idraulica come una singola frattura planare di una determinata estensione (Murphy et al., 1981, Hosanski et al., 1984) che si propaga lontano da un pozzo, oppure una combinazione fratture parallele (Nicol e Robinson, 1990) sono ampiamente utilizzati nell'industria e in ambito accademico (Adachi et al., 2007; Meyer and Associates, 2012) ma non sono idonei a rappresentare complesse reti di fratture. Recentemente sono stati introdotti perfezionamenti in questi semplici modelli, sia per migliorare gli schemi numerici richiesti dall'uso di leggi reologiche non lineari (Kolditz e Diersch, 1993), e per spiegare i processi termo-meccanici accoppiati (Kohl et al., 1992 come citato in Hayashi et al., 1999) che in precedenza non erano adeguatamente considerati. Alcuni modelli discreti di frattura trascurano gli stress causati dalla deformazione delle fratture riducendo la complessità dell'implementazione e aumentando l'efficienza. Con questo approccio, è possibile eseguire simulazioni su grandi reti di frattura discrete a scala di bacino.

La maggior parte dei risultati pubblicati utilizza modelli accoppiati con un numero limitato di fratture. Alcuni studi hanno indagato lo scorrimento indotto su una o poche fratture preesistenti (Baisch et al., 2010; Zhou e Ghassemi, 2011; Safari e Ghassemi, 2011 come citato in McClure, 2012) fino ad alcune dozzine di fratture

(Pine e Cundall, 1985; Asgian, 1989; Last and Harper, 1990; Hicks et al., 1996; Swenson e Hardeman, 1997; Rachez e Gentier 2010 come citato in McClure, 2012). Alcuni hanno studiato la propagazione di fratture multiple con nessuna frattura preesistente (Tarasov e Ghassemi, 2012; Roussel e Sharma, 2011 come citato in McClure, 2012).

Alcuni hanno combinato la propagazione di nuove fratture e fratture preesistenti su reti fino a dozzine di fratture (Damjanac et al., 2010; Nagel et al., 2011, 2012; Fu et al., 2012, Weng et al., 2011; Rogers et al., 2011 come citato in McClure, 2012)

Con l'aumentare delle dimensioni e della complessità della rete di frattura le difficoltà di modellazione crescono notevolmente. I metodi agli elementi finiti e alle differenze finite richiedono la discretizzazione dell'area o del volume intorno alle fratture, e questo può portare ad un numero molto grande di elementi per reti complesse e geometrie di frattura arbitrarie. Sebbene i modelli basati sul continuo hanno dimostrato di essere preziosi nella modellazione della deformazione e della plasticità, non sono efficienti per catturare la fisica completa della frattura.

I metodi degli elementi al contorno (BEM) sono inefficienti per problemi molto grandi perché richiedono la risoluzione di matrici dense.

Il metodo degli elementi discreti (DEM) supera tale difficoltà in quanto è possibile simulare spostamenti e distacchi di frammenti solidi. Per studiare il comportamento dei serbatoi EGS, un modello DEM è un buon candidato perché rappresenta la matrice rocciosa come un insieme di elementi discreti che possono distaccarsi quindi è adatto per modellare l'innescò e la propagazione della frattura.

2.5 Metodi agli elementi discreti

Il metodo agli elementi discreti venne introdotto nel 1971 da Cundall che descrisse l'analisi degli ammassi rocciosi come la combinazione tra blocchi rigidi e giunti con una certa rigidità.

La principale caratteristica del DEM è la possibilità di riprodurre spostamenti e rotazioni degli elementi (blocchi o particelle) inclusi completi distacchi o nuovi contatti.

L'interazione tra elementi viene trattata come un processo dinamico che raggiunge l'equilibrio quando le sollecitazioni interne al sistema sono bilanciate. Le forze e gli spostamenti del mezzo vengono aggiornati ad ogni interazione in base alla posizione e al movimento relativo dei singoli elementi. Nel DEM la risposta di un sistema discreto a un carico applicato è data dalla risoluzione dell'equilibrio

dinamico per ogni blocco. Il movimento è il risultato della propagazione attraverso il sistema di blocchi di una perturbazione causata, ad esempio, da un carico applicato.

Il flusso si muove solo attraverso i giunti mentre la matrice rimane impermeabile e occorre svolgere un'analisi idromeccanica accoppiata. Infatti, la permeabilità dipende dalla deformazione meccanica e il comportamento meccanico dipende dalla pressione del fluido.

L'equazione del moto è risolta con approccio FDM esplicito con un dato timestep Δt e questo è un vantaggio poiché consente di risolvere problemi complessi senza risolvere grandi matrici. L'estensione del timestep deve essere tale che velocità e accelerazione siano costanti in Δt e deve essere sufficientemente piccolo affinché la perturbazione si propaghi da un elemento a quello immediatamente vicino.

L'approccio esplicito FDM prevede di seguire questi passi:

- Per ogni timestep le forze, dovute a tensioni o carichi applicati, vengono computate per ogni blocco
- Si risolvono le equazioni del moto e si determinano nuovi valori di velocità e spostamento dovute alle forze applicate:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F\} \quad (3)$$

Dove $[M]$ è la matrice delle masse, $\{\ddot{u}\}$ è il vettore delle accelerazioni, $[c]$ è la matrice di smorzamento, $\{\dot{u}\}$ è il vettore delle velocità, $[k]$ è la matrice delle rigidità, $\{u\}$ è il vettore degli spostamenti e $\{F\}$ è il vettore delle forze applicate

- Si determinano le deformazioni
- Applicando le leggi costitutive si determinano le tensioni da cui si computano le forze e si ricomincia il ciclo

2.5.1 Simulazione della fratturazione

Predire il processo d'innescio della fratturazione idraulica e il processo di propagazione della frattura, dovuto all'interazione tra fluido e roccia, è molto complicato e tuttora oggetto di studio.

Il comportamento delle discontinuità e la loro interazione nel sistema roccioso sono ben sviluppati nel DEM tuttavia, per creare blocchi distinti e fare un'analisi tensionale, è necessario utilizzare giunti "persistenti", cioè giunti che vengono definiti durante la creazione della geometria e che rimangono costanti nel tempo,

mentre per la modellazione del processo di innesco servono dei giunti “non persistenti” che nascono con l’avanzamento della frattura stessa.

Questo problema viene superato utilizzando dei giunti fittizi per discretizzare l’intero dominio in blocchi poliedrici, in particolare in grani Voronoi (Hamidi et al., 2014). Per garantire un’analisi realistica i parametri di resistenza dei giunti fittizi devono essere tali che il comportamento del volume discretizzato sia uguale al comportamento del volume intatto.

Questo è giustificabile dal fatto che il materiale roccioso sia discontinuo non solo alla scala dei giunti e delle faglie ma anche alla microscala. Infatti, si hanno microfratture, bordi di grano e porosità che influenzano il comportamento meccanico della matrice rocciosa. Per rocce fragili sotto stress compressivo, l’innesco della frattura è in gran parte governato da questi microdifetti. La forza di compressione esterna viene trasformata in forza di trazione interna tra i blocchi e in forza di taglio lungo i giunti.

In Figura 2.4 (a) viene mostrata la struttura olocristallina del granito osservata con microscopio petrografico, la Figura 2.4 (b) mostra un’immagine SEM di una superficie di frattura appena formata in un quarzo mentre le immagini (c) e (d) mostrano dei modelli in 3DEC. Se si confrontano le immagini reali col modello si osserva che sono molto simili.

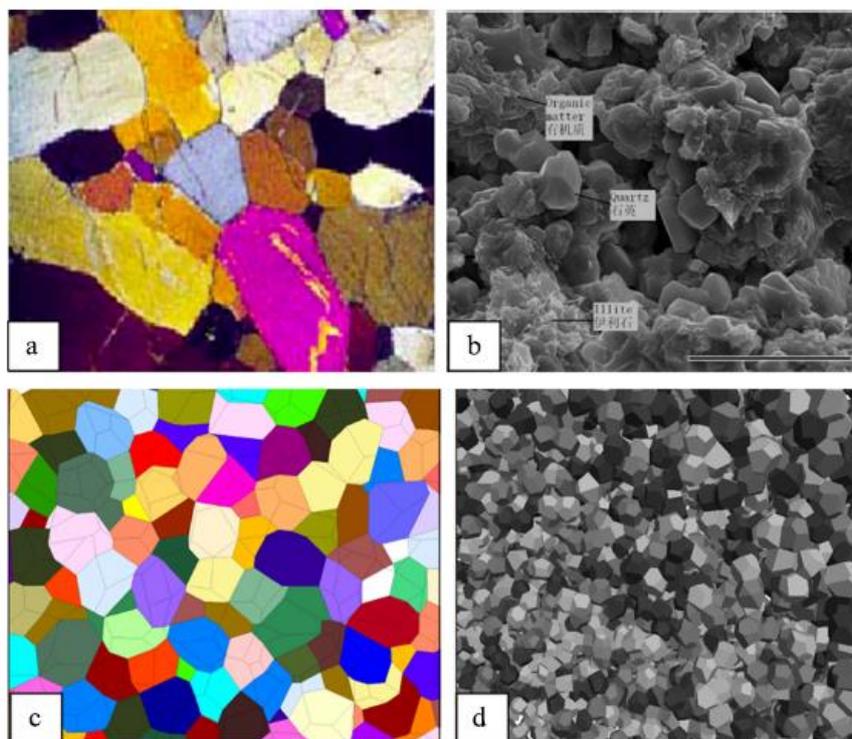


Figura 2.4: Confronto tra immagini al microscopio e modelli 3DEC (De-Fu Zhu et al 2017)

Per questo motivo l'utilizzo della tassellatura Voronoi è ottimale anche se conduce a più lunghi tempi computazionali.

Nel corso del tempo, dal 1980 fino ad oggi, diversi software basati su metodi agli elementi discreti sono stati implementati al fine di simulare il processo di fratturazione in roccia (Figura 2.5).

- 1980 mediante UDEC viene simulata la presenza di fratture in una roccia intatta (Brostow et al.1978, Finney 1979, Medvev 1986). L'ammasso roccioso viene discretizzato in blocchi, suddividendo il dominio di poligoni Voronoi (o tassellatura Voronoi), e viene assunto che una frattura si formi qualora il livello di tensione all'interfaccia tra i blocchi supera i valori limite in termini di tensione (J_{kn}) o di taglio (J_{ks});
- 1996 anche in PFC2 viene simulato il processo di fratturazione (Potyondy et al. 1996);
- 2013 viene modellata l'iniezione di un fluido in un ammasso roccioso tramite UDEC (Riahi & Damjanac 2013a, 2013b). Viene dunque studiata l'interazione tra HF (*Hydraulic Fracture*) e DFN (*Discrete Fracture Network*). La limitazione di questo studio consiste nel fatto che le traiettorie della frattura vengono definite a priori nella simulazione;
- 2013-2015 il processo di fratturazione idraulica, sia in roccia intatta sia in roccia naturalmente fratturata, viene implementato in UDEC utilizzando la tassellatura Voronoi (Nasehi & Mortazavi 2013, Zangeneh et al (2013, 2014), Pirayehgar & Dusseault 2015)
- 2012-2014 l'approccio numerico viene esteso in 3D da Hamidi e Mortazavi (Hamidi 2012, Hamidi & Mortazavi 2012, Hamidi & Mortazavi 2014). Il processo di fratturazione in materiale intatto viene modellato importando una discretizzazione tetraedrica del dominio in esame in 3DEC. Tuttavia, utilizzando una tassellatura tetraedrica è possibile incorrere in un problema: durante le interazioni possono incastrarsi e dunque causare un incremento della resistenza dei contatti;
- 2016 la tassellatura tetraedrica viene sostituita con una tassellatura Voronoi (3D), in Hamidi F. et al. 2016, al fine di diminuire l'aumento della resistenza dei contatti dovuta all'ingranamento dei tetraedri

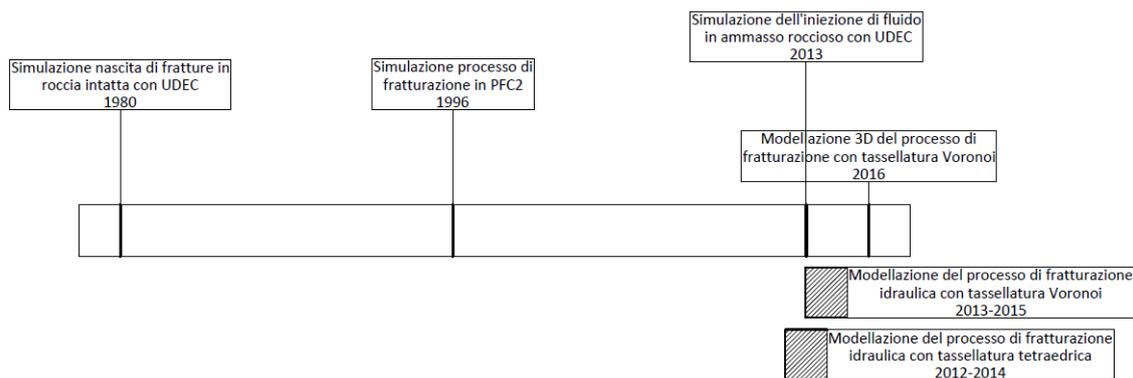


Figura 2.5: Evoluzione della modellazione del processo di fratturazione con software agli elementi distinti

2.5.1.1 Tassellatura Voronoi

La tassellatura Voronoi è un metodo che consente di generare dei grani all'interno di un determinato dominio. Questa tecnica prevede che il dominio venga popolato da una serie di punti detti centroidi (seed points). A partire da tali centroidi vengono generate linee (nel caso 2D) o superfici (nel caso 3D) in modo che i punti al suo interno siano più vicini a quel determinato centroide rispetto a tutti gli altri centroidi. Ogni cella può essere vista come una regione d'influenza del centroide da cui questa deriva. Un esempio si può osservare in Figura 2.6.

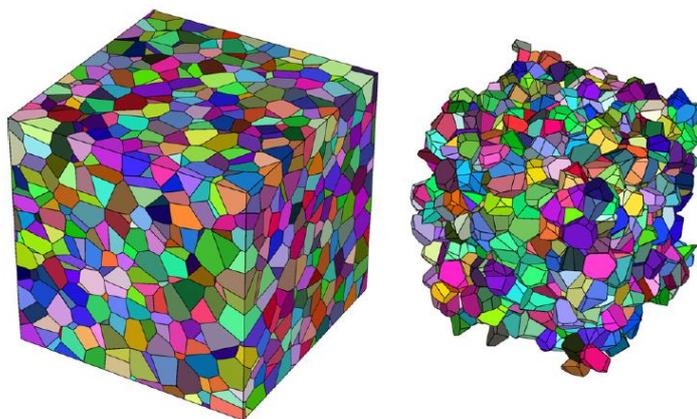


Figura 2.6: Esempio di tassellatura Voronoi (Quei et al, 2011)

Dal punto di vista matematico la tassellatura Voronoi di uno spazio tridimensionale è un insieme di entità tridimensionali che riempiono interamente il dominio, senza sovrapposizioni o strappi.

In una tassellatura Voronoi un dominio nello spazio tridimensionale \mathbb{R}^3 viene suddiviso in un insieme di celle. Dato un certo numero di centroidi appartenenti a

D , $\{S_i(x_i)\}$ con $i=\{1,\dots,N\}$, ad ogni centroide è assegnata una cella Voronoi C_i tale che:

$$C_i = \{P(x) \in D / d(P, S_i) \leq d(P, S_j) \forall j \neq i\} \quad (4)$$

Dove $P(x)$ è un punto appartenente alla cella C_i e d è una distanza euclidea definita come:

$$d = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2} \quad (5)$$

In cui (x, y, z) sono le coordinate del generico punto P , mentre (x_s, y_s, z_s) sono le coordinate del centroide S .

La posizione dei centroidi è scelta in maniera casuale da una distribuzione uniforme sul dominio.

In generale la dimensione delle facce dei poligoni deve essere abbastanza piccola da rappresentare la microstruttura della roccia e allo stesso tempo deve essere sufficientemente grande da garantire tempi computazionali ragionevoli.

2.6 Simulazioni con HYDRA 2D e 3D

Il presente studio si collega direttamente al lavoro svolto da Insana (2016) e Terramagra (2018). Si riassumono brevemente i risultati ottenuti prima di procedere.

Lo scopo della tesi di Insana era di dimostrare l'applicabilità di UDEC Voronoi (Itasca, 2015) allo studio di sistemi EGS, sviluppando strumenti utili per la stima della pressione idraulica necessaria per creare un serbatoio fratturato.

È stata dapprima analizzata la scala di laboratorio al fine di convalidare il software e dimostrare la sua capacità di modellare test di laboratorio tradizionali. Analisi numeriche su cinque tipi di roccia sono state eseguite grazie a un modello discreto rappresentativo; il loro comportamento meccanico di sforzo-deformazione è stato riprodotto mediante una procedura di calibrazione preliminare delle microproprietà dei contatti di Voronoi che controllano l'interazione tra i diversi elementi del modello. Per tale fine, sono stati definiti due fattori correttivi, R e S , che agiscono sulla coesione, sulla resistenza a trazione, sull'angolo d'attrito e sulla rigidità dei contatti. Si è dimostrato che con tale procedura è possibile riprodurre la resistenza a compressione e il modulo di Young delle prove di laboratorio.

Dopodiché l'attenzione si è spostata sullo studio degli effetti di scala, con l'obiettivo di comprendere come variano i microparametri. Sono stati costruiti cinque campioni (0.05x0.1 m, 1x2 m, 2x4 m, 4x8 m, 10x20 m) e si è osservato che

mantenendo costante il rapporto tra lunghezza media del bordo di grano e larghezza del campione il risultato rimane lo stesso a diverse scale (Figura 2.7).

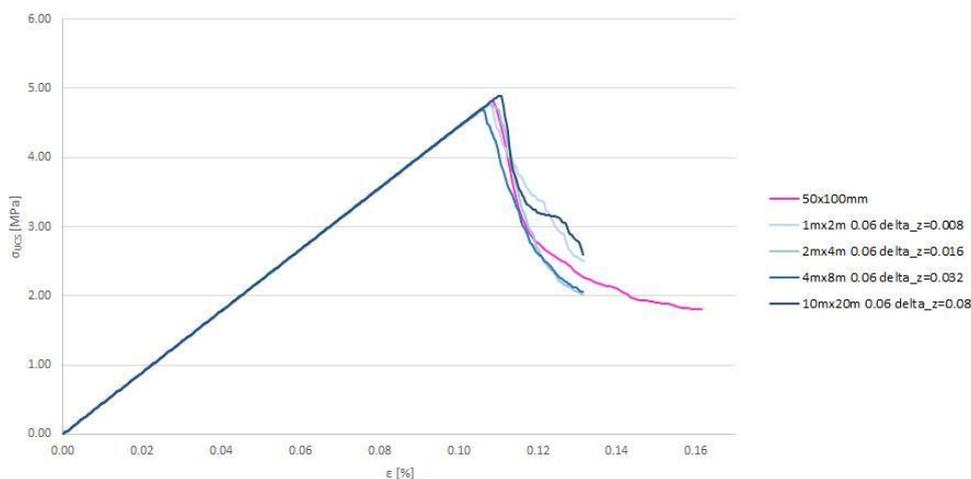


Figura 2.7: Prove di compressione monoassiale con campioni di scale diverse e stesso numero di grani (Insana, 2016)

Quindi, è inutile calibrare i microparametri dei contatti di Voronoi su un campione di laboratorio se la dimensione di Voronoi viene modificata in seguito. Con l'intento di cercare un'altra soluzione per il caso di studio, è stata posta enfasi sul calcolo dei microparametri necessari a riprodurre il comportamento della massa rocciosa.

Sono stati costruiti quattro campioni (1x2m, 2x4m, 3x4m, 4x8m) questa volta con la stessa dimensione dei grani Voronoi. In questo caso si è dimostrato che all'aumentare della dimensione (e quindi del numero di grani) decresce la resistenza del campione (Figura 2.8). Quindi la resistenza è stata dedotta indirettamente, costruendo una linea di tendenza che mostra la variazione della forza UCS con la larghezza del modello.

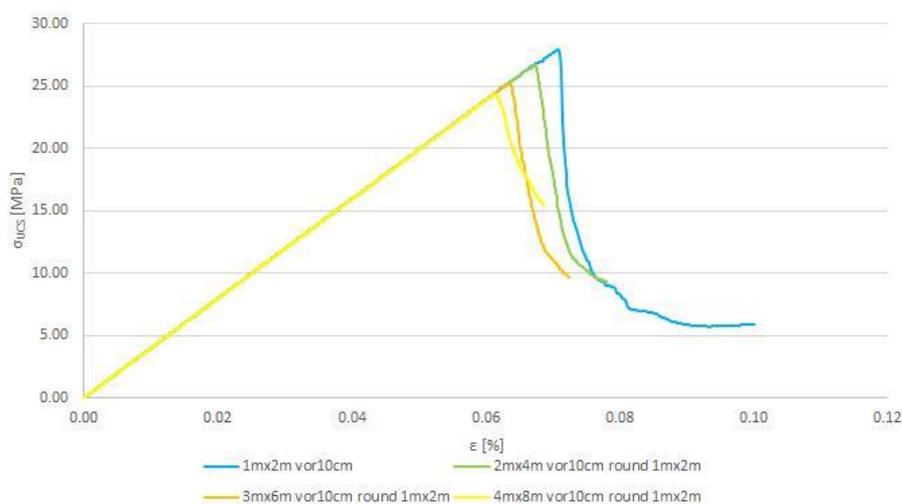


Figura 2.8: Prova di compressione monoassiale su campioni di diverse scale e uguale lunghezza di bordo di grano (Insana, 2016)

È chiaro come questo passo sia di fondamentale importanza per una corretta rappresentazione delle proprietà meccaniche del caso studio, quindi per consentire la simulazione di un sistema EGS in materiale sintetico equivalente a quello reale. È stato quindi descritto un sistema EGS nella regione di Cooper Basin, in Australia. È stato poi costruito un modello numerico di 10mx15m con grani Voronoi di 10 cm, compromesso tra risultato e tempi computazionali. Per la simulazione della fratturazione è stata scritta e implementata una funzione FISH per estendere la pressione idraulica anche alle fratture appena create.

La simulazione ha portato a buoni risultati come si può osservare nella Figura 2.9.

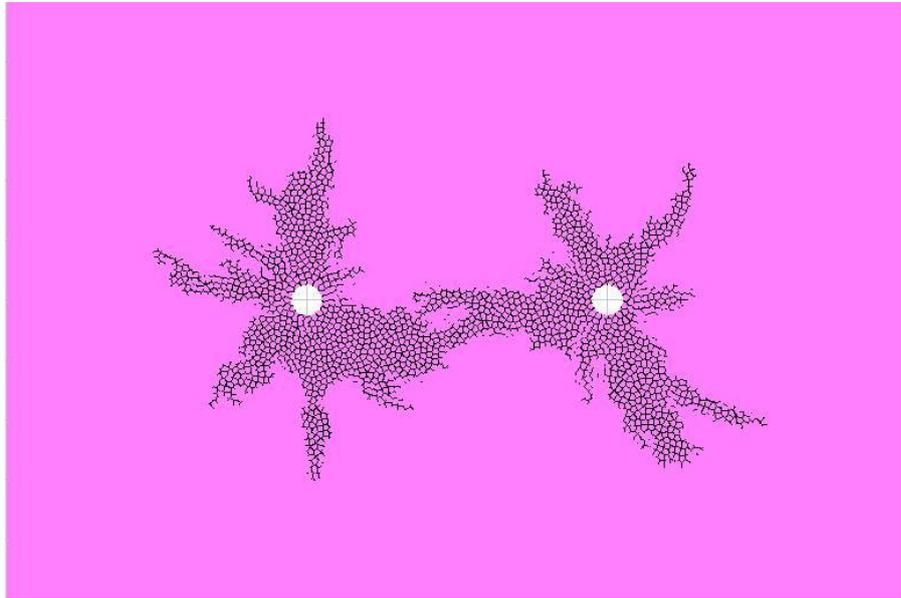


Figura 2.9: Risultati fratturazione idraulica (Insana, 2016)

Nella sua tesi, Terramagra, per esaminare la resistenza ed il processo di rottura della roccia ha utilizzato proposto il software commerciale Three-dimension Distinct Element Code (3DEC 5.0), un codice numerico tridimensionale basato sul metodo agli elementi distinti. 3DEC tuttavia non permette di creare una tassellatura Voronoi tridimensionale, come era invece possibile fare in UDEC 6.0 nel caso bidimensionale. Pertanto, per la generazione della geometria, sono stati utilizzati due software. Il primo, Matlab, ha permesso di creare il modello desiderato sebbene richieda un lungo tempo computazionale. Il secondo, Neper, permette di ottenere il modello desiderato in minor tempo, permette di controllare meglio la geometria dei grani e contiene delle funzioni che permettono di ricavare dati statistici riguardanti i grani Voronoi. Si è scelto di utilizzare il modello cilindrico generato mediante Neper, adottando un numero di grani Voronoi pari a 1000, con regolarizzazione, bordo medio di lunghezza pari a 3 mm e diametro equivalente medio dei grani di

lunghezza pari a 7 mm. Questo modello è stato importato nel software 3DEC allo scopo di simulare il comportamento di un provino di materiale roccioso. Sono state assegnate caratteristiche diverse ai grani Voronoi e ai bordi grano, in modo che i bordi grano possano essere utilizzati per simulare i possibili percorsi di propagazione di una frattura.

È stato effettuato un processo di calibrazione dei microparametri al fine di ottenere una risposta del materiale sintetico, in termini di deformabilità e resistenza, il più simile possibile alla risposta proveniente dalla prova di laboratorio di compressione monoassiale non confinata. Sono stati indagati due materiali: un gesso (Plaster of Paris) ed un granito (Barre Granite). Per il gesso è stata calibrata soltanto la deformabilità, mentre per il granito è stata calibrata sia la deformabilità che la resistenza (Figura 2.10)

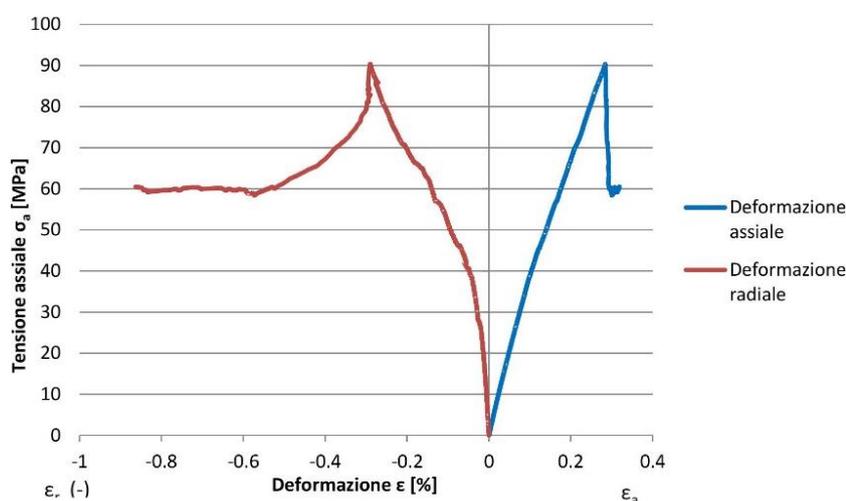


Figura 2.10: Curva sforzo-deformazione prova di compressione monoassiale non confinata su provino granitico (Terramagra, 2018)

Una volta validato il software 3DEC e calibrati i microparametri del materiale si è proceduto con la simulazione della fratturazione idraulica.

In sito la fratturazione ha luogo a causa dell'azione di un fluido che immesso ad alta pressione nei pozzi, causa l'apertura di giunti preesistenti o la creazione di nuove fratture. Nell'analisi si è sostituita al fluido la pressione che esso esercita sul giunto. Una volta aperta una frattura la pressione dell'acqua verrà applicata anche lungo il giunto in direzione normale ad esso.

A questo scopo la FISH è stata testata su un provino cilindrico con altezza 100 mm e diametro 50 mm assegnando le proprietà dei blocchi calibrate precedentemente.

Per simulare un sondaggio sono stati rimossi i grani centrali appartenenti alla parte

superiore del modello. A questo punto è stata applicata una pressione all'interno del vano creato in modo da simulare l'iniezione del fluido utilizzato per la fratturazione idraulica. La pressione applicata ha creato delle fratture nel materiale, lungo i bordi grano. A questo punto attraverso la FISH (HYDRA 3D) sono stati individuati i punti in cui è avvenuta la rottura del giunto e in corrispondenza del giunto aperto è stata applicata la pressione precedentemente definita. Si è proceduto in maniera iterativa alternando fasi di iniezione del fluido con fasi di "scorrimento del fluido" lungo le nuove superfici create fino ad ottenere un numero di fratture sufficiente.

Anche in questo caso la simulazione ha portato a risultati positivi (Figura 2.11).

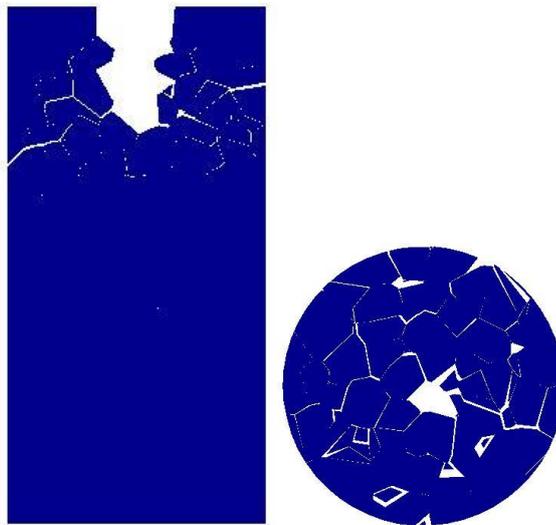


Figura 2.11: risultato simulazione di fratturazione su provino granitico (Terramagra,2018).

2.7 HYDRA (HYDRaulic fracturing Algorithm)

HYDRA è una funzione scritta nel linguaggio di programmazione FISH implementato in Itasca.

Nello specifico HYDRA permette di individuare i punti (detti subcontatti) di ogni potenziale superficie di rottura (ossia di ogni contatto) e di determinare quali di questi punti si è spostato creando una frattura nel materiale. Viene definita un'apertura limite oltre la quale il giunto viene considerato aperto. A questo punto viene applicata una pressione lungo il giunto, in direzione normale rispetto a quest'ultimo per simulare l'azione spingente dell'acqua in pressione (Figura 2.12):

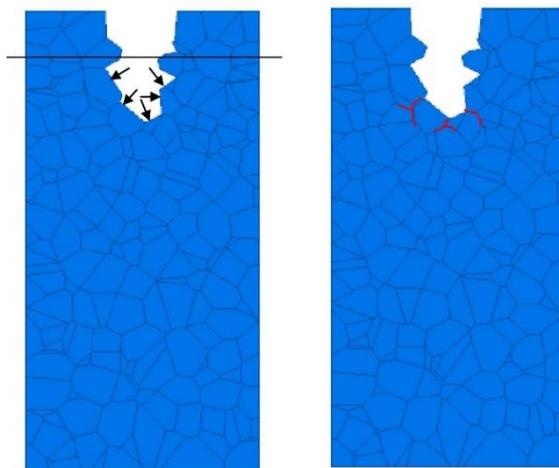


Figura 2.12: Schema semplificato HYDRA3D (Terramagra, 2018)

Le linee rosse in Figura 2.12 rappresentano i giunti aperti dalla pressione interna. La FISH scansiona tutto il dominio e tutte le coordinate dei contatti e il loro orientamento vengono catalogate. Se lo spostamento normale del giunto supera il valore limite ($10E-5$), HYDRA riconosce la rottura del giunto e applica una pressione. Questa avrà l'effetto di aprire ulteriormente la discontinuità.

Si alternano quindi fasi di iniezione del fluido con fasi di “scorrimento del fluido” lungo le nuove superfici create fino ad ottenere un numero di fratture sufficiente.

La funzione in 2D è stata poi migliorata da Insana e Barla (2017) introducendo due importanti cambiamenti:

- la pressione non viene più applicata quando l'apertura dei giunti raggiunge un certo valore ma quando la resistenza a trazione o a taglio dei giunti viene superata
- la pressione dell'acqua viene applicata solo alle fratture comunicanti con il pozzo

Capitolo 3

La tassellatura di Voronoi per la simulazione di una prova di laboratorio

3.1 Introduzione

Nel presente capitolo si simulerà una prova di compressione monoassiale su un provino di laboratorio di diametro 0.05 m e altezza 0.1 m di granito (Barre granite). La simulazione si svolgerà con 3DEC (Three-Dimensional Element Code), un software di calcolo 3D basato sul metodo DEM. Viene utilizzato per simulare la risposta di un materiale discontinuo sottoposto a carichi statici o dinamici (Itasca 2014).

Per costruire un modello occorre seguire i seguenti step:

- Si crea la geometria del modello
- I blocchi precedentemente creati vengono discretizzati mediante degli elementi alle differenze finite
- Si assegnano le proprietà e i modelli costitutivi ai blocchi e ai giunti
- Si applicano le condizioni iniziali e le condizioni al contorno

Dopodiché viene imposta una perturbazione e viene calcolata la risposta del modello. Poiché si tratta di un programma che utilizza un metodo esplicito, la soluzione sarà raggiunta dopo un certo numero di step.

L'obiettivo è di trovare un modello adatto a simulare il comportamento meccanico di un materiale roccioso. Si costruirà un modello numerico di un provino cilindrico utilizzando la tassellatura Voronoi per la generazione dei grani. Il modello così creato sarà utilizzato per la simulazione di prove di compressione monoassiale al fine di confrontare la risposta del materiale intatto con quella del materiale in grani. Inoltre, si calibreranno i microparametri confrontando il modello con le prove di laboratorio.

3.2 La prova di compressione monoassiale

Nella prova di compressione monoassiale un provino cilindrico viene posto tra due piastre di carico aventi lo stesso diametro del provino e altezza almeno pari a 15 mm o 1/3 del diametro e viene caricato esercitando una pressione continua con incrementi regolari tali da portarlo a rottura.

Il carico massimo a cui è sottoposto il provino prima di giungere a rottura corrisponde alla resistenza a compressione monoassiale σ_{ci} . Questa è definita dal rapporto tra la forza applicata a rottura del provino, o la forza massima registrata, e l'area della sezione iniziale del provino:

$$\sigma_{ci} = \frac{P_{max}}{A} \quad (6)$$

Dove P_{max} è il massimo carico di compressione e A la sezione iniziale del provino.

Inoltre, utilizzando strumenti come celle di carico, estensimetri elettrici o trasduttori a differenziale variabile lineare, è possibile misurare gli spostamenti assiali e radiali durante l'applicazione del carico calcolando tensioni e deformazioni:

- Tensione assiale

$$\sigma_a = \frac{P}{A} \quad (7)$$

- Deformazione assiale

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \quad (8)$$

- Deformazione radiale

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R}{R} \quad (9)$$

Dove L è la lunghezza iniziale del provino misurata parallelamente all'asse del campione, R il raggio iniziale del provino, ΔL e ΔR le variazioni di lunghezza.

Al fine di monitorare gli andamenti di sforzo assiale, deformazione assiale e deformazione radiale durante la prova di compressione monoassiale si è scelto di adottare lo schema mostrato in Figura 3.1:

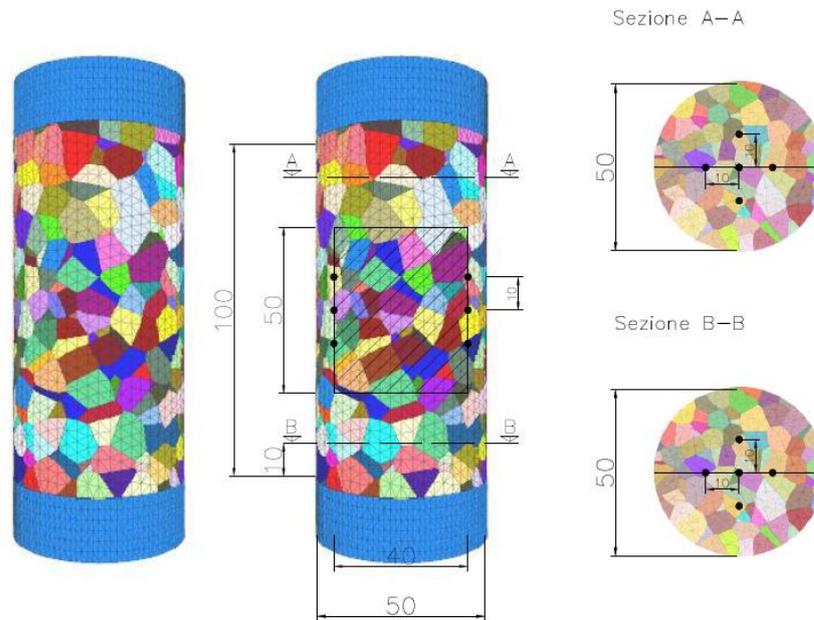


Figura 3.1: Schema di monitoraggio

La deformazione assiale del provino è stata misurata considerando le due sezioni A-A e B-B. Ciascuna sezione contiene al suo interno cinque punti di misurazione ed ogni sezione si trova ad una distanza di 10 mm dall'estremità del provino. Il valore della deformazione assiale è stato ottenuto facendo una media dello spostamento relativo dei cinque punti della sezione superiore (ΔL_1) e una media dello spostamento relativo dei cinque punti della sezione inferiore (ΔL_2). In questo modo si ottiene la deformazione assiale ϵ_a , come:

$$\epsilon_a = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(\Delta L_1 + \Delta L_2)}{L} \quad (10)$$

dove $L = 100$ mm è l'altezza del provino.

La deformazione radiale del provino è stata calcolata facendo la media dello spostamento relativo di tre coppie di punti, posti vicino alla mezzeria del provino ed a 5 mm di distanza dall'estremità, come mostrato in figura, sia lungo la direzione x sia lungo la direzione y .

Lo sforzo assiale nel provino è stato calcolato facendo la media degli sforzi assiali dei centroidi, delle zone create dalla discretizzazione del modello, che si trovano

all'interno del poligono, di dimensioni 40 mm x 40 mm x 50 mm, disegnato all'interno del provino cilindrico.

3.3 Generazione del modello su 3DEC

3DEC è un codice di modellazione numerica tridimensionale per l'analisi geotecnica avanzata di suolo, roccia, supporti strutturali e murature. Il software simula la risposta dei mezzi discontinui soggetti a carico statico o dinamico. La formulazione numerica si basa sul metodo degli elementi distinti (DEM) per la modellazione discontinua.

Il materiale è rappresentato come un assemblaggio di blocchi discreti, le discontinuità sono trattate come condizioni al contorno tra i blocchi, sono ammessi grandi spostamenti lungo le discontinuità e rotazioni dei blocchi. I blocchi possono essere resi deformabili discretizzandoli con una mesh.

3DEC contiene anche il potente linguaggio di scripting incorporato di Itasca FISH con il quale è possibile scrivere funzioni aggiuntive.

3.3.1 Generazione della geometria

La creazione di un modello in 3DEC inizia da un singolo blocco di dimensioni sufficienti ad analizzare il caso reale da analizzare. I confini del modello devono essere sufficientemente lontani dalla regione in esame in modo che non influenzino l'analisi

Dopodiché il blocco iniziale può essere tagliato per rappresentare strutture geologiche (faglie, discontinuità, giunti) o artificiali (scavi e gallerie).

Nel caso in esame la creazione della geometria di partenza è stata prodotta con NEPER (Query et al, 2011), software per la generazione di policristalli (2D o 3D) e di mesh, in quanto 3DEC non ha implementato un modulo per la creazione di tassellatura Voronoi.

Per la creazione del modello su NEPER occorre:

- Definire un dominio 3D: cilindro di diametro 50 mm e altezza 100 mm
- Impostare il numero di centroidi (in questo caso pari a 1000) da cui vengono generate le celle
- Regolarizzare la tassellatura: viene preso in analisi il rapporto tra il più piccolo bordo di una cella e il suo raggio medio, se questo valore è minore di un limite λc allora il bordo viene rimosso e il blocco di partenza nuovamente suddiviso.

Mediante la regolarizzazione vengono rimossi i piccoli bordi grano e dunque i blocchi vengono nuovamente suddivisi. La regolarizzazione non modifica la morfologia dei grani; viene sfruttata per velocizzare e rendere più semplice la successiva operazione d’inserimento della mesh in 3DEC. Inoltre, la presenza di celle particolarmente piccole rispetto alla dimensione media dei policristalli potrebbe creare problemi durante l’analisi di 3DEC poiché durante la simulazione, è possibile che si verifichi una concentrazione degli sforzi che comprometta la veridicità dei risultati ottenuti, e inoltre aumenta il tempo computazionale della simulazione.

La generazione del modello in Neper è seguita da una fase di post-processing che permette di ottenere delle statistiche, riguardanti diverse caratteristiche (come lunghezza, diametro equivalente, raggio equivalente), rispettivamente dei poligoni che costituiscono la tassellatura, dei centroidi delle celle Voronoi, dei vertici della tassellatura Voronoi, dei bordi dei grani Voronoi e delle facce dei grani che costituiscono la tassellatura. Nel caso in esame si è scelto di estrapolare i dati statistici, che vengono riportati in Tabella 3.1, riguardanti la lunghezza dei bordi grano ed il loro diametro equivalente.

Tabella 3.1 Valori statistici della tassellatura calcolati da Neper

Bordo medio [mm]	3,8
Bordo minimo [mm]	0,2
Diametro equivalente medio [mm]	7,0
Diametro equivalente minimo [mm]	2,8

Pertanto, sono state create 1000 celle Voronoi all’interno di un dominio cilindrico, di altezza $h = 100\text{mm}$ e diametro $d = 50\text{mm}$, con regolarizzazione dei grani. Si ottiene il modello rappresentato in Figura 3.2, che è possibile esportare direttamente in 3DEC.

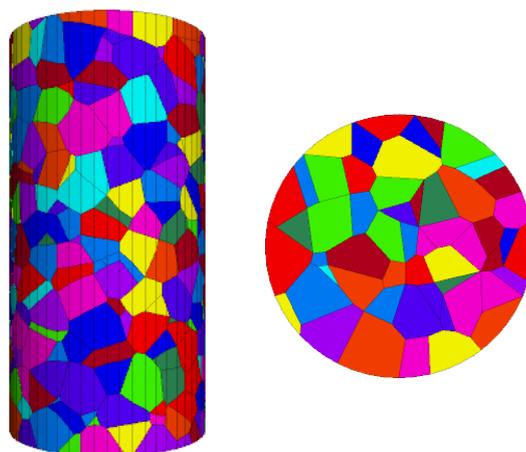


Figura 3.2: Provino tassellato generato con NEPER

3.3.1.1 *Blocchi rigidi o deformabili*

Una volta generata la geometria occorre decidere se utilizzare blocchi rigidi o deformabili. È importante ricordare che in 3DEC non è possibile utilizzare contemporaneamente le due tipologie.

Di default i blocchi sono tutti rigidi ma è possibile discretizzarli in elementi tetraedrici aventi una dimensione dello spigolo fissata.

La ragione per cui è necessario utilizzare blocchi deformabili è il cosiddetto “effetto di Poisson” di un ammasso roccioso confinato che ne influenza notevolmente il comportamento poiché i criteri di rottura dei giunti sono funzione della tensione di confinamento (ad esempio il criterio di Mohr-Coulomb).

Nella formulazione originale Cundall considera blocchi rigidi che non cambiano geometria per effetto del carico applicato. Ma questa formulazione è adatta nei casi in cui il materiale intatto ha alta resistenza e quindi il comportamento è interamente dipendente dalle discontinuità o quando la regione in esame è soggetta a basse tensioni di confinamento.

Pertanto, nel problema in esame non è possibile trascurare l'effetto di Poisson e il modello è stato quindi discretizzato con elementi tetraedrici di spigolo pari a 3mm.

3.3.2 **Proprietà dei materiali e dei contatti**

Una volta resi deformabili i blocchi è possibile assegnare proprietà ai materiali e ai contatti. Generalmente tali proprietà derivano da test di laboratorio.

3.3.2.1 *Blocchi*

Per quanto riguarda i blocchi ci sono diversi modelli costitutivi implementati che possono essere suddivisi in tre gruppi:

- Modelli elastici: caratterizzati da deformazioni reversibili, le leggi tensione-deformazione sono lineari e indipendenti dal percorso di carico. È necessario assegnare la densità di massa, il modulo di compressibilità K e il modulo di taglio G (o in alternativa il modulo di Young e il coefficiente di Poisson).
- Modelli plastici: coinvolgono deformazioni permanenti, correlate al percorso di carico, e dunque delle relazioni tensione-deformazione non lineari. I diversi modelli sono caratterizzati da un criterio di rottura, da un comportamento rammollente/incrudente e da un flusso plastico.
- Scavi

I modelli elastici implementati sono:

- *Isotropic elastic model*: fornisce la più semplice rappresentazione del comportamento del materiale. Questo modello è adatto a materiali omogenei, isotropi e continui, che rappresentano un comportamento lineare di tensioni-deformazioni.
- *Transversally isotropic elastic model*: permette di simulare un mezzo elastico stratificato nel quale ci siano diversi moduli elastici in direzione normale e parallela ai piani.

I modelli plastici invece:

- *Drucker-Prager model*: molto utile per la modellazione di argille soffici con bassi angoli d'attrito. Questo modello ha applicazioni molto limitate, non è raccomandato per materiali geologici. Viene impiegato nel confronto di risultati con altri programmi numerici.
- *Mohr-Coulomb model*: è il modello elasto plastico ideale, convenzionalmente utilizzato per rappresentare le fratture di taglio in terreni e rocce.
- *Ubiquitous-joint model*: è un modello plastico anisotropo che include piani deboli aventi una specifica orientazione incorporato in un solido alla Mohr-Coulomb.
- *Strain-hardening/softening model*: permette di modellare materiali non lineari, con comportamento incrudente e rammollente, basato su variazioni prestabilite delle proprietà del modello Mohr-Coulomb (coesione, attrito, dilatanza e resistenza a trazione) in funzione della deformazione plastica deviatorica.
- *Bilinear strain- hardening/softening ubiquitous-joint model*: permette la rappresentazione di materiali con comportamento incrudente e rammollente per la matrice, come il modello precedente. In aggiunta, vi è la possibilità di rappresentare un piano debole, basato su variazioni prestabilite del modello ubiquitous-joint in funzione della deformazione plastica, deviatorica e di trazione. Può essere applicato per lo studio di materiali laminati dopo la frattura.
- *Double yield model*: questo modello è utilizzato per rappresentare i materiali in cui ci possono essere significanti compattazioni irreversibili, in aggiunta agli involuppi di rottura di taglio e di trazione nel modello Strain-

hardening/softening. Viene utilizzato, ad esempio, per materiali granulari poco cementati dove la pressione causa delle permanenti riduzioni di volume.

- *Modified Cam-clay model*: può essere utilizzato per rappresentare dei materiali quando le variazioni di volume influenzano la deformabilità e la resistenza a taglio. Utilizzato per le costruzioni geotecniche in argilla.
- *Hoek-Brown model*: questo criterio di rottura caratterizza lo stato tensionale che porta a rottura nella roccia intatta e nell'ammasso roccioso. La superficie di rottura non è lineare ed è basata sulla relazione tra la tensione principale maggiore e quella minore (σ_1 e σ_3). Il modello incorpora una regola sulla plasticità che varia in funzione del livello di confinamento.
- *Modified Hoek-Brown model*: è una alternativa al modello precedente, poiché include un criterio di snervamento a trazione, e inoltre permette all'operatore di specificare l'angolo di dilatanza come un parametro di ingresso e manualmente controllato nel suo sviluppo. In aggiunta, è possibile effettuare il calcolo del fattore di sicurezza basato sul metodo di riduzione della resistenza.

Nel caso in esame, per i blocchi è stato scelto un modello costitutivo elastico affinché la rottura avvenga lungo i bordi di grano. Le proprietà assegnate, definite sulla base di prove di laboratorio (Barla M., 2010), sono riportate nella Tabella 3.2

Tabella 3.2 Proprietà dei blocchi (Barre granite)

Densità (ρ)	2640 kg/m ³
Modulo di Young (E)	40000 MPa
Coefficiente di Poisson (ν)	0,3
Modulo di compressibilità (K)	3,333E10 Pa
Modulo di taglio (G)	1,538E10 Pa
Resistenza a compressione (σ_{ci})	115.5 MPa

3.3.2.2 Giunti

L'interazione tra due grani è governata dalla legge costitutiva dei contatti (Itasca, 2014). Ad ogni contatto viene assegnata una rigidità normale (k_n) e una rigidità di taglio (k_s). Inoltre, è possibile assegnare ai contorni dei blocchi i parametri di coesione, attrito e resistenza a trazione. È necessario indicare un criterio di rottura in modo che nel momento in cui il livello tensionale supererà la forza resistente allora si avrà il processo di fratturazione.

Le forze di interazione sviluppate nei punti di contatto sono determinate come funzioni lineari o non lineari delle deformazioni delle molle e delle superfici di scorrimento e sono risolte in componenti normali e tangenziali utilizzando modelli costitutivi per i contatti.

In direzione normale il legame tensione spostamenti è assunto lineare e il comportamento è governato dalla rigidità normale k_n :

$$\Delta\sigma_n = -k_n\Delta u_n \quad (11)$$

Come mostrato in Figura 3.3 se si supera la tensione σ_t , il contatto si rompe a trazione e al contrario la rottura per compressione è controllata dalla chiusura ultima δ_n .

Analogamente per la forza di taglio si scrive:

$$\Delta\tau = -k_s\Delta u_s^e \quad (12)$$

Dove $\Delta\tau$ è l'incremento di tensione di taglio e Δu_s^e è la componente elastica dello spostamento tangenziale.

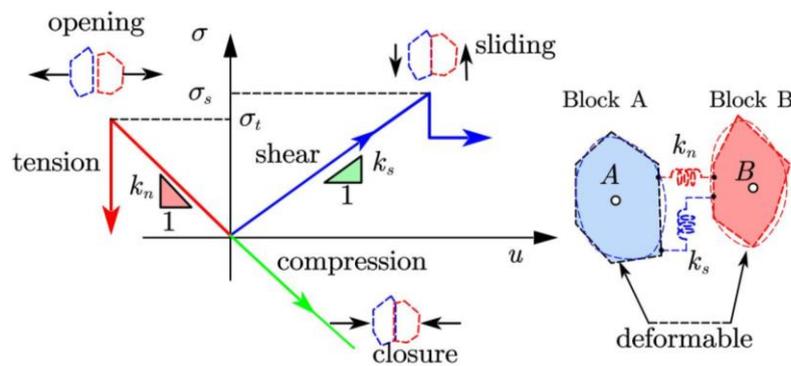


Figura 3.3: Modello costitutivo dei contatti (Li X.F., 2017)

Per quanto riguarda i modelli costitutivi per i giunti è possibile scegliere tra:

- *Joint area contact elastic/plastic model with Coulomb slip failure*: permette di simulare gli spostamenti dei giunti a causa di una perdita di attrito, coesione e resistenza a trazione all'insorgere della frattura per trazione o scorrimento. Il valore di default di coesione e resistenza a trazione è zero. Se non viene fornito un valore di angolo d'attrito residuo, il valore iniziale viene mantenuto costante.
- *Joint area contact model- Coulomb slip with residual strength*: questa versione del modello è uguale a quella precedente, ma in aggiunta il valore di coesione viene mantenuto costante, mentre il valore di resistenza a trazione

viene ridotta fino al valore al valore residuo. Il valore residuo di default per la resistenza a trazione è zero.

- *Continuously yielding model*: è un modello più complesso rispetto ai precedenti, che simula il continuo indebolimento in funzione dello spostamento di taglio plastico. Molto utilizzato per giunti che presentano un danneggiamento progressivo e un comportamento isteretico.
- *Elastic joint model*: non sono permesse rotture per apertura o taglio.

In questo caso si è scelto di utilizzare il criterio di rottura di Coulomb con comportamento residuo, in cui la tensione di taglio è definita in funzione della coesione (c), della tensione normale (σ_n) e dell'angolo di attrito (φ):

$$\tau_{max} = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (13)$$

Si è assunto che nel comportamento residuo dei giunti la coesione e la resistenza a trazione abbiano valore nullo, mentre l'angolo d'attrito rimanga costante.

I valori di partenza della rigidezza dei contatti sono stati assunti come in Insana (2016) e vengono riportati in Tabella 3.3.

Tabella 3.3: Proprietà dei contatti

Rigidezza normale (k_n)	1,346E14
Rigidezza al taglio (k_s)	6,731E13
Coesione (c)	22,9E6 Pa
Resistenza a trazione (σ_t)	8,9 Pa
Angolo d'attrito (ϕ)	46,9°
Coesione residua (c_{RES})	0
Resistenza a trazione residua ($\sigma_{t,RES}$)	0
Angolo d'attrito residuo (ϕ_{RES})	46,9°

3.3.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno, in un modello numerico, consistono in una serie di valori delle variabili prescritte ai contorni del modello. Esistono contorni reali o artificiali. I primi esistono anche nell'oggetto reale che si desidera modellare. I secondi, invece, non esistono nella realtà ma sono introdotti nel modello al fine di semplificare il problema (come ad esempio gli assi di simmetria o le linee di troncamento del modello).

Inizialmente i contorni del modello sono liberi, senza nessuna tensione applicata o nessun vincolo imposto.

Si possono utilizzare due tipi di condizioni al contorno che riguardano rispettivamente il campo tensionale o il campo degli spostamenti.

Per quanto riguarda il campo tensionale è possibile prescrivere un certo valore di tensione negli elementi che si trovano lungo il contorno del modello. Analogamente è possibile prescrivere un certo valore del carico da applicare.

Per il campo degli spostamenti, invece, si è soliti prescrivere dei valori di spostamento o, analogamente, dei valori di velocità da applicare nei punti al contorno del modello.

Si noti che le convenzioni sui segni che adotta 3DEC sono:

- Segno negativo per i valori delle tensioni di compressione.
- Segno negativo per i valori di spostamento/velocità diretti nel verso opposto alla direzione dell'asse cartesiano.

Per la simulazione della prova di compressione monoassiale è stata assegnata una velocità in direzione verticale ad entrambe le piastre di carico.

3.3.3.1 Individuazione delle condizioni di carico

Al fine di individuare le condizioni di carico da utilizzare per le successive prove sul materiale sintetico con discretizzazione Voronoi sono state effettuate delle prove di compressione monoassiale per diversi valori di velocità delle piastre.

È stato creato, tramite il software 3DEC, un provino cilindrico, con diametro di 50 mm e altezza 100 mm. In questa prima fase si è utilizzato un provino omogeneo (senza tassellatura) discretizzato con elementi tetraedrici con spigolo di 3 mm.

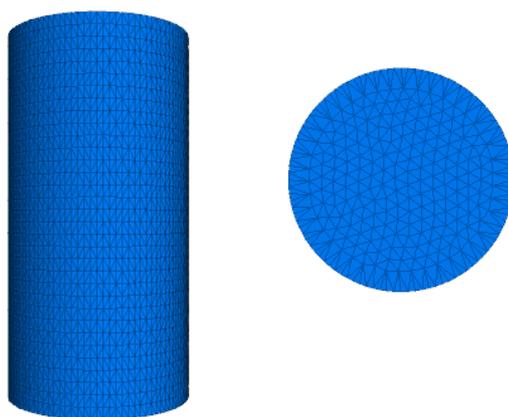


Figura 3.4 Provino omogeneo senza tassellatura

Si sono assegnate le caratteristiche di densità, resistenza e deformabilità del materiale. Si è scelto di utilizzare un modello elastico perfettamente plastico che utilizza il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

Si è utilizzato un provino di granito (Barre Granite) con le proprietà riportate in Tabella 3.4:

Tabella 3.4 Proprietà Barre Granite

Densità (ρ)	2640 kg/m ³
Modulo di Young (E)	40 GPa
Coefficiente di Poisson (ν)	0,3
Modulo di compressibilità (K)	33,33 GPa
Modulo di taglio (G)	15,38 GPa
Coesione (c)	22,9 MPa
Resistenza a trazione (σ_t)	8,9 MPa
Angolo d'attrito (ϕ)	46,9°
Resistenza a compressione (σ_{ci})	115,5 MPa

La prova è stata svolta in controllo di deformazione, caricando il provino in maniera continua, applicando una velocità costante alle due basi. Al fine di determinare la condizione di carico più adatta sono state effettuate diverse simulazioni in cui si è variata la velocità delle piastre di carico.

In Figura 3.5 si riportano i risultati ottenuti:

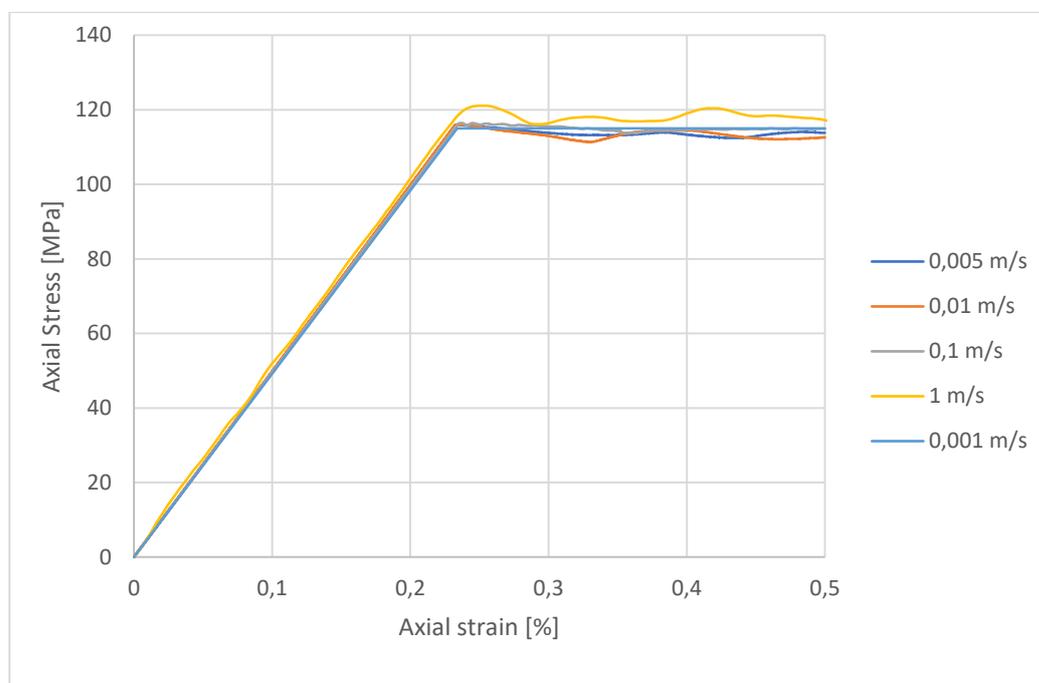


Figura 3.5 Grafico sforzo-deformazione assiale per diverse velocità delle piastre di carico

Si evince che:

- La velocità di carico pari a 1 m/s porta alla nascita di effetti dinamici indesiderati
- La curva corrispondente alla velocità 0,1 m/s presenta un leggero comportamento sinusoidale simile al precedente
- Per le tra velocità più basse, 0,01 m/s, 0,005 m/s e 0,001 m/s, si hanno degli andamenti molto simili, specialmente per valori di piccole deformazioni.

Si sceglie una velocità delle piastre pari a 0,005 m/s, compromesso tra accuratezza dei risultati e tempi computazionali.

3.4 Simulazione della prova e calibrazione dei parametri

Impostato il modello si procede con la simulazione della prova e la calibrazione dei microparametri.

A tal fine, con un processo di trial-and-error le proprietà vengono di volta in volta modificate con due coefficienti: S per i parametri che condizionano la deformabilità e R per i parametri che condizionano la resistenza del modello (Insana et al., 2016).

Gruppo 1:

$$k_{n,prova} = S \cdot k_{n,mat} \quad k_{s,prova} = k_{n,prova}/2 \quad (14)$$

Gruppo 2:

$$c_{prova} = R \cdot c_{mat} \quad \tan\varphi_{prova} = R \cdot \tan\varphi_{mat} \quad \sigma_{t,prova} = R \cdot \sigma_{t,mat} \quad (15)$$

Inizialmente, al fine di ottenere una deformabilità del modello simile a quella delle prove di laboratorio, il moltiplicatore R è mantenuto costante mentre S, che governa l'inclinazione del tratto elastico della curva sforzo-deformazione, è stato incrementato gradualmente fino ad ottenere l'inclinazione desiderata.

In un secondo momento il moltiplicatore S è stato mantenuto costante, mentre è stato incrementato il valore di R fino ad ottenere un valore di resistenza simile a quello delle prove di laboratorio.

Inizialmente si assumono valori unitari per i coefficienti S e R ottenendo valori di deformabilità e resistenza pari rispettivamente a 32089 MPa e 23,13 MPa, entrambi inferiori ai valori di laboratorio (40000 MPa e 115.5 MPa). Attraverso il processo di calibrazione dei microparametri, precedentemente illustrato, sono stati individuati i valori dei coefficienti S e R che meglio approssimano il comportamento reale del materiale.

Il valore di resistenza a compressione monoassiale non confinata (σ_{ci}) è stato assunto pari al valore massimo della curva sforzo deformazione.

Il Modulo di Young è stato ottenuto valutando la pendenza della curva sforzo deformazione in corrispondenza del valore di $0,5\sigma_{ci}$. Lo stesso dicasi per il valore del coefficiente di Poisson (ν).

I risultati del processo di calibrazione sono riassunti in Tabella 3.5 e

Tabella 3.6:

Tabella 3.5 Calibrazione parametri gruppo 1 Barre Granite

S	1	14
E (MPa)	32089	40253
ν	0,23	0,31
kn [Pa]	1,3459E14	1,8843E15
ks [Pa]	6,7296E13	9,4213E14

Tabella 3.6 Calibrazione parametri gruppo 2 Barre Granite

R	1	1,80
σ_{ci} [MPa]	30,5	115,6

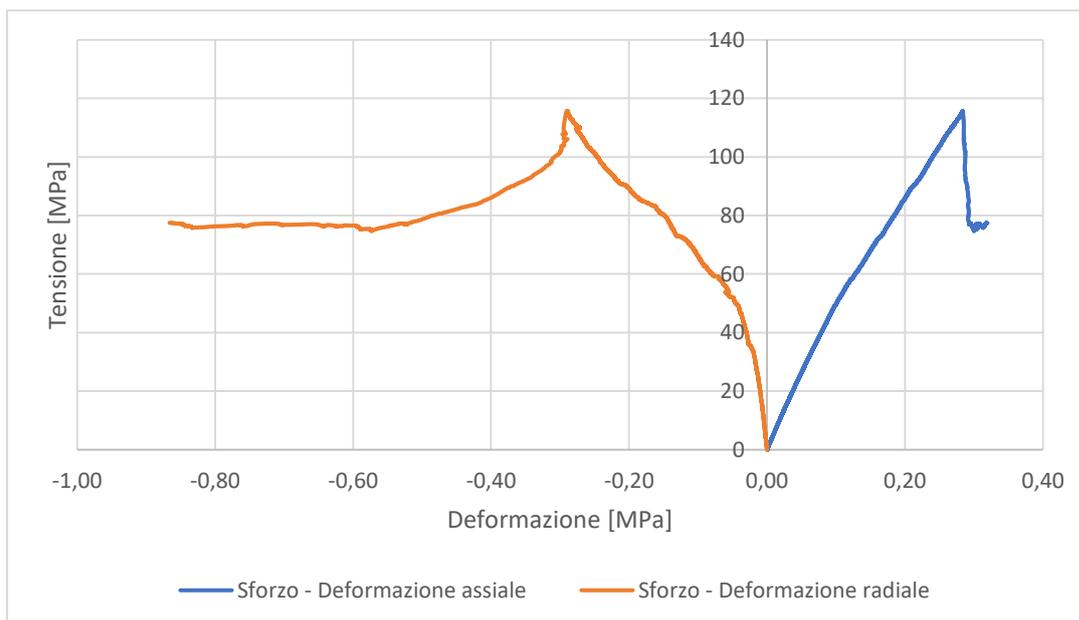


Figura 3.6: Curve sforzo-deformazione calibrate

Si può infine osservare che, come ci si aspetta, la rottura del provino avviene per trazione lungo i bordi dei grani Voronoi come mostrato in Figura 3.7.

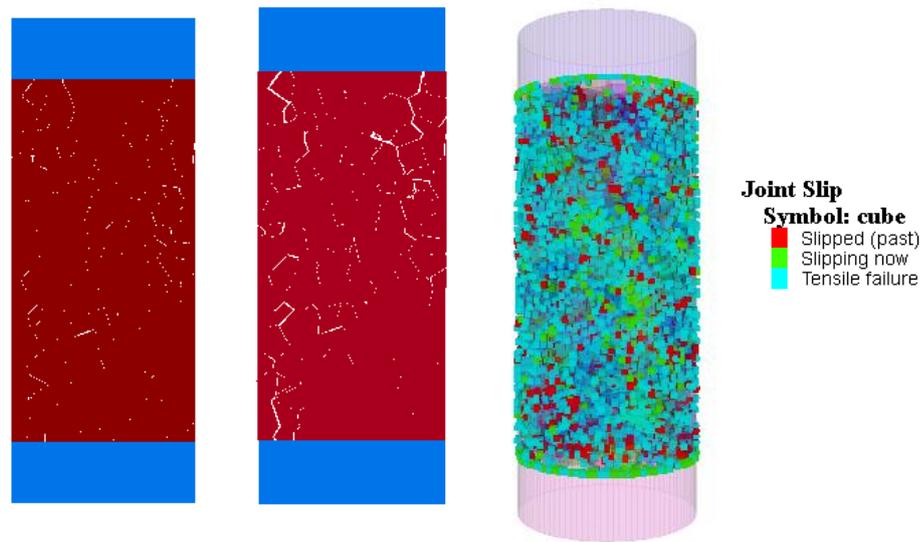


Figura 3.7 Modalità di rottura del provino

3.5 Conclusioni

In questo capitolo è stato proposto di utilizzare la tassellatura Voronoi per discretizzare l'elemento cilindrico in modo da rendere più casuale possibile la forma e la distribuzione dei grani, e dunque dei percorsi della frattura. A tale scopo è stato utilizzato il modello cilindrico generato mediante Neper, adottando un numero di grani Voronoi pari a 1000, con regolarizzazione, bordo medio di lunghezza pari a 3 mm e diametro equivalente medio dei grani di lunghezza pari a 7 mm.

Questo modello è stato importato nel software 3DEC allo scopo di simulare il comportamento di un provino di materiale roccioso. Sono state assegnate caratteristiche diverse ai grani Voronoi e ai bordi grano, in modo che i bordi grano possano essere utilizzati per simulare i possibili percorsi di propagazione di una frattura.

È stato effettuato un processo di calibrazione dei microparametri al fine di ottenere una risposta del materiale sintetico in termini di deformabilità e resistenza, il più simile possibile alla risposta proveniente dalla prova di laboratorio di compressione monoassiale non confinata. Si riepilogano in Tabella 3.7 i risultati ottenuti.

Tabella 3.7: Riepilogo risultati di calibrazione dei microparametri

	S = 1 R = 1	S = 14 R = 1,80
E [GPa]	32,1	40,2
σ_{ci} [MPa]	23,1	115,6

Capitolo 4

Dalla scala di laboratorio alla scala del sito

4.1 Introduzione

Nel capitolo in esame viene modellato un semplice sistema EGS. La simulazione include la perforazione di due pozzi circolari e l'idrofratturazione in un ammasso roccioso granitico. Le proprietà meccaniche, la geometria di scavo e lo stato di stress sono poste come in Insana (2016). Il caso studio già analizzato da Ceria (2015) e poi da Insana (2016) è il sistema EGS di Cooper Basin, già descritto nel paragrafo 1.4.2.6.

Nella prima parte si riepilogheranno le caratteristiche principali del sito in analisi e si costruirà il modello. Dopodiché si calibreranno i microparametri necessari per riprodurre la resistenza dell'ammasso roccioso. Infine, si scaveranno i pozzi e si fratterà idraulicamente la roccia.

4.2 Cooper Basin

Il sito di Cooper Basin si trova nell'Australia meridionale (Figura 4.1) dove le perforazioni petrolifere stimarono temperature prossime ai 250 °C a una profondità di 4 km (MIT, 2006). L'alto gradiente geotermico della zona è dovuto alle grandi quantità di elementi radiogenici nella crosta.

La stimolazione del serbatoio ebbe successo e permise nel maggio del 2013 l'installazione un primo impianto di 1 MW_e che venne esteso a 40 MW_e nel 2015. L'obiettivo finale è quello di raggiungere i 450 MW_e.

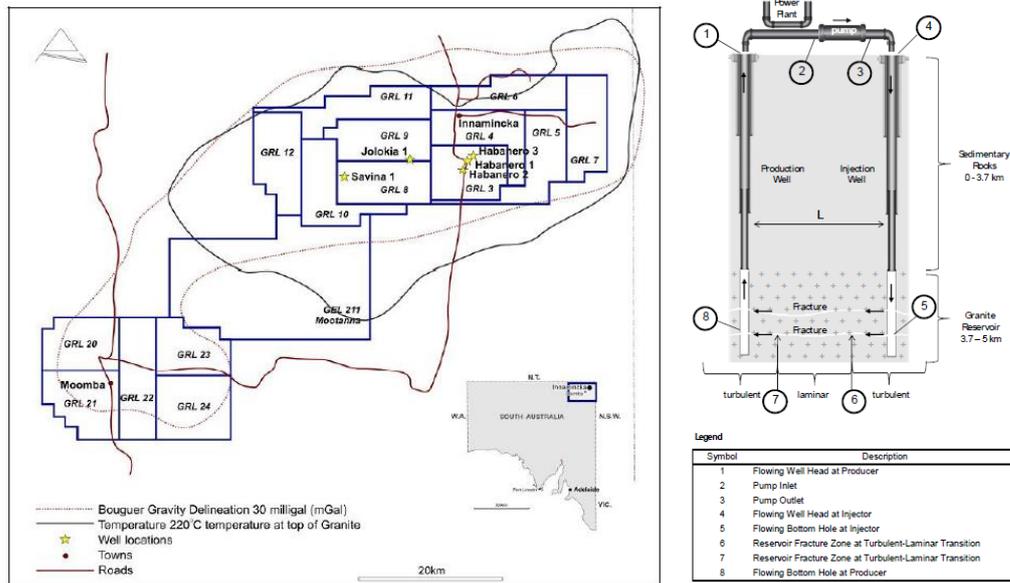


Figura 4.1: sito di Cooper Basin e schema del serbatoio (Delton, 2010)

4.3 Costruzione del modello

4.3.1 Geometria

Il dominio di partenza scelto è un parallelepipedo di dimensioni 15x10x5 m, compromesso tra la modellazione del caso reale e tempi computazionali ragionevoli. Nuovamente la geometria iniziale è stata creata con il software Neper, questa volta il numero di grani è stato posto pari a 12 000 per ottenere una dimensione media dello spigolo di 20 cm (Figura 4.2).

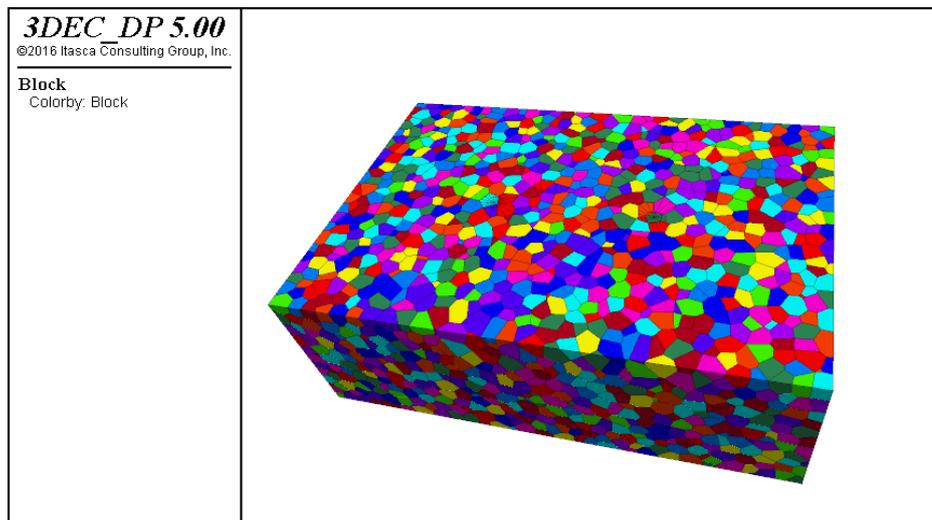


Figura 4.2: Dominio iniziale

Vengono perforati due pozzi di diametro di 50 cm e distanti 5 m tra loro (Figura 4.3).

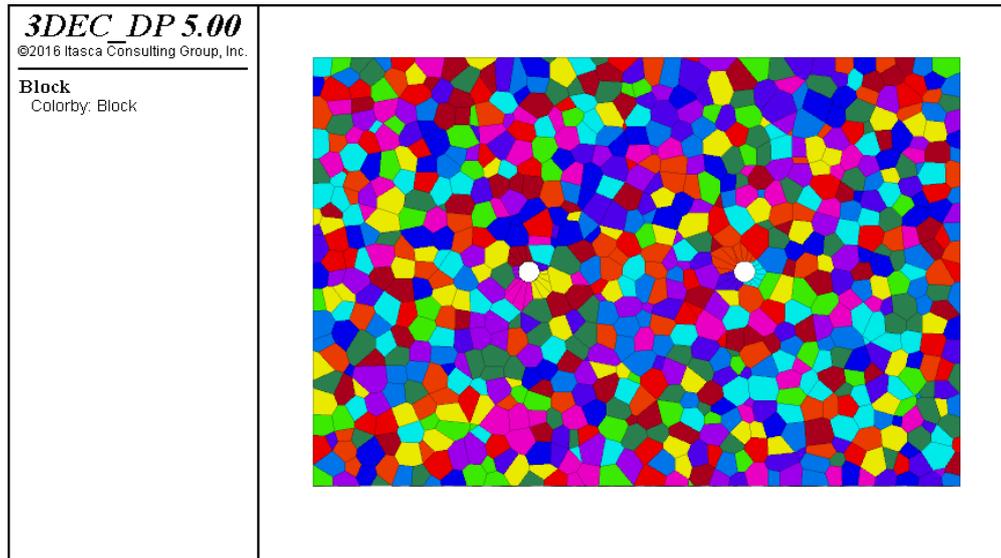


Figura 4.3: Dominio con pozzi

Il modello è stato discretizzato con elementi tetraedrici di spigolo pari a 10 cm. Si precisa che a causa della regolarizzazione che viene operata in Neper tende a rendere non planari le facce dei grani provocando problemi alla discretizzazione del modello. Pertanto, in questo caso si è limitata la regolarizzazione in Neper, fissando a 10°, e non a 20° come di default, la deformazione delle facce e i blocchi che ancora causavano problemi alla mesh (8 blocchi su 12000) sono stati rimossi dal modello.

4.3.2 Proprietà meccaniche

Si utilizza il Barre Granite come in Ceria (2015) caratterizzato dalle proprietà meccaniche riportate in Tabella 4.1.

Tabella 4.1: Parametri granito roccia intatta e ammasso roccioso

Densità	2640 kg/m ³
Resistenza a trazione roccia intatta	8,9 MPa
Resistenza a compressione roccia intatta	115,5 MPa
Parametri di Hoek e Brown per la roccia intatta (m)	27,1
Modulo di Young ammasso roccioso	40 GPa
Coefficiente di Poisson	0.3

Si considera un ammasso roccioso di media qualità con un GSI (Geological Strength Index) pari a 50. Il GSI è un indice che dà una misura della qualità dell'ammasso roccioso e permette di calcolare i parametri di Hoek e Brown:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) = 27,1 \cdot \exp\left(\frac{50 - 100}{28}\right) = 4,54 \quad (16)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) = \exp\left(\frac{50 - 100}{9}\right) = 0,0039 \quad (17)$$

Dopodiché linearizzando si ottengono i corrispondenti parametri di Mohr-Coulomb per l'ammasso roccioso (Tabella 4.2):

Tabella 4.2: Parametri di resistenza dell'ammasso roccioso

Angolo d'attrito	34,6°
Coesione	7,3 MPa
Resistenza a trazione	0,08 MPa
Resistenza a compressione	28,0 MPa

4.3.3 Stato tensionale e condizioni al contorno

La fratturazione idraulica nel caso in esame avviene a 4 km di profondità. Si suppone uno stato tensionale isotropo:

$$\sigma_H = \sigma_h = \sigma_V = p_0 = \gamma \cdot z = 26400 \text{ N/m}^3 \cdot 4000 \text{ m} = 105,6 \text{ MPa} \quad (18)$$

Poiché le dimensioni del dominio sono ridotte rispetto al problema in analisi si sono applicate delle condizioni al contorno di tipo tensionale.

L'azione del fluido nel pozzo viene sostituita dalla pressione che lo stesso esercita. Tale pressione viene applicata a partire da 10 cm dall'estremità superiore del modello fino a 10 cm dall'estremità inferiore del modello, quindi su una lunghezza complessiva di 4,8 m. Lo schema delle condizioni al contorno viene rappresentato in Figura 4.4.

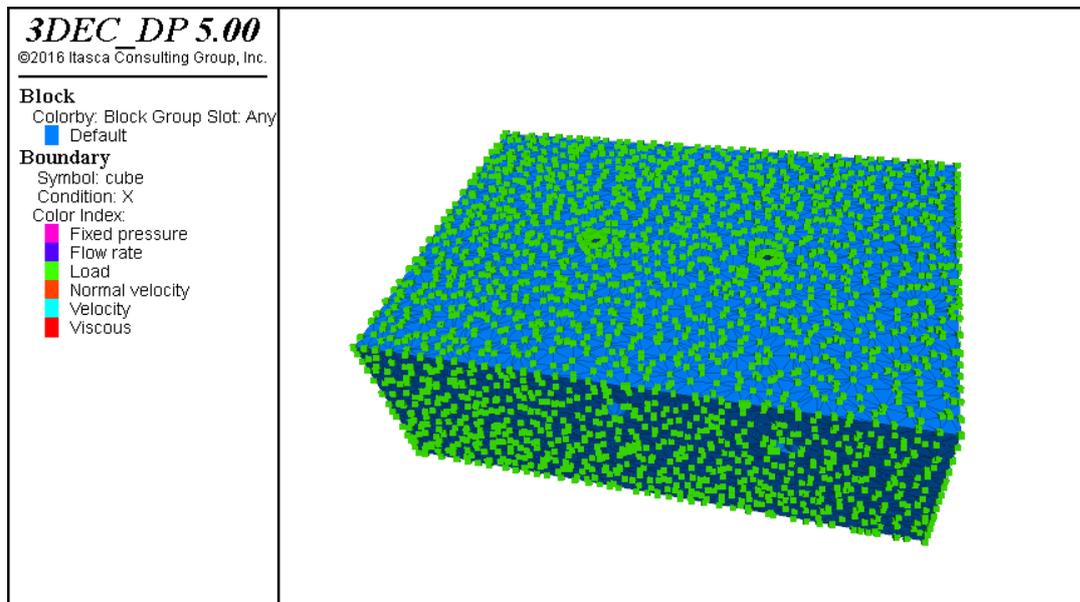


Figura 4.4: Condizioni al contorno iniziali

4.3.4 Calibrazione dei microparametri

In questo paragrafo si valuterà dapprima come si comporta il provino di granito al variare della scala. Per tale scopo, come in Insana (2016) (come descritto nel paragrafo 2.6) si costruiscono 6 provini di dimensioni 1x2 m, 2x4 m, 3x6 m, 4x8 m, 5x10 m, 6x12 m (Figura 4.5) tutti suddivisi in grani Voronoi aventi lo stesso spigolo medio del caso studio (20 cm). A tutti i provini vengono assegnate le stesse proprietà dei blocchi e dei giunti e vengono sottoposti a una prova di compressione monoassiale con le stesse modalità viste al Capitolo 3.

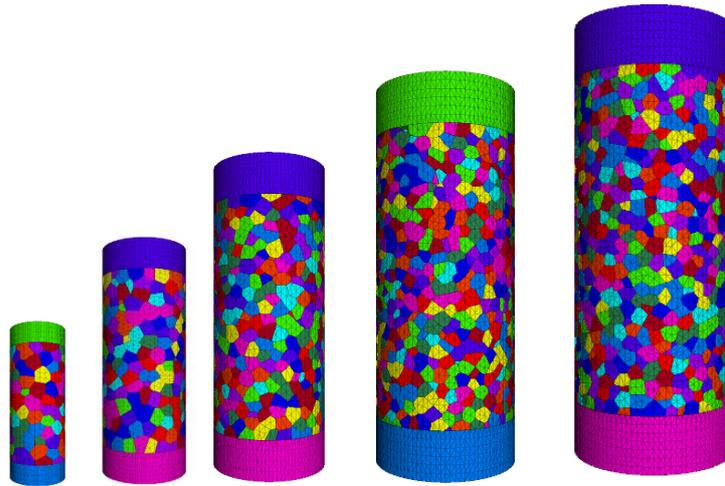


Figura 4.5: provini sottoposti a prova di simulazione di compressione monoassiale (da sinistra a destra: 1x2 m, 2x4 m, 3x6 m, 4x8 m, 5x10 m, 6x12 m)

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 4.6 e in Tabella 4.3:

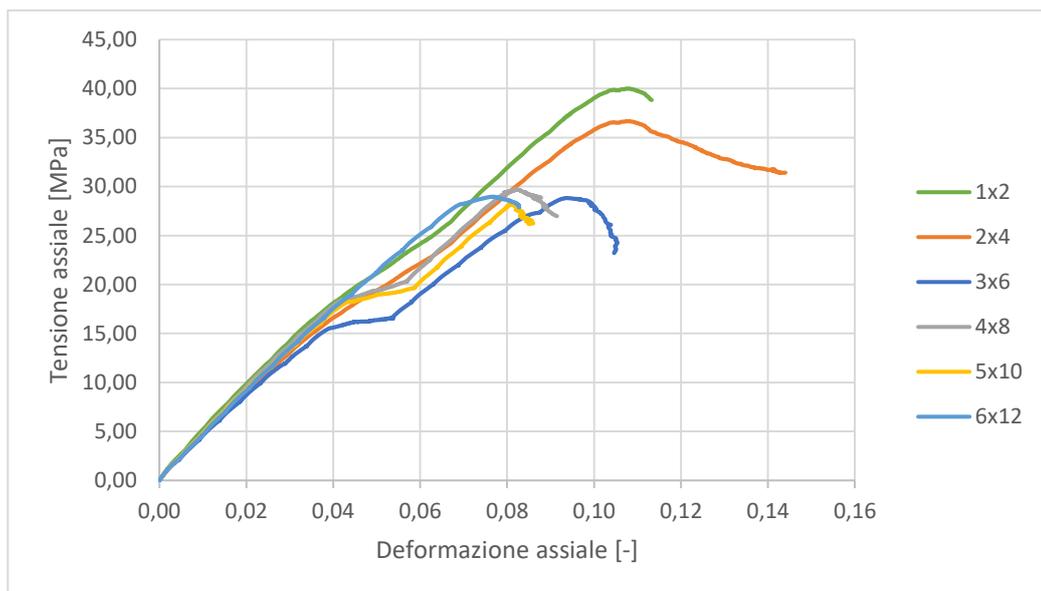


Figura 4.6: Confronto prove di compressione monoassiale

Tabella 4.3: rapporto tra numero di grani e resistenza del campione

Campione	n° grani	σ_{ci} [MPa]
1x2	40	40.01
2x4	300	36.68
3x6	1000	28.83
4x8	2500	29.68
5x10	4800	28.19
6x12	8200	28.96

Si osserva che i campioni più piccoli hanno una resistenza più alta rispetto a quella dei campioni più grandi a causa del minor numero di grani e quindi di difetti del materiale. Si può anche osservare però che superata una certa dimensione (e un certo numero di grani) la resistenza dei campioni si assesta a un valore pressoché costante. Pertanto, si è scelto di calibrare i parametri sul campione di 3x6m e di estenderli al caso studio.

Per la calibrazione si è utilizzata la procedura già illustrata al Capitolo 3. Si sono ottenuti risultati riportati in Tabella 4.4:

Tabella 4.4: Proprietà dei blocchi e dei contatti dell'ammasso roccioso

Proprietà		S=1, R=1	S=24, R=2.2
σ_{rm}			28,45 MPa
E			40 GPa
Densità (ρ)	2640 kg/m ³		
Modulo di Young (E)	40 GPa		
K	3.333E10 Pa		
Modulo di taglio (G)	1.538E10 Pa		
Resistenza a trazione (σ_t)		0.08MPa	0.18 Mpa
Resistenza a trazione residua ($\sigma_{t,res}$)		0 MPa	0 Mpa
Coesione (c)		7.3 MPa	16.06 Mpa
Coesione residua (c_{res})		0 MPa	0 MPa
Angolo d'attrito (ϕ)		34.6°	56.6°
Angolo d'attrito residuo ϕ_{res}		34.6°	56.6°
k_n		2.692E12 Pa/m	7.109E13
k_s		1.346E12 Pa/m	3.554E13
Spigolo medio	0.20		

4.4 HYDRA 3D

Per simulare realisticamente la fratturazione idraulica è stata implementata la funzione HYDRA (HYDRaulic fracturing Algorithm) scritta da Insana (2016), e applicata al caso 3D da Terramagra (2018).

La funzione HYDRA 3D (Terramagra, 2018) permette di individuare i punti (detti subcontatti) di ogni potenziale superficie di rottura (ossia di ogni contatto) e di determinare quali di questi punti si è spostato creando una frattura nel materiale. Viene definita un'apertura limite a_{lim} oltre la quale il giunto viene considerato aperto. A questo punto viene applicata una pressione lungo il giunto, in direzione normale rispetto a quest'ultimo, a cui appartengono questi subcontatti per simulare l'azione spingente dell'acqua in pressione. Questa avrà l'effetto di aprire ulteriormente la discontinuità. Si procederà in maniera iterativa alternando fasi di iniezione del fluido con fasi di "scorrimento del fluido" lungo le nuove superfici create fino ad ottenere un numero di fratture sufficiente.

Il principale problema di tale approccio è che la pressione del fluido viene applicata anche a contatti non comunicanti col pozzo oltre a portare a lunghi tempi computazionali.

La funzione in 2D è stata quindi migliorata da Insana e Barla (2017) introducendo due importanti cambiamenti:

- la pressione non viene più applicata quando l'apertura dei giunti raggiunge un certo valore ma quando la resistenza a trazione o a taglio dei giunti viene superata
- la pressione dell'acqua viene applicata solo alle fratture comunicanti con il pozzo

Si apporteranno quindi gli stessi miglioramenti alla FISH HYDRA3D.

Il criterio di rottura a taglio è espresso dall'Equazione 18:

$$\tau = \frac{c_{s,force}(ci)}{c_{length}(ci)} \cong \tau_{res} = c + \sigma_n tg\phi = c + \frac{c_{n,force}(ci)}{c_{length}(ci)} tg\phi \quad (18)$$

Mentre la rottura a trazione è espressa dall'Equazione 19:

$$\sigma_n = \frac{c_{n,force}(ci)}{c_{length}(ci)} \cong \sigma_{t,rockmass} \quad (19)$$

Dove $c_{n,force}(ci)$ è la forza normale applicata al contatto, $c_{s,force}(ci)$ è la forza di taglio applicata al contatto e $c_{length}(ci)$ è la lunghezza del contatto.

Se si verifica una delle due condizioni il contatto si rompe e a questo viene applicata la pressione esercitata dal fluido. In questo modo si passa da un criterio di spostamento a uno di resistenza.

Questo controllo viene eseguito automaticamente in 3DEC tramite il comando *cx_state(ci)* che restituisce i valori riportati in Tabella 4.5:

Tabella 4.5: Stati del subcontatto

Stato del subcontatto = 0	Nessuna rottura
Stato del subcontatto = 1	Scorrimento
Stato del subcontatto = 2	Scorrimento in passato
Stato del subcontatto = 3	Rottura a trazione

Per far sì che la pressione venga applicata solo alle fratture comunicanti col pozzo si procede come segue:

- si crea il gruppo di contatti “Frattura”, contenente tutti i contatti adiacenti ai due pozzi sui quali viene inizialmente applicata la pressione dell’acqua
- si scansionano tutti i contatti del dominio: se uno di questi è collegato a un contatto facente parte del gruppo “Frattura” allora se ne verifica lo stato
- si hanno allora 3 casi possibili:
 1. se la resistenza a taglio del contatto è inferiore alla tensione di taglio allora il contatto sta scorrendo
 2. se la resistenza a trazione del contatto è inferiore alla tensione normale allora il contatto si è rotto per trazione
 3. se entrambe le condizioni precedenti non si verificano allora il contatto non è fratturato o è stato fratturato in passato
- se ci si trova nel caso 1 o 2 allora il nuovo contatto viene aggiunto al gruppo “Frattura” e viene applicata la pressione del fluido altrimenti si passa al contatto successivo

Seguendo questa procedura ci si assicura che la pressione venga applicata solo se il giunto collegato a quello in esame fa parte del contorno del pozzo o se è già stato fratturato.

In Figura 4.7 il diagramma che descrive l’algoritmo:

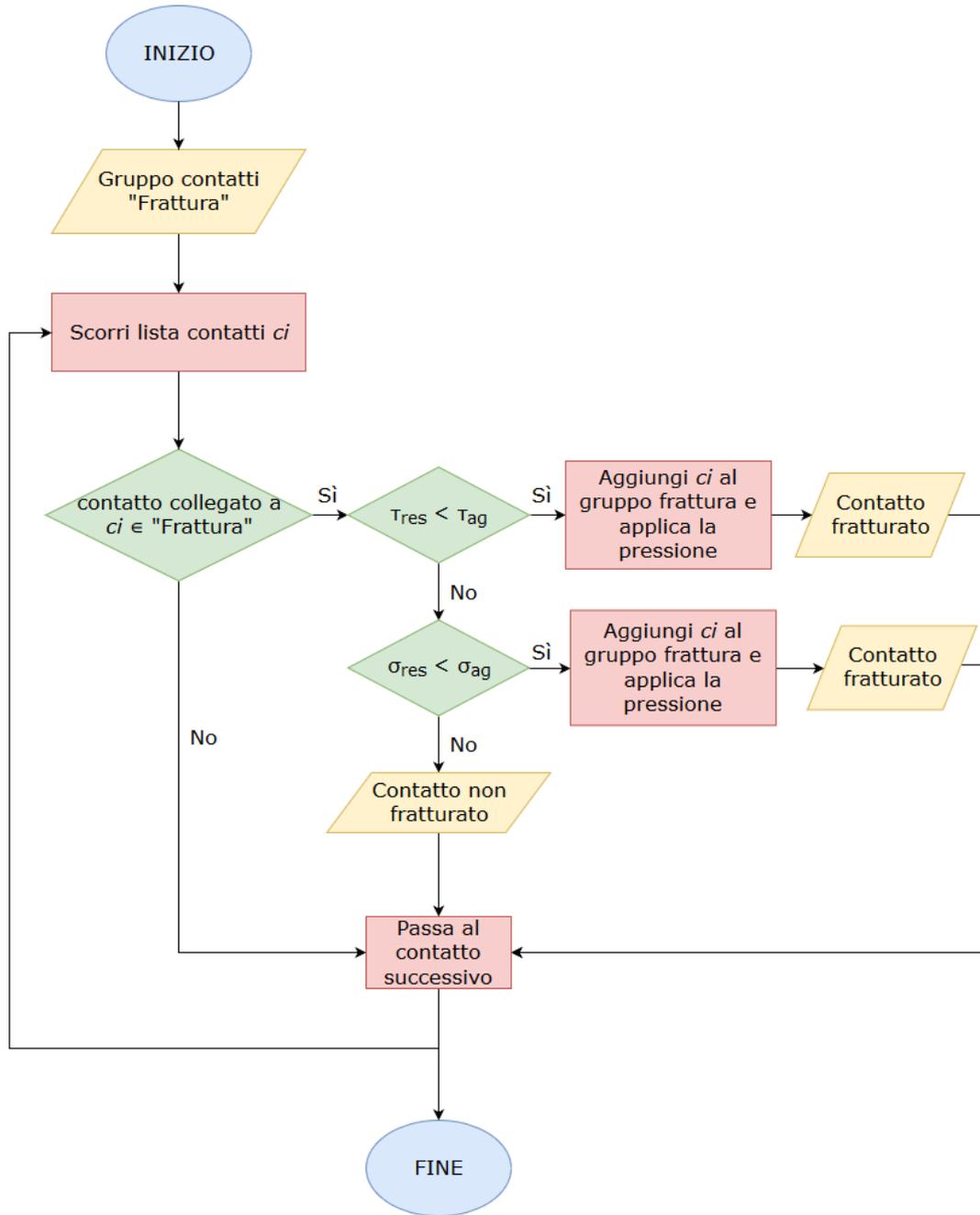


Figura 4.7: Diagramma di flusso HYDRA 3D modificata

4.5 Simulazione del processo di fratturazione idraulica con HYDRA 3D aggiornata

Per simulare correttamente il processo di fratturazione idraulica è necessario modellare anche la perforazione dei due pozzi e l'incremento di pressione per generare il sistema di fratture. Come in Insana (2016) si ipotizza di utilizzare un fango bentonitico, necessario per stabilizzare lo scavo, di densità pari a 1000 kg/m^3

in modo da non avere problemi quando alla pressione del fango verrà aggiunta quella dell'acqua.

La profondità a cui lo scavo non è più stabile è quando la tensione circonferenziale, definita dall'equazione di Lamé (valida per stato di stress isotropo), uguaglia σ_{ci} :

$$\sigma_{\theta} = p_0 + (p_0 - p_i) \cdot \frac{a^2}{r^2} = p_0 + (p_0 - 0) \cdot \frac{r^2}{r^2} = 2p_0 = \sigma_{ci} = 115,5 \text{ MPa} \quad (20)$$

Si verifica che il pozzo non è più stabile a partire dai 2000 m ma per precauzione il fango viene iniettato a partire dai 500 m. In Figura 4.8 si illustra la distribuzione delle pressioni (Insana, 2016).

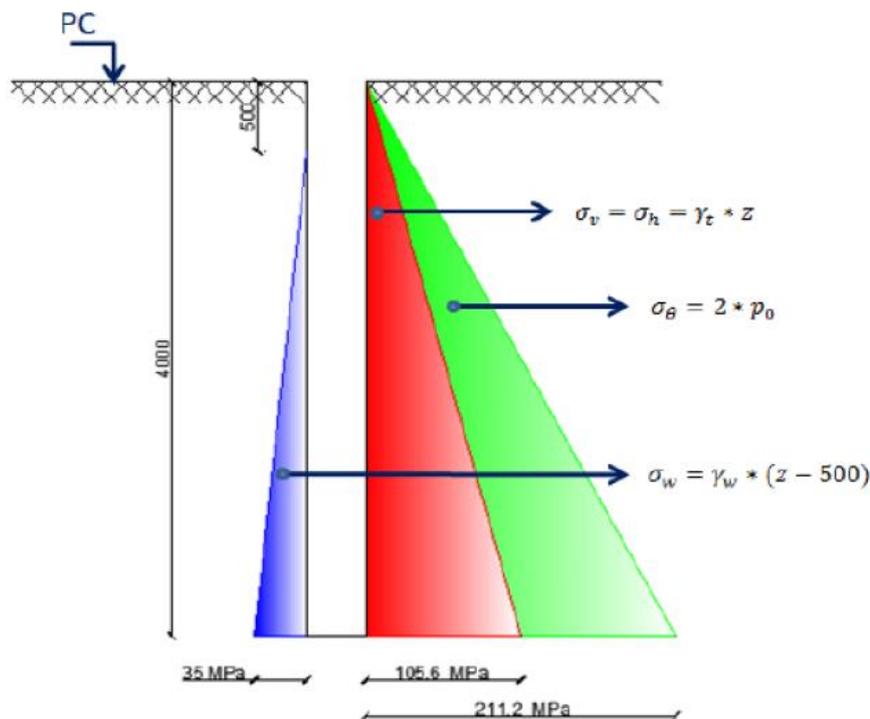


Figura 4.8: Distribuzione delle tensioni (Insana, 2016)

In rosso si rappresenta la tensione geostatica, in verde la tensione radiale e in blu la pressione del fango.

A 4000 m si ha che la pressione del fango bentonitico è pari a:

$$p_i = 1000 \text{ N/m}^3 \cdot (4000 - 500) \text{ m} = 35,6 \text{ MPa} \quad (21)$$

E la tensione geostatica è:

$$p_0 = 26400 \text{ N/m}^3 \cdot 4000 \text{ m} = 105,6 \text{ MPa} \quad (22)$$

Si procede quindi come segue (ciascuno step si ripete fino a raggiungere le condizioni di equilibrio):

- Si assegnano le condizioni al contorno

- Si perfora il primo pozzo e si assegna al contorno una pressione di 105,6 MPa. Questo step è utile per verificare la correttezza delle condizioni al contorno applicate.
- Si riduce la pressione interna a 35,6 MPa
- Si ripetono gli stessi step per il secondo pozzo
- Si incrementa la pressione interna al pozzo a 100 MPa e si richiama la funzione HYDRA 3D modificata
- Se non si raggiunge il collegamento tra i pozzi si incrementa la pressione interna e si ripete

4.5.1 Il processo di calcolo con HYDRA 3D

Nelle figure seguenti si descrive il funzionamento di HYDRA 3D e in parallelo l'andamento del processo di fratturazione. In viola sono rappresentati i punti di applicazione della pressione nello stato iniziale e poi al raggiungimento dell'equilibrio per ogni livello di pressione.

Inizialmente la pressione è applicata solo al contorno dei pozzi.

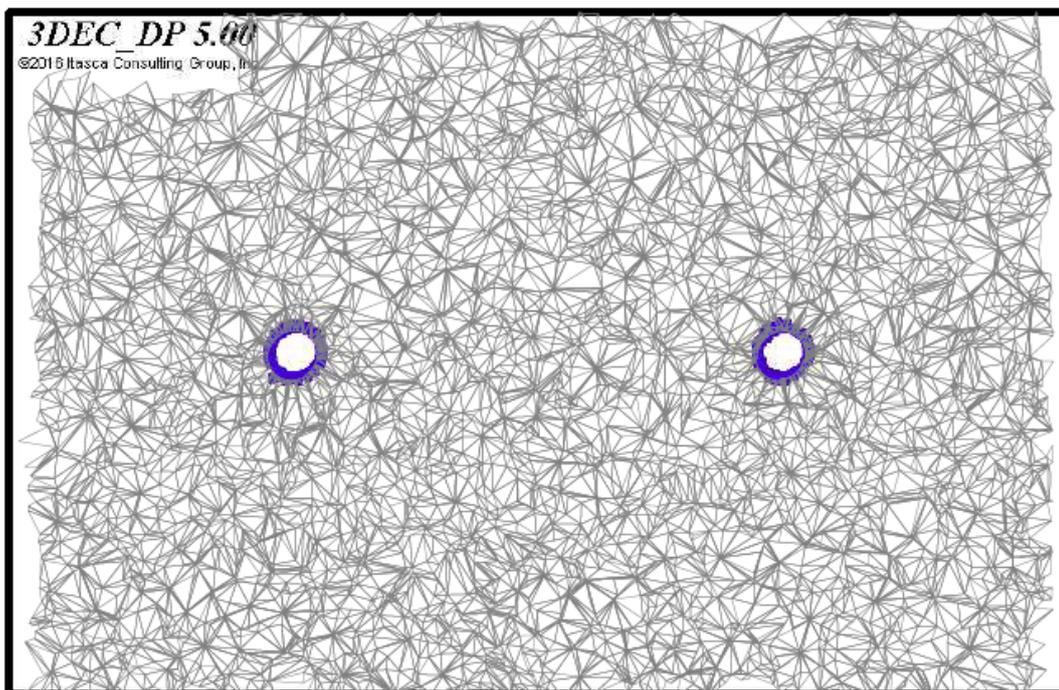


Figura 4.9: punti di applicazione pressione stato iniziale

Applicando una pressione di 100 MPa l'equilibrio viene raggiunto dopo 6 cicli di HYDRA 3D. Si osserva che il fluido (o la pressione applicata) ha raggiunto una distanza dal pozzo sinistro di 1,0 m e una distanza dal pozzo destro di 0,8 m (Figura 4.10). I subcontatti fratturati sono 12547 di cui 4495 rotti per trazione e 8052 per

taglio. In questa fase non è stato raggiunto il collegamento tra i pozzi. Si osserva infatti dalla che la gran parte delle aperture è dell'ordine del millimetro e si concentrano principalmente nell'intorno del pozzo (Figura 4.11). L'apertura media delle fratture è di 1,5 mm mentre la massima è di 50 mm.

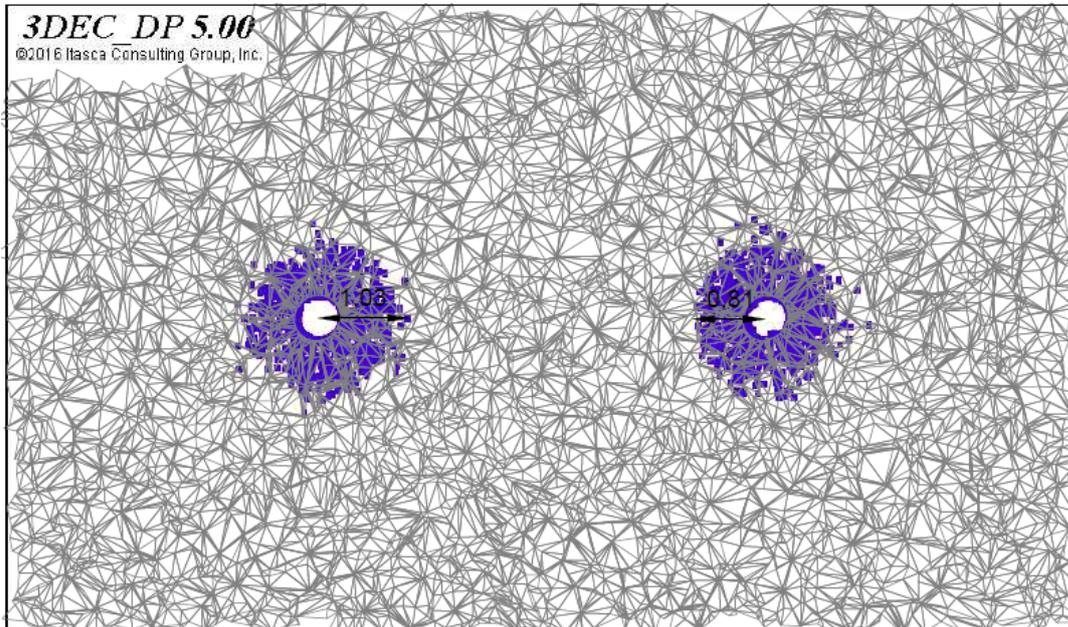


Figura 4.10: Applicazione delle nuove pressioni (100 MPa)

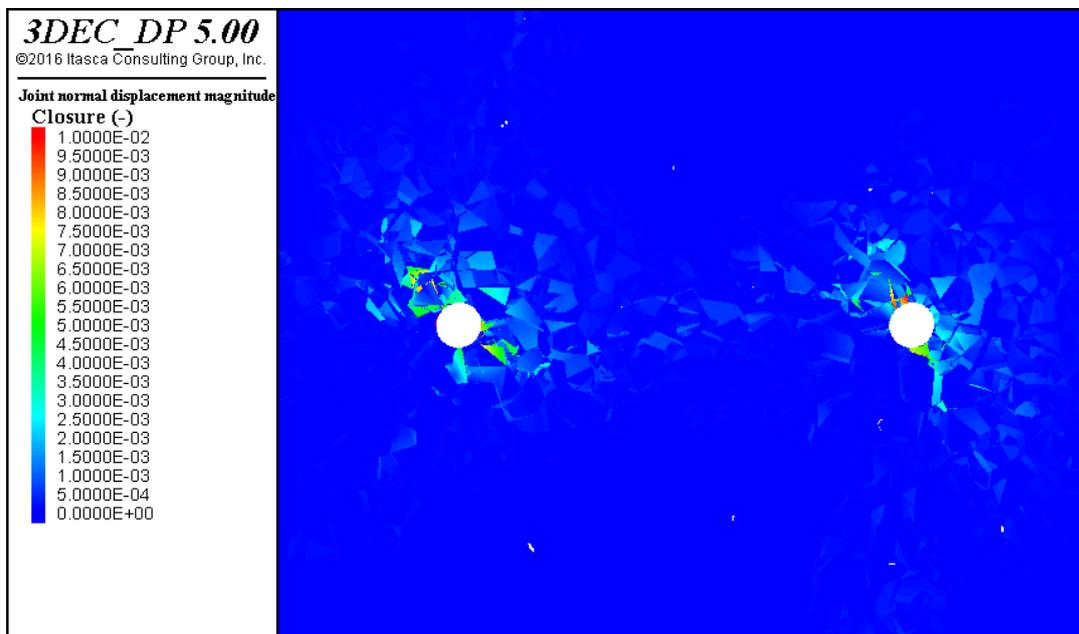


Figura 4.11: Apertura giunti (100 MPa)

Con l'applicazione di una pressione di 100 MPa non si è raggiunto il collegamento tra i pozzi pertanto si è aumentata la pressione a 150 MPa. In questo caso l'equilibrio è stato raggiunto dopo 8 cicli di HYDRA 3D e il fluido è arrivato a

una distanza di 1,5 m dal pozzo sinistro e 1,2 m dal pozzo destro (Figura 4.12). I subcontatti fratturati sono 25045 di cui 11087 per trazione e 13958 per taglio. L'apertura media dei giunti è aumentata ma la pressione non è ancora sufficiente a collegare i pozzi (Figura 4.13). L'apertura media è pari a 1,8 mm mentre la massima è di 52 mm.

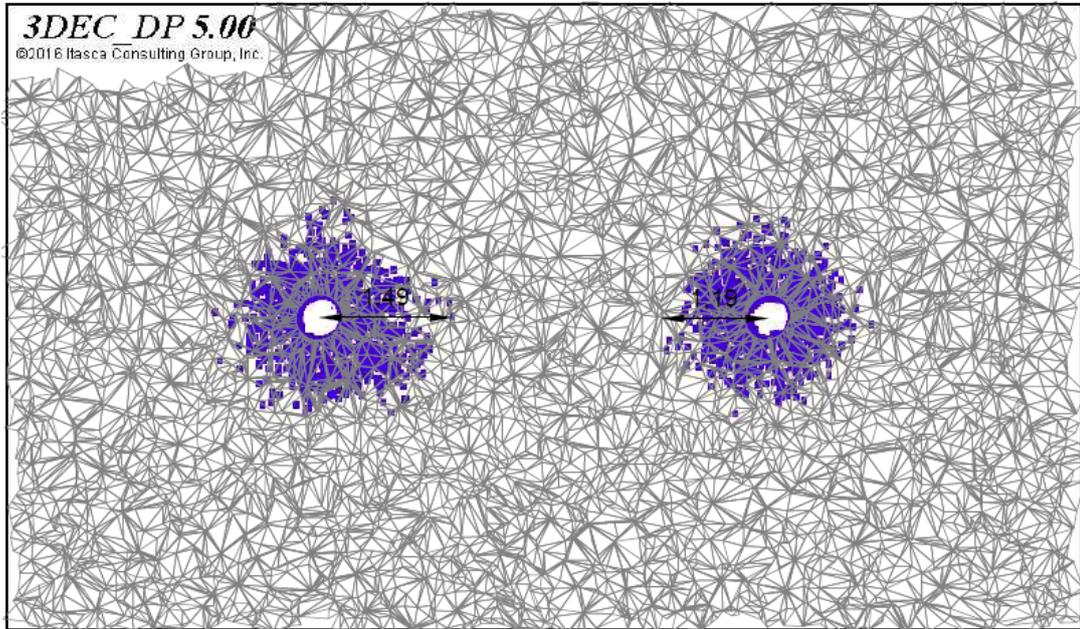


Figura 4.12: Nuove pressioni applicate (150 MPa)

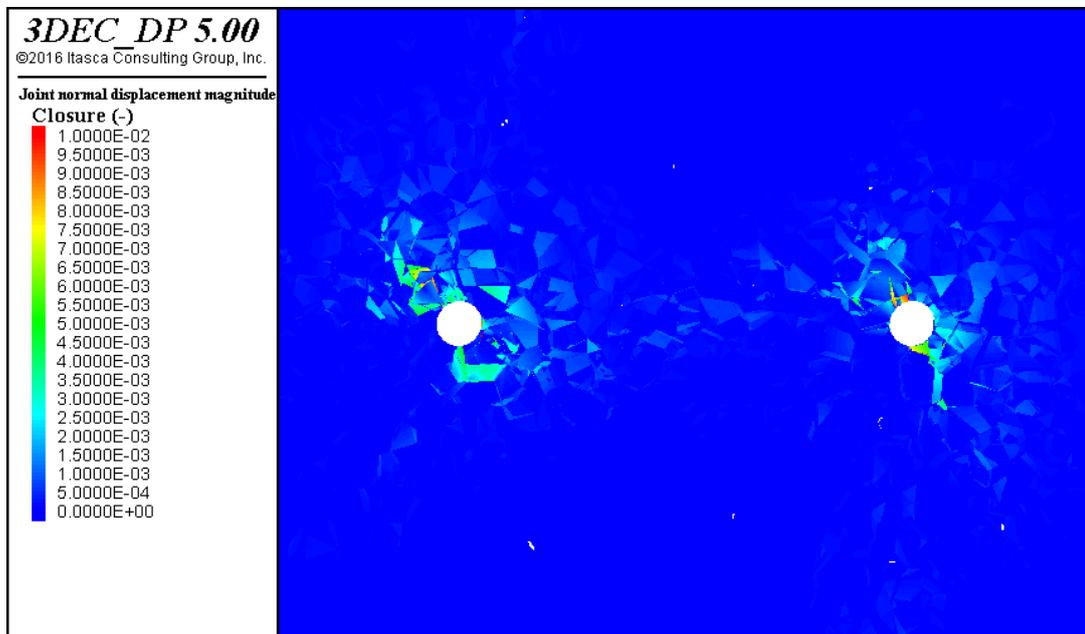


Figura 4.13: Apertura giunti (150 MPa)

La pressione di 150 MPa non è ancora sufficiente per collegare i due pozzi pertanto si aumenta ancora a 200 MPa. L'equilibrio è stato raggiunto dopo 9 cicli di

HYDRA 3D. In questo caso non si osserva una crescita significativa per il pozzo di sinistra mentre il pozzo di destra raggiunge 1,6 m (Figura 4.14). I subcontatti fratturati sono 39523 di cui 15864 a trazione e 23659 a taglio. L'apertura nell'intorno del pozzo aumenta ulteriormente e l'apertura in direzione dell'altro pozzo inizia ad aumentare ma non è ancora sufficiente per collegare i pozzi (Figura 4.15). L'apertura media delle fratture è di 1,9 mm mentre l'apertura massima è di 110 mm.

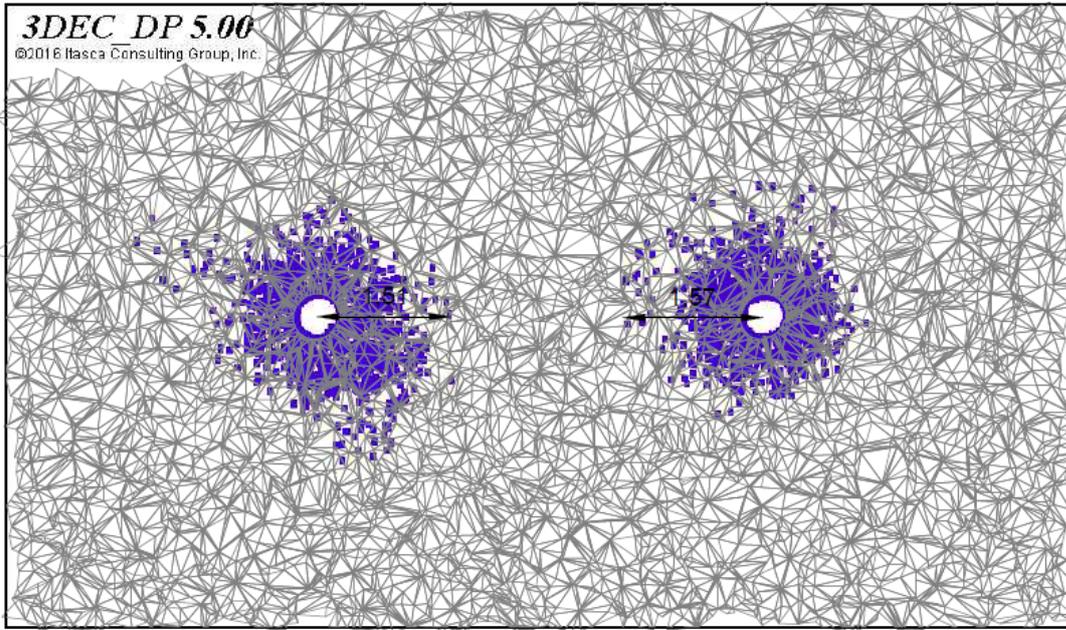


Figura 4.14: Nuove pressioni applicate (200 MPa)

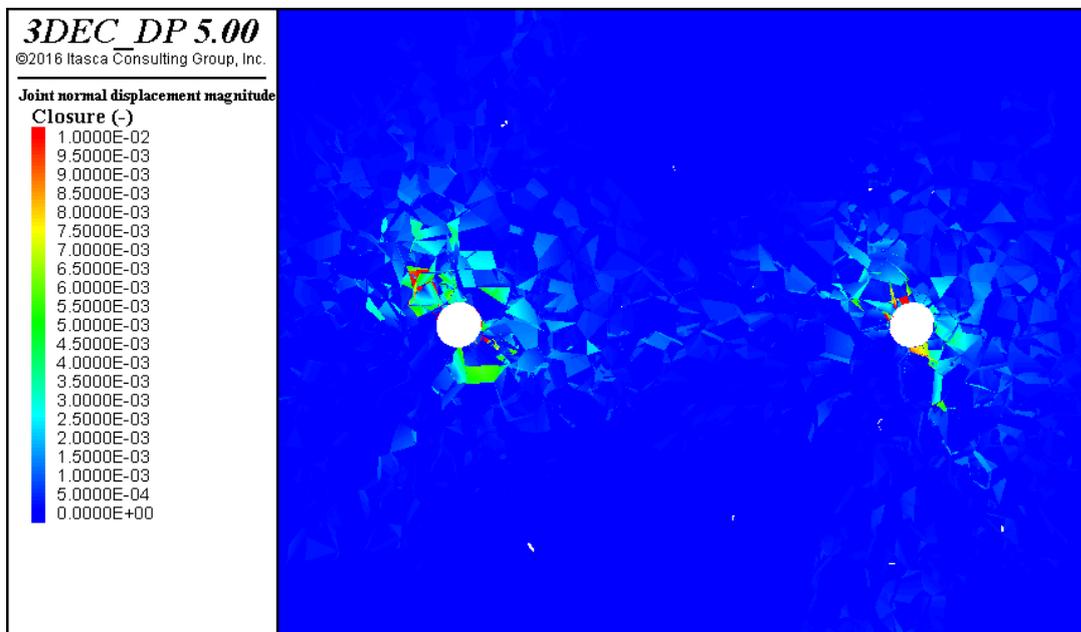


Figura 4.15: Apertura giunti (200 MPa)

Si aumenta la pressione a 250 MPa con la quale l'equilibrio è raggiunto dopo 12 cicli di HYDRA 3D. Il fluido raggiunge una distanza dal pozzo di sinistra di 2,3 m e dal pozzo di destra di 2,2 m (Figura 4.16). I subcontatti fratturati sono 77122 di cui 16447 per trazione e 60675 per taglio. Il collegamento tra i due pozzi diventa più marcato ma l'apertura è di pochi millimetri quindi si aumenta ulteriormente la pressione (Figura 4.17). L'apertura media delle fratture è di 2 mm e la massima di 150 mm

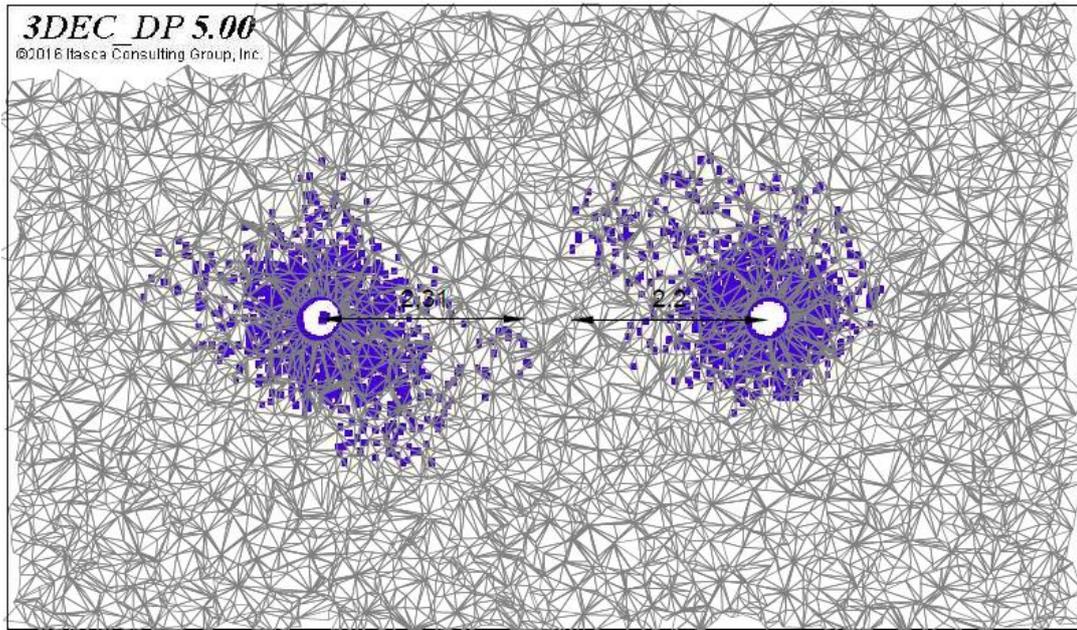


Figura 4.16: Nuove pressioni applicate (250 MPa)

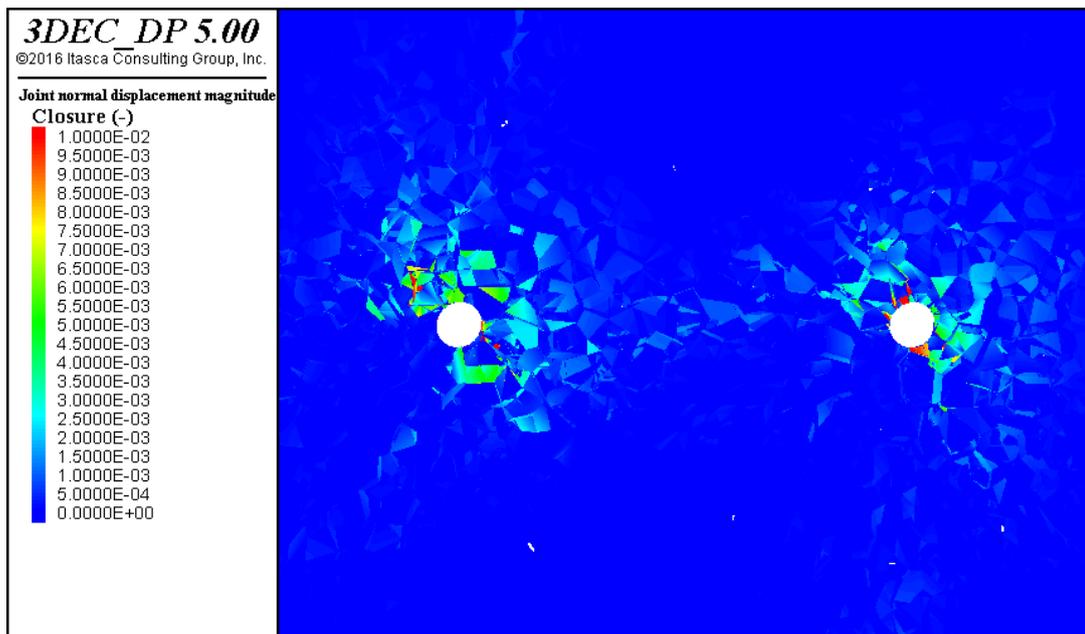


Figura 4.17: Apertura giunti (250 MPa)

Aumentando a 300 MPa la pressione, HYDRA si estende fino a collegare i due pozzi (Figura 4.18). I cicli necessari per arrivare a equilibrio sono 16. I subcontatti fratturati sono 130797 di cui 22858 per trazione e 107939 per taglio. Si raggiunge il collegamento tra i pozzi benché l'apertura dei giunti resti di piccola entità (Figura 4.19).

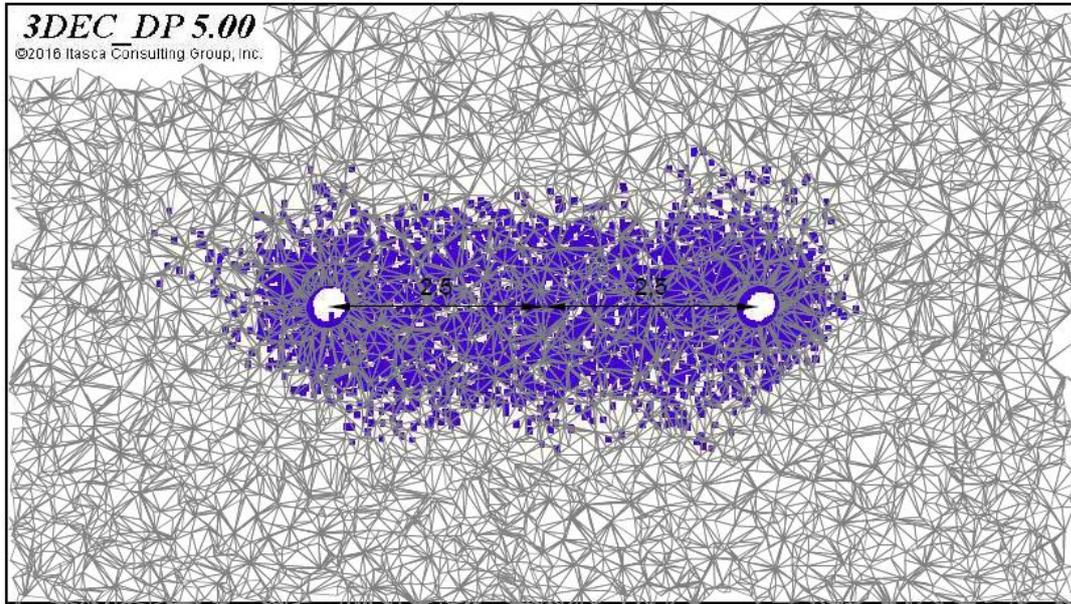


Figura 4.18: Nuove pressioni applicate (300 MPa)

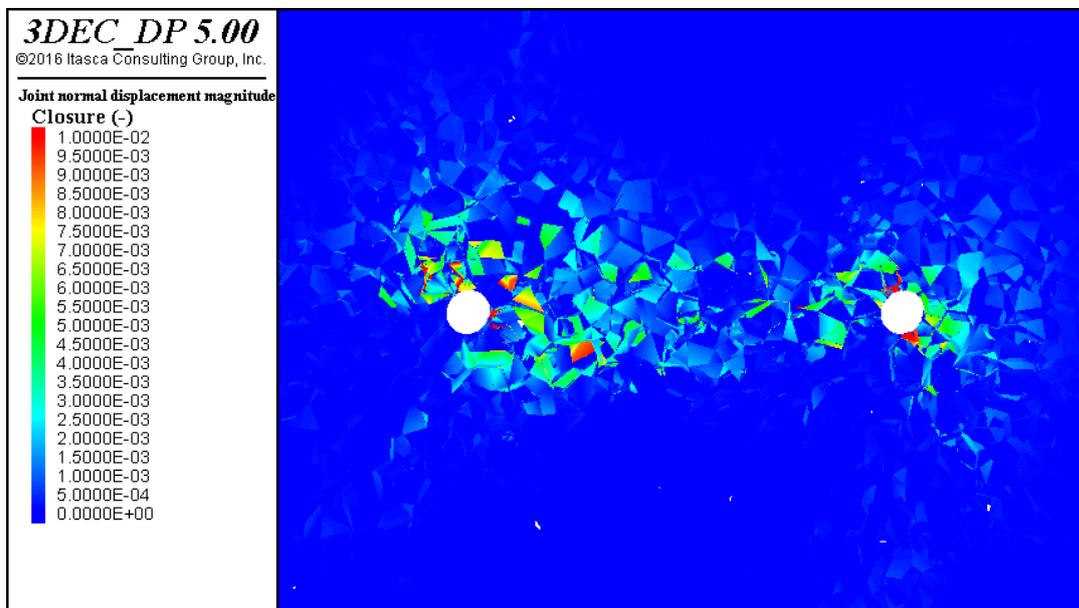


Figura 4.19: Apertura giunti (300 MPa)

Nella Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22, la vista 3D delle pressioni applicate con l'avanzare di HYDRA 3D.

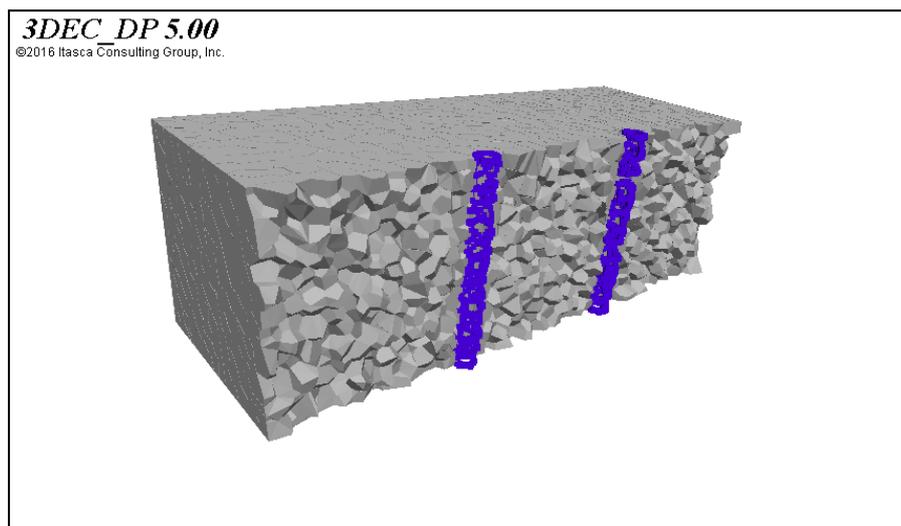


Figura 4.20: Applicazione delle pressioni nella condizione iniziale

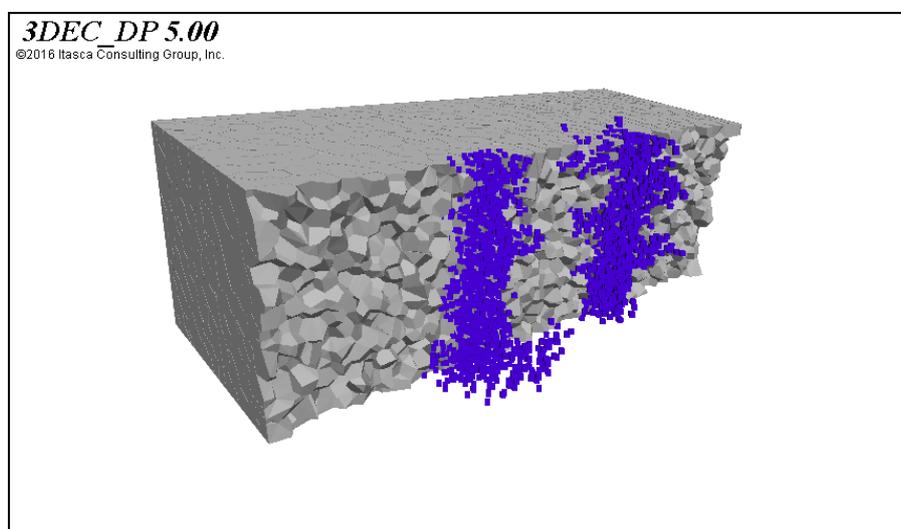


Figura 4.21: Applicazione delle pressioni dopo 8 cicli di HYDRA 3D

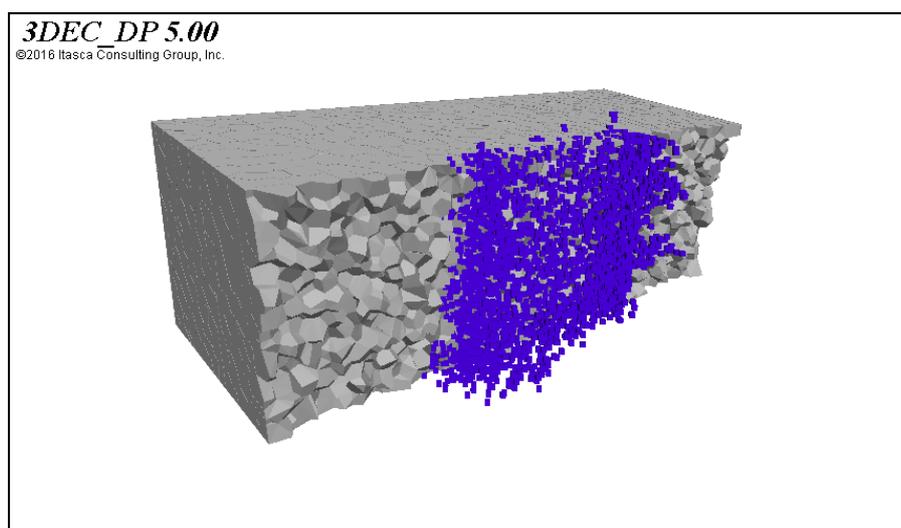


Figura 4.22: Applicazione delle pressioni dopo 16 cicli di HYDRA 3D

4.5.2 Analisi dei risultati

Nella Tabella 4.6 si riepilogano i risultati ottenuti:

Tabella 4.6: Riepilogo risultati HYDRA 3D

P [MPa]	Cicli	t	s	tot	a_med [m]	a_max [m]	r_sx [m]	r_dx [m]
100	6	4495	8052	12547	0.0015	0.05	1.01	0.8
150	8	11087	13958	25045	0.0018	0.052	1.5	1.2
200	9	15864	23659	39523	0.0019	0.11	1.5	1.6
250	12	16447	60675	77122	0.002	0.15	2.32	2.2
300	16	22858	107939	130797	0.005	0.22	2.5	2.5

In Figura 4.23 si rappresentano i subcontatti fratturati al raggiungimento dell'equilibrio per le diverse pressioni applicate. Si osserva che la gran parte dei contatti si frattura per taglio mentre le fratture per trazione aumentano molto più lentamente. Questo in accordo con i risultati ottenuti in diversi siti di prova riassunti in precedenza (MIT, 2006).

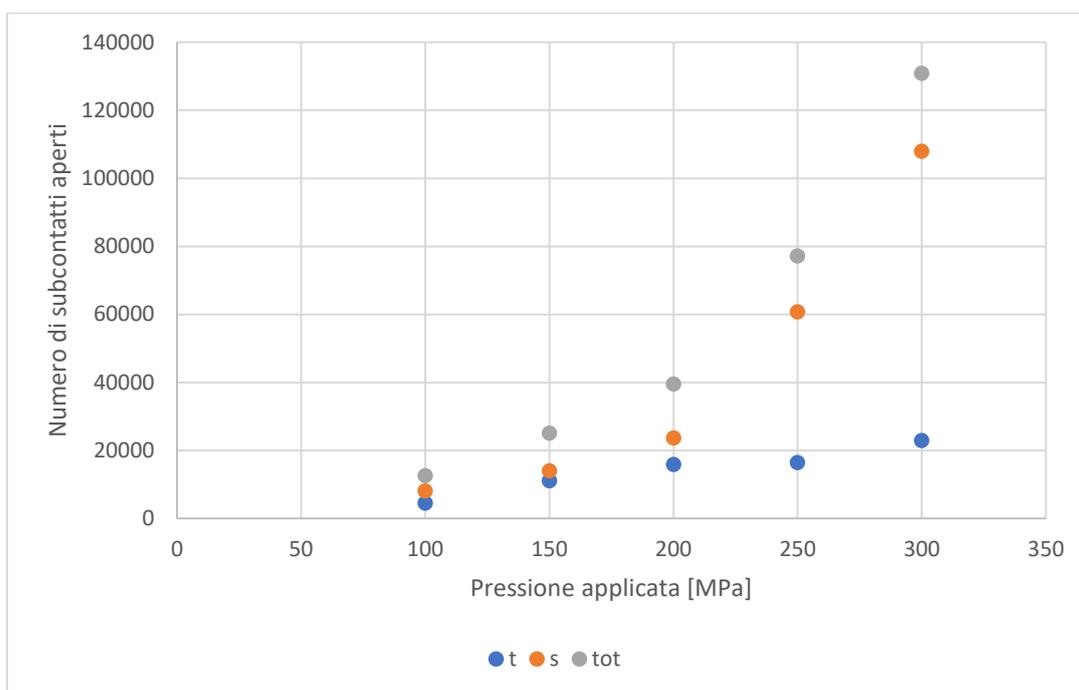


Figura 4.23: Rottura subcontatti

In Figura 4.24 si rappresenta la crescita delle pressioni applicate da HYDRA 3D per i diversi valori di pressione. Si osserva che l'estensione di HYDRA aumenta quasi allo stesso modo per entrambi i pozzi.

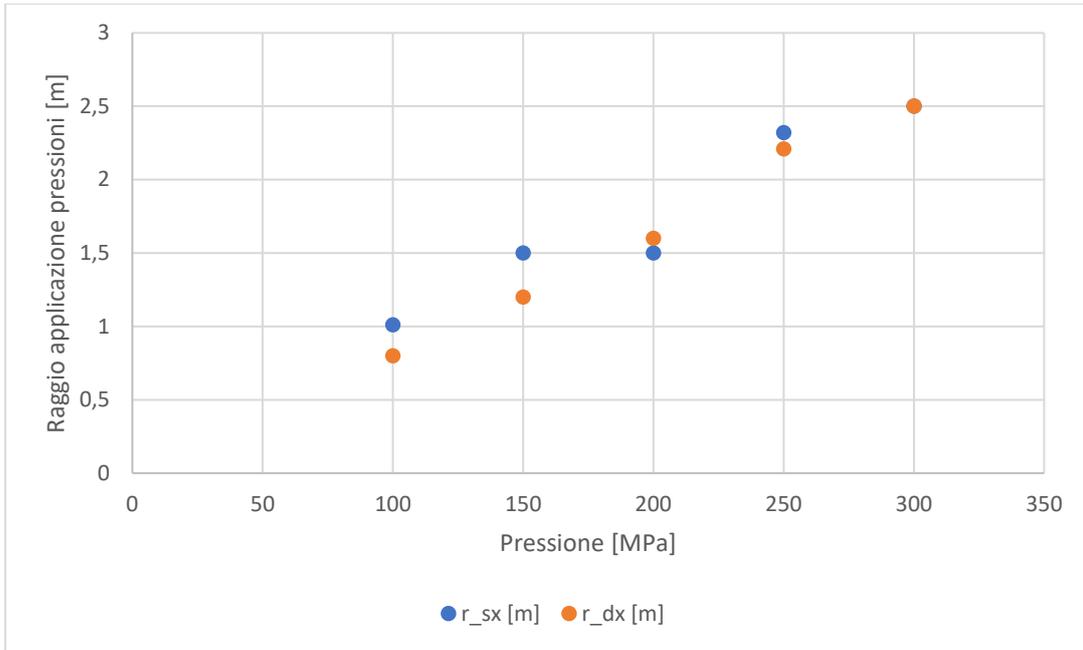


Figura 4.24: Crescita HYDRA

L'apertura media cresce di poco per pressioni fino a 250 MPa mentre raddoppia per la pressione di 300 MPa (Figura 4.25).

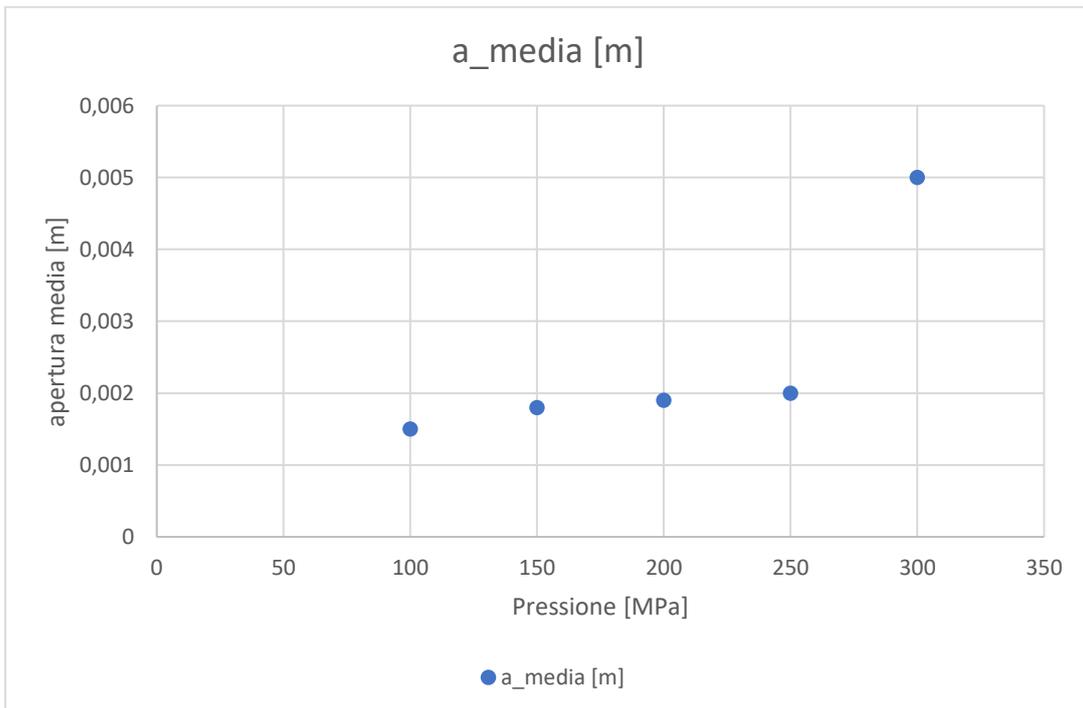


Figura 4.25: Andamento apertura media

L'apertura massima ha invece una crescita più lineare (Figura 4.26).

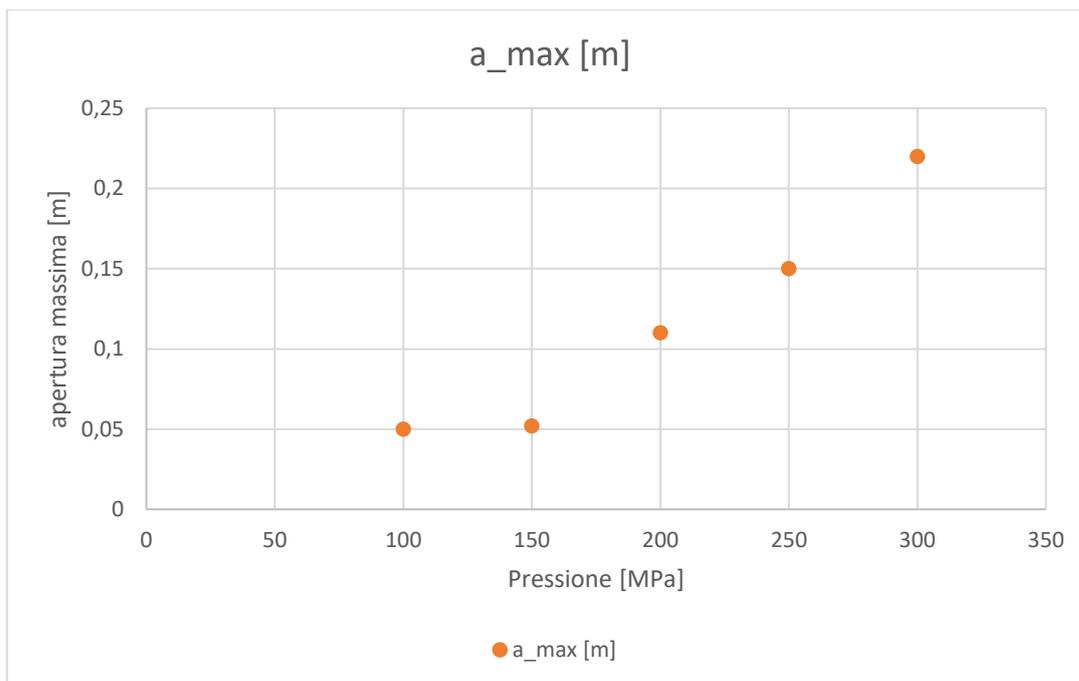


Figura 4.26: Andamento apertura massima

4.6 Variazione del modello

Si è modificato il modello di partenza per simulare la fratturazione con l'utilizzo di packer, quindi isolando una porzione di pozzo e applicando la pressione solo in quella porzione. Si è quindi perforato solo fino a 3 m di profondità. La pressione ora non viene più applicata su tutta la lunghezza del pozzo ma solo nella fascia compresa tra i 2 e i 3 m e sul fondo del pozzo. Si procede quindi come nel paragrafo precedente applicando una pressione di 300 MPa (Figura 4.27).

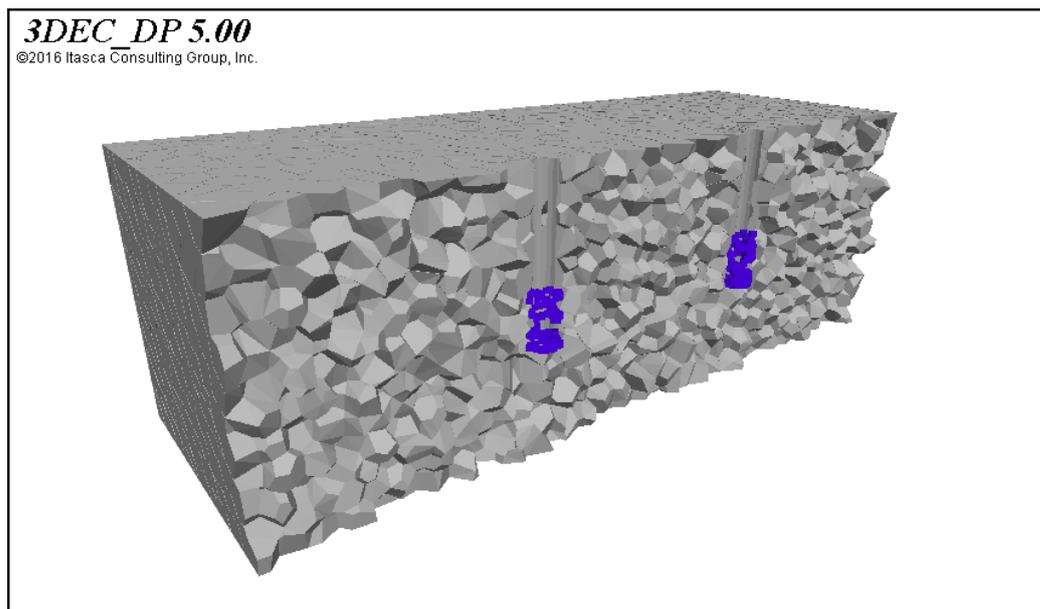


Figura 4.27: Stato iniziale modello modificato

Nelle figure seguenti l'evoluzione delle pressioni applicate.

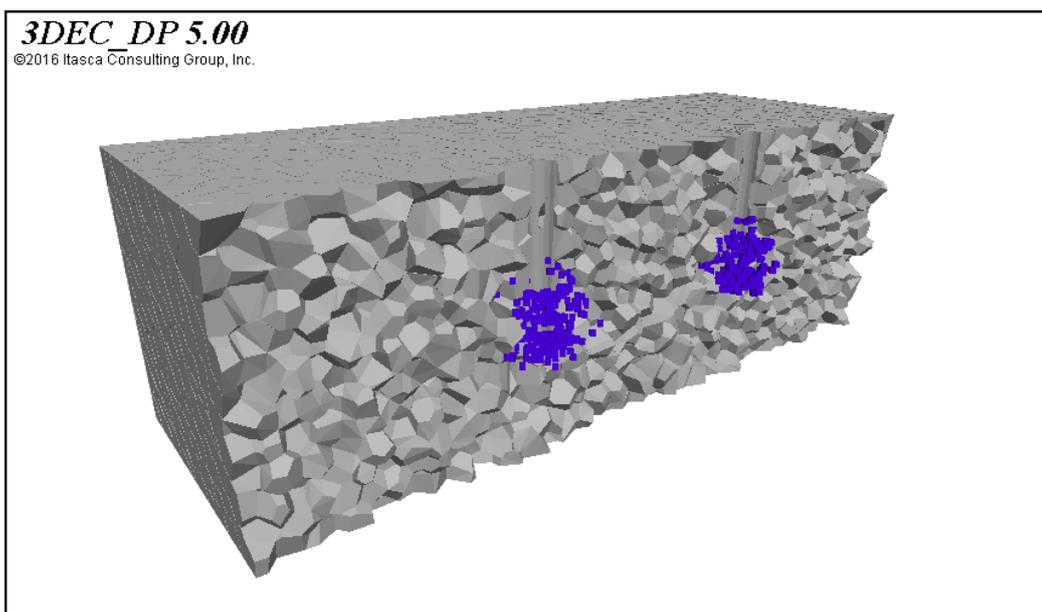


Figura 4.28: Pressioni applicate 4 cicli HYDRA 3D

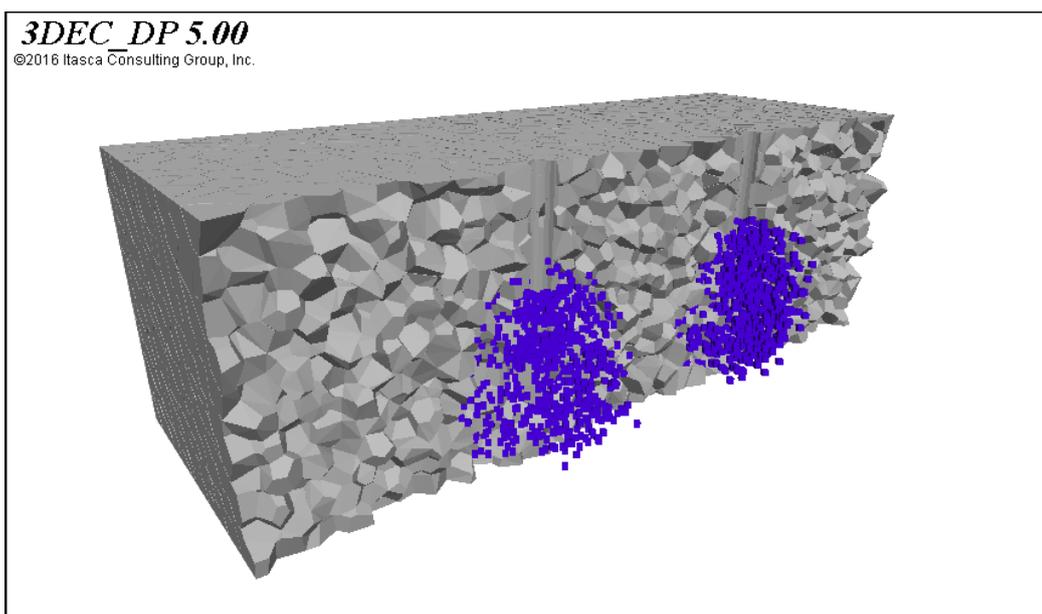


Figura 4.29: Pressioni applicate dopo 8 cicli di HYDRA 3D

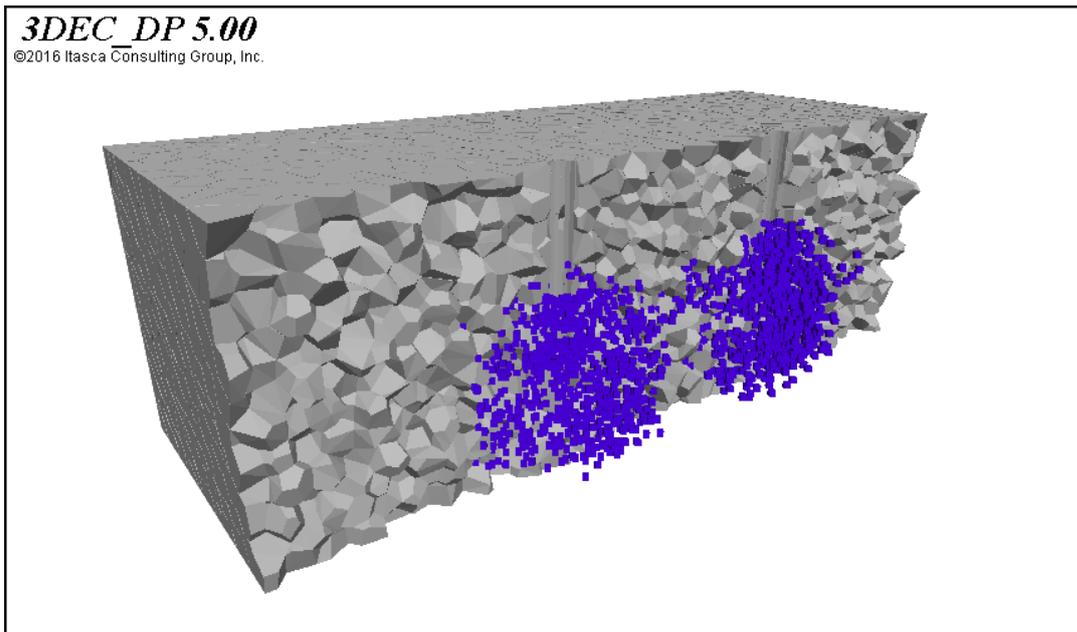


Figura 4.30: Pressioni applicate dopo 13 cicli di HYDRA 3D

In questo caso l'equilibrio è raggiunto dopo 13 cicli di HYDRA 3D e il collegamento è meno esteso. Ciò probabilmente è dovuto al confinamento maggiore dal momento che la pressione viene applicata solo al centro del dominio.

Sono stati fratturati 51740 contatti di cui 13329 per trazione e 38411 per taglio.

4.6.1 Confronto con risultati precedenti

Si seziona il dominio a una profondità di 2,5 m e si evidenzia il sistema di fratture ottenuto.

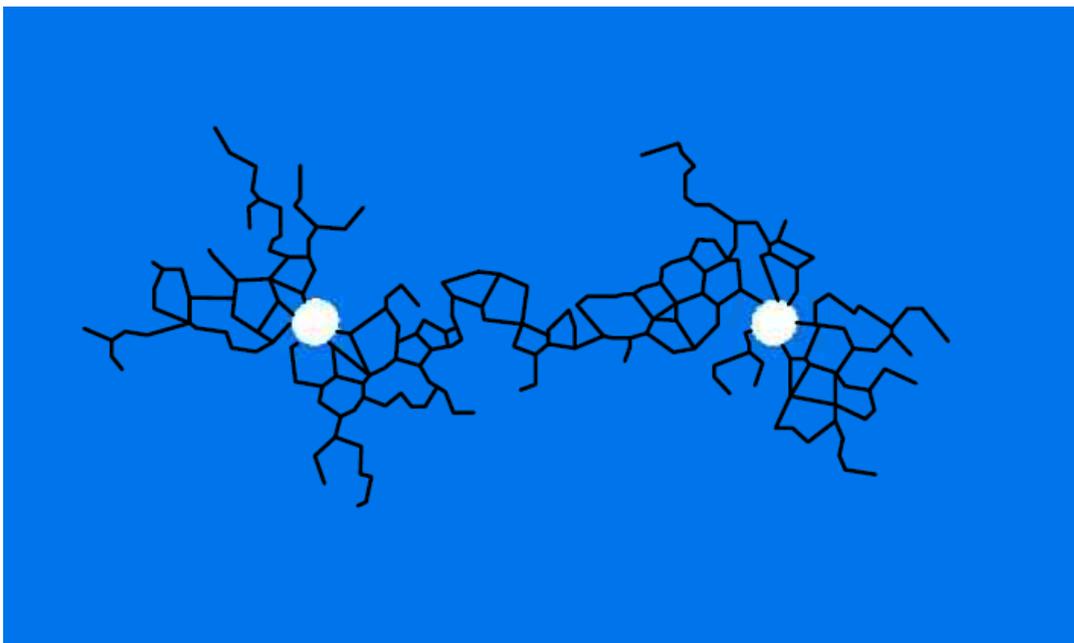


Figura 4.31: Sezione dominio a 2,5 m di profondità

Confrontando con i risultati ottenuti da Ceria (2015) con il software Y-GEO e da Insana (2016) con UDEC Voronoi, si osserva che nei tre casi le fratture si propagano in tutte le direzioni a causa dello stato di stress isotropo. Il sistema di fratture creato dai modelli di Ceria e Insana è più fitto a causa della differenza di dimensione dei grani. Tale dimensione è stata aumentata in 3D per avere ragionevoli tempi computazionali.

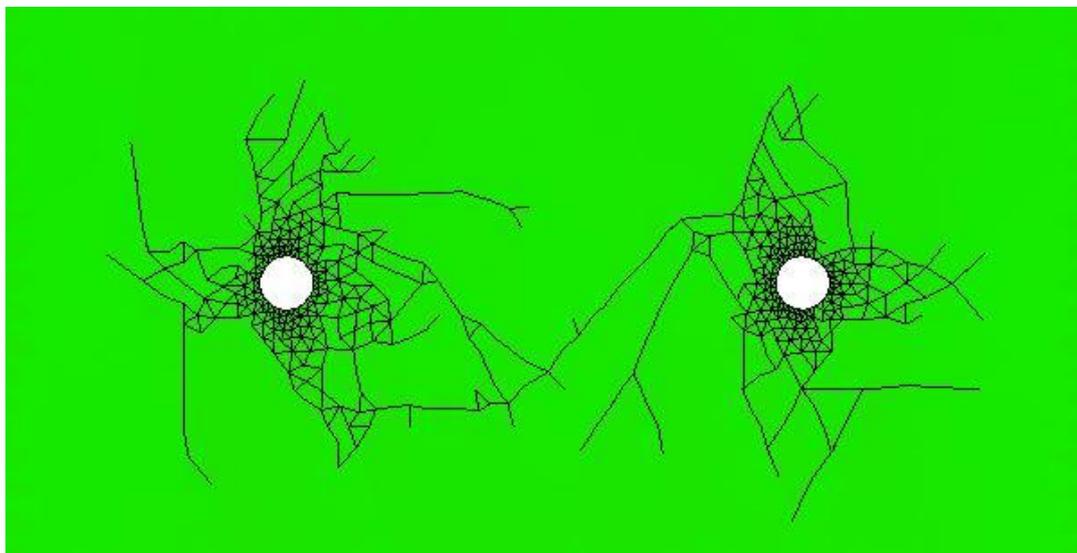


Figura 4.32: Sistema di fratture Ceria (2015)

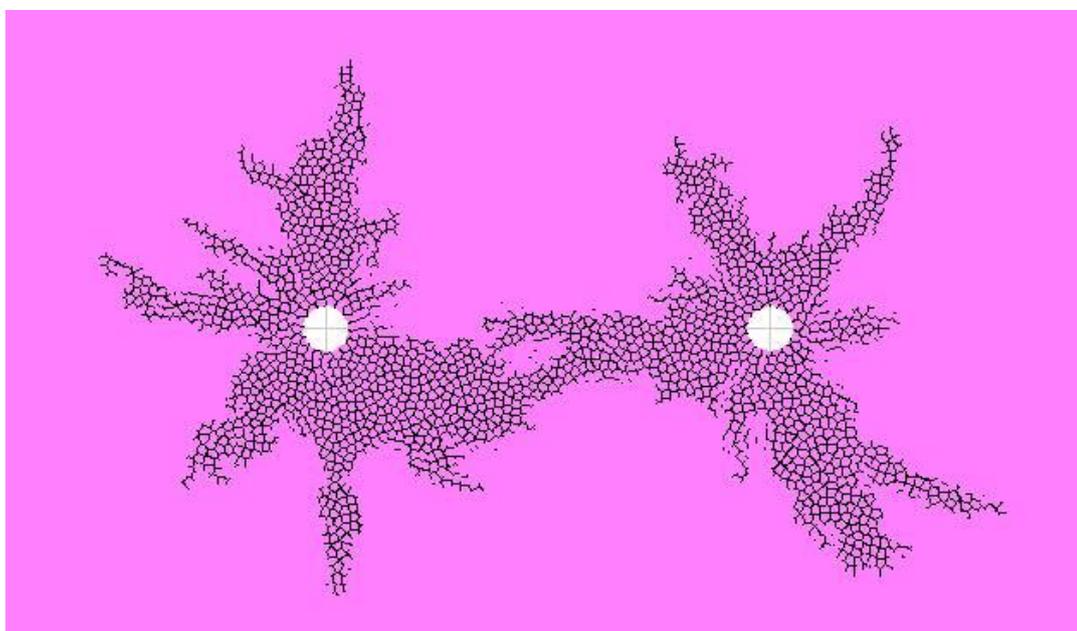


Figura 4.33: Sistema di fratture Insana (2016)

Nell'articolo di Insana e Barla (2017) il collegamento tra i pozzi avviene dopo 14 cicli di HYDRA e applicando una pressione di 250 MPa. Nel caso 3D, invece, il

collegamento viene raggiunto dopo 16 cicli di HYDRA a 300 MPa. Anche in questo caso i giunti fratturati per taglio superano quelli per trazione.

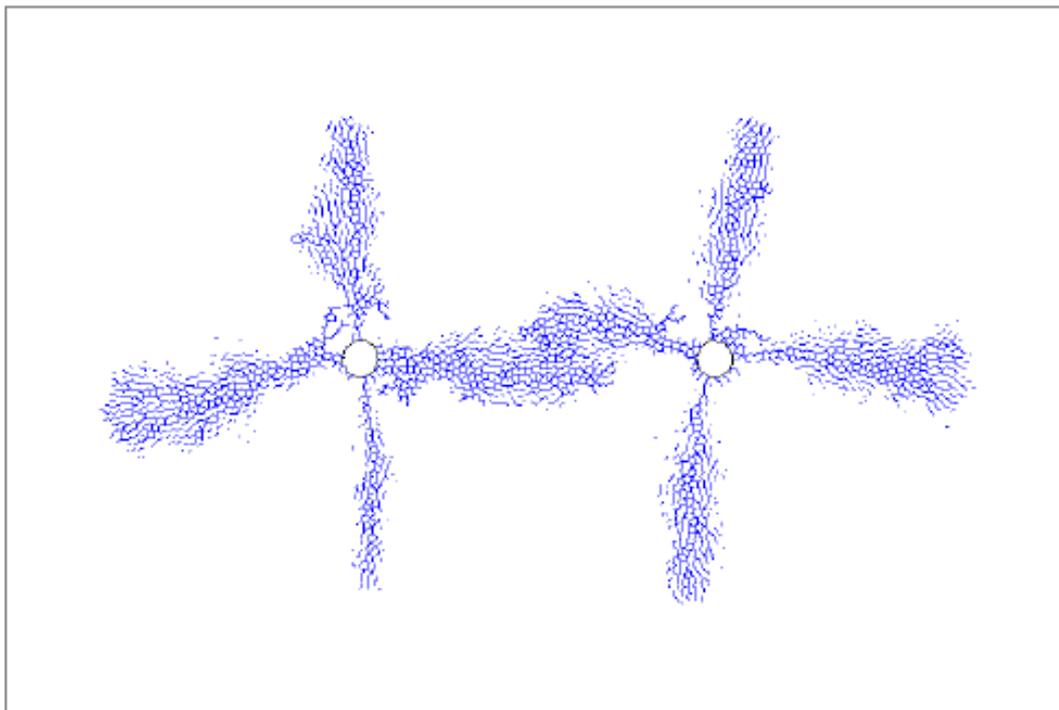


Figura 4.34: Risultato fratturazione Insana e Barla (2017)

4.7 Conclusioni

Nel presente capitolo si è simulata la fratturazione idraulica di un semplice sistema geotermico composto da due pozzi di diametro 50 cm distanti 5 m.

Il risultato desiderato si è ottenuto alternando cicli di applicazione della pressione e cicli di HYDRA 3D, FISH che consente di estendere la pressione del fluido col procedere della fratturazione.

Si ottiene che la pressione del fluido necessaria a collegare i pozzi è pari a 300 MPa.

Dopodiché si modifica il modello applicando la pressione del fluido solo a una profondità compresa tra i 2 m e i 3 m e sul fondo del pozzo. Anche in questo caso si riesce a collegare i pozzi con una pressione di 300 MPa.

Capitolo 5

Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi era di dimostrare l'applicabilità di 3DEC, unita alla tassellatura Voronoi generata con Neper, per la simulazione della fratturazione idraulica in sistemi geotermici profondi. Nei paragrafi seguenti si riassume il lavoro svolto.

Dopo uno studio bibliografico dettagliato si è analizzata la possibilità di riprodurre il comportamento di un provino di granito con un modello agli elementi distinti composto da grani Voronoi. Per questo motivo si è generato un provino di 50x100 mm in Neper composto da grani Voronoi aventi spigolo medio pari a 7 mm. Dopodiché con un processo di trial and error sono state calibrate le microproprietà del provino sintetico affinché avesse proprietà meccaniche uguali a quelle del provino reale. Si è dimostrato che il comportamento del modello rappresenta adeguatamente il comportamento reale quindi la tassellatura Voronoi si dimostra utile per simulare il comportamento di un materiale roccioso.

Dopodiché si è passati alla scala del sito modellando un semplice sistema geotermico HDR composto da due pozzi di diametro 50 cm distanti 5 metri tra loro. Il dominio di 15x10x5 m è stato discretizzato con grani Voronoi di spigolo medio pari a 20 cm. Fondamentale in questa fase è la calibrazione dei parametri dell'ammasso roccioso. Per questo motivo si è analizzata la variazione delle proprietà con la scala. A tal fine si sono costruiti 5 provini di dimensioni 1x2 m, 2x4 m, 3x6 m, 4x8 m, 5x10 m e 6x12 m. Tutti i provini sono stati discretizzati con grani Voronoi

con spigolo medio pari a 20 cm, come il dominio in esame. Sottoponendo i provini a prova di compressione monoassiale si è osservato che le proprietà meccaniche ottenute decrescevano notevolmente all'aumentare della scala a causa dell'aumento delle discontinuità per poi assestarsi, probabilmente a causa dell'effetto di ingranamento maggiore nei provini più grandi. Per questo motivo si è calibrato il provino di 3x6 m e si sono estese le proprietà all'ammasso roccioso.

Generato il modello si è modificata la FISH HYDRA 3D introducendo due cambiamenti: la pressione viene applicata ai giunti quando questi si fratturano e non quando viene superata una certa apertura; la pressione viene applicata solo ai giunti comunicanti con il pozzo.

A partire dal dominio parallelepipedo intatto si è simulata la perforazione dei due pozzi e si è applicata la pressione dell'acqua al contorno del pozzo. Si è iniziato con una pressione di 100 MPa aumentando di 50 MPa se, raggiunte le condizioni di equilibrio, i due pozzi non venivano collegati. Applicando una pressione di 300 MPa si è raggiunto un sufficiente collegamento tra i pozzi.

Si sono infine confrontati i risultati con quelli di Ceria (2015), Insana (2016) e Insana e Barla (2017) ottenendo risultati paragonabili.

Per sviluppi futuri si consiglia di effettuare nuovi test con diversi materiali e diverso numero di blocchi o inserire un sistema di faglie per analizzare l'interazione e gli ostacoli che potrebbe provocare al collegamento tra i pozzi.

Bibliografia

AGEA, <https://www.agea.org.au/geothermal-energy/>, 2019.

Barla M., *Elementi di meccanica delle rocce*, Celid, Torino, 2010.

Bombarda P., Gaia M., *Energia geotermica: una grande risorsa nascosta in Energia* anno XXXI, n° 2, p. 84 - 94, 2010

Brostow, W., Dussault, J.-P. & Fox, B.L. 1978. *Construction of Voronoi polyhedra. Journal of Computational Physics*, v. 29, no. 1, p. 81-92.

Brown, D.W., Duchane, D.V., Heiken, G., Hriscu, V.Th., *Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy*, 2012

Breede K., Dzebisashvili K., Liu X., Falcone G., *A systematic review of enhanced geothermal system: past, present and future*, in Geothermal Energy, 2013

Ceria F., 2015. *Modellazione numerica FDEM del processo di fratturazione idraulica nell'ambito di sistemi geotermici HDR*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino.

Cundall, P.A., 1971. *A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems*. Proceedings of the symposium of the International Society of Rock Mechanics, Vol. 1, No. II-8, Nancy, France.

Cundall, P.A., Strack O.D.L, 1979. *A discrete numerical model for granular assemblies*. Géotechnique, Vol. 29, pp. 47-65.

Cundall, P.A., Hart R.D., 1992. *Numerical modeling of discontinua*. Engr. Comp, Vol. 9 (2), 101-113.

Cundall, P.A., et al., 1978. *Computer modeling of jointed rock masses*. U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Tech. ReportNo. 78-4.

De-Fu Zhu et al 2017 *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 25 085005

Delton Chen, Concepts of a Basic EGS Model for the Cooper Basin, Australia, Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010

Dickson M.H., Fanelli M., *Cos'è l'Energia Geotermica?*, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy, 2004

Dickson M.H., Fanelli M., Manetti P., Zan L., *Enciclopedia degli idrocarburi (Volume III) "Nuovi sviluppi: energia, trasporti, sostenibilità"*

Fairhurst C., *Fractures and fracturing: hydraulic fracturing in jointed rock*, in ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, 2013.

Finney, J.L. 1979. *A procedure for the construction of Voronoi polyhedra*. Journal of Computational Physics, v. 32, no. 1, p. 137-143.

Hamidi F., Mortazavi A., *A new three dimensional approach to numerically model hydraulic fracturing process*, in Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 124, no. 0, p. 451-467, 2014.

Hamidi F., Galindo Torres S.A., Scheuermann A., *3D modeling of hydraulically induced crack initiation and propagation*, Conference paper, March 2016.

Hamidi F., Mortazavi A., *Three Dimensional Modeling of Hydraulic Fracturing Process in Oil Reservoirs*, 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium: Chicago, IL, 2012.

Hochstein M., *Small Geothermal resources - A guide to Development and Utilization*, Edition: Rome 1990, Chapter: 2. Classification and assessment of Geothermal Resources, Publisher: UNITAR/UNDP Centre on small Energy Sources - Rome Italy, Editors: Mary H. Dickson and Mario Fanelli, pp.31-59

Insana A., *Modelling Hydrofracking for deep geothermal energy exploitation by Voronoi tassellation*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2016

Insana A., Barla M., Elmo D., 2016, *Multi scale numerical modelling related to hydrofracking for deep geothermal energy exploitation*, in Procedia Engineering n° 158, p. 314 – 319, 2016.

Insana A., Barla M. *A Voronoi-based Algorithm for Hydraulic Fracturing Simulation in Deep Geothermal Wells*, 15th IACMAG, 19-23 October 2017, Wuhan, China

Itasca, *3DEC (3 dimensional distinct element code) version 5.0*, Minneapolis, MN, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2013.

Jung R., *EGS – Goodbye or Back to the Future*, Cap 5 in Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, 2013.

-
- Li X.F., Li H.B., Zhao J., *3D polycrystalline discrete element method (3PDEM) for simulation of crack initiation and propagation in granular rock*, in *Computer and Geotechnics* n° 90, p. 96 – 112, 2017.
- McClure, M.W., 2012. *Modeling and characterization of hydraulic stimulation and induced seismicity in geothermal and shale gas reservoirs*. PhD Thesis, Stanford University.
- Medvedev, N.N. 1986. *The algorithm for three-dimensional voronoi polyhedra*. *Journal of Computational Physics*, v. 67, no. 1, p. 223-229.
- MIT, Tester J.W., Anderson B.J., Batchelor A.S., Blackwell D.D., DiPippo R., Drake E.M., Garnish J., Livesay B., Moore M.C., Nichols K., Petty S., Toksöz M.N., Veatch R.W., *The Future of geothermal energy - impact of enhanced geothermal systems on the United States in the 21st Century*, 2006
- Nasehi, M.J. & Mortazavi, A. 2013. *Effects of in-situ stress regime and intact rock strength parameters on the hydraulic fracturing*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 108, no. 0, p. 211-221.
- Pirayehgar, A. & Dusseault, M.B. 2015. *The Stress Ratio Effect on Hydraulic Fracturing in the Presence of Natural Fractures*. 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Minneapolis, MN, USA, American Rock Mechanics Association
- Potter R., Robinson E., Smith M., *Method of extracting heat from dry geothermal reservoirs*, 1974.
- Potyondy, D.O., Cundall, P. A., Lee, C.A. 1996. *Modelling Rock Using Bonded Assemblies of Circular Particles*, American Rock Mechanics Association.
- Quey, R., Dawson, P., & Barbe, F. (2011). *Large-scale 3D random polycrystals for the finite element method: Generation, meshing and remeshing*. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 1729-1745.
- Riahi, A. & Damjanac, B. 2013a. *Numerical Study of Hydro-shearing in Geothermal Reservoirs with a Preexisting Discrete Fracture Network* Stanford Geothermal Workshop, p. 13.
- Riahi, A. & Damjanac, B. 2013b. *Numerical Study of Interaction Between Hydraulic Fracture and Discrete Fracture Network*. In Bungler, A. P., McLennan, J., and Jeffrey, R., (eds.), *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*, INTECH, p. 16.
-

Sanyal, S. K. and S. J. Butler. 2005. “*An Analysis of Power Generation Prospects From Enhanced Geothermal Systems.*” Geothermal Resources Council Transactions, 29.

Shy-Min L., *A global review of enhanced geothermal system* in Renewable & Sustainable Energy Review n° 81, p. 2902–2921, 2018.

Terramagra I., *Modellazione Numerica 3D del processo di fratturazione idraulica*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2018.

Tester J.W., Brown D.W., Potter R.M., *Hot Dry Rock geothermal Energy – a new Energy agenda for the 21st century*, Los Alamos National Laboratory report LA-11514-MS. US Department of Energy, Washington D.C, 1989.

Unione Geotermica Italiana, *La geotermia ieri, oggi, domani*, I.R. Allegato al N. 1-2/2007 di *Geologia Tecnica e Ambientale*, 2007

Zangeneh, N., Eberhardt, E. & Bustin, M. 2013. *A Numerical Investigation of Fault Slip Triggered by Hydraulic Fracturing.* in Bungler, A. P., McLennan, J. & Jeffrey, R., (eds.), *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*, INTECH, p. 12.

Zangeneh, N., Eberhardt, E. & Bustin, R.M. 2014. *Investigation of the influence of natural fractures and in situ stress on hydraulic fracture propagation using a distinctelement approach.* Canadian Geotechnical Journal, v. 52, no. 7, p. 926-946.

Zhang X., Jeffrey R.G., Bungler A.P., Thiercelin M., *Initiation and growth of a hydraulic fracture from a circular wellbore*, in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011.

Allegati

A.1 HYDRA 3D (modificata)

```
;FISH CRACK
def HYDRA3Dter
  Fxx=0
  Fyy=0
  Fzz=0
  area=0
  sa=0
  sb=0
  t=0
  contatto=0
  fr=0
  ci = contact_head ; lista contatti
  loop while ci # 0
  contatto=contatto+1
  vicino1=c_link1(ci)
  vicino2=c_link2(ci)
  if vicino2#0 & vicino1#0
    if c_group(vicino2)=='Frattura' | c_group(vicino1)=='Frattura'
      local cxi = c_cx(ci)
      loop while cxi # 0 ;per tutti i subcontatti del contatto
      if cx_group(cxi)!='Applicata'
        if cx_state(cxi)==1
          if c_group(ci)!='Frattura'
            command
            group contact 'Frattura' range id @ci
            save HYDRA300_cicloparziale.3dsav
            endcommand
            fr=fr+1
          endif
        endif
      if cx_state(cxi)==2
        if c_group(ci)!='Frattura'
```

```
command
group contact 'Frattura' range id @ci
save HYDRA300_cicloparziale.3dsav
endcommand
fr=fr+1
endif
endif
if cx_state(cxi)==3
  if c_group(ci)='Frattura'
    command
    group contact 'Frattura' range id @ci
    save HYDRA300_cicloparziale.3dsav
    endcommand
    fr=fr+1
    endif
  endif
  if cx_state(cxi)==1 ;il subcontatto sta scorrendo
    sa=sa+1
    apertura=cx_ndis(cxi)
    normco_x = c_nx(ci)
    normco_y = c_ny(ci)
    normco_z = c_nz(ci)
    area=cx_area(cxi)
    Fx=area*300e6
    Fy=area*300e6
    Fz=area*300e6
    _x = cx_x(cxi)
    _y = cx_y(cxi)
    _z = cx_z(cxi)
    Fxx = -Fx * normco_x
    Fyy = -Fy * normco_y
    Fzz = -Fz * normco_z
    if apertura>0
      command
      boundary point @_x @_y @_z xload @Fxx
      boundary point @_x @_y @_z yload @Fyy
```

```

        boundary point @_x @_y @_z zload @Fzz
        cycle 1
        group subcontact 'Applicata' range id @cxi
        endcommand

    endif
endif
if cx_state(cxi)==2 ;il subcontatto sta scorrendo
sb=sb+1
apertura=cx_ndis(cxi)
normco_x = c_nx(ci)
normco_y = c_ny(ci)
normco_z = c_nz(ci)
area=cx_area(cxi)
Fx=area*300e6
Fy=area*300e6
Fz=area*300e6
_x = cx_x(cxi)
_y = cx_y(cxi)
_z = cx_z(cxi)
Fxx = -Fx * normco_x
Fyy = -Fy * normco_y
Fzz = -Fz * normco_z
if apertura>0
    command
        boundary point @_x @_y @_z xload @Fxx
        boundary point @_x @_y @_z yload @Fyy
        boundary point @_x @_y @_z zload @Fzz
        cycle 1
        group subcontact 'Applicata' range id @cxi
        endcommand
    endif
endif
if cx_state(cxi)==3 ;il subcontatto si rompe a trazione
t=t+1
apertura=cx_ndis(cxi)

```

```
normco_x = c_nx(ci)
normco_y = c_ny(ci)
normco_z = c_nz(ci)
area=cx_area(cxi)
Fx=area*300e6
Fy=area*300e6
Fz=area*300e6
_x = cx_x(cxi)
_y = cx_y(cxi)
_z = cx_z(cxi)
Fxx = -Fx * normco_x
Fyy = -Fy * normco_y
Fzz = -Fz * normco_z
if apertura>0
    command
    boundary point @_x @_y @_z xload @Fxx
    boundary point @_x @_y @_z yload @Fyy
    boundary point @_x @_y @_z zload @Fzz
    cycle 1
    group subcontact 'Applicata' range id @cxi
    endcommand
endif
endif
endif
cxi = cx_next(cxi)
endloop
endif
endif
ci = c_next(ci)
endloop
end
@HYDRA3Dter
```