

Hemp pavilion:

a study of a structural natural material building based on hempcrete

Elena Tenca / Gustavo Zapponi / Relatore: Prof. Andrea Bocco

Hemp pavilion: a study of a structural natural material building based on hempcrete

Students: Elena Tenca - Master Sustainable Architecture
Gustavo Ferreira Zapponi - Master Construction and City
Relatore: Prof. Andrea Bocco
Turin, July 2022

INDICE

1. INTRODUZIONE

1.1 Articoli scientifici

2. LABORATORIO I

2.1 Introduzione
2.2 L'aggregato: canapulo
2.3 La curva granulometrica
2.4 Impasti: canapulo
2.5 Il legante
2.6 Preparazione dell'impasto
2.7 Preparazione dei campioni
2.8 Resistenza a compressione

3. LABORATORIO II

3.1 Introduzione
3.2 Ipotesi riguardo alle cause di non raggiungimento dell'obiettivo
3.3 Nuove formulazioni di impasto
3.4 Il legante
3.5 Preparazione dell'impasto
3.6 Preparazione dei campioni
3.7 Monitoraggio
3.8 Resistenza a compressione
3.9 Confronto della composizione degli impasti B,E,G,H
3.10 Considerazioni finali

4. CURVA DELLE PRESSIONI – IPOTESI 1

4.1 Introduzione
4.2 Ipotesi 1
4.3 Individuazione della porzione di arco da analizzare e divisione in parti uguali
4.4 Peso e baricentro
4.5 Determinazione della risultante
4.6 Determinazione di spinta e reazione
4.7 Tracciamento della curva delle pressioni
4.8 Conclusioni
4.9 Ipotesi 2

5. IPOTESI MATTONI

5.1 Introduzione
5.2 Pianta
5.3 Vista assonometrica
5.4 Corso A
5.5 Corso B
5.6 Tabella quantità
5.7 Conclusioni

6. COMPUTO

6.1 Introduzione
6.2 Procedimento
6.3 Conclusioni

7. FORMWORK - casseri

7.1 Introduction -
introduzione
7.2 Option a, b, c, d, e, f: comparison
opzioni a, b, c, d, e, f: confronto
7.3 Roof -
Tetto
7.4 Casseri: studio delle parti
Formowork: element's study

8. DESIGN

8.1 Drawings -
Disegni
8.2 Internal and external flooring -
Pavimentazione interna ed esterna
8.3 Walls and openings -
Muratura e aperture
8.4 Roofing -
Copertura
8.5 Material's description -
descrizione/computo dei materiali

ABSTRACT

Nowadays there is a global effort in reducing the emission of green house gasses in order to avoid the climate changes. In this scenery, construction industry is one of the biggest waste and CO_2 producers globally, so it is important to re-think how the material are being used and which materials are being chosen for buildings. Hempcrete is a plant based natural material, with low to negative embodied carbon and lower embodied energy then Portland cement, material with grate use in the construction industry. It is usually applied as a non-load bearing insulation material. In 2009, at Welsh School of Architecture (Cardiff, Wales), the architect David Lea built, during a training workshop, a load bearing hempcrete prototype arch in full scale to verify the structural performance of the material. This thesis is a development with further analysis of David's Lea design, here we are going to explore two main fronts: the laboratory analysis which defines the hempcrete mix to be used in the projects and planning of the vault prototype; and the preliminary design for a $30m^2$ hempcrete pavilion. The pavilion design remains preliminary cause it depends on the prototype mechanical testing results for better detailing it. In this way, we can provide material for further development of the project and construction site.

1. INTRODUCTION

Nowadays there is a global effort to achieve a more sustainable society, aiming at the reduction of consumption, reuse, and recycling of materials, following a circular economy, preserving the ecosystem and protecting the humankind. The Paris agreement, negotiated in the 21st session of the conference of the parties (COP) has set the objective of limiting the earth temperature rise to 2°C in relation to pre-industrial levels, is one of the most relevant "because for the first time, a binding agreement brings all nations into a common cause to undertake ambitious efforts to combat climate change and adapt to its effects." [1]

The aim of a research of sustainable materials is to discover, and to be able to provide a wider range of solutions that are more environmentally friendly, helping to reduce the greenhouse gases emissions and the consumption of resources. Industries must reduce CO_2 emissions and energy consumption. In 2020 the building sector (construction and building management) was responsible for, respectively, 39% of energy-related emissions of carbon dioxide, and for 36% of the entire energy consumption in the world [2][3]. These data show the importance of coming up with zero-carbon solutions or, even better, to address materials that store CO^2 in their production phase (ex. plant-based materials). Of course, materials also need to meet requirements, such as moisture absorption, structural resistance, and thermal resistance. Hempcrete, a material that joins hemp shivs somewhere also fibers with lime, is increasingly used in the last years.

The cultivation of hemp dates to the Neolithic. It is originated in China, and gradually spread westwards through India and the Middle East, Africa, and the Mediterranean. The prohibition of cannabis, seen as a drug, has discontinued the cultivation of the plant, but since 1993 in UK and 1995 in Canada, the cultivation of industrial hemp is legal again. Industrial hemp is a plant that was developed to have 0.2 per cent of THC content or less, so it is no longer considered as a drug. [5]

It is possible to use all parts of the hemp plant: the seeds, fibres, wood, and flowers, and they can be used in a wide variety of applications, such as agriculture, construction, cosmetics, furniture, and so on. Hemp is one of the fastest growing biomasses. It is disease resistant, which makes it possible for the crop to be grown organically without herbicides, pesticides, or fungicides.

The production of cement largely contributes to the total CO_2 emissions worldwide. In 2018, the cement industry represented 7% of the total global values [2]. The choice of using hempcrete as a construction material goes in accordance with the global effort of controlling the environmental degradation by reducing the Portland cement demand, which is much needed in the construction sector, specially to produce concrete, but also in a wide range of materials, such as plasters, finishings or binders.

Today, hemp is mainly used for two construction products: to make hempcrete and to provide fiber for quilt insulation. This thesis focuses on the production of hempcrete, and its uses focusing in it structural performance.

Hempcrete describes a mix of chopped hemp stems (hemp shivs) with a lime-based binder to create a bio-composite material that can be cast. Hemp lime is referred as a non-load-bearing material, that is vapour permeable, and has good insulation properties [6]. It can be used to form walls, floor slabs, ceilings, and roof insulation, showing a good performance both in new build and restoration projects [6]. The hemp shiv is a durable material, that absorbs and releases water without degrading. Also, there is a great amount of air stocked inside the hempcrete, not only in the spaces between the shivs, but also inside the hemp shiv itself, which gives a good thermal in-

sulation characteristic. According to Seng *et al* (2018), hempcrete is "a lightweight bio-aggregate-based concrete, that has excellent agronomic features, good hygroscopic properties and is self-supporting." The binder can come in different formulations. Usually based on hydraulic or aerial lime, somewhere with pozzolanic components or other additives [6].

Hempcrete is used as cast-on-site, or pre-cast material. In the first case the material is mixed on-site and is cast into shuttering or form-work (which can be temporary or permanent) to form walls, floor, or roof. The mix is placed or sprayed into the voids created by the structural grid and the shuttering.



Image 1: Hempcrete mix, author's production, August 2021.

In the second case, hempcrete is pre-cast to form blocks or panels that give advantages in terms of performance predictability, due to the industrial control processes. For example, pre-casting eliminates the time required for the drying process, besides eliminating any uncertainty on the final product's quality due temperature and humidity control. Pre-fabricated elements allow to build in places where there is the cold season.

This thesis explores an alternative use of hempcrete, as a load-bearing material, therefore the load-bearing frame would no longer be needed.

Furthermore, methods for reducing



Image 2: Hempcrete used as insulation at a restoration project, author's production, August 2021.

energy consumption and carbon emissions have been developed to help guide the materials' choices and to improve the production process. Life Cycle Assessment (LCA), according to Florentin *et al*, (p. 2) "provides a framework for quantifying the environmental impact of a process or service, or a product such as a building or residential unit, over the various stages of its life-cycle." The analysis can be divided in three main phases: production phase, use phase and demolition phase. Among the many indicators considered in a LCA, two are particularly relevant energy consumption and CO2 emission of greenhouse gasses. If these phenomenons are observed during the production phase only, they translate into so-called embodied energy and embodied carbon, that defined as the amount of energy consumed and the amount of greenhouse gasses released to produce the building. [4]

To better understand these factors of an ecological assessment of Hempcrete, the analysis should be done both for hemp fibres and lime, when no addi-

tives are added in the mix, in this case, the same would have to be done for each component.

Y. Florentin *et al* (2017) compare the embodied energy and carbon of a hypothetical building made with hempcrete and autoclave aerated concrete. The analysis was made for the three phases of the LCA, considering the lifetime of the building as 50 years. According to them, the embodied energy to produce hempcrete is considered low due to the low energy consumption for the hemp cultivation, with also low CO_2 emission (varying between 0.085 to 0.19 $kgCO_2$). Also, during the curing process of lime there is a sequestration of CO_2 when most of the lime is solidified back to limestone by absorbing CO_2 in the carbonization process. During the lime production two main processes that emit carbon, during the burn of fossil fuels to achieve the high temperatures needed for heating the limestone and the chemical reactions that happens in the limestone calcination. Besides the embodied carbon, the embodied energy for lime production can be considered high mainly due to the lack of efficiency in small-scales kilns. But, there is a lack of information regarding the embodied energy of hempcrete, what happens differently for the embodied carbon, that is commonly negative in the present literature. [4] So, they conclude that the hemplime mix has a slightly lower embodied energy than the concrete, while the embodied carbon is not only lower, but negative.

Hempcrete can be an alternative for energy-intensive and high CO_2 materials, but there is still very little data and literature about it especially, when compared to concrete, even though it is not a new material, being present in constructions dating from the 6th century AD [7]. It is important to explore characteristics of hempcrete and stimulate feature research highlighting its environmental characteristics and exploring its range

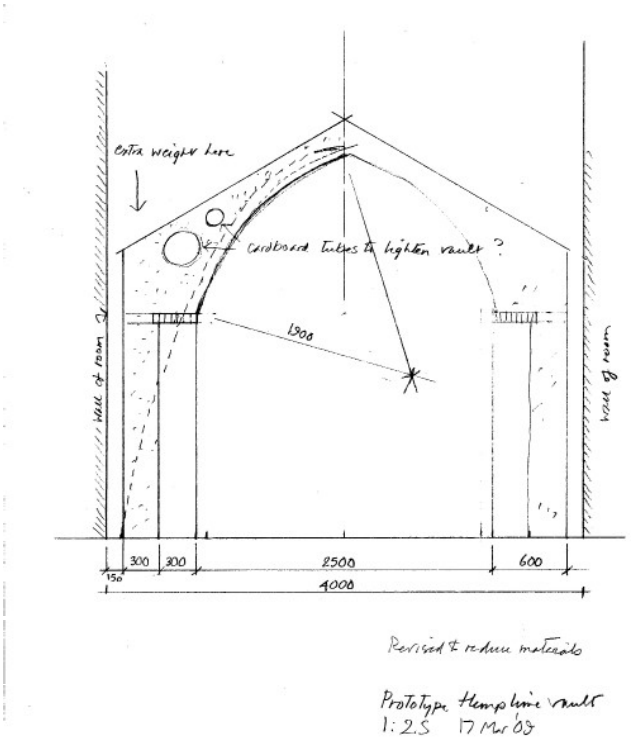


Image 3: Hemplime David Lea's vault pototype's project for Vertical Workshop at Cardiff University, 2009

of uses, by analysing not only its thermal properties but also the structural ones. This thesis contribute to increasing the amount of data regarding this material, opening new perspectives for its application.

This thesis is only a preliminary study within an ongoing research. Which also includes light earth and straw bale construction. One pavilion for each material is going to be designed and constructed at the same site, at Grugliasco, Torino. In



Image 4: Hempcrete vault built during the Vertical Studio, Cardiff 2009

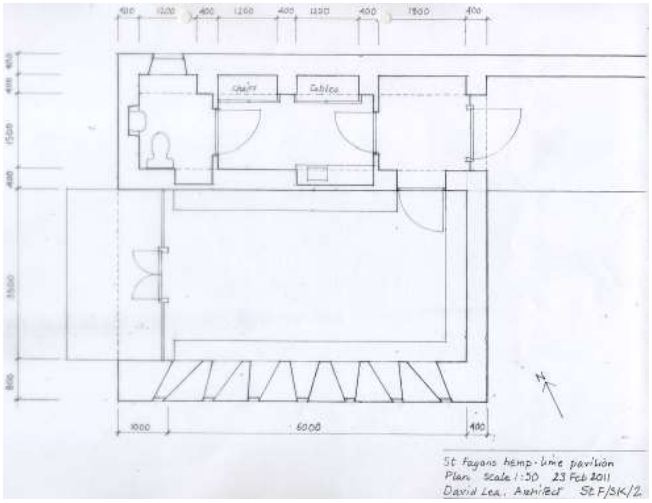


Image 5: David's Lea design for a hempcrete pavilion to be built at St Fagans museum , 2011

this way it will be possible to compare the three natural materials.

In relation to hempcrete, there are two main steps to be performed: first the construction of a full-scale prototype which is going to be submitted to mechanical tests; then the construction of the whole 30 m² pavilion. Both are going to be built in training workshops. In 2009, at Welsh School of Architecture (Cardiff, Wales), architect David Lea built a prototype of load bearing hempcrete and submitted to mechanical tests. [8] In fact, this research uses his studies as a starting point, adopting the same vaulted shape, and further developing his design.

Hempcrete's strength is still not well defined. Most studies focus in insulation properties and, define it as a non-load-bearing material. So, the first step was to develop laboratory tests to define a mix to be used in the prototype, verifying not only the compressive strength of each mix, but also, its drying time. Then we proposed a form-work design and set a construction method. If the results will not obtain satisfactory values, changes in the mix may be needed.

Once the workshop is done, and the structural tests are verified, it will be possible to construct the pavilion, so we also developed some first designs focusing way windows are attached to the wall and defining components materials. In the end, it was also possible to develop a prediction for the materials quantities

1.1 INTRODUZIONE - Articoli Scientifici

1.1 LETTERATURA

La nostra ricerca è partita dallo studio di ciò che è stato prodotto e sperimentato da altri (per poter ragionare su dati verificati e partire da questi). Gli esempi considerati e studiati non sono stati riprodotti in ugual modo, bensì modificati e integrati secondo le nostre considerazioni, realizzando così un prodotto nuovo e dati utili per gli altri, contribuendo allo sviluppo della ricerca.

Di seguito riportiamo in modo schematico l'analisi dei contenuti, concentrandoci sulla composizione degli impasti, e sulla creazione e la conservazione dei provini, integrando con tabelle e alcuni articoli scientifici, così da fornire un'idea sulle ricerche condotte finora in materia e la documentazione da cui siamo partiti.

1.1.1 ARTICOLO 1

"Study of lime hemp concrete (LHC) e Mix design, casting process and mechanical behaviour"
Cement and Concrete Composites 67 (2016) 60 e 72
Pierre Tronet, Thibaut Lecompte, Vincent Picandet, Christophe Baley. Univ. de Bretagne-Sud, EA4250, LIMATB F, 56100 Lorient, France*

Mix details.

	Shiv(S) [kg]	Binder (B) [kg] (In a m^3 of LHC)	Water (W) [kg]	W/B	B/S	Upper compression stress (at the end of compression step) [MPa]	Green density (kg/m3)	Green compactness [-]	Compactness After 28 days of ageing [-]
M1	215	387	213	0.55	1.8	1.1	816	0.52	0.37
M2	257	360	198		1.4	1.7		0.52	0.39
M3	320	320	176		1	2.6		0.53	0.4
M4	500	270	148		0.54	6.7	920	0.6	0.55
M5		204	112		0.41	6.3	816	0.54	0.5

B/S is the Binder to Shiv ratio by mass. W/B is the Water to Binder ratio by mass, equal to 0.55 for each LHC mixes. This choice corresponds to a continuation of the findings of Nguyen et al. [5]. This is close to the W/B ratio currently used in a conventional lime concrete or mortar: 0.5 for lime with high density as NHL5, 0.55 for lime with medium density (ex: NHL2) and 0.6 for limes with a bulk density lower than 0.6 kg/L. This W/B ratio is also very close to the value of 0.56 calculated by Lanos et al. [20] to optimize lime porosity and limit water suction by shiv into the fresh mixtures.

Figura 1

Elastic modulus, Poisson's ratio and yield stress in compression for the mixes M1 to M5 (age of 28 days).

Mix	Compaction stress of casting [MPa]	Compactness After 28 days of ageing [-]	B/S	E_c (28 days) [MPa]	ν (28 days) [-]	σ_y [MPa]
M1	1.1	0.37	1.8	**43**	**0.04**	**1.36**
M2	1.7	0.39	1.4	**51**	**0.1**	**1.63**
M3	2.6	0.4	1	**70**	**0.05**	**2.13**
M4	6.7	0.55	0.54	**147**	**0.025**	**4.74**
M5	6.3	0.5	0.41	**122**	**0.022**	**3.95**

Figura 2

In questa ricerca vengono utilizzati:

<u>*Aggregati*</u>:
canapulo "*Chanvribat*" di Tradical, granulometria tra 0,01 e 0,05 mm (figura 1).

<u>*Legante*</u>:
"*Tradical PF 70*", che è composto da 75% calce idrata, 15% calce idraulica e 10% pozzolana (figura 2).

<u>*Procedimento di impasto:*</u>
1. Canapulo + acqua per 4 min a 140rpm (durante questo step l'acqua è totalmente assorbita dalla fibra);
2. Aggiunta legante e mix per 4 min a 140 rpm.

<u>*Modalità di compressione*</u>:
Viene applicata una forza di 250kN.
La massa iniziale del provino è 2-4.5 volte quella finale. Tutti i campioni hanno un'altezza finale di 200 mm e sono stati compressi con una velocità di 1 mm/s.
Terminato questo procedimento, per agevolare l'idratazione, sono stati tenuti

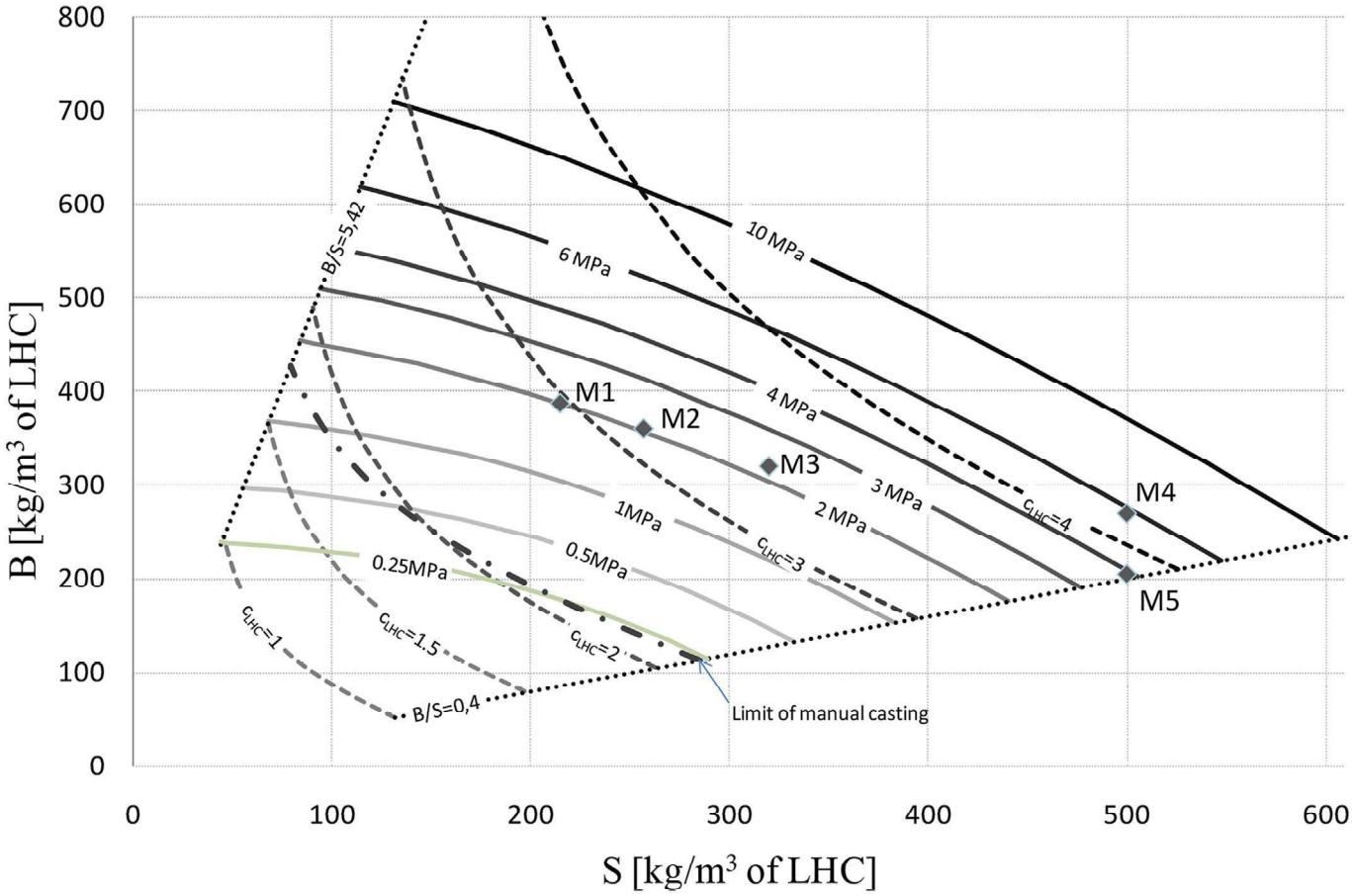
in compressione mantenendo un'altezza costante di 200 mm per 72 h.

Conservazione:
T=20+-1 C, umidità 70+-5% , 28-90 giorni.

Conclusioni:
Un parametro molto importante è la porosità, che nell'impasto fresco è controllata da due fattori:
- quantità di acqua
- compattezza raggiunta

Se nell'impasto fresco vi è un eccesso di acqua, molta di questa verrà persa durante l'asciugatura e l'indurimento del materiale, rendendolo poroso.
Quando il rapporto L/F (legante/fibra) è ridotto di un fattore maggiore di 2, la compattezza è alta, dovuta alla compressione nei casseri. Questo aumenta la rigidità e la resistenza.

Nel grafico sottostante (figura 3) viene esaminato un composto caratterizzato da un rapporto A/L (acqua/legante) di 0,55.
Vengono messi in relazione la quantità di legante e fibra presenti nell'impasto, la sua compattazione e resistenza.
Si nota come, all'aumentare della quantità di legante, a parità di compattazione, si ottengono valori finali di resistenza maggiori.
Per raggiungere una forza di 10 MPa è infatti necessario un contenuto di legante molto alto (fino a 700 kg/m^3), o un elevato livello di compattazione (coefficiente di compattazione fino a 4,5).



Design chart for selecting B and S, and the consequence of B and S content on the process compacting coefficient (c_{LHC}). Curves are drawn for W/B = 0.55, Binder Tradical PF 70 (hydration degree t = 1.1), Hemp Shiv of specific density 1465 kg/m^3, particle density 260 kg/m^3 and bulk density 110 kg/m^3.

Figura 3

1.1.2 ARTICOLO 2

"Is hemp lime concrete a mix of hemp and lime?"
B. Mazhoud, M. Viel, F. Collet, A. Phelipot-Mardelé, C. Lanos, S. Prétot,Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, Equipe Matériaux Thermo Rhéologie, Rennes, France. 2nd International Conference on Bio-based Building Materials &1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIbrous materials, June 21th - 23th 2017, Clermont-Ferrand, France*

In questa ricerca vengono utilizzate quattro tipologie di canapuli di cui si riportano le caratteristiche in figura 4.

Physical properties of studied hemp shiv

Material	Bulk density kg/m^3	Width mm	length mm
Biofibat®	107	2.9	11.5
HS 1	118	7.6	2.4
HS 2	101	7.7	2.1
HS 3	113	18.0	4.2

Figura 4

Chemical composition of lime-based binder (mass %)

Material	Lime-based binder (ThermO®)
Si	4.306
Mg	0
Al	0.972
S	1.125
Cl	0.112
K	0.465
Ca	48.242
Ti	0
Fe	0.730
Others	43.941

Figura 5

Legante:
ThermO – BCB, densità specifica 2560 kg/m³, la cui composizione è riportata in figura 5.
Il rapporto tra legante e fibra è 0.5.

Additivi:
1. SP20 – K&Co, plasticizzante ⟶ 0,2 ~ 0,22 %
2. Hostapur OSB - Clariant, tensioattivo ⟶ 0,1 ~ 0,3 %
3. CMC, addensante.

Questi consentono il processo di "schiumatura diretta", comportando una maggiore porosità del prodotto finale.

Procedura:
- Le fibre vengono mescolate a mano per 2 min, con un rapporto A/F = 0.4
- Legante e acqua mix con A/L = 0.4~0.67
- Canapulo + Legante mix per 5 min
Considerando l'acqua in totale,
Atot/L = 0.8 .

Compattazione:
- Cubi 10x10x8 cm
- O.1 MPa, utilizzando un macchinario

Conservazione:
I campioni vengono coperti per 5 giorni, poi rimossi dagli stampi e mantenuti a un T= 23°C e 50% di umidità relativa.

Conclusioni:
I grafici successivi (figura 6 e 7) mettono in relazione la porosità dei singoli componenti con la loro capacità di assorbimento di umidità. Vengono analizzati sia il composto calce canapa, sia la fibra e il legante separati, sia una schiuma minerale.
Viene fatta una distinzione tra micro porosità (riferita alla matrice del singolo elemento) e macro porosità (riferita ai vuoti che si creano durante l'impasto), evidenziando come la porosità riferita alla matrice sia la più influente sulla capacità di assorbimento degli elementi.

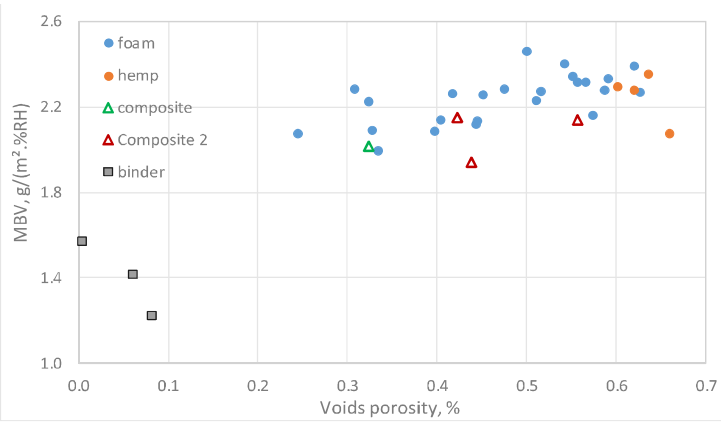


Figura 6

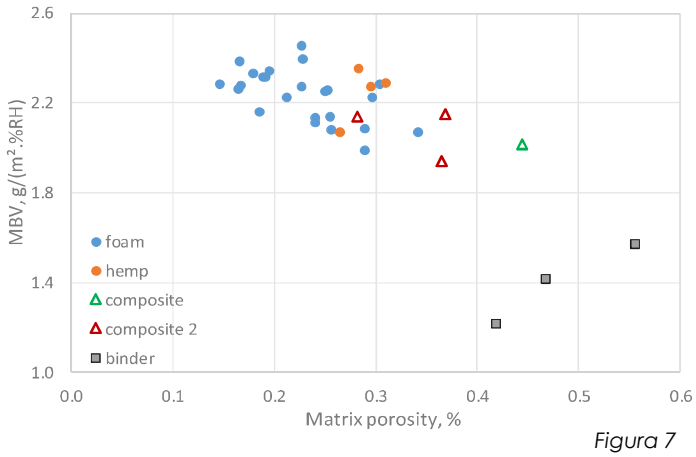


Figura 7

1.1.3 ARTICOLO 3

"Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes"
"Construction and Building Materials" 28, 2012, pp. 50-56, Laurent Arnaud, Etienne Gourlay, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Eta.

Nella tabelle sottostanti (figura 8 e 9) sono riportate le proporzioni dell'impasto utilizzate per ogni componente.

Reference mix proportions [9].

Mixture	% Weight			
	Hemp shiv	Binder	Sand	Water
"Roof"	28.0	23.6	0.0	48.4
"Wall"	18.6	31.4	0.0	50.0
"Floor"	14.4	30.4	0.0	55.2
"Render"	9.1	34.1	11.2	45.6

Figura 8

Bulk density of the shiv and average size of the particles.

Hemp shiv	HS No. 1	HS No. 2	HS No. 3
Bulk density (kg/m^3)	112	114	119
Average length (mm)	8.9	7.6	3.1
Average width (mm)	2.0	1.8	1.0
Average thickness (mm)	0.5	0.5	0.5

Figura 9

Canapulo:
Nella tabella sopra riportata (figura 8), sono elencati i diversi tipi di fibre utilizzati con le rispettive proprietà.

Legante:
Vengono utilizzati 4 leganti diversi, di cui 3 sono composti da calce idraulica.
A = NHL 3.5; B = NHL 3.5 Z; C = NHL 2;
D = 75% calce aerea, 15% calce idraulica, 10% pozzolana (figura 9).

Preparazione dell'impasto:
- Acqua + legante mix per 2 min
- Aggiunta canapulo e mix per 5 min
- Aggiunta legante e svolgimento prove a 14 giorni, 2, 6, 12, 15 mesi.

La composizione di ogni campione è indicata in figura 10.

Campioni:
- Cilindrici, dimensioni 16x32 cm
- Vengono riempiti con layers di spessore 50 mm e svolta una compattazione di 0.05 MPa, con una macchina per prove di compressione.

Mass and volume composition of freshly-mixed concretes.

Hemp concrete	% Weight			% Volume		
	Hemp shiv	Binder	Water	Hemp shiv	Binder	Water
A-2	14.3	34.8	50.9	55.4	22.0	22.6
B-2	15.4	37.7	46.9	56.1	24.4	19.5
C-2	15.9	38.9	45.2	56.1	25.7	18.2
D-1	16.2	32.3	51.5	58.8	20.3	20.9
D-2-a	9.9	47.7	42.4	42.8	36.2	21.0
D-2-b	14.4	37.2	48.4	54.4	24.7	20.9
D-2-c	14.3	34.8	50.9	54.5	23.3	22.2
D-2-d	16.5	33.7	49.8	58.7	21.1	20.2
D-2-e	25.1	24.6	50.3	71.4	12.3	16.3
D-2-f	16.2	32.3	51.5	58.3	20.5	21.2
D-3	16.2	32.3	51.5	57.3	21.0	21.7

Figura 10

Conservazione:
I campioni vengono conservati a T=20°C e in quattro ambienti con umidità differenti.
Prima del test, vengono rimossi dallo stampo e fatti asciugare in forno per 48 h a una temperatura di 50°C.

Valore di resistenza:
L'impasto formato da legante A = NHL 3.5 e canapulo N.2 è stato conservato a umidità relative differenti e presenta proprietà meccaniche molto basse. Il valore di resistenza maggiore all'umidità relativa del 50% (figura 12).

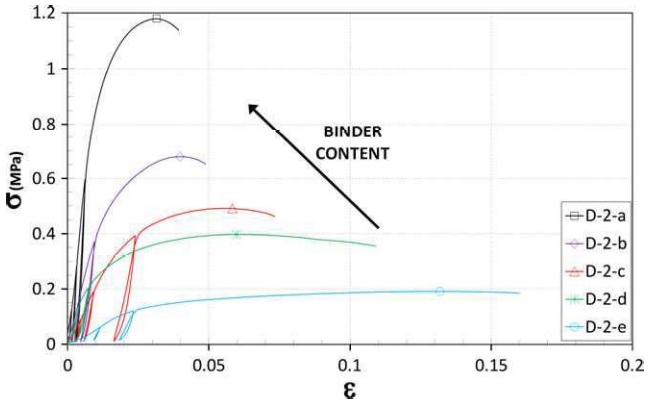
L' impasto formato da legante B = NHL 3.5, e canapulo N.2, raggiunge valori di resistenza più alti rispetto al caso precedente, sempre ad un' umidità relativa del 50% (figura 12a).

Nelle figure successive (12b, 12c) sono riportati i risultati degli impasti C e D. Il campione D-2 con un'umidità relativa del 30%, raggiunge il valore più elevato.

Prove di compressione:
vengono eseguite dopo 28 giorni e 3, 6, 15 e 24 mesi.

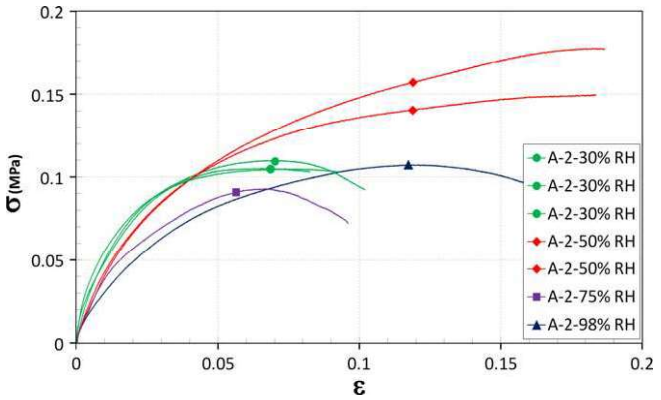
All'inizio, il materiale è debole perché il legante non ha ancora formato una struttura connessa. Il comportamento è dunque simile a quello delle particelle di canapulo. Con il tempo avviene l'idratazione e si va così a creare una struttura continua nella quale vengono trasmessi uniformemente gli stress a cui il campione è sottoposto.
La resistenza a compressione può essere migliorata se durante la preparazione dei campioni avviene una compattazione maggiore. Con un range di compattazione tra 0.6 e 1 MPa, si è ottenuta una resistenza di 3 MPa.
Più è alta la concentrazione di legante all'interno della miscela e più la miscela avrà un comportamento simile a quello del legante (figura 11).
Altre prove di compressione sono state fatte dopo 28 giorni e 4 e 14 mesi, registrando un aumento del valore dei risultati (figura 12).

Distribuzione e grandezza delle particelle di canapulo:
Le particelle di canapulo N.1 sono leggermente più lunghe di quelle del canapulo N.2, dunque i cilindri preparati con il canapulo N.1 sono meno densi rispetto agli altri, e, di conseguenza, hanno minori proprietà meccaniche.
Invece il campione composto da canapulo N.3, più fine degli altri, presenta una resistenza minore dopo i primi 28 giorni, che poi aumenta nei successivi 4 mesi, risultando migliore rispetto a N.1 e N.2.
Questo avviene perché il provino contenente N.3 è meno poroso rispetto agli altri, poiché, essendo la fibra più fine, la CO_2 si diffonde più lentamente nel materiale, rallentandone l'indurimento e il raggiungimento delle proprietà meccaniche.
Essendo le fibre piccole, però, sono meglio ricoperte dal legante: per questo a lungo andare si ottengono resistenze maggiori.
Il legante utilizzato contiene un'alta percentuale di calce aerea: questa indurisce solamente a contatto con l'aria, dunque, essendo il materiale poco poroso, i tempi di presa sono maggiori.



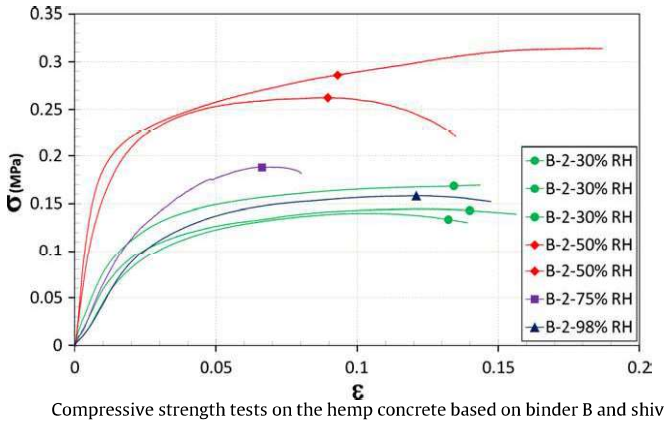
Compressive strength tests on various mixtures of hemp concrete after 6 months of setting.

Figura 11



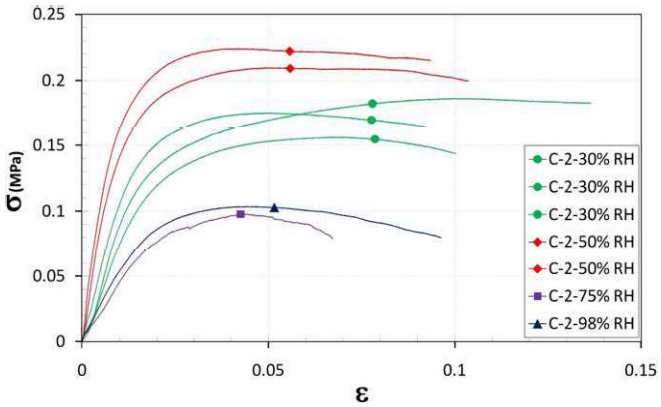
Compressive strength tests on the hemp concrete based on binder A and shiv No. 2 after 28 days of setting in curing conditions of 20 °C and various relative humidities.

Figura 12



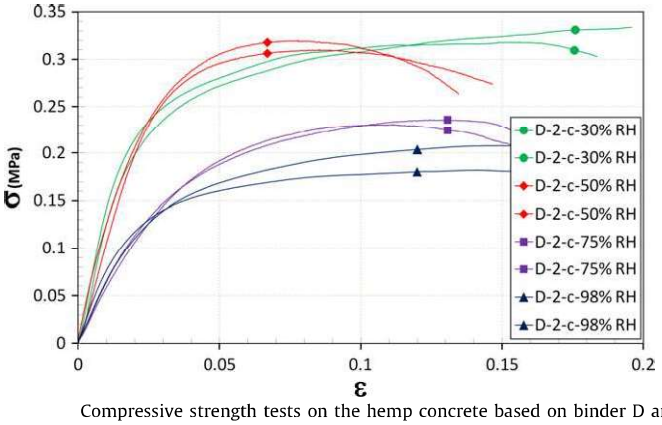
Compressive strength tests on the hemp concrete based on binder B and shiv No. 2 after 28 days of setting in curing conditions of 20 °C and various relative humidities.

Figura 12a



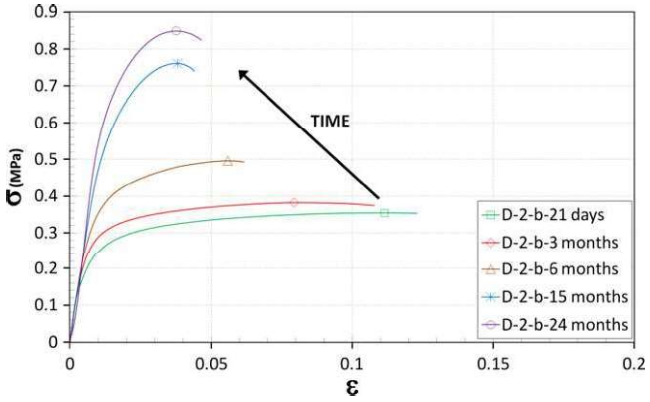
Compressive strength tests on the hemp concrete based on binder C and shiv No. 2 after 28 days of setting in curing conditions of 20 °C and various relative humidities.

Figura 12b



Compressive strength tests on the hemp concrete based on binder D and shiv No. 2 after 28 days of setting in curing conditions of 20 °C and various relative humidities.

Figura 12c



Compressive strength tests for increasing ages on a given mixture of hemp concrete.

Figura 13

1.1.4 ARTICOLO 4

"Assessing the variability of hemp concrete properties during experimental tests: a focus to specimens'number"

C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Université Clermont-Auvergne, Institut Pascal, Polytech Clermont-Ferrand. 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, June 26th-28th 2019, Belfast, UK

In questa ricerca sono stati utilizzati:

Canapulo:

4 tipologie, riportate in figura 15.

Legante:

Si crea una miscela con una densità di 250 kg/m³. Per 100 L i dosaggi sono: 25 kg di legante + 12 kg di fibra + 30 kg di acqua

Provini:

Cilindri 11x22 cm, vengono realizzati diversi set numerati da 1 a 7 (figura 14).

Compattazione:

manuale in 4 layers, la superficie superiore di ciascun strato è stata lavorata in modo da aiutare lo strato successivo ad aderire. La compattazione è stata eseguita dallo stesso operatore per tutti i provini.

Conservazione:

Provini lasciati a riposare per 72 h.
L'asciugatura è avvenuta secondo due modalità:
1. esposizione all'aria (con variazioni di temperatura e umidità relativa, 14 ~ 30°C e 31~ 66 % HR, condizioni medie: T = 21°C e 48% RH) e in forno (T=60°C per 48h).
I campioni vengono analizzati a 30 giorni.
In figura 16 sono riportati i risultati.

Nomenclature and overview of results of characterizations of types of used hemp shiv [22]

Nomenclature	BD: Bulk Density [kg/m³]	IWC: Initial Water Content[2] [%]	FWC: Final Water Content[3] [%]	MPS: Mean Particle Surface[4] [mm²]	MP: Mass of Particle [mg]	L: Length [mm]	W: Width [mm]	El: Elongation	FD: Feret Diameter [mm]
H1	89.7	194.2	379.2	4.89	0.84	3.40	1.04	3.47	1.79
H2	118.3	233.8	358.3	1.94	0.35	1.45	0.44	2.60	0.76
H3	125.7	154.0	351.3	8.10	1.77	5.88	1.40	4.97	2.78
H4	103.9	162.9	338.7	1.18	0.18	1.02	0.28	2.77	0.50

identification of different sets analyzed with i= 1 to 4

N° lot	Hi-1	Hi-2	Hi-3	Hi-4	Hi-5	Hi-6	Hi-7
Nomber of specimens	3	4	5	6	7	8	9

Figura 14

: hemp concrete properties for each specimen at 30 days

Properties	Hemp	Number 1	Number 2	Number 3	Number 4	Number 5	Number 6	Number 7	Number 8	Number 9	Mean	SD
Stress (MPa)	H1	0.55	0.56	0.59	0.48	0.50	0.65	0.47	0.50	0.62	0.55	0.06
	H2	0.45	0.38	0.41	0.38	0.49	0.41	0.39	0.36	0.36	0.40	0.04
	H3	0.77	0.83	0.98	0.85	0.82	0.81	0.89	0.99	0.65	0.84	0.11
	H4	0.42	0.45	0.45	0.44	0.42	0.49	0.40	0.41	0.43	0.43	0.03
Apparent modulus (MPa)	H1	35.63	36.12	22.87	29.30	31.69	24.92	31.84	34.24	18.78	29.49	6.06
	H2	15.00	18.72	12.40	16.79	24.59	10.32	15.52	8.92	12.71	15.00	4.74
	H3	43.14	59.50	43.20	34.38	30.97	44.52	74.17	41.14	49.87	46.77	13.17
	H4	14.83	15.36	14.38	18.49	16.57	15.67	17.05	18.17	16.97	16.39	1.43

Figura 15

1.1.5 ARTICOLO 5

"Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete"

Tai-Thu Nguyen — Vincent Picandet — Sofiane Amziane Christophe Baley Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB). Université de Bretagne Sud, Centre de Recherche de Saint-Maudé BP 92116, F-35631 Lorient cedex

In questa ricerca sono stati utilizzati:

<u>*Canapulo*</u>:
2 tipologie, "HH" e "FH".
HH = canapa pura, gambi di trucioli, lunghi pochi centimetri, ottenuti per macinazione e defibratura completa
FH = canapa più sottile, costituita dagli stessi trucioli misti a fibre, ottenuti per macinazione e defibratura parziale.
Le caratteristiche specifiche delle fibre sono riportate in figura 16.

<u>*Legante:*</u>
Tradical PF 70 composto per il 75% da calce aerea, 15% calce idraulica, 10% pozzolana.

In figura 17 vengono riportati i dosaggi per ogni materiale e la forza di compattazione per ogni campione.

Maggiore è il rapporto L/F, minore è la deformazione misurata al picco di sollecitazione. Qualunque sia la compatta-

Physical properties of the hemp hurds

Density: (kg/m^3)	**HH** *Hemp Hurds*	**FH** *Fibered Hemp*
ρ_{BD} apparent density in bulk at dried state[1]	113	55
ρ_{PD} apparent density of the dried particle[2]	256.4	256.4
ρ_S density of the solid phase[3]	1465	1438
n_{total}, total porosity (%)[4]	93	96
n_{inter}, inter-granular porosity (%)[5]	60	76.6
n_{intra}, intra-granular porosity (%)[6]	33	18
w_{max}, maximal water content (%)[7]	406	356
w_i, initial water content (%)	12	15

1. ρ_{BD}, Apparent density of dried hemp hurds in bulk, without compaction, is measured on samples dried in an oven for 2 days at a temperature of 100 ± 5 °C.
2. ρ_{PD}, Apparent density of uncompacted hemp hurd particles are directly measured from rod sections of hemp without fibre.
3. ρ_S, The density of the plant material which constitutes the hemp hurds is determined by the pycnometer method, using toluene as fluid filling.
4. n_{total}, Total porosity is calculated using the following equation: $n_{total} = 1 - \rho_{VS}/\rho_S$.
5. n_{inter}, and 6. n_{intra} are respectively the inter and intra-granular porosities calculated from the following relations: $n_{inter} = 1 - \rho_{BD}/\rho_{PD}$ and $n_{intra} = n_{total} - n_{inter}$.
7. w_{max} The maximum water content is determined by absorption at the end of two days of immersion (cf. Figure 1).

Figura 16

Mix proportioning and properties of hemp concrete

Mix design	**HH_1**	**HH_2**	**HH_3**	**HH_4**	**HH_5**	**FH_1**	**FH_2**
Compaction	Low	Low	High	High	High	High	High
Hemp (kg/m^3)	107	98	219	193	155	209	184
Lime (kg/m^3)	229	275	241	415	539	240	431
Water (kg/m^3)	348	334	224	355	296	223	363
W/L**	1.52	1.21	0.93	0.85	0.55	0.93	0.84
$\rho_{Compacted}$ (kg/m3)	684	707	684	963	990	672	960
L/H*	2.12	2.77	1.11	2.12	3.44	1.15	2.32

* L/H = Lime / Hemp hurd weight ratio; ** W/L = Water / Lime weight ratio

Figura 17

zione applicata al provino, all'aumentare del rapporto L/F, la rigidità sarà maggiore. Considerando il mix HH5, l'aumento del rapporto L/F ha portato a un calo della rigidità. Questo è dovuto al basso contenuto di acqua libera nella miscela.

<u>*Compattazione:*</u>
- 2 modalità di compattazione: manuale e con macchinario.

Il range di compattazione va da 0.6 a 1 MPa.

Quando la compattazione è troppo bassa, il campione diventa inutilizzabile, in quanto manifesta collasso e disintegrazione.

Una leggera compattazione porta a una bassa resistenza a compressione, la compattazione invece comporta significativi miglioramenti, ma non modifica la rigidità del materiale, che rimane relativamente bassa.

L'impatto del rapporto L/H sulla resistenza aumenta con la compattazione

dei provini.

Conservazione:
I campioni sono stati lasciati nello stampo per 24 h e poi estratti e lasciati in un'atmosfera controllata a una temperatura di 20°C e umidità relativa al 75%. I campioni sono sottoposti a prove dopo 28 giorni e 3 e 6 mesi.

Compattazione:
Il comportamento a compressione del materiale dipende dalla compattazione durante la produzione.
Una leggera compattazione porta ad una bassa resistenza a compressione, (figura 18) mentre una buona compattazione porta miglioramenti significativi nei risultati (figura 19).

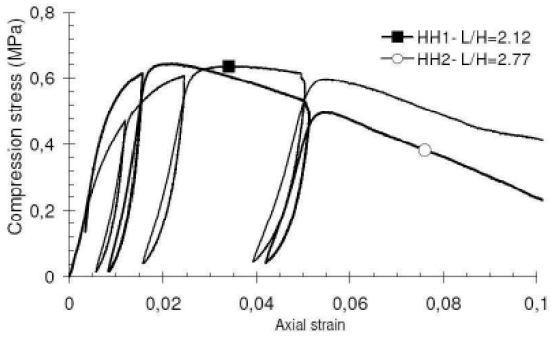


Figura 18

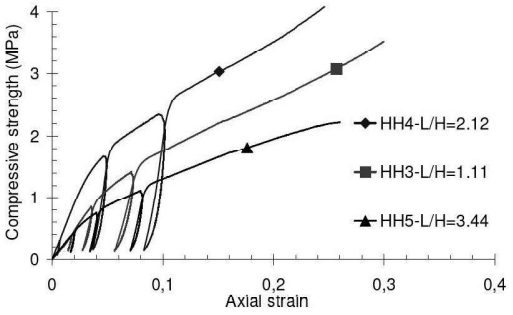


Figura 19

1.1.6 ARTICOLO 6
"Multicriteria analysis of hemp particles'impact on physical and thermo-mechanical performances of hemp concrete"
C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Université Clermont-Auvergne, Institut Pascal, BP 20206, Clermont-Ferrand, France. 2nd International Conference on Bio-based Building Materials &1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIbrous materials. June 21th - 23th 2017, Clermont-Ferrand, France 554*

Provini:
cilindrici, 11x22cm
Il riempimento degli stampi viene fatto a mano, in 4 layer. Alla fine di ogni strato la superficie è stata lavorata in modo che lo strato successivo aderisca. La compattazione viene eseguita dalla stessa persona.

Conservazione:
I campioni vengono lasciati all'interno dello stampo per 72 h, poi esposti all'aria (T=21°C 48% umidità relativa) e in forno (T=°60 C per 48 h).

Reazione alle prove:
È stato registrato un basso livello di deformazione nei provini con particelle molto piccole (figura 21). Queste impediscono la buona connessione nella matrice legante indebolendo l'intero campione.

Nel caso di un'elevata deformazione sotto carico, le particelle di canapulo si riorganizzano in una pila di strati. Questo processo è facilitato dalla forma delle particelle, grazie al loro grande allungamento, con conseguente buona sovrapposizione delle une con le altre.

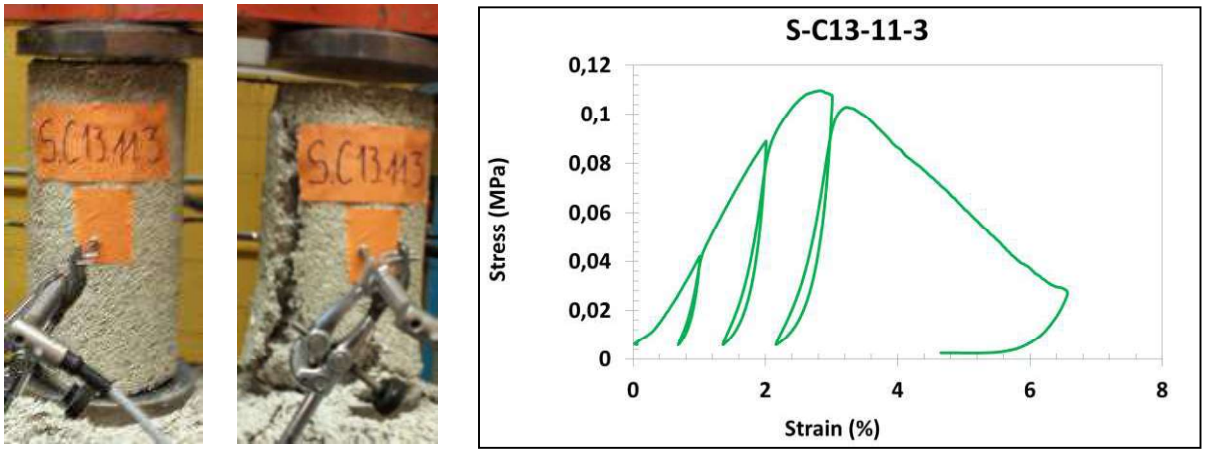
Deformazione:
È possibile che l'elevata capacità di assorbimento di acqua (340% in 48 h) possa amplificare il livello di deformazione.
C'è una competizione tra legante e particelle di canapulo per l'assorbimento dell'acqua (figura 22).

Conclusioni:
Il tipo di canapulo utilizzato e la capacità dell'impasto di assorbimento dell'acqua sono determinanti sul livello di deformazione del materiale.

Summary of results for hemp particles characterization [NIY 15].

Nomenclature	BD : Bulk Density [Kg/m3]	IWA : Initial Water Absorption [%]	FWA : Final Water Absorption [%]	MPA : Mean Particle Area [mm2]	MP : Mass of a Particle [mg]	L : Length [mm]	W : Width [mm]	El : Elongation	DF : Diameter of Feret [mm]
C1	70.83	159.83	293.05	0.91	0.18	0.64	0.19	2.62	0.32
C2	89.74	194.15	379.22	4.89	0.84	3.40	1.04	3.47	1.79
C3	118.03	242.59	432.49	1.57	0.28	1.11	0.32	2.63	0.58
C4	118.27	233.79	358.33	1.94	0.35	1.45	0.44	2.60	0.76
C5	125.66	153.99	351.28	8.10	1.77	5.88	1.40	4.97	2.78
C6	128.20	181.39	358.53	5.31	1.14	4.20	1.27	3.95	2.23
C7	129.91	163.59	321.94	3.25	0.79	1.93	0.42	3.19	0.84
C8	143.55	152.73	328.04	6.96	1.51	5.59	1.23	5.52	2.53
C9	147.50	211.77	381.47	6.95	1.50	5.11	1.38	4.47	2.58
C10	130.65	112.23	307.31	0.82	0.15	0.77	0.25	2.28	0.41
C11	95.40	165.85	344.58	1.72	0.23	1.46	0.34	3.32	0.66
C12	103.93	162.89	338.70	1.18	0.18	1.02	0.28	2.77	0.50
C13	158.85	226.16	375.06	1.36	0.22	1.11	0.52	2.27	0.80
Minimum	**70.83**	**112.23**	**293.05**	**0.82**	**0.15**	**0.64**	**0.19**	**2.27**	**0.32**
Maximum	**158.85**	**242.59**	**432.49**	**8.10**	**1.77**	**5.88**	**1.40**	**5.52**	**2.78**
Average	**120.04**	**181.61**	**351.54**	**3.46**	**0.70**	**2.59**	**0.70**	**3.39**	**1.29**
SD	**24.72**	**37.97**	**36.38**	**2.64**	**0.60**	**1.96**	**0.48**	**1.05**	**0.94**

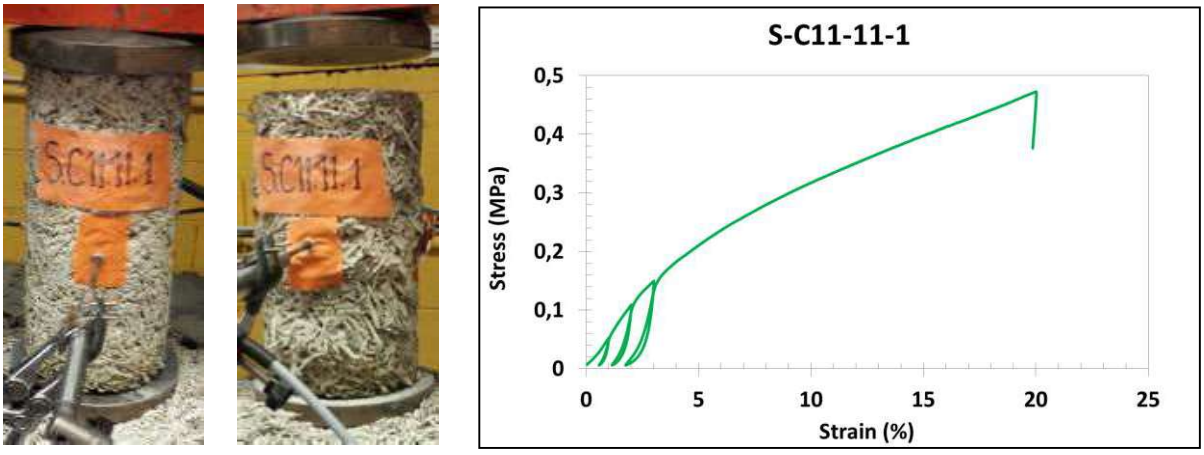
Figura 20



(a) (b) (c)

mechanical response: low deformation, specimen before (a) and after (b) test with stress-strain curve (c) [NIY 17].

Figura 21



(a) (b) (c)

mechanical response: high deformation, specimen before (a) and after (b) test with stress-strain curve (c) [NIY 17].

Figura 22

2. LABORATORIO I

2.1 Introduzione

2.2 L'aggregato: canapulo
- 2.2.1 Granulometrie

2.3 La curva granulometrica
- 2.3.1 Setacciatura - Vibrovaglio

2.4 Impasti: canapulo
- 2.4.1 Impasto A
- 2.4.2 Impasto B
- 2.4.3 Impasto C
- 2.4.4 Impasto D
- 2.4.5 Impasto E

2.5 Il legante
- 2.5.1 Calce aerea
- 2.5.2 Calce idraulica
  - 2.5.2.1 I valori di resistenza delle calci idrauliche
- 2.5.3 Calce NHL 5
- 2.5.4 Rapporto legante/aggregato
- 2.5.6 Pozzolana
- 2.5.7 Calce idraulica + pozzolana vs malte ordinarie
- 2.5.8 Quantità di legante per ogni impasto

2.6 Preparazione dell'impasto
- 2.6.1 Principali componenti
- 2.6.2 Procedimento
  - 2.6.2.1 Preparazione dell'aggregato
- 2.6.3 Osservazioni
  - 2.6.3.1 Impasto E
  - 2.6.3.2 Conclusioni

2.7 Preparazione dei campioni
- 2.7.1 Tipologie
- 2.7.2 Compattazione
- 2.7.3 Conservazione
- 2.7.4 Monitoraggio e misurazione dell'umidità

2.8 Resistenza a compressione
- 2.8.1 Strumenti
- 2.8.2 Modalità di rottura
- 2.8.3 Analisi della rottura
- 2.8.4 Risultati e considerazioni finali
  - 2.8.4.1 Impasto B
  - 2.8.4.2 Grafici

2. LABORATORIO I

2.1 INTRODUZIONE

Il giorno 7 luglio 2021, presso il laboratorio LaSTIn Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi Dipartimento di Architettura e Design (DAD), ci siamo dedicati, con l'aiuto dell'esperto artigiano Fausto Cerboni della società Terrapaglia, specializzata nell'edilizia con materiali naturali, alla creazione degli impasti in calce-canapa. Il nostro obiettivo era realizzare un impasto con proprietà portanti sebbene contenente una componente di fibra legnosa con minima resistenza meccanica.
Solitamente, gli impasti tradizionali per l'edilizia sono costituiti da due elementi principali:

Legante + aggregato

Nel nostro caso, l'aggregato è costituito da canapulo.

2.2 L'AGGREGATO : CANAPULO

Il canapulo si trova sul mercato in varie granulometrie. Ne sono state acquistate 3 differenti da due fornitori:

- Assocanapa SRL,
una ditta sementiera che si è aperta alla produzione e vendita di prodotti di canapa in ambito alimentare, cosmesi/ igiene, zootecnia ed edilizia. Membro di AssoCanapa Group, un gruppo collaborativo che unisce:
1) Assocanapa SRL,
2) Assocanapa Coordinamento Nazionale per la Canapicultura (società che coltivano o lavorano la canapa),
3) PROCaIT, cooperativa agricola di canapicoltori italiani.

- Biomat,
produttore di canapa composta per l'80% da canapulo proveniente dalla Puglia, e anche da Francia e Romania;
produce inoltre impasti per sottofondi isolanti, massetti, intercapedini, isolamenti di tetto, e blocchi in calce-canapa per tamponamenti.

2.2.1 L'AGGREGATO : GRANULOMETRIE

Le granulometrie acquistate sono state le seguenti:

- da 0 a 3 mm
- da 3 a 6 mm
- da 6 a 15 mm

Inoltre, da Assocanapa è stato acquistato un canapulo di scarto con granulometria > 15 mm.

Per stabilire il rapporto base ideale da cui sviluppare il nostro impasto abbiamo impostato una curva granulometrica sulla base della curva ideale di Fuller, che prevede un range di dimensioni da 0 a 3 mm, così distribuite:

- da 0 a 1 mm → 30%
- da 1 a 2 mm → 50-55%
- da 2 a 3 mm 15-20%

All'aggregato abbiamo poi aggiunto una quantità compresa tra l'1 e il 10% di fibre, su suggerimento dell'artigiano, per conferire maggiori proprietà di resistenza all'impasto. Queste si differenziano dall'inerte che, idealmente, ha una forma sferica, in quanto si presentano sotto forma di filamenti legnosi, che possono contribuire, tramite il loro intreccio, alla creazione di una struttura reticolare interna.

2.3 LA CURVA GRANULOMETRICA

Una curva granulometrica è il rapporto delle varie dimensioni di aggregato (inerte) all'interno di un volume. Questo rapporto può variare, seguendo una granulometria di partenza data, oppure combinando tra loro diverse granulometrie.

La curva granulometrica varia in base al diametro dell'aggregato in proporzione ad un volume, dunque, nel momento in cui si devono realizzare volumi grandi di impasto, la misura dell'inerte sarà maggiore, in quanto un materiale fine non ha resistenza meccanica idonea per le prestazioni richieste al prodotto finito. Il volume del materiale finito è dunque direttamente proporzionale al diametro-dell'aggregato (o viceversa).

volume materiale finito



diametro aggregato

Lo studio della curva granulometrica e del diametro dei filamenti serve per riempire gli spazi vuoti che si creano tra le particelle di aggregato, per le quali non basta il legante, in quanto questo non ha funzione "riempitiva", ma di rivestimento dei granuli affinché questi si leghino tra loro.
Le fibre invece avvolgono i granuli e li legano tra loro.

Analizzando la granulometria a disposizione, suddivisa in tre range che vanno da un minimo di 0 mm a un massimo di 15 mm, si cerca di creare una curva granulometrica specifica sulla base di quella presa come riferimento:

- 0 mm - 3 mm
- 3 mm - 6 mm
- 6 mm - 15 mm

2.3.1 SETACCIATURA - VIBROVAGLIO

Il vibrovaglio (figura 1) è uno strumento utilizzato per la setacciatura (o vagliatura) di sostanze granulari, che consente la classificazione e il controllo qualitativo di polveri, granulati e materiale solido in genere, secco o umido.
È una tecnica semplice, economica e di facile utilizzo, e fornisce un risultato immediato.

Per ogni prodotto acquistato, è stato prelevato 1L di prodotto tramite il misurino. Questo misurino è stato pesato, ricavando così il peso, in grammi, delle fibre di canapulo sia di Biomat che di Assocanapa.
Successivamente, tramite la setacciatura, è stata individuata la composizione granulometrica di ogni prodotto.

La setacciatura prevede l'utilizzo di appositi setacci disposti in serie, generalmente appoggiati su uno scuotitore meccanico, chiamato vibrovaglio, ognuno dei quali trattiene la frazione di solido i cui granuli hanno dimensioni maggiori dei fori del setaccio (figura 1).

La misura finale fornisce la cosiddetta curva granulometrica, riportando in ascissa il diametro dei grani e in ordinata la percentuale di solido trattenuto avente tale diametro.

Nella pagina a fianco in figura 2 è riportato il procedimento eseguito.



Figura 1



1.

Prelievo del materiale con apposito misurino



2.

Posa del materiale in apposito contenitore per la pesatura



3.

Pesatura del materiale



4.

Trasferimento del materiale nel vibrovaglio

Figura 2

Codice prodotto	Azienda	Granulometria [mm]	Fibre	Densità [g/L]		
				Misura	peso con tara [g]	peso di 1 L di canapulo [g]
ASSO 0-6[1]	Assocanapa	0 - 6	-	1	272	108
				2	280	116
				media		112
ASSO 0-20[2]	Assocanapa	0 - 20	fibrato	1	280	116
				2	270	106
				media		111
E4	Biomat	0 - 3	3 - 5%	1	288	124
IT2	Biomat	0 - 2	-	1	350	186
E2	Biomat	2 - 8	circa 5%	1	294	130
IT1	Biomat	5 - 15	-	1	310	146
E1	Biomat	2 - 13	-	1	286	122
E3	Biomat	5 - 16	fibrato	1	276	112

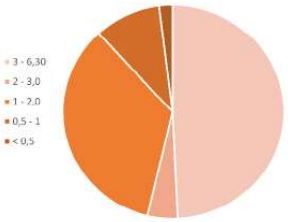
Note

[1] codice assegnato per distinguere il materiale; gli altri codici sono assegnati dall'azienda

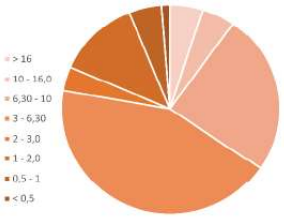
[2] codice assegnato per distinguere il materiale; gli altri codici sono assegnati dall'azienda

Risultati vibrovaglio	
Setaccio [mm]	**%**
3 - 6,3	50
2 - 3,0	4-5
1 - 2,0	35
0,5 - 1	10
< 0,5	2
> 16	3 - 5
10 - 16,0	3 - 5
6,3 - 10	20
3 - 6,3	35
2 - 3,0	2 - 3
1 - 2,0	10
0,5 - 1	4
< 0,5	1
> 3	50
2 - 3,0	< 1
1 - 2,0	38
0,5 - 1	5
< 0,5	1
> 2	17
1 - 2,0	50
0,5 - 1	27
< 0,5	7 -8
> 6,3	17
3 - 6,3	40
2 - 3,0	7
1 - 2,0	25
0,5 - 1	5
< 0,5	<1
> 10	0
6,3 - 10	1
3 - 6,3	65
2 - 3,0	5
1 - 2,0	17
0,5 - 1	< 2
< 0,5	< 1
> 6,3	17
3 - 6,3	62
2 - 3,0	7
1 - 2,0	15
0,5 - 1	< 2
< 0,5	0
> 10	6
6,3 - 10	11
3 - 6,3	67
2 - 3,0	4
1 - 2,0	7
0,5 - 1	5
< 0,5	0

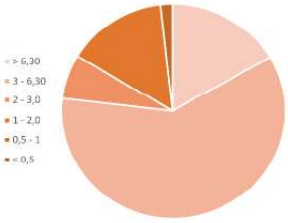
ASSOCANAPA 0-6



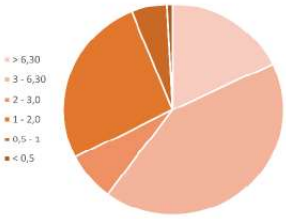
ASSOCANAPA 0-20



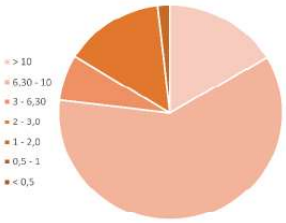
E1 BIOMAT 2-13mm



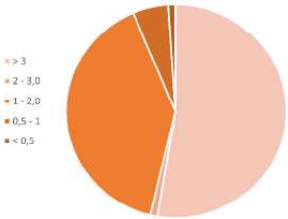
E2 BIOMAT 2-8mm



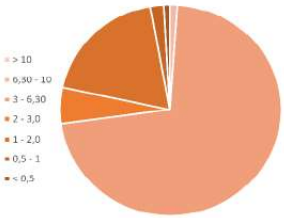
E3 BIOMAT 5-16mm



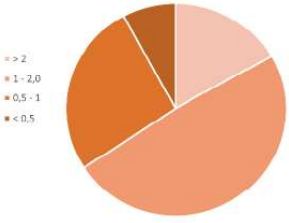
E4 BIOMAT 0-3mm



IT1 BIOMAT 5-15mm



IT2 BIOMAT 0-2mm















2.4 IMPASTI : CANAPULO

La curva granulometrica rimane sempre la medesima, variano però i prodotti che la compongono.

2.4.1 IMPASTO A

- 0 - 3 mm ⟶ 30%, così composto:

  - 50% canapulo Biomat granulometria 0 - 2 mm (IT2); 3,75L
  - 50% canapulo Biomat granulometria 0 - 3 mm (E4), fibrato per il 3 - 5 %. 3,75L

  Totale 7,5L

- 3 - 6 mm ⟶ 50%, composto per il 100%:

  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8 mm (E2), fibrato per circa il 5 %. 12,5L

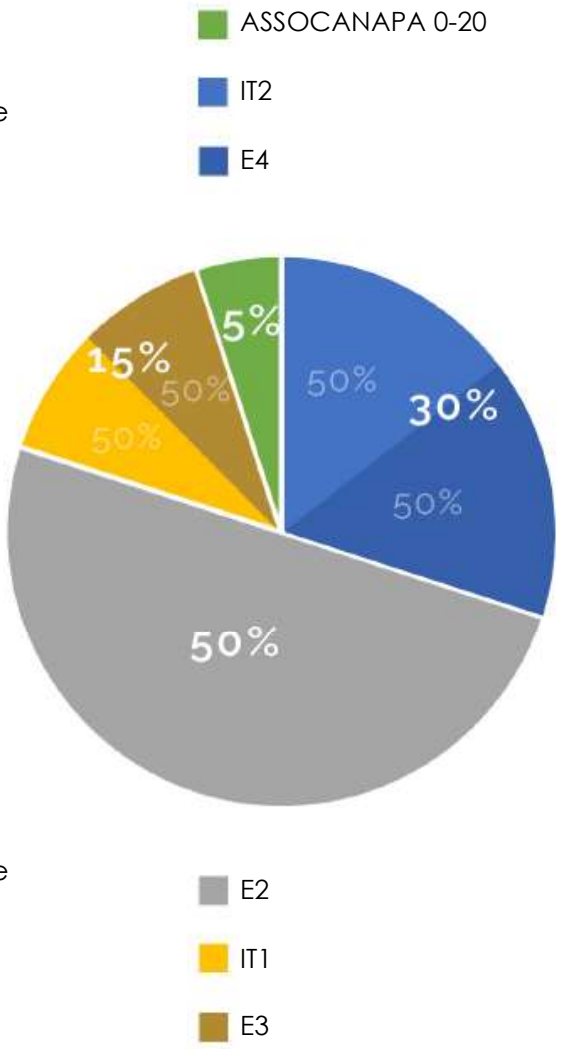
- 6 - 15 mm ⟶ 15%, così composto:

  - 50% canapulo Biomat granulometria 5 - 16mm (E3), fibrato; 1,875L
  - 50% canapulo Biomat granulometria 5 - 15 mm (IT1); 1,875L

  Totale 3,75L

- 0 - 20 mm ⟶ 5%, composto per il 100%:

  - canapulo Assocanapa granulometria 0 - 20 mm. 1,25L



2.4.2 IMPASTO B

- 0 - 3 mm ⟶ 30%, così composto:

  - 70% canapulo Biomat granulometria 0 - 2 mm (IT2); — 5,25L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 0 - 3 mm (E4), fibrato per il 3 - 5 %. — 2,25L

  Totale 7,5L

- 3 - 6 mm ⟶ 50%, composto per il 100%:

  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8 mm (E2), fibrato per circa il 5 %. — 12,5L

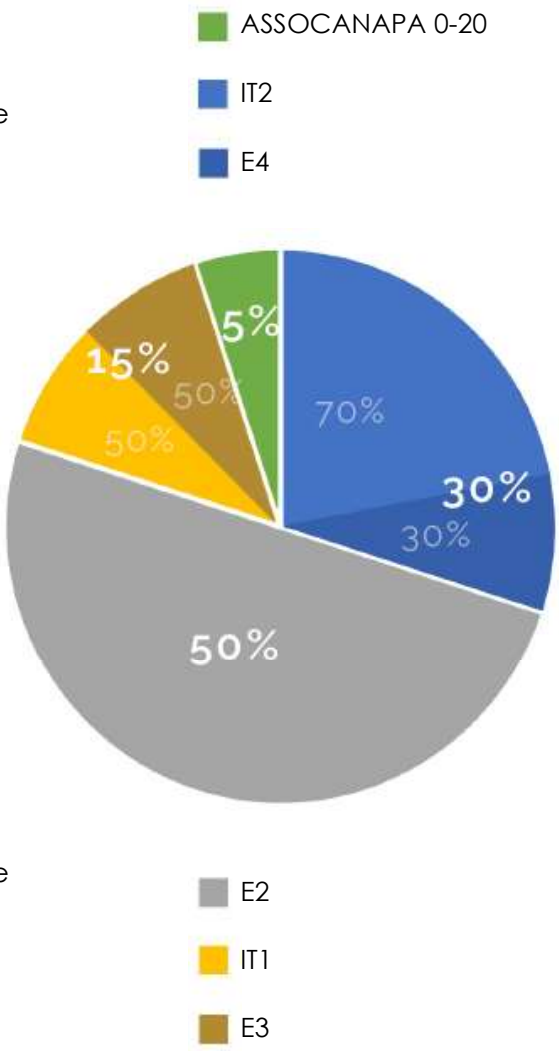
- 6 - 15 mm ⟶ 15%, così composto:

  - 50% canapulo Biomat granulometria 5 - 16mm (E3), fibrato; — 1,875L
  - 50% canapulo Biomat granulometria 5 - 15 mm (IT1); — 1,875L

  Totale 3,75L

- 0 - 20 mm ⟶ 5%, composto per il 100%:

  - canapulo Assocanapa granulometria 0 - 20 mm. — 1,25L



2.4.3 IMPASTO C

- 0 - 3 mm ⟶ 30%, così composto:

  - 50% canapulo Biomat granulometria 0 - 2 mm (IT2); — 3,75L
  - 50% canapulo Biomat granulometria 0 - 3 mm (E4), fibrato per il 3 - 5 %. — 3,75L

  Totale 7,5L

- 3 - 6 mm ⟶ 50%, composto per il 100%:

  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8 mm (E2), fibrato per circa il 5 %. — 12,5L

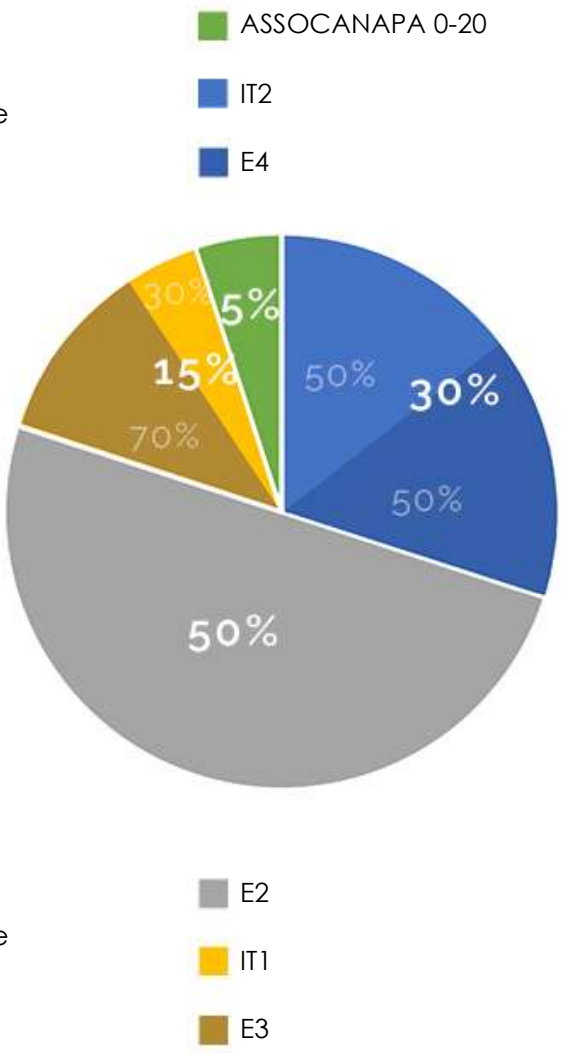
- 6 - 15 mm ⟶ 15%, così composto:

  - 70% canapulo Biomat granulometria 5 - 16mm (E3), fibrato; — 2,625L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 5 - 15 mm (IT1); — 1,125L

  Totale 3,75L

- 0 - 20 mm ⟶ 5%, composto per il 100%:

  - canapulo Assocanapa granulometria 0 - 20 mm. — 1,25L



2.4.4 IMPASTO D

- 0 - 3 mm ⟶ 30%, così composto:

  - 70% canapulo Biomat granulometria 0 - 2 mm (IT2); — 5,25L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 0 - 3 mm (E4), fibrato per il 3 - 5 %. — 2,25L

  Totale 7,5L

- 3 - 6 mm ⟶ 50%, composto per il 100%:

  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8 mm (E2), fibrato per circa il 5 %. — 12,5L

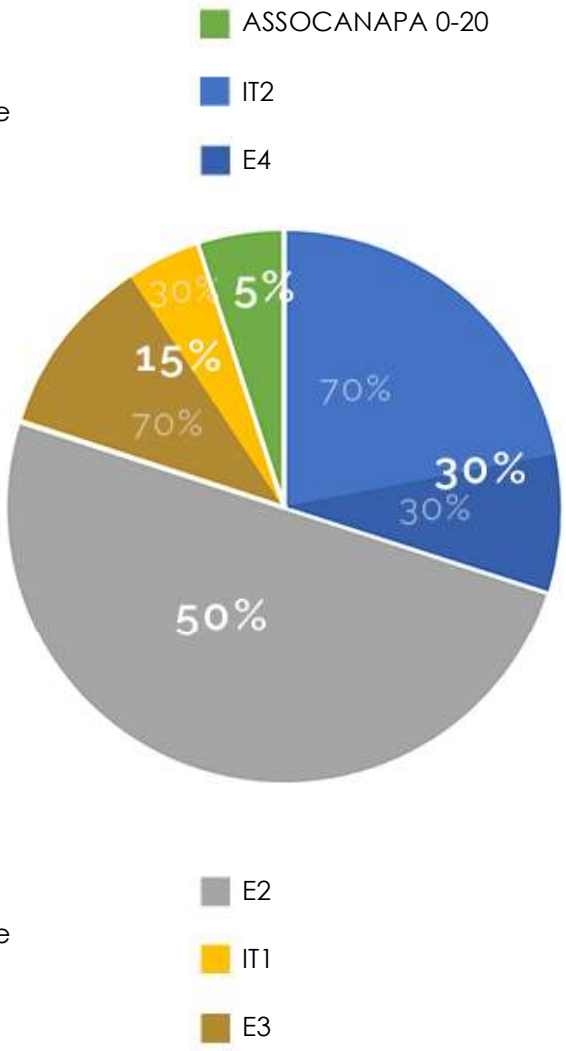
- 6 - 15 mm ⟶ 15%, così composto:

  - 70% canapulo Biomat granulometria 5 - 16mm (E3), fibrato; — 2,625L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 5 - 15 mm (IT1); — 1,125L

  Totale 3,75L

- 0 - 20 mm ⟶ 5%, composto per il 100%:

  - canapulo Assocanapa granulometria 0 - 20 mm. — 1,25L



2.4.5 IMPASTO E

- 0 - 3 mm ⟶ 30%, così composto:

  - 30% canapulo Biomat granulometria 0 - 2 mm (IT2); 2,25L
  - 70% canapulo Biomat granulometria 0 - 3 mm (E4), fibrato per il 3 - 5 %. 5,25L

  Totale 7,5L

- 3 - 6 mm ⟶ 50%, composto per il 100%:

  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8 mm (E2), fibrato per circa il 5 %. 12,5L

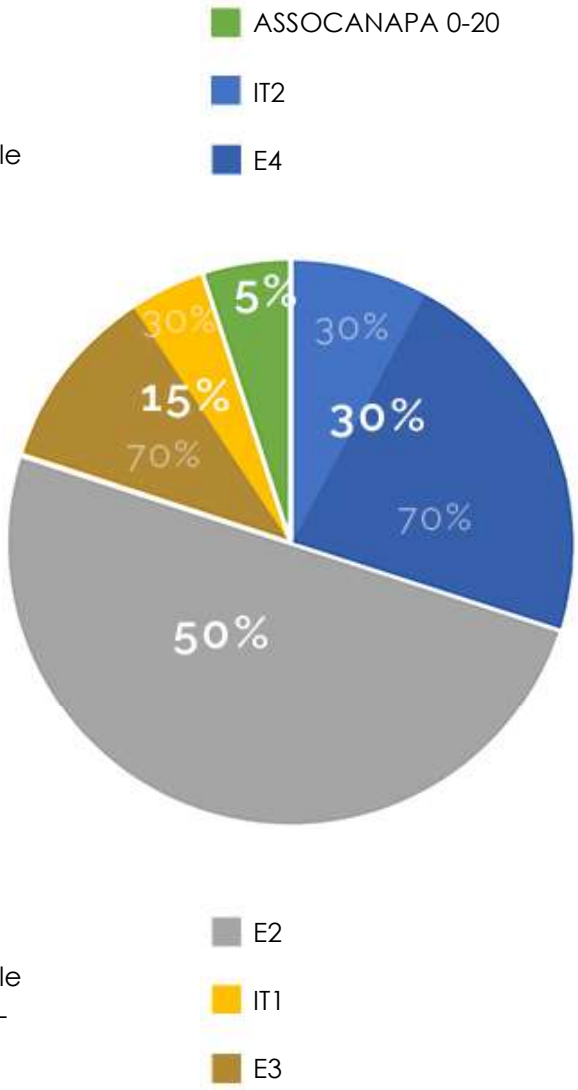
- 6 - 15 mm ⟶ 15%, così composto:

  - 70% canapulo Biomat granulometria 5 - 16mm (E3), fibrato; 2,625L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 5 - 15 mm (IT1); 1,125L

  Totale 3,75L

- 0 - 20 mm ⟶ 5%, composto per il 100%:

  - canapulo Assocanapa granulometria 0 - 20 mm. 1,25L



Miscela	Composizione canapulo						
	Curva granulometrica			Codice prodotto	% rispetto alla categoria di aggregato	% rispetto al totale di aggregato	Volume [L]
	Granulometria	%	Volume [L]				
A	0 - 3	30	7,5	IT2	50	15,0	3,75
				E4	50	15,0	3,75
	3 a 6	50	12,5	E2	100	50,0	12,5
	6 a 15	15	3,75	E3	50	7,5	1,875
				IT1	50	7,5	1,875
	0 a 20	5	1,25	ASSO 0-20	100	5,0	1,25
B	0 - 3	30	7,5	IT2	70	21,0	5,25
				E4	30	9,0	2,25
	3 a 6	50	12,5	E2	100	50,0	12,5
	6 a 15	15	3,75	E3	50	7,5	1,875
				IT1	50	7,5	1,875
	0 a 20	5	1,25	ASSO 0-20	100	5,0	1,25
C	0 - 3	30	7,5	IT2	50	15,0	3,75
				E4	50	15,0	3,75
	3 a 6	50	12,5	E2	100	50,0	12,5
	6 a 15	15	3,75	E3	70	10,5	2,625
				IT1	30	4,5	1,125
	0 a 20	5	1,25	ASSO 0-20	100	5,0	1,25
D	0 - 3	30	7,5	IT2	70	21,0	5,25
				E4	30	9,0	2,25
	3 a 6	50	12,5	E2	100	50,0	12,5
	6 a 15	15	3,75	E3	70	10,5	2,625
				IT1	30	4,5	1,125
	0 a 20	5	1,25	ASSO 0-20	100	5,0	1,25
E	0 - 3	30	7,5	IT2	30	9,0	2,25
				E4	70	21,0	5,25
	3 a 6	50	12,5	E2	100	50,0	12,5
	6 a 15	15	3,75	E3	70	10,5	2,625
				IT1	30	4,5	1,125
	0 a 20	5	1,25	ASSO 0-20	100	5,0	1,25

2.5 IL LEGANTE

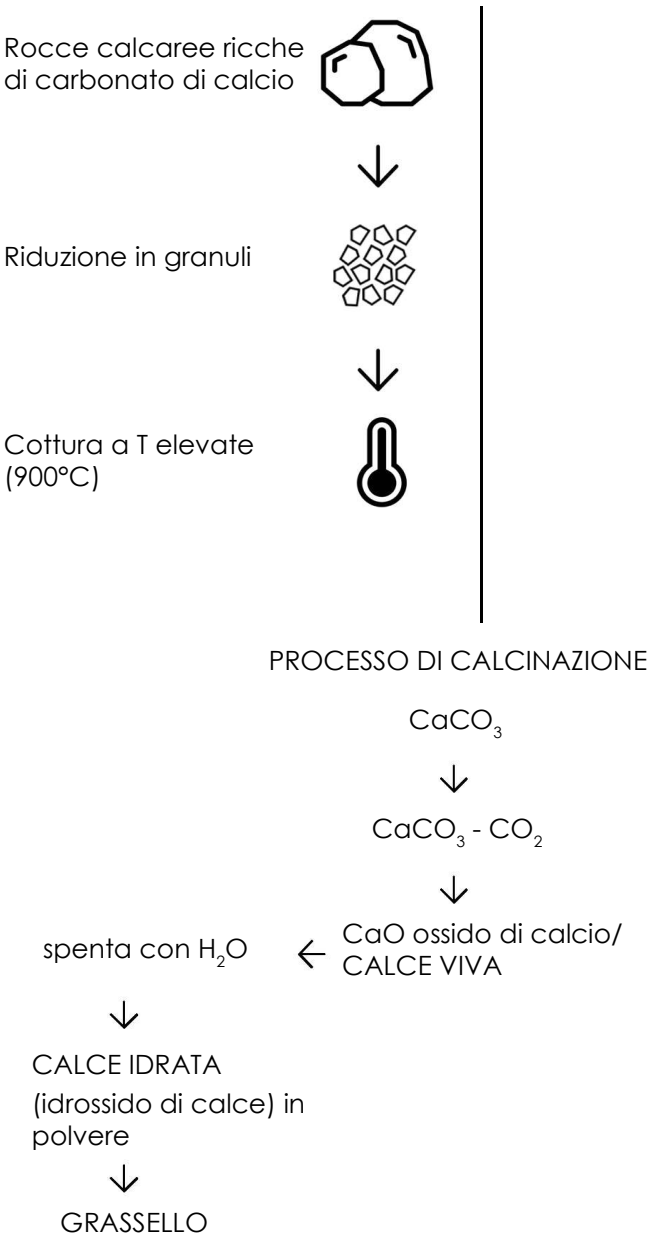
Ci sono diverse tipologie di leganti, tra i quali le più conosciute sono il classico cemento, la calce aerea e la calce idraulica.
Sono prodotti caratterizzati da:
- assenza di alcali solubili;
- elasticità;
- traspirabilità;
- resistenza ai solfati;
- assenza di ritiro idraulico.

Per questo trovano ampia applicazione non solo nel restauro e nella bioarchitettura ma anche nelle nuove costruzioni e ristrutturazioni per:
- intonaci di facciata;
- intonaci interni;
- finiture varie;
- costruzione di murature in laterizio e pietra;
- consolidamento di strutture degradate;
- reintegrazione e ricostruzione autogena delle fessure.

2.5.1 CALCE AEREA

La calce aerea è così definita perché fa presa e si indurisce in presenza di anidride carbonica. Si produce portando a cottura, a temperatura di 900°C, rocce calcaree ricche di carbonato di calcio, ridotte in granuli. Attraverso questo processo, noto con il nome calcinazione, il carbonato di calcio perde l'anidride carbonica in esso contenuta e si trasforma in ossido di calcio, ovvero la calce viva.





2.5.2 CALCE IDRAULICA NATURALE

La calce idraulica è così definita perché fa presa e si indurisce in presenza di acqua.
Si ottiene dalla cottura di rocce calcaree impure (marna) ricche di silice o miscele di calcare e argilla, in forni verticali a strati simili a quelli per la produzione della calce aerea, con un processo lento e a temperature intorno ai 1000°C. All'uscita dal forno, il calcare cotto viene in parte idratato ("spento") e poi macinato senza aggiunta di alcun materiale che modifichi la composizione naturale della marna. Le alte temperature di cottura permettono di ottenere una polvere ricca di idrossido di calcio (calce idrata) e silicati di calcio. La reazione tra i silicati di calcio e la calce idrata determina l'idraulicità del prodotto.
È la calce ideale nelle malte di allettamento e per intonaci, nell'edilizia per il restauro storico e monumentale, nella bioedilizia e nelle costruzioni in genere.



- MARNA:
  roccia calcarea impura/ ricca di silice
-miscela calcare+argilla/





cottura a T elevate (1000°C)





spegnimento



macinazione

Polvere ricca di
$Ca(OH)_2$ + silicati di calcio

idraulicità

La calce idraulica naturale dopo lo spegnimento e la stagionatura si presenta sotto forma di polvere con colore variabile dal bianco al nocciola.
Secondo la norma UNI EN 459-1:2010, viene contrassegnata dalla sigla NHL (Natural Hydraulic Lime).

È un prodotto abbastanza utilizzato in edilizia. La malta che ne deriva è più resistente di quella a base di calce aerea/ idrata, soprattutto ai cicli di gelo e disgelo.

2.5.2.1 VALORI DI RESISTENZA DELLE CALCI IDRAULICHE

La norma sopra citata prevede una distinzione basata sulla resistenza meccanica, sulla base degli aggregati che vengono aggiunti, distinguendo tre classi in ordine crescente di resistenza a compressione: NHL 2, NHL 3,5 e NHL 5. Solitamente per le mu-

rature portanti viene utilizzata NHL5. Si aggiungono alla lista le NHL-Z: calci idrauliche naturali in cui vengono aggiunti (sino al 20% in massa) materiali idraulicizzanti o pozzolane.

2.5.3 CALCE IDRAULICA NATURALE NHL5



È stato deciso, seguendo i consigli dell'artigiano, di utilizzare come legante la calce idraulica. Questa contiene dal 15% al 50% di "calce libera", che costituisce una componente di "calce aerea" interna, non naturalmente idraulicizzata. Si ha quindi la necessità di aggiungere una componente idraulicizzante.

Prodotto marcato CE con certificazione n. 0925 CPR Ce b n. 22/2016.

La calce idraulica utilizzata è stata acquistata da Brigliadori Fornace Calce, in provincia di Rimini, in sacchi da 25 kg, Prodotto marcato CE con certificazione n. 0925 CPR Ce b n. 22/2016 (UNI EN 459-1:2010). Contiene una quantità di calce libera > 15% della sua massa che creerebbe un getto disomogeneo, in quanto questa costituisce un punto debole nel nucleo. Abbiamo quindi aggiunto un idraulicizzante (pozzolana), con la funzione di "catturare" la parte di calce libera, in una percentuale che va dal 40 a circa il 50% del peso della calce idraulica.

Considerando quindi 1 kg di calce idraulica naturale, la quantità di pozzolana sarà 400 grammi. Nella miscela calce-canapa l'elemento "aggregato" è costituito dal canapulo, mentre l'"(aggregato) idraulicizzante" è costituito dalla pozzolana. L'impasto dunque è composto da:

canapulo + legante + pozzolana

2.5.4 DENSITÀ DELL'IMPASTO

Il nostro obiettivo è raggiungere un impasto che abbia una densità tra i 500 (volta) e i 700 kg/m^3 (piedritti).
In commercio esistono blocchi di calce/canapulo realizzati con calce idraulica, con una densità di 420 kg/m^3 e una resistenza a compressione di 0,4 MPa prodotti dall' azienda Edilcanapa.

L'obiettivo è superare 0,5 MPa, per raggiungere il massimo della prestazione meccanica.
Il canapulo ha una densità di circa 120-160 kg/m^3: per ottenere i valori desiderati bisogna quindi aggiungere legante.

Considerando le densità del canapulo e del legante, rispettivamente 150 e 300 kg/m^3, si ottiene una densità totale di 450 kg/m^3.

canapulo + legante

150 + 300 = 450 [kg/m^3]

Si aggiunge pozzolana per circa la metà del peso della calce idraulica. Quindi, in totale l'impasto risulta composto da:

550 g di canapulo + 300 g di calce idraulica + 150 g di pozzolana

2.5.5 RAPPORTO LEGANTE / AGGREGATO

Le malte sono miscele di:
legante + aggregato + acqua

Si dividono, in base al rapporto tra legante e aggregato, in magre, standard e

grasse.

- Malte magre:
Legante/Aggregato > 1:3

- Malte standard:
Legante/Aggregato = 1:3

- Malte grasse: Legante/Aggregato < 1:3
Le malte grasse offrono prestazioni meccaniche più alte e indurimento più veloce; la massa risulta molto plastica, più lavorabile e più omogenea.

2.5.6 POZZOLANA

La pozzolana è un materiale di origine vulcanica costituito prevalentemente da:
- silice (70%) e silicati idrati di allumina
- ossido di ferro
- potassio
- sodio
- magnesio.

I materiali a comportamento pozzolanico sono sostanze naturali o sottoprodotti industriali che hanno una struttura amorfa o parzialmente cristallina e sono composti di silice o silico-alluminati o da una combinazione di questi.
La pozzolana ha natura acida e reagisce con l'ossido di calcio per formare silicati amorfi.
Non viene considerata come un aggregato, ma come un additivo. Non influisce sulla massa del composto, e viene utilizzata nel legante per migliorare le prestazioni di una calce idraulica naturale, catturando ulteriore calce libera.
Le sole pozzolane non induriscono se messe a contatto con acqua, ma se vengono finemente macinate possono reagire con l'idrossido di calcio, in presenza di acqua e a temperatura ambiente, e formare silicati di calcio idrati.
A seconda della composizione, costipazione e maturazione) la resistenza a compressione di una malta ottenuta con calce e pozzolana può variare tra 3 e 9 MPa.

2.5.7 CALCE + POZZOLANA VS MALTE ORDINARIE

La combinazione di pozzolana e calce conferisce le seguenti proprietà:
- maggiore resistenza meccanica,
- minore permeabilità all'acqua,
- maggiore durabilità in ambiente esterno.

Il nostro impasto contiene calce idraulica in un rapporto 1:2 rispetto agli aggregati. Aggiungendo la pozzolana, il volume aumenta di circa il 15%. L'impasto sarà quindi così composto:

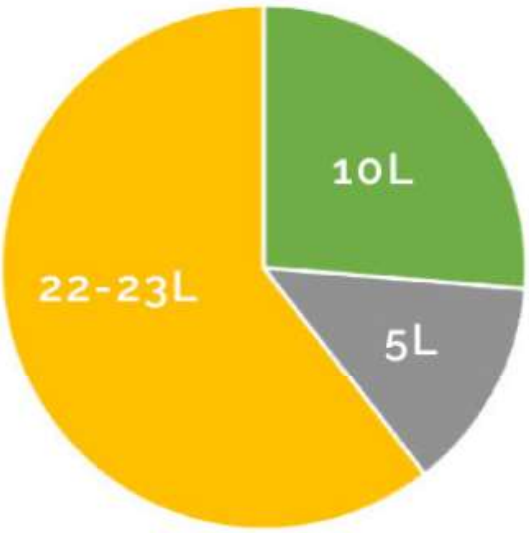
30% legante (calce idraulica) +
55% aggregato/inerti (canapa) +
15% pozzolana

(Il rapporto 1:2 non cambia, perché la pozzolana si va a legare alla calce idraulica, catturando la calce libera).

2.5.8 COMPOSIZIONE DI OGNI IMPASTO

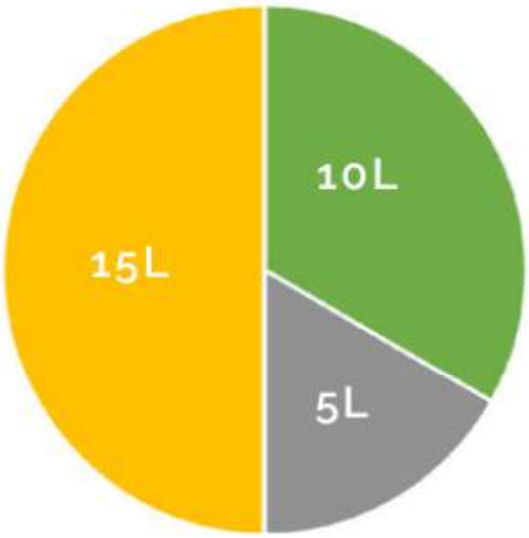
2.5.8.1 IMPASTO A

- calce idraulica naturale NHL 5 Brigliadori Fornace Calce	10 L
- pozzolana	5 L
- acqua	22-23 L



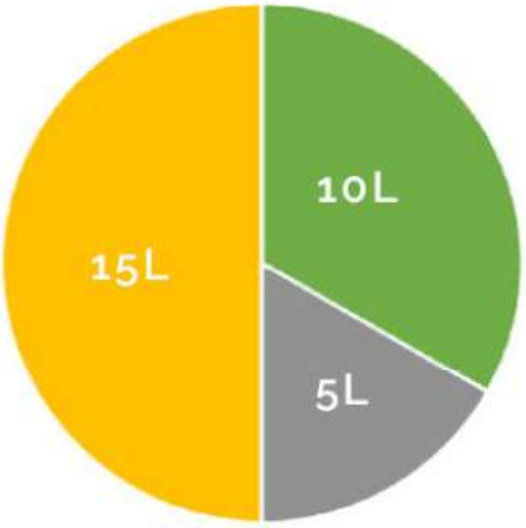
2.5.8.2 IMPASTO B

- calce idraulica naturale NHL 5 tipo Brigliadori Fornace Calce	10 L
- pozzolana	5 L
- acqua	15 L



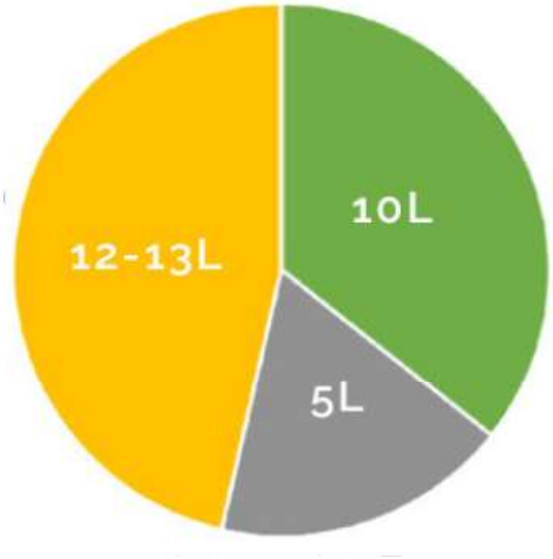
2.5.8.3 IMPASTO C

- calce idraulica naturale NHL 5 tipo Brigliadori Fornace Calce	10 L
- pozzolana	5 L
- acqua	15 L



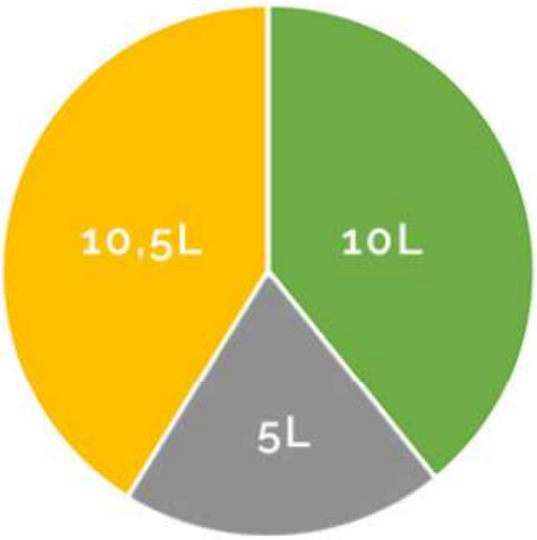
2.5.8.3 IMPASTO D

- calce idraulica naturale NHL 5 Brigliadori Fornace Calce	10 L
- pozzolana	5 L
- acqua	12-13 L



2.5.8.4 IMPASTO E

- calce idraulica naturale NHL 5 Brigliadori Fornace Calce	10 L
- pozzolana	5 L
- acqua	10+0,5 L



2.6 PREPARAZIONE DELL'IMPASTO

Dopo aver studiato la curva granulometrica e la composizione granulometrica specifica di ogni canapulo, si sono ipotizzati 5 tipi di impasto, denominati: A, B, C, D, E.

2.6.1 PRINCIPALI COMPONENTI

Ogni impasto prevede 25 litri di inerte, con due costituenti a percentuali costanti:

- 3 - 6 mm ⟶ 50% di cui E2
- 0 - 20 mm ⟶ 5% di cui ASSOCANAPA

Le altre due granulometrie (0-3 mm e 6-15 mm) assumono percentuali differenti, creando così composizioni di impasto diverse.

Gli impasti sono stati fatti a secco, ovvero si è preparato un contenitore dentro il quale si sono messi i vari tipi di canapulo, fino a raggiungere il totale di 25L.

Questo composto viene poi mescolato con acqua, inumidendo la canapa. La quantità di acqua richiesta è il doppio della quantità di canapulo. In questo modo si evita il rigonfiamento del materiale e la conseguente fessurazione, che comporterebbe disomogeneità, creando, una volta aggiunto il legante, parti collose. Se invece il rapporto 1:2 è rispettato, il canapulo assorbe l'acqua, e quando verranno aggiunti il legante e ulteriore acqua, questa servirà solamente per la presa della calce idraulica.

2.6.2 PROCEDIMENTO

Prendendo come esempio l'impasto A di tutti gli impasti, ad eccezione dell'impasto E, il procedimento di realizzazione è stato schematizzato nella pagina a fianco.

2.6.2.1. PREPARAZIONE DELL'AGGREGATO

Vengono mescolate differenti granulometrie di canapulo:

IT2		3,75 L
E4		3,75 L
E2		12,5 L
E3		1,875 L
IT1		1,875 L
Assocanapa 0-20		1,25 L

TOT = 25 L



1.
Preparazione dell' aggregato e miscela a secco







2.
Miscelazione aggregato + acqua 5 min





3.
Miscelazione legante a secco x min

4.
Miscelazione canapulo bagnato + legante



5.
Aggiunta di acqua + miscelazione



2.6.3 OSSERVAZIONI

2.6.3.1 IMPASTO E

Per l'impasto E, è stata effettuata una diversa miscelazione. Invece di inumidire il canapulo e, successivamente, aggiungere altra acqua insieme al legante, il canapulo è stato lasciato nel suo stato secco. L'acqua è stata aggiunta alla miscela esclusivamente nel momento in cui viene aggiunto il legante. In questo modo parte dell'acqua necessaria per la presa è stata assorbita dal canapulo (ancora secco): ci si aspettava quindi che la i tempi di presa del legante fossero più lunghi.

2.6.3.2 CONCLUSIONI

Mentre la maggior parte tra gli articoli precedentemente citati indica per l'impasto calce-canapa, un rapporto 1:2, ovvero il doppio di volume d'acqua rispetto alla quantità di canapulo, la nostra esperienza ci ha portato a fare alcune osservazioni:

il rapporto 1:2 tra canapulo [L] e acqua è stato smentito, in quanto, prendendo come esempio l'impasto A, a un volume di canapulo di 25L, sarebbe dovuto corrispondere un volume d'acqua di 50L. In realtà la fibra ha presentato difficoltà nell'assorbimento già a poco più di 20L. Questo impasto è risultato abbastanza liquido e grasso.

Visto il risultato ottenuto per l'impasto A (vedi figura sotto), si è deciso di diminuire il volume dell'acqua negli impasti successivi. È stato quindi ridotto a 10-15 litri, dando origine a prodotti molto più "pastosi".

IMPASTO A





IMPASTO B





Composizione legante		Acqua [L]	Processo di miscelazione		Consistenza della miscela
Materiale	Volume [L]		Step	Descrizione	
NHL 5	10	22 ~ 23	1	miscelazione canapulo a secco	bagnato (il canapulo non ha assorbito l'acqua come ci aspettavamo); la cazzuola lucida l'impasto; rapporto grasso (il legante "copre" il canapulo)
			2	miscelazione canapulo e acqua (circa 5 min)	
			3	miscelazione legante a secco	
			4	miscelazione canapulo bagnato e legante	
Pozzolana	5		5	aggiunta di acqua e miscelazione (circa 10 min)	
NHL 5	10	15	1	miscelazione canapulo a secco	umida
			2	miscelazione canapulo e acqua	
			3	miscelazione legante a secco	
			4	miscelazione canapulo bagnato e legante	
Pozzolana	5		5	aggiunta di acqua e miscelazione	
NHL 5	10	15	1	miscelazione canapulo a secco	più umida di B (meno di A)
			2	miscelazione canapulo e acqua	
			3	miscelazione legante a secco	
			4	miscelazione canapulo bagnato e legante	
Pozzolana	5		5	aggiunta di acqua e miscelazione	
NHL 5	10	12 ~ 13	1	miscelazione canapulo a secco	umida
			2	miscelazione canapulo e acqua	
			3	miscelazione legante a secco	
			4	miscelazione canapulo bagnato e legante	
Pozzolana	5		5	aggiunta di acqua e miscelazione	
NHL 5	10	10 + 0,5	1	miscelazione canapulo a secco	terra bagnata (per massetti)
			2	miscelazione legante a secco	
			3	miscelazione canapulo e legante a secco	
Pozzolana	5		4	aggiunta di acqua e miscelazione	

2.7 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

2.7.1 TIPOLOGIE

Per determinare le capacità meccaniche del materiale, abbiamo eseguito le stesse prove di laboratorio che vengono tipicamente effettuate per il calcestruzzo. Si sono dunque preparati dei provini sia cubici sia cilindrici, di dimensioni standard, rispettivamente 15x15x15 cm e 16x30 cm.



Sono state utilizzate cubiere monouso in polistirene espanso sinterizzato (EPS).
Esistono in commercio anche casseforme cubiche in acciaio o in poliuretano che proteggono il provino da urti, deformazioni, etc. ed evitano lunghe operazioni di scasseramento, oltre ai costi di smaltimento dell'EPS. Le più diffuse sono in poliuretano; hanno alla base una valvola e sono riutilizzabili più volte.
L'utilizzo di cubiere in acciaio, nel nostro caso, sarebbe sconsigliato, in quanto l'acciaio è un materiale acido. Le corrette modalità d'uso delle casseforme cubiche prevedono che vengano preventivamente pulite e lubrificate e, dopo l'indurimento del materiale, il campione venga espulso soffiando aria compressa tramite la valvola posta alla base della cubiera stessa.



2.7.2 COMPATTAZIONE

I campioni sono stati pressati manualmente con appositi utensili. Durante il riempimento dello stampo ci sono stati vari step di compattazione, a piacere del soggetto esecutore. Non è dunque stata seguita alcuna linea guida sul numero di colpi e la forza applicata.





Miscela	Campione	Dimensioni [mm]			S_0 [mm^2]	Volume [cm^3]	Massa [g]	Densità [kg/m^3]	Densità media [kg/m^3]
		a_0	b_0	h_0					
A	A1	150	149	144	22350	32,184	1943	603,72	611,78
	A2	145	148	145	21460	31,117	1925	618,63	
	A3	147	146	146	21462	31,335	1905	607,96	
	A4	150	149	145	22350	32,408	1995	615,60	
B	B1	150	148	150	22200	33,300	2471	742,04	745,75
	B2	148	150	146	22200	32,412	2450	755,89	
	B3	147	147	150	21609	32,414	2409	743,21	
	B4	148	147	150	21756	32,634	2442	748,30	
C	C1	146	148	147	21608	31,764	1834	577,39	484,50
	C2	145	147	147	21315	31,333	1498	478,09	
	C3	145	147	150	21315	31,973	1530	478,54	
	C4	148	148	148	21904	32,418	1590	490,47	
D	D1	148	145	147	21460	31,546	1591	504,34	504,34
	D2	148	148	148	21904	32,418	1624	500,96	
	D3	147	144	148	21168	31,329	1620	517,10	
E	E1	148	148	150	21904	32,856	1913	582,24	603,21
	E2	150	148	150	22200	33,300	2160	648,65	
	E3	145	149	149	21605	32,191	1915	594,88	
	E4	148	151	153	22348	34,192	2091	611,54	

2.7.3 CONSERVAZIONE

I campioni sono stati lasciati ad asciugare per circa 60 giorni, dal 7 luglio (preparazione degli impasti) al 2 settembre (rimozioni delle casseforme cubiche e cilindriche), facendo una misurazione intermedia dell'umidità dopo circa 10 giorni.

2.7.4 MONITORAGGIO E MISURAZIONE DELL'UMIDITÀ

La calce canapa si può considerare asciutta quando il valore dell'umidità relativa è circa del 10 ~ 12%.
Per misurare il livello di umidità relativa dei campioni è stato utilizzato lo strumento "BM31" prodotto da Trotec: un rilevatore di umidità elettronico che effettua la misurazione tramite principio dielettrico. Questo permette una rilevazione di umidità non invasiva e non richiede l'utilizzo di sonde o elettrodi da inserire nel materiale da analizzare (figure 3 e 4).

Durante l'ultima misurazione effettuata (il 24 settembre, intorno al 70esimo giorno), è stato utilizzato uno specifico strumento di rilevazione dell'umidità, che ha fornito diversi valori in differenti punti del medesimo campione. È stata dunque calcolata una media tra tutti i valori misurati ed è emerso che l'umidità di ogni provino si aggirava ancora intorno al 15 ~ 20%.
È stato rilevato come, nei provini cubici, il materiale sia più secco nei punti di contatto con l'EPS, quasi con tendenza allo sgretolamento, rispetto ad altri punti

esposti (per esempio l'apertura della cassaforma) dove sembra essersi asciugato in modo più uniforme e omogeneo, mantenendo una certa compattezza, seppure ancora abbastanza umido (figura 5).



Figura 3



Figura 4



Figura 5

2.8 RESISTENZA A COMPRESSIONE

Per determinare la resistenza a compressione, si sono eseguite delle prove di schiacciamento sui provini (questa prova consiste nel posizionare il campione tra i piatti di acciaio di una pressa, aumentando il carico applicato). Si tratta della stessa prova utilizzata anche per i provini in calcestruzzo.

2.8.1 STRUMENTI

Le prove sono state svolte presso il Laboratorio del Dipartimento DISEG del Politecnico di Torino, utilizzando la macchina per test di compressione Zwick Roell (figure 6 e 7) insieme al software TestXpert II (figura 8). Questo sistema garantisce risultati di prova ripetibili e riproducibili, infatti a ogni ambiente di prova può essere assegnato un programma di prova. Se un nuovo utente desidera ripetere lo stesso test il giorno successivo, gli verrà richiesto di utilizzare esattamente la stessa configurazione di prova già salvata. Questo assicura che tutti i test siano eseguiti nelle stesse condizioni.



Figura 6



Figura 7

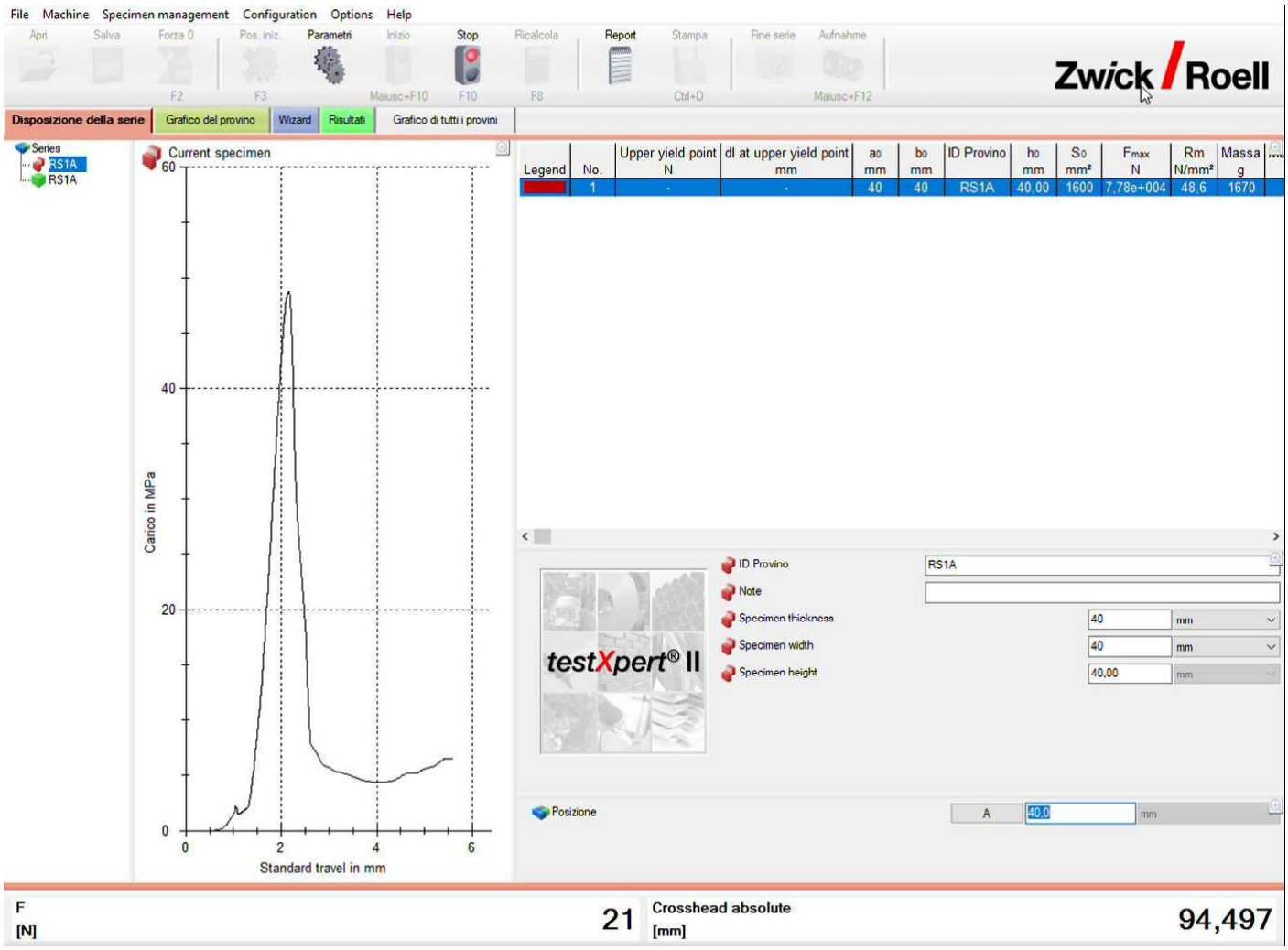
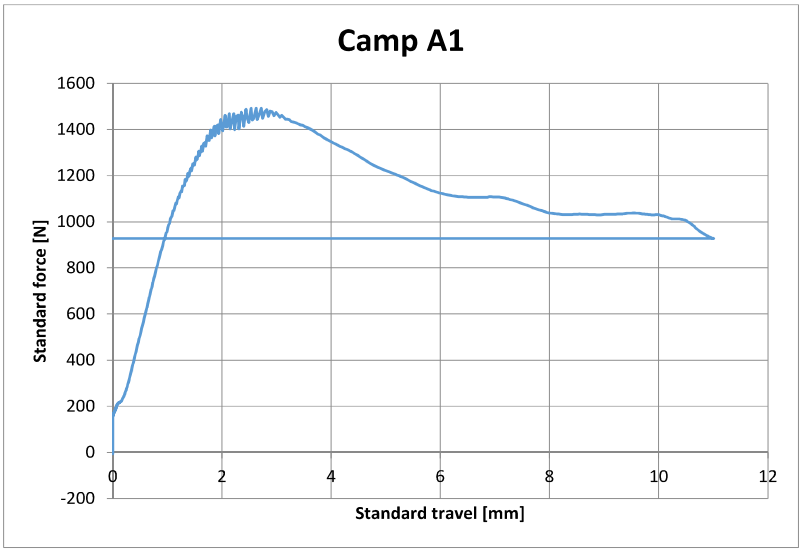
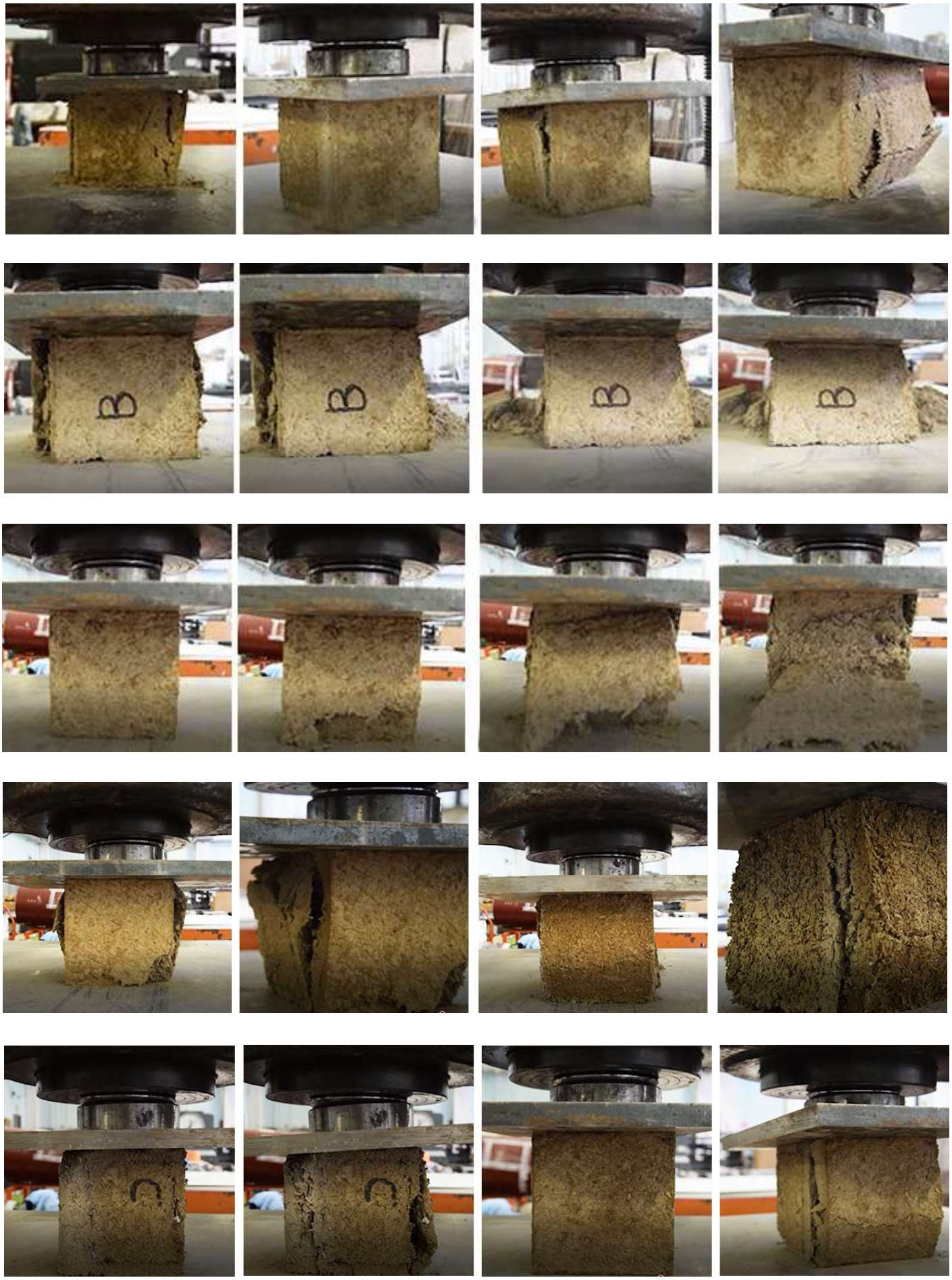


Figura 8

Campione A1		
Tempo [s]	Dilatazione [mm]	Forza [N]
1,827875	0	-6,035308
1,917875	0	-5,787749
1,977875	0	-5,780181
5,287875	0	113,7673
5,637875	0	153,6784
5,647875	0	154,7721
4,43235	0	156,1803
4,45235	0,002456665	157,7311
4,46235	0,003768921	159,0436
4,48235	0,006225586	160,2741
4,49235	0,007530212	161,2741
4,50235	0,008842468	162,2194
4,51235	0,009994507	162,8874
4,52235	0,011138916	163,9655
4,53235	0,012451172	164,7741
4,54235	0,013595581	165,3522
4,55235	0,01473999	166,7897
4,56235	0,015892029	166,6911
4,57235	0,017036438	168,1442
4,59235	0,019165039	168,9762
4,60235	0,020317078	169,4294
4,61235	0,021461487	170,2184
4,63235	0,023590088	171,3981



2.8.2 MODALITÀ DI ROTTURA





Durante la rottura, i campioni hanno presentato un comportamento costante: le facce laterali dei cubi tendono a dividersi e staccarsi dal nucleo centrale: sembra che il materiale non sia coeso. Questo potrebbe essere dato dalla scarsa e disomogenea forza di compattazione applicata nel momento della formazione dei campioni.

2.8.3 ANALISI DELLA ROTTURA

La pressa, collegata al software testXpert II, consente di ricavare una serie di dati che descrivono il comportamento del campione analizzato.
Prendendo come esempio il campione A1, vediamo nella parte sinistra della schermata riportata a pag.45, un grafico che mette a rapporto la forza di compressione applicata e la deformazione, lo spostamento, del materiale.

Durante la prova, per ogni secondo, il sistema registra la forza applicata (espressa in N) e la deformazione, considerata come lo spostamento delle parti dovuto a rottura o slittamento (espressa in mm) del provino. Questi dati vengono poi organizzati in file tabellari Excel che descrivono il comportamento del campione in funzione del tempo, della forza applicata e della deformazione.
I risultati ottenuti, messi a rapporto tra loro, consentono di creare un grafico forza/ deformazione e di definire quale sia la resistenza a compressione di ogni campione e la resistenza media (espressa in MPa) di ogni di impasto.

PROVINI CUBICI		PROVE DI COMPRESSIONE			
Miscela	Campione	Fmax [N]	Area [mm²]	σc [MPa]	σc media [MPa]
A	A1	1492	22350	0,07	0,07
	A2	1338	21460	0,06	
	A3	1590	21462	0,07	
	A4	1467	22350	0,07	
B	B1	5656	22200	0,25	0,25
	B2	6144	22200	0,28	
	B3	4984	21609	0,23	
	B4	5133	21756	0,24	
C	C1	1564	21608	0,07	0,04
	C2	588	21315	0,03	
	C3	780	21315	0,04	
	C4	673	21904	0,03	
D	D1	1169	21460	0,05	0,05
	D2	878	21904	0,04	
	D3	1221	21168	0,06	
	D4	0	0	0,00	
E	E1	2796	21904	0,13	0,16
	E2	4777	22200	0,22	
	E3	2724	21605	0,13	
	E4	4928	22348	0,22	

2.8.4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI

I risultati delle prove di compressione non sono state per niente soddisfacenti. Gran parte dei provini, sottoposti a forze di compressione molto basse, si sono sgretolati. Il resistenza maggiore ottenuta è di 0,25 MPa, con l'impasto B. Questa è la metà rispetto alla resistenza a compressione posta come obiettivo, ovvero maggiore di 0,5 MPa.

2.8.4.1 IMPASTO B

L'impasto B è risultato il migliore. Il campione B2 ha raggiunto una resistenza a compressione di 0,28 MPa.

A differenza degli altri campioni, non presenta un picco di rottura, ma un cedimento più articolato. Sembra opporre resistenza e reazioni alla forza di compressione applicata.
Durante la rottura, tutte le facce laterali del cubo si sono distaccate dal nucleo centrale, alcune sgretolandosi, altre rimanendo intatte. Il nucleo centrale sembra rimanere più compatto seppur perdendo materiale ai lati.







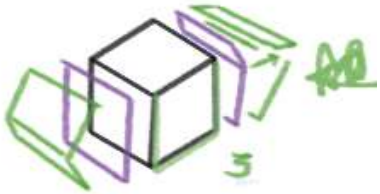




1. Il campione, non appena sottoposto alla forza di compressione, mostra un cedimento e sgretolamento alla base.



2. In un secondo momento avviene il distacco delle due facce laterali, la destra e successivamente la sinistra. Essendo il campione ruotato, queste facce, se si fa riferimento alla sua giacitura durante l'asciugatura, sono in realtà la base e la parte superiore del provino. La prima a cedere è la base, dispiegandosi in modo non uniforme e frantumandosi.



3. Successivamente anche la faccia superiore del campione, dopo un primo distacco, inizia una fase di distaccamento, in modalità opposta rispetto alla base.



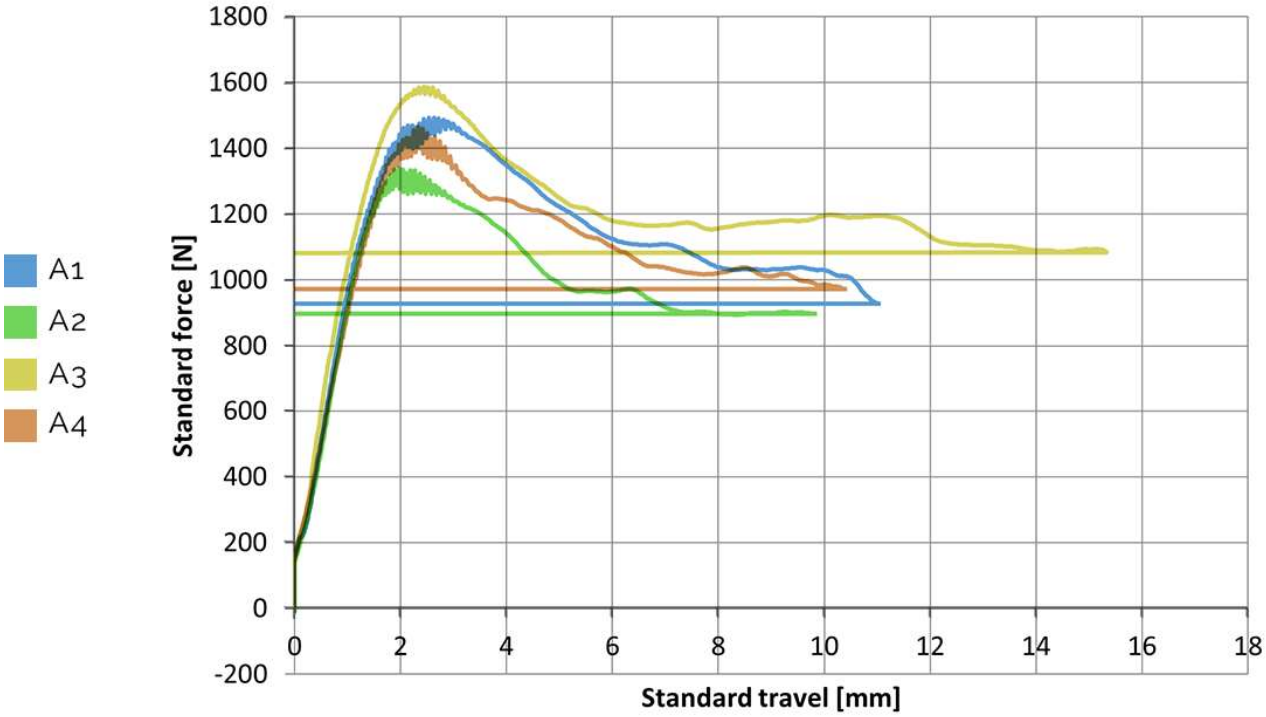
4. Entrambi le basi (inferiore e superiore) si sono rotte e frantumate; inizia la rotazione della faccia laterale B



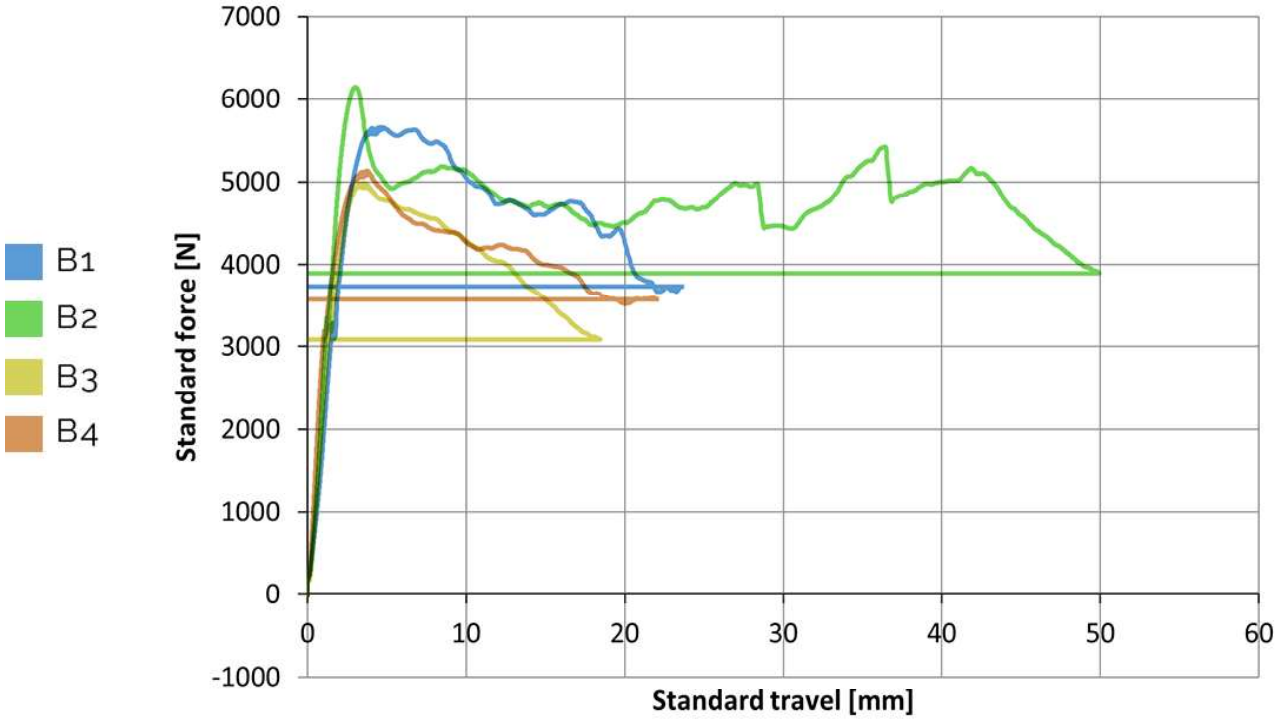
5. La faccia laterale non si sgretola ma sembra staccarsi scorrendo sulla superficie del nucleo centrale

2.8.4.2 GRAFICI FORZA/DEFORMAZIONE

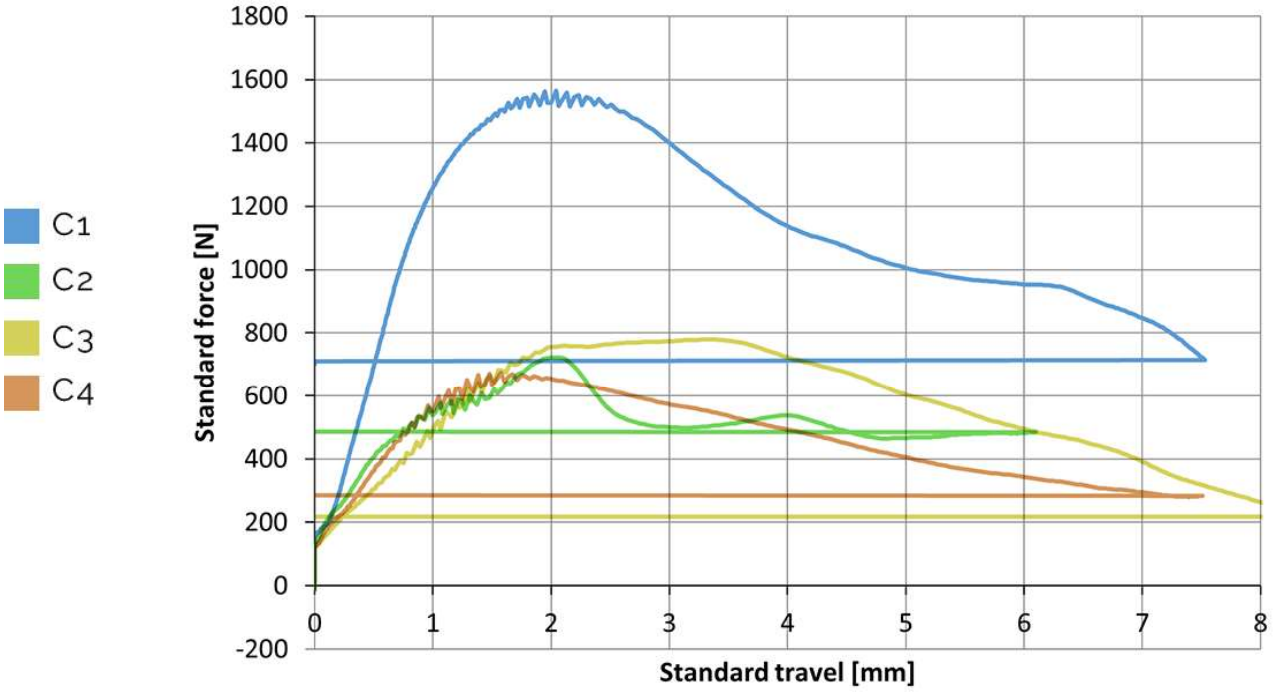
IMPASTO A
Campioni: A1, A2, A3, A4



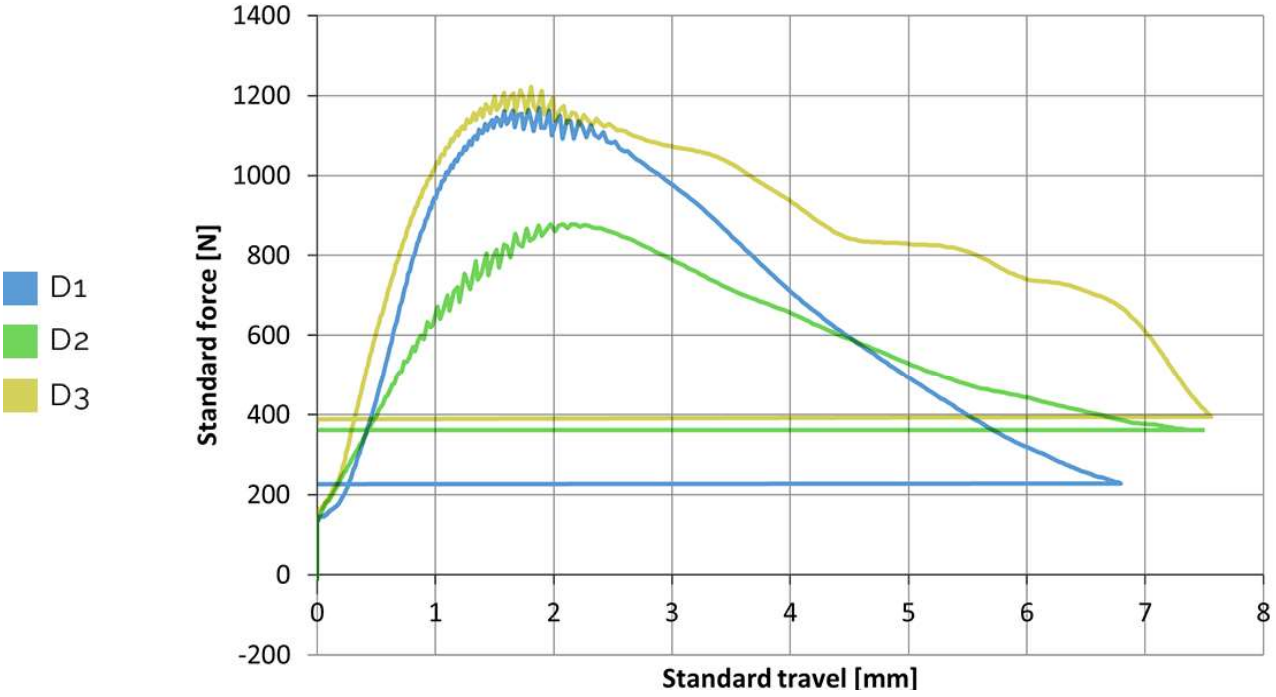
IMPASTO B
Campioni: B1, B2, B3, B4



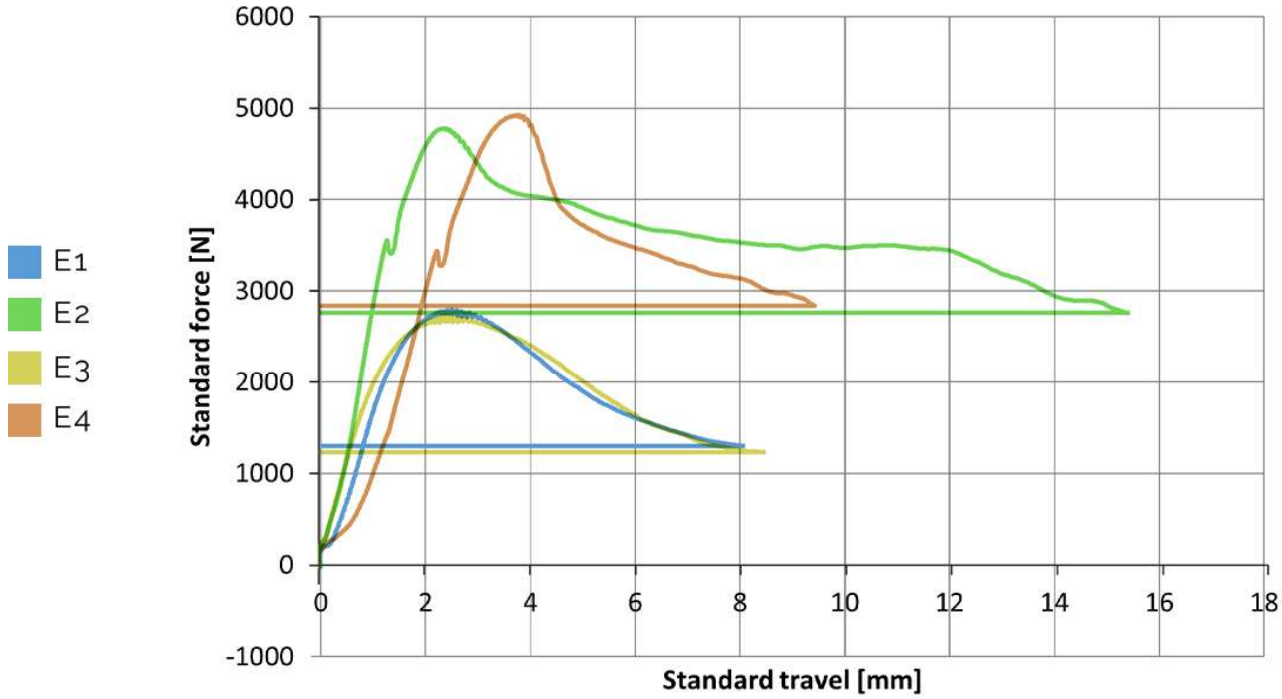
IMPASTO C
Campioni: C1, C2, C3, C4



IMPASTO D
Campioni: D1, D2, D3, D4

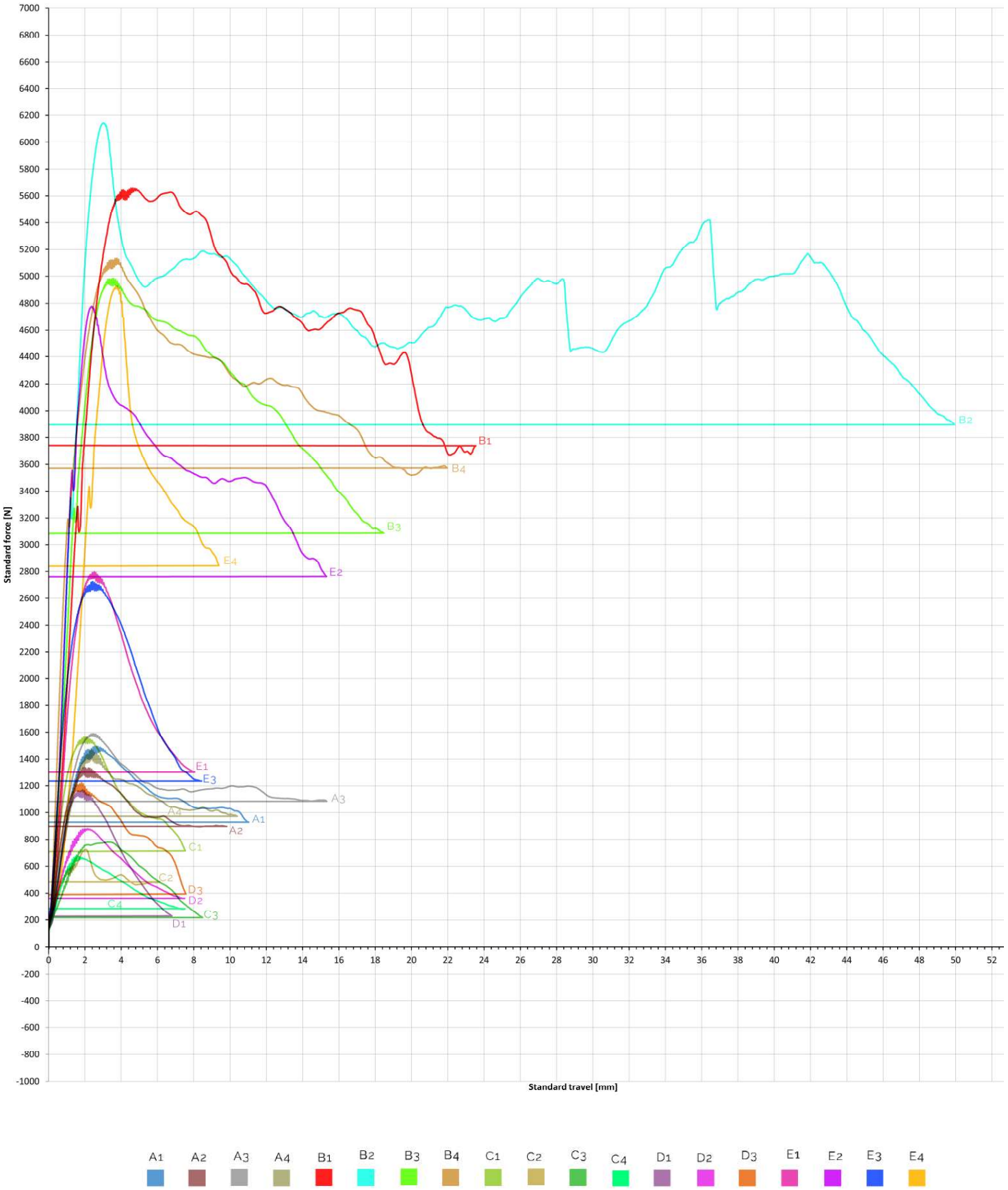


IMPASTO E
Campioni: E1, E2, E3, E4



Dai grafici forza/deformazione notiamo come il campione B2 non abbia raggiunto un picco di rottura oltre il quale non ha più risposto alla sollecitazione, ma sembrerebbe aver effettuato una rottura graduale, reagendo nel tempo alla forza applicata.
L'impasto E è stato, dopo il B, quello che ha ottenuto un risultato migliore. Presenta infatti una resistenza a compressione di 0,16 MPa. Analizzando il grafico relativo all'impasto E sembra che il carico sia più distribuito nel materiale, e che non crei una spaccatura netta al massimo sforzo. Il campione risponde in modo continuativo alla sollecitazione, deformandosi lentamente.

IMPASTI A,B,C,D,E e relativi campioni a confronto



3. LABORATORIO II

3.1 Introduzione

3.2 Ipotesi riguardo alle cause di non raggiungimento dell'obiettivo

3.3 Nuove formulazioni di impasto
- 3.3.1 Impasti: canapulo
  - 3.3.1.1 Impasto F
  - 3.3.1.2 Impasto G
  - 3.3.1.3 Impasto H

3.4 Il legante
- 3.4.1 Tipologia e quantità di legante per ogni impasto
  - 3.4.1.1 Impasto F
  - 3.4.1.2 Impasto G
  - 3.4.1.3 Impasto H

3.5 Preparazione dell'impasto
- 3.5.1 Procedimento
  - 3.5.1.1 Aggiunta di acqua
  - 3.5.1.2 Preparazione legante
- 3.5.2 Conseguenze sugli impasti
  - 3.5.2.1 Impasto F
  - 3.5.2.2 Impasto G
  - 3.5.2.3 Impasto H

3.6 Preparazione dei campioni
- 3.6.1 Procedimento
  - 3.6.1.1 Inserimento del materiale nello stampo
- 3.6.2 I campioni
- 3.6.3 Compattazione campioni cubici
- 3.6.4 Conservazione
- 3.6.5 Modalità di asciugatura

3.7 Monitoraggio
- 3.7.1 Fase iniziale
  - 3.7.1.1 Campione G1
  - 3.7.1.2 Grafici
  - 3.7.1.3 Impasto F
  - 3.7.1.4 Impasto G
- 3.7.2 Dimensioni
- 3.7.3 Asciugatura
  - 3.7.3.1 Ambiente interno
  - 3.7.3.2 Impasto F
  - 3.7.3.3 Impasto G
  - 3.7.3.4 Impasto H
- 3.7.4 Grafici monitoraggio
  - 3.7.4.1 Peso medio campioni nel periodo di monitoraggio
  - 3.7.4.2 Confronto tra variazione di peso

3.8 Resistenza a compressione
- 3.8.1 Strumenti
- 3.8.2 Modalità di rottura
- 3.8.3 Analisi della rottura
- 3.8.4 Risultati e considerazioni finali
  - 3.8.4.1 Campioni mattone
  - 3.8.4.2 Campioni cubici

3.9 Confronto della composizione degli impasti B,E,G,H

3.10 Considerazioni finali

3. LABORATORIO II

3.1 INTRODUZIONE

I risultati ottenuti dai campioni prodotti nella prima serie, non sono stati soddisfacenti. I provini hanno mostrato valori di resistenza a compressione molto bassi. Ci siamo dunque interrogati, insieme all'artigiano Fausto Cerboni dell'azienda Terrapaglia Costruire Sostenibile, che ci ha aiutati nella produzione degli scorsi impasti, riguardo le criticità riscontrate e le variazioni da applicare per raggiungere l'obiettivo posto all'inizio del nostro percorso.

3.2 IPOTESI RIGUARDO ALLE CAUSE DI NON RAGGIUNGIMENTO DELL'OBIETTIVO

Rianalizzando i procedimenti effettuati, la composizione dei primi impasti, e della conservazione dei campioni, abbiamo fatto alcune considerazioni:

1. Il livellamento e la compattazione del materiale negli stampi non sono avvenuti in modo omogeneo;

2. L'asciugatura dei campioni è risultata disomogenea.
Le superfici laterali dei campioni, a contatto con le casseforme (in EPS per la forma cubica e in PVC per quella cilindrica) durante tutto il tempo di asciugatura, sembrano essersi "seccate", il materiale sembra quasi avere una consistenza "pietrosa" e si sgretola facilmente. Le facce superiori dei campioni invece non si sono asciugate a contatto con i materiali delle casseforme (poiché in quel punto vi è l'apertura per l'inserimento del materiale nello stampo), ma hanno potuto asciugare a contatto con l'aria dell'ambiente esterno. L'asciugatura in questi punti sembra essere stata più graduale, resitutendo un materiale più compatto e umido, non tendente allo sgretolamento.

Abbiamo dunque pensato di apportare modifiche:

- Per quanto riguarda la costipazione, utilizzare un cassero che possa interamente essere rimosso, in questo modo il campione sarà esposto all'aria su tutti i lati e potrà iniziare più velocemente il suo processo di carbonatazione. Se il legante riceve maggior ventilazione asciuga e fa presa in tempi più rapidi.
- Per aumentare il valore di resistenza a compressione aggiungere cemento bianco come additivo al legante; questo consente tra l'altro un'asciugatura più rapida.

3.3 NUOVE FORMULAZIONI DI IMPASTO

Siccome l'impasto B e l'impasto E presentano i valori più elevati nelle prove di resistenza, siamo partiti da quelli per la creazione dei nuovi provini.

Abbiamo creato tre impasti, di cui due preservano la curva granulometrica dagli impasti B ed E, mentre il terzo, a causa di un errore nella preparazione, modifica la composizione dell'aggregato dell'impasto B togliendo la fibra più grande (Assocanapa 0-20); in tutti gli impasti sono state variate la composizione del legante e la quantità di acqua utilizzata.

3.3.1 IMPASTI: CANAPULO

Le granulometrie di canapulo utilizzate sono le medesime che compongono i precedenti provini.

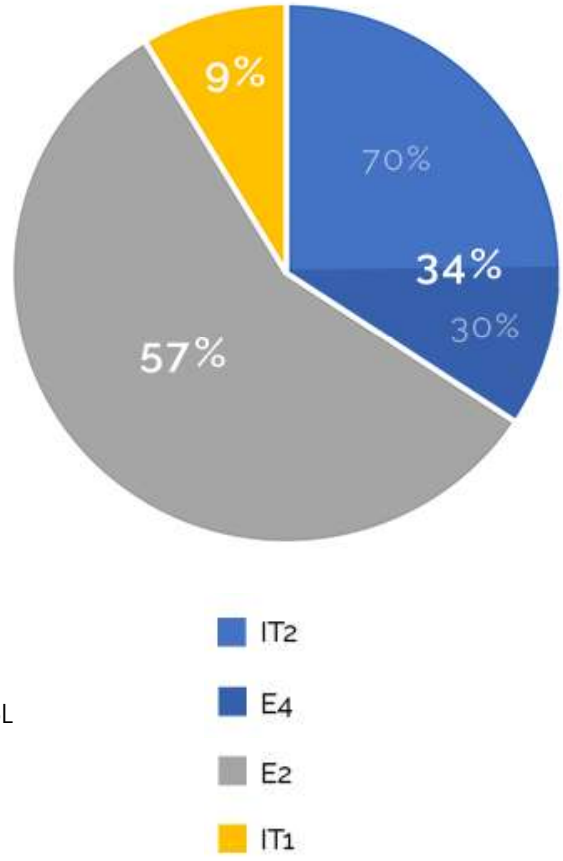
3.3.1.1 IMPASTO F

Si è utilizzata la curva granulometrica dell'impasto B.
Durante la preparazione dell' impasto, un imprevisto ha condotto alla modifica della composizione dell' aggregato: sono state infatti dimenticate due tipologie di canapulo con fibra grande (Assocanapa 0-20 e Biomat E3).
Quindi, l'impasto F è composto da:

- 0 - 3 mm ⟶ 34%, così composto:
  - 70% canapulo Biomat granulometria 0 - 2 mm (IT2); 5,25L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 0 - 3 mm (E4), fibrato per il 3 - 5 %. 2,25L

  Totale 7,5L
- 3 - 6 mm ⟶ 57%, composto per il 100%:
  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8 mm (E2), fibrato per circa il 5 %. 12,5L
- 6 - 15 mm ⟶ 9%, composto per il 100%:
  - 30% canapulo Biomat granulometria 5 - 15 mm (IT1); 1,875L

  Totale 14,375L



3.3.1.2 IMPASTO G

L'impasto G mantiene invariata la curva granulometrica dell'impasto E:

- 0 - 3 mm ⟶ 30%, così composto:

  - 30% canapulo Biomat granulometria 0 - 2 mm (IT2); 2,25L
  - 70% canapulo Biomat granulometria 0 - 3 mm (E4), fibrato per il 3 - 5 %. 5,25L

  Totale 7,5L

- 3 - 6 mm ⟶ 50%, composto per il 100%:

  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8 mm (E2), fibrato per circa il 5 %. 12,5L

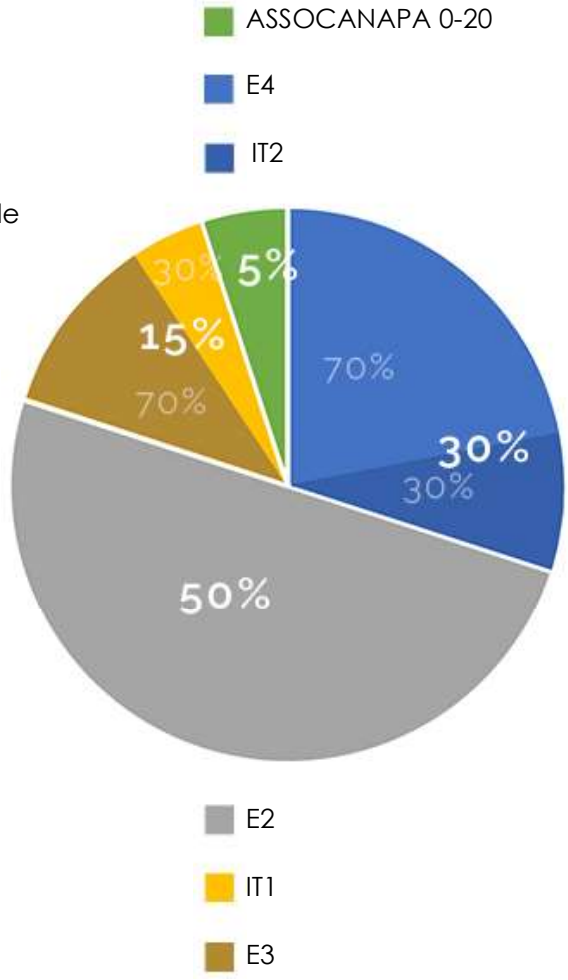
- 6 - 15 mm ⟶ 15%, così composto:

  - 70% canapulo Biomat granulometria 5 - 16 mm (E3), fibrato; 2,625L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 5 - 15 mm (IT1); 1,125L

  Totale 3,75L

- 0 - 20 mm ⟶ 5%, composto per il 100%:

  - canapulo Assocanapa granulometria 0 - 20 mm. 1,25L



3.3.1.3 IMPASTO H

L'impasto H ripropone la curva granulometrica dell'impasto B.

- 0-3 mm -> 30% , così composto:
  - 70% canapulo Biomat granulometria 0 - 2mm (IT2); 5,25L
  - 30% canapulo Biomat granulometria 0 - 3mm (E4), fibrato per il 3 - 5%. 2,25L

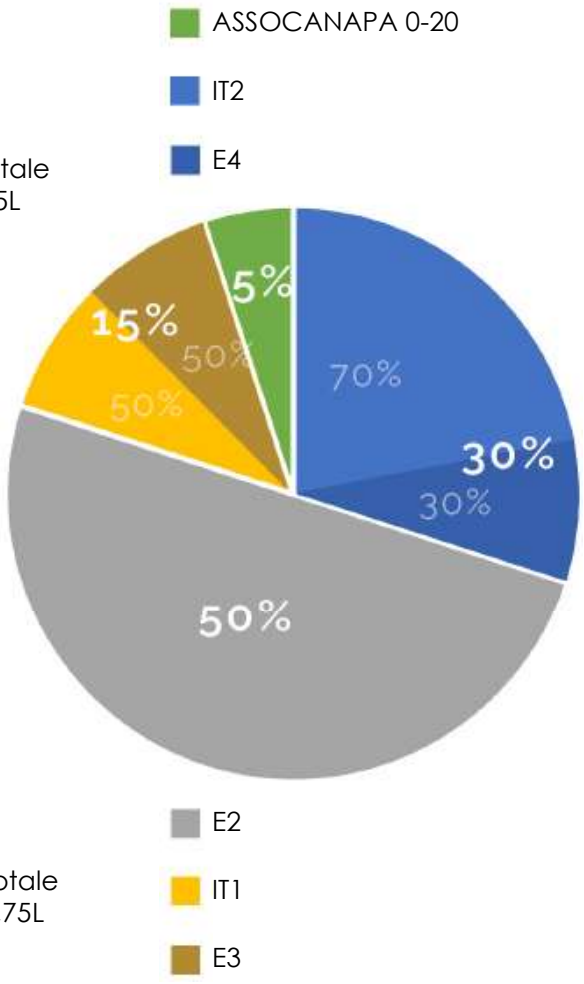
  Totale 7,5L

- 3-6 mm -> 50%, composto per il 100%:
  - canapulo Biomat granulometria 2 - 8mm (E2), fibrato per circa il 5%. 12,5L

- 6-15 mm -> 15%, così composto:
  - 50% canapulo Biomat granulometria 5-16mm (E3), fibrato, 1,875L
  - 50% canapulo Biomat granulometria 5-15mm (IT1) 1,875L

  Totale 3,75L

- 0-20mm -> 5%, composto per il 100%:
  - canapulo Assocanapa granulometria 0-20mm 1,25L



Miscela	Composizione canapulo						
	Curva granulometrica			Codice prodotto	% di volume rispetto alla categoria di aggregato	% di volume rispetto al totale di aggregato	Volume [L]
	Granulometria	%	Volume [L]				
F	0 - 3	34	7,5	IT2	70	24	5,25
				E4	30	10,3	2,25
	3 a 6	57	12,5	E2	100	57,1	12,5
	6 a 15	9	1,875	IT1	100	8,6	1,875
G	0 - 3	30	7,5	IT2	30	9	2,25
				E4	70	21	5,25
	3 a 6	50	12,5	E2	100	50	12,5
	6 a 15	15	3,75	E3	70	10,5	2,625
				IT1	30	4,5	1,125
	0 a 20	5	1,25	ASSO 0-20	100	5	1,25
H	0 - 3	30	7,5	IT2	70	21	5,25
				E4	30	9	2,25
	3 a 6	50	12,5	E2	100	50	12,5
	6 a 15	15	3,75	E3	50	7,5	1,875
				IT1	50	7,5	1,875
	0 a 20	5	1,25	ASSO 0-20	100	5,0	1,25

3.4 IL LEGANTE

Mentre per l'aggregato abbiamo cercato di ripetere gli impasti B ed E, per quanto riguarda il legante sono state apportate notevoli modifiche, infatti:

- è stato aggiunto un nuovo componente: cemento bianco (figure 1,2,3), per aumentare la velocità di asciugatura e le proprietà meccaniche. Questo è un cemento calcareo cotto ad alte temperature e contenente più magnesio rispetto alla calce idraulica naturale.
- è stata modificata la tipologia di calce idraulica, più precisamente la classe di resistenza: non più NHL 5, bensì NHL 3.5, per avvicinarci al comportamento della calce aerea.

La calce idraulica presenta una resistenza meccanica più alta, ma in combinazione con la canapa tende ad asciugare più lentamente. Utilizzando NHL 3.5, con maggiore capacità di aerazione dovuta al minor contenuto di sedimenti marnosi, il processo di asciugatura dovrebbe essere più veloce.

- è diminuita la quantità di pozzolana (figure 4 e 5), che rispetta la quantità minima a coprire la quantità di calce libera presente nella calce idraulica. Nei precedenti impasti, per aumentarne la densità, a 10 L di calce idraulica avevamo fatto corrispondere 5 L di pozzolana.

Facendo lavorare insieme le due calci si conferisce più traspirabilità alla calce idraulica e più resistenza alla componente di calce aerea.

Anziché utilizzare la classica proporzione utilizzata per il cemento che prevede 7L di calce + 3L di cemento, manteniamo invariati i 10 L di calce idraulica e a questa aggiungiamo 3 L di cemento bianco.



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4

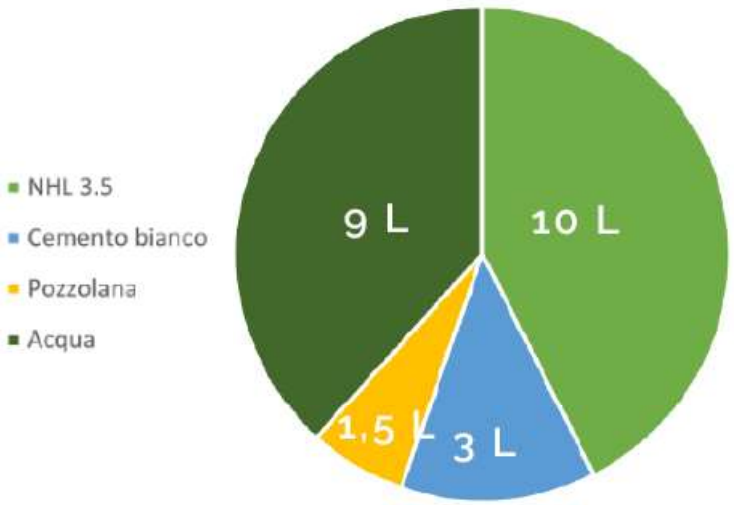


Figura 5

3.4.1 TIPOLOGIA E QUANTITÀ DI LEGANTE PER OGNI IMPASTO

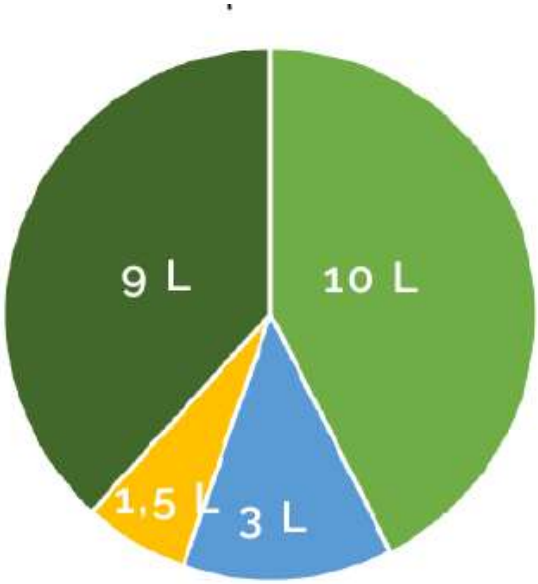
3.4.1.1 IMPASTO F

- calce idraulica naturale Brigliadori Fornace Calce NHL 3.5	10 L
- cemento bianco Cemento Prompt VICAT	3 L
- pozzolana Pozzolana Romana TRASS	1,5 L
- acqua	9 L



3.4.1.2 IMPASTO G

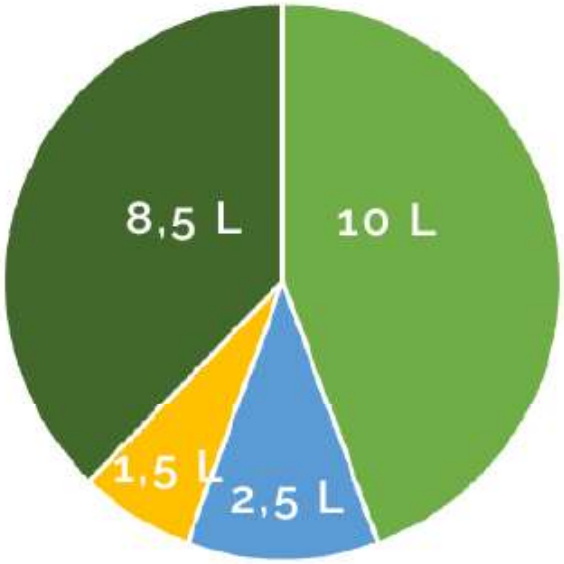
- calce idraulica naturale tipo Brigliadori Fornace Calce NHL 3.5 — 10 L
- cemento bianco tipo Cemento Prompt VICAT — 2,5 L
- pozzolana tipo Pozzolana Romana TRASS — 1,5 L
- acqua — 8 L



Abbiamo prodotto un campione (G-2) con dosaggio differente, aggiungendo ulteriori 0,5L di acqua, per un totale di 8,5L

3.4.1.3 IMPASTO H

- calce idraulica naturale tipo Brigliadori Fornace Calce NHL 3.5 — 10 L
- cemento bianco tipo Cemento Prompt VICAT — 4 L
- pozzolana tipo Pozzolana Romana TRASS — 1 L
- acqua — 8,5 L



3.5 PREPARAZIONE DELL'IMPASTO

Dopo aver definito le granulometrie e la composizione del legante per ogni impasto, si è proceduto alla realizzazione:

3.5.1 PROCEDIMENTO

Gli impasti sono stati fatti a secco, ovvero si è preparato un contenitore dentro il quale sono state messe fibre di canapulo, fino a raggiungere il totale di 25L.

3.5.1.1 AGGIUNTA DI ACQUA

Il composto di fibre, precedentemente nominato, non è stato poi mescolato con acqua, come per gli impasti A, B, C, D, ma è stato seguito il procedimento utilizzato per l'impasto E.
Ovvero, invece di inumidire il canapulo e, successivamente, aggiungere altra acqua insieme al legante, il canapulo è stato lasciato nello stato secco.

3.5.1.2 PREPARAZIONE LEGANTE

Anche la preparazione del legante ha subito una variazione: questo infatti non è stato più miscelato a secco prima aggiungerlo alla fibra. È stata preparata la miscela calce idraulica/cemento bianco/pozzolana in un apposito contenitore, e questa miscela è stata poi aggiunta alla fibra mentre veniva mescolata a sua volta a secco.

3.5.2 CONSEGUENZE SUGLI IMPASTI

3.5.2.1 IMPASTO F

Durante la compattazione per la creazione del campione, il materiale ha rilasciato un poco d'acqua sporca di legante.

3.5.2.2 IMPASTO G

È stato realizzato un campione contenente 8 L di acqua; questo durante il processo di compattazione non ha rilasciato acqua.
Il restante impasto, a cui è stato aggiunto 0,5 L di acqua, durante la compattazione ha rilasciato una minima quantità di acqua.
L'impasto risulta leggermente meno umido e più difficile da compattare (maggiore durezza) rispetto all'impasto F.

Il canapulo è stato inserito direttamente nella pressa, in quanto il procedimento che prevede il riempimento del cassetto e successivamente dello spazio di compattazione, sembra provocare una linea trasversale sul lato lungo del campione.

Con l' impasto rimasto è stato realizzato un campione secondo il procedimento seguito per la prima serie, dove sono stati realizzati campioni cubici di dimensioni 15x15x15 cm, compattando l'impasto a mano, all'interno di forme cubiche cave in polistirolo.

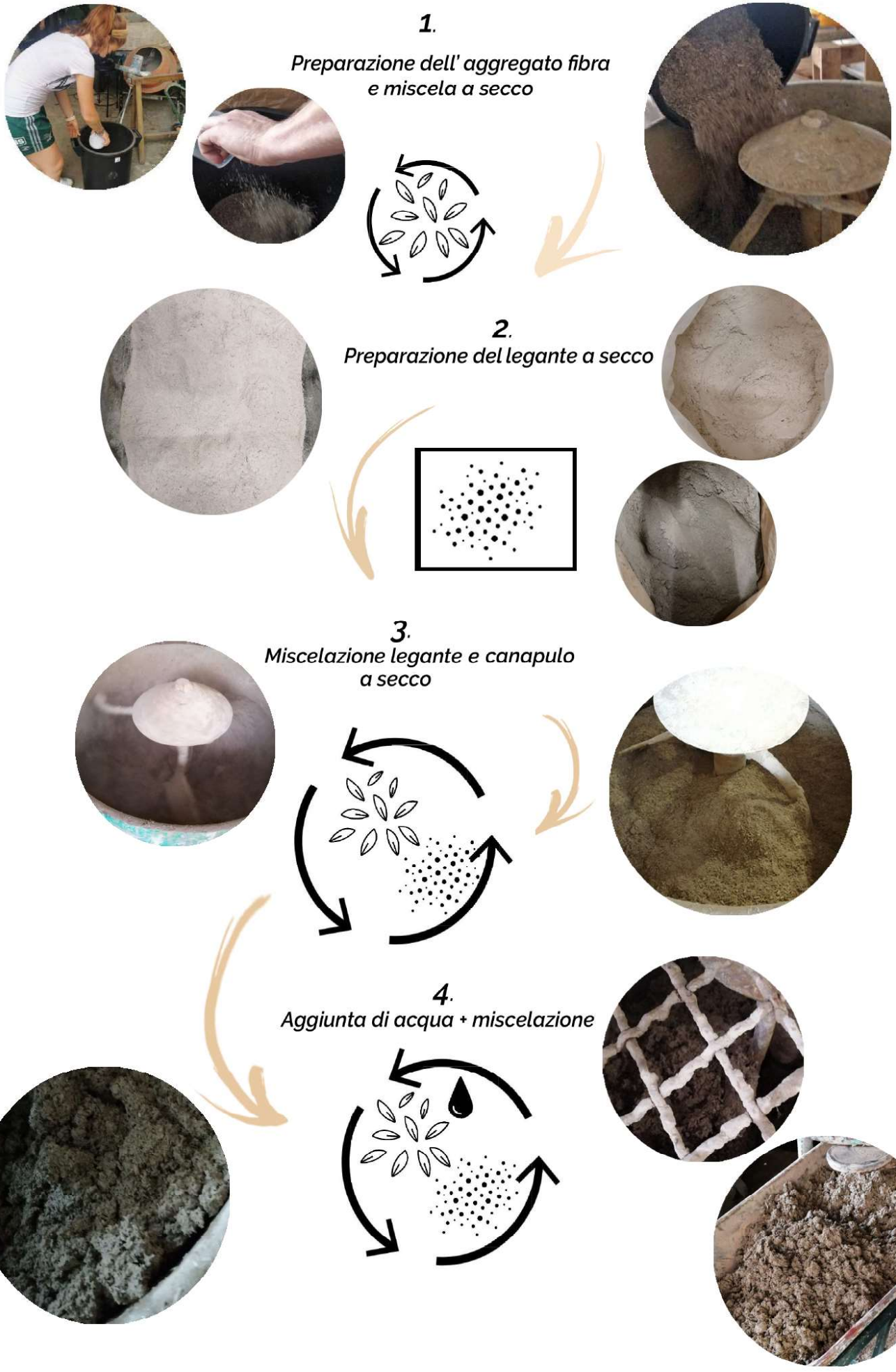
3.5.2.3 IMPASTO H

L'impasto risulta più difficile da compattare rispetto ai due precedenti.
I provini sono stati realizzati seguendo il procedimento utilizzato per l'impasto G.

3.6 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

Per determinare le capacità meccaniche del materiale, si eseguiranno le stesse prove di laboratorio effettuate sugli impasti A, B, C, D, E. Questa volta però non saranno utilizzati casseri cubici in polistirolo, bensì la pressa manuale Altech, disponibile presso il LASTIN (vedi pag. 66).

Questa compattazione consente di ottenere provini abbastanza solidi da essere conservati senza casseri durante la maturazione.


1.
Preparazione dell' aggregato fibra
e miscela a secco
2.
Preparazione del legante a secco
3.
Miscelazione legante e canapulo
a secco
4.
Aggiunta di acqua + miscelazione

3.6.1 PROCEDIMENTO (vedi pag. 67)

L'impasto è stato inserito all'interno della cassetta/dosatore con la cazzuola e compattato mano a mano che aumenta la quantità.
Le dimensioni della cassetta sono di circa 18x13x28 cm: contiene quindi circa 6L di materiale.
Una volta riempita la cassetta, il materiale è stato compattato e livellato con la cazzuola, per poi essere versato all'interno dello stampo. Qui è stato nuovamente livellato e compattato manualmente, fino a renderlo regolare e quindi pronto per la compattazione tramite la pressa.

Durante il processo di compattazione e creazione dei campioni, è stato modificato il sistema di rovesciamento del materiale nello stampo: inizialmente questo veniva messo nella cassetta per poi essere versato nello stampo, ma nei campioni creati secondo questa modalità si creava sulla faccia laterale una linea trasversale di "debolezza" (figura 6), forse dovuta alla ridistribuzione del materiale durante il rovesciamento nello stampo.

L'artigiano ha dunque deciso di introdurre il materiale e compattarlo con la cazzuola direttamente nello stampo. In questo modo si elimina il problema della "rottura trasversale", ma la quantità di materiale utilizzato è meno omogenea tra i campioni.

3.6.1.1 INSERIMENTO DEL MATERIALE NELLO STAMPO

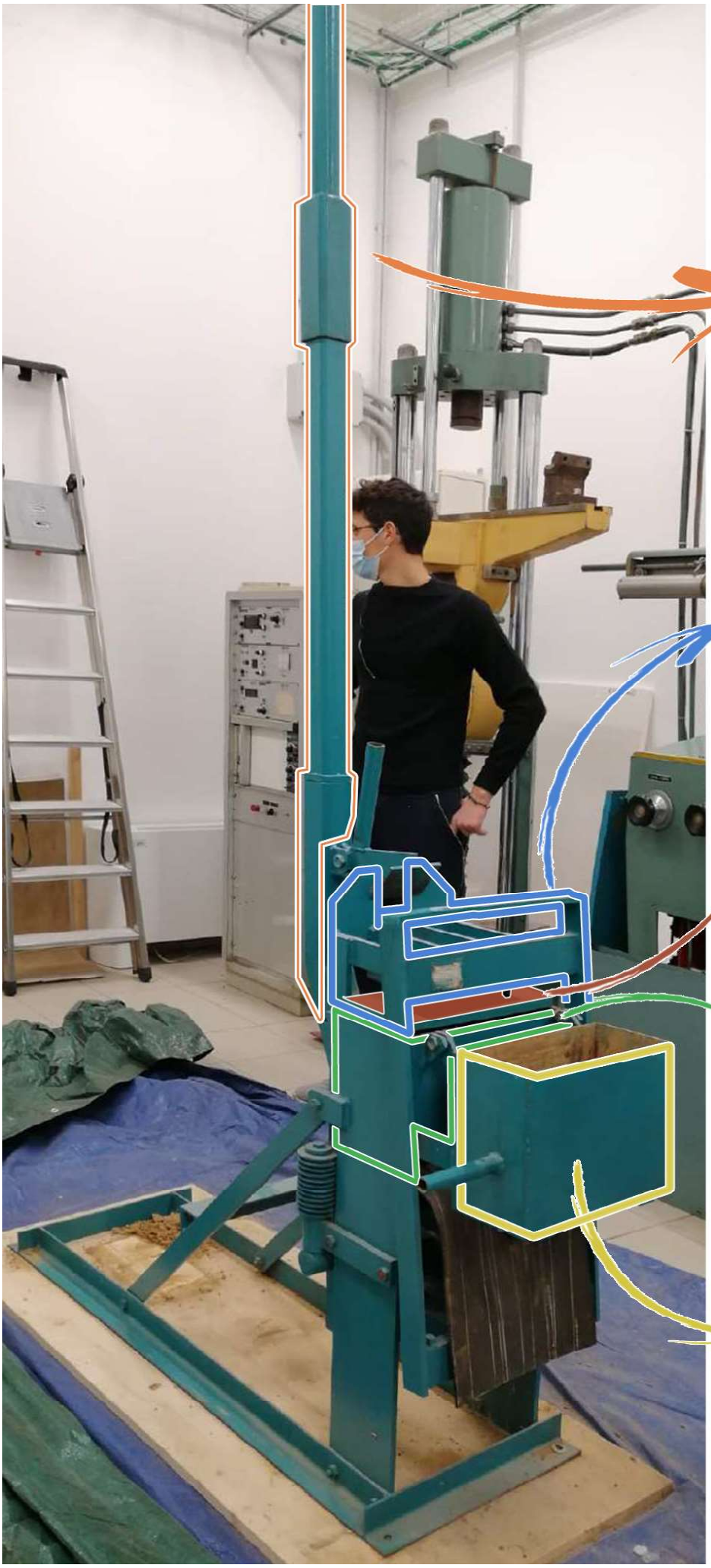
Durante il processo di compattazione e creazione dei campioni, è stato modificato il modo di inserimento del materiale: inizialmente questo veniva messo nella cassetta per poi essere versato nello stampo, ma nei campioni creati secondo questa modalità si creava sulla faccia laterale una linea trasversale di "debolezza", forse dovuta alla ridistribuzione del materiale durante il rovesciamento nello stampo.

L'esperto Cerboni (del gruppo Terrapaglia Costruire Sostenibile) ha cercato di risolvere la questione introducendo il materiale direttamente nello stampo e lì compattandolo con la cazzuola. In questo modo si elimina il problema della "frattura trasversale", ma la quantità di materiale impiegato per ogni campione, senza l'utilizzo del dosatore, non è la medesima per tutti.



Figura 6

Composizione legante		Volume acqua [L]	Processo di miscelazione		Consistenza miscela
Prodotto	Volume [L]		Step	Descrizione	
NHL 3.5	10	9	1	miscelazione canapulo a secco	terra bagnata
Cemento bianco	3		2	miscelazione canapulo e legante a secco	
Pozzolana	1,5		3	aggiunta di acqua e miscelazione	
NHL 3.5	10	8 + 0,5*	1	miscelazione canapulo a secco	terra bagnata
Cemento bianco	2,5		2	miscelazione canapulo e legante a secco	
			3	aggiunta di acqua e miscelazione	
Pozzolana	1.5		4	aggiunta di acqua e miscelazione	
NHL 3.5	10	8,5 litri	1	miscelazione canapulo a secco	terra bagnata
Cemento bianco	4		2	miscelazione canapulo e legante a secco	
Pozzolana	1,5		3	aggiunta di acqua e miscelazione	


LEVA
COPERCHIO DELLA PRESSA
PRESSA
STAMPO
CASSETTA/ DOSATORE



1.

Caricamento della cassetta per il



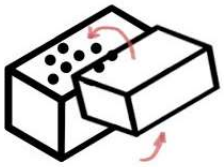




2.

Svuotamento del materiale dal dosatore all' interno dello stampo





2.1

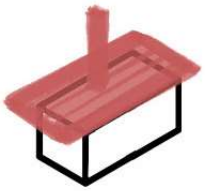
Livellamento manuale



3.

Chiusura della pressa



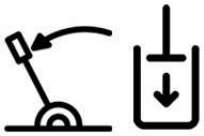




4.

leva -> Compattazione







5.

Rialzo leva + aggancio del coperchio della pressa al sistema di sollevamento presente lungo l'asta della leva







6.

Abbassamento della leva -> sollevamento automatico del blocco tramite il sistema a pistoni







7.

Trasferimento sel campione su base di legno + numerazione

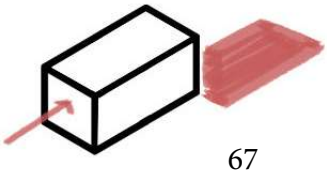




Figura 7



Figura 8

3.6.2 I CAMPIONI

Abbiamo realizzato 6 campioni per ogni tipo di impasto.
Per gli impasti F e G, sono stati realizzati 5 campioni a forma di mattone di dimensioni circa 13x14x11,5 cm e un campione cubico (secondo il procedimento seguito per la prima serie, figure 7 e 8) con cassaforma in EPS di lato 15 cm. In questo modo possiamo confrontare le differenti modalità di realizzazione, compattazione e conservazione dei campioni.

3.6.3 COMPATTAZIONE DEI CAMPIONI CUBICI

La compattazione è stata eseguita manualmente come per la prima serie, ma questa volta la forza è stata applicata dallo stesso individuo, tramite un numero di colpi costante e con lo stesso strumento: costipatore in legno con una piastra in ferro nel punto di contatto con il materiale (figura 7).

Campioni - seconda serie	
Parallelepipedo 30 x 14,5 x 11 cm	**Cubi 15 x 15 x 15 cm**
5	1
5	1
5	/
Casseri	
Nessuno	Polistirolo
Compattazione	
Pressa per mattoni	Costipatore
Asciugatura	
Alcuni esterno e poi interno; altri interno	Esterno e poi interno

3.6.4 CONSERVAZIONE

I campioni sono stati conservati all'esterno, posizionati su lastre metalliche e sotto un porticato che li riparasse dalla pioggia e altri agenti atmosferici (figura 9).
Un campione per tipo di miscela è stato posizionato su pannelli in legno e conservato all'interno del laboratorio (in ambiente riscaldato) a una temperatura media di circa 20°C (figura 10).

Nei primi giorni di asciugatura le condizioni meteo sono state caratterizzate da abbondante pioggia, di conseguenza l'ambiente esterno è stato molto umido.

3.6.5 MODALITÀ DI ASCIUGATURA

Seguendo le procedure di alcuni articoli scientifici studiati*, si è ipotizzato di asciugare in forno un campione per ogni miscela. Disponendo solamente di cinque/ sei campioni per ogni miscela, i risultati ottenuti non sarebbero stati attendibili in quanto non sufficientemente confrontabili tra loro. Uno degli studi scientifici dell'Università di Clermont-Ferrand ha infatti dimostrato che per ottenere un risultato attendibile, servirebbero almeno 5 campioni, conservati nelle stesse condizioni, per ogni miscela.

3.7 MONITORAGGIO

Per studiare il comportamento dei campioni, è stato definito un programma di monitoraggio intensivo e costante, che ha previsto:
1. pesatura giornaliera dei provini;
2. misurazione giornaliera del peso dei provini;
3. modifica delle condizioni di asciugatura in fieri:
- spostamento da ambiente esterno a interno
- rovesciamento dei provini dalla loro posizione originale per cambiare il lato d'appoggio sulla base sottostante in legno. In questo modo abbiamo permesso l'esposizione all'aria anche al lato a contatto con il legno sottostante;
- disposizione dei campioni lasciando spazi liberi tra un provino e l'altro;
- cambio del piano d'appoggio in legno.



Figura 9

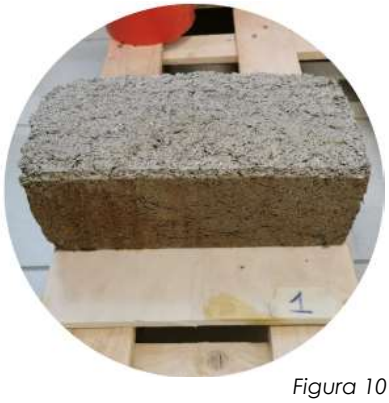


Figura 10

"Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes", Laurent Arnaud, Etienne Gourlay, "Construction and Building Materials" 28, 2012, pp.50–56,

C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, "Assessing the variability of hemp concrete properties during experimental tests: a focus to specimens' number", C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf. 3rd International Conference on Bio-Based Buildig Materials, June 26th-28th 2019, Belfast,

C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf "Multicriteria analysis of hemp particles' impact on physical and thermo-mechanical performances of hemp concrete" . 2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIbrous materials, June 21th-23th 2017, Clermont-Ferrand

Miscela	Campione	Asciugatura	GIORNO 3 : 12/11/2021		GIORNO 7*: 16/11/2021; h 9:30					
			Peso (kg)	Asciugatura	Peso [kg]	Variazione peso	Dimensioni [cm]			Densità [kg/m^3]
							a	b	c	
F	1	esterno	5,314	esterno	5,212	1,92%	30	14,5	11	1089,24
	2	esterno	5,408	esterno	5,300	2,00%	30	14,5	11,5	1059,47
	3	esterno	5,676	interno	5,35	5,74%	30	14,5	11,3	1088,39
	4	esterno	5,520	esterno	5,214	5,54%	30	14,5	11,3	1060,73
	5	interno	4,960	interno	4,714	4,96%	30	14,5	11	985,16
	media		5,408		5,214	4,96%	30	14,5	11,3	1060,73
	cubo	esterno	/	esterno	3,290	/	15	15	13	1782,56
G	1	esterno	4,372	esterno	4,260	2,56%	30	14,3	11,3	878,77
	2	esterno	5,430	interno	5,082	6,41%	30	14,5	12,5	934,62
	3	esterno	4,926	esterno	4,824	2,07%	30	14,5	12,5	887,17
	4	esterno	5,316	esterno	4,936	7,15%	30	14,5	12,5	907,77
	5	interno	4,808	interno	4,554	5,28%	30	14,5	11,7	894,78
	media		4,926		4,824	5,85%	30	14,5	12,5	894,78
	cubo	esterno	/	esterno	2,814	/	15	15	13	962,05
H	1	esterno	5,550	interno	5,138	7,42%	30	14,5	12,5	944,92
	2	esterno	5,380	esterno	5,264	2,16%	30	14,5	12,5	968,09
	3	esterno	5,522	esterno	5,098	7,68%	30	14,5	12,5	937,56
	4	esterno	5,338	esterno	5,246	1,72%	30	14,5	12	1004,98
	5	esterno	5,106	esterno	5,014	1,80%	30	14,5	11,5	1002,30
	6	interno	4,754	interno	4,472	5,93%	30	14,3	12,3	847,50
	media		5,359		5,118	4,04%	30	14,5	12,4	956,51

*tutti i campioni sono stati portati dentro e girati, cubi scasserati

3.7.1 FASE INIZIALE

Il 12 novembre 2021, 3 giorni dopo la produzione dei campioni, è iniziato il monitoraggio. I campioni sono stati pesati tramite bilancia elettronica ZENITH pulsar BE40F (figura 11).



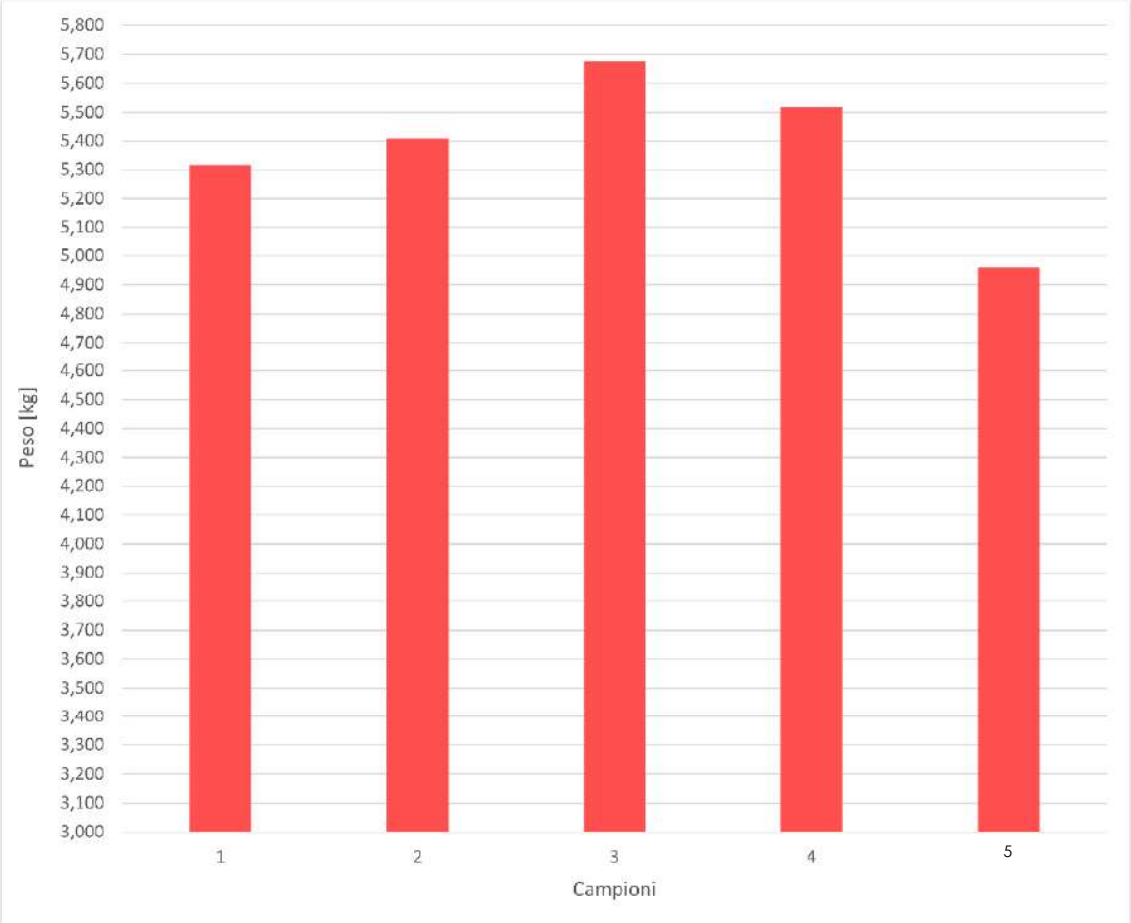
Figura 11

Dai grafici successivi vediamo come il peso dei campioni non sia per niente omogeneo, a causa della differenza di composizione dell'impasto, della modalità di creazione dei provini, e dell'asciugatura durante i primi giorni.

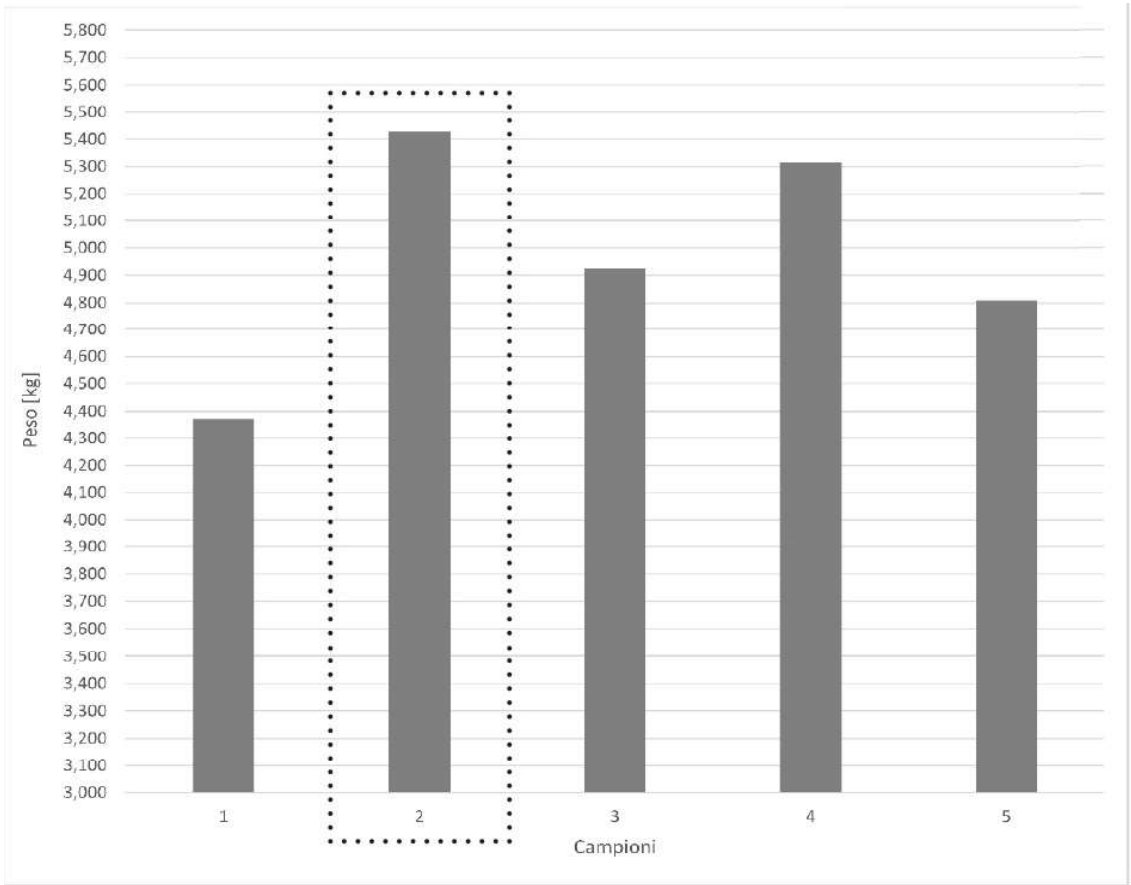
3.7.1.1 CAMPIONE G1

Il campione G1, con un peso di 4,372 kg, risulta il più leggero. Esso contiene il minor quantitativo di acqua rispetto agli altri provini, in quanto, durante la preparazione dell'impasto G, l'acqua è stata aggiunta in due differenti step:
1) 8L
2) 0,5L
Nel passaggio tra il primo e il secondo step, si è prelevato il materiale per realizzare il campione G1. Questo, durante la compattazione, non ha rilasciato acqua, a differenza dei successivi campioni, realizzati con l'impasto ottenuto dopo lo step 2, che ne hanno rilasciata un minimo quantitativo.

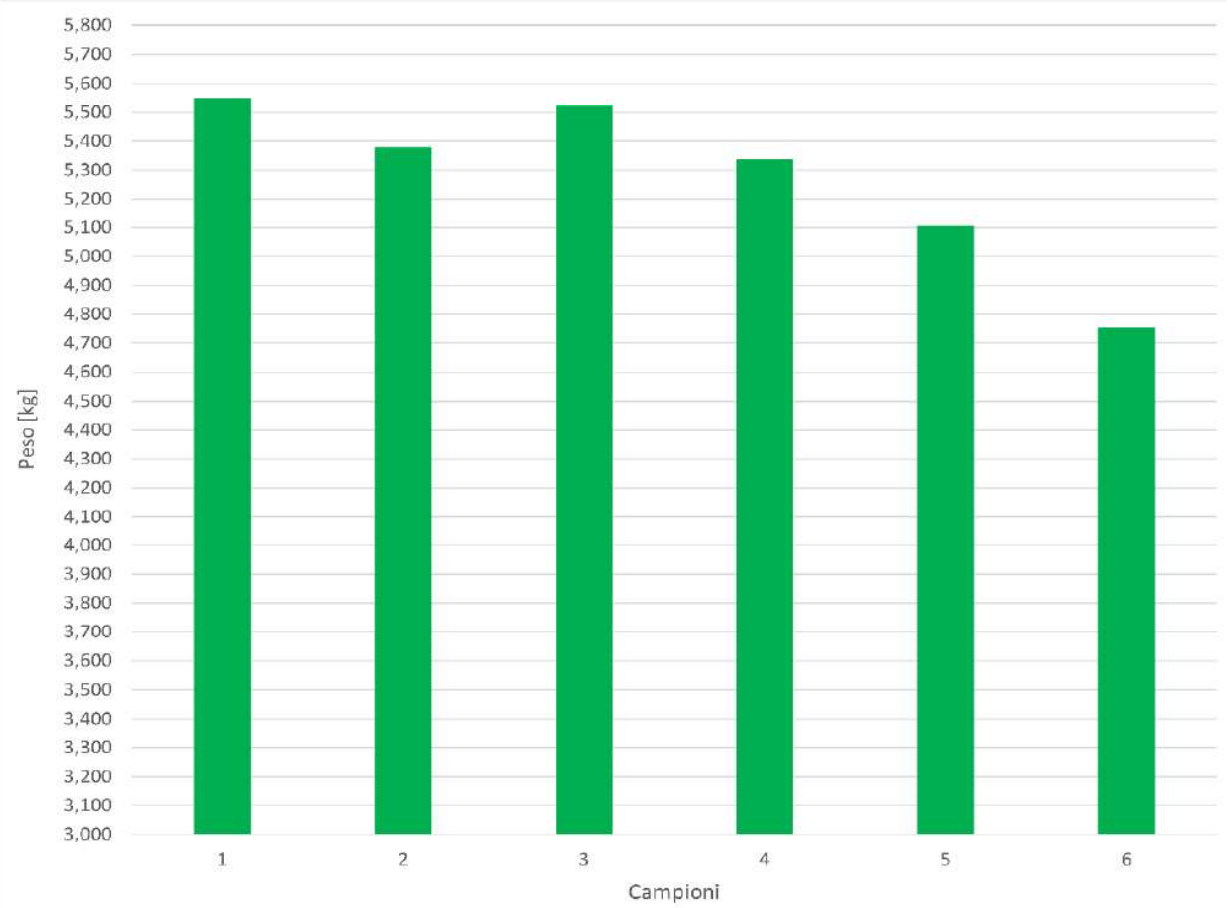
IMPASTO F - Peso provini mattone - giorno 3



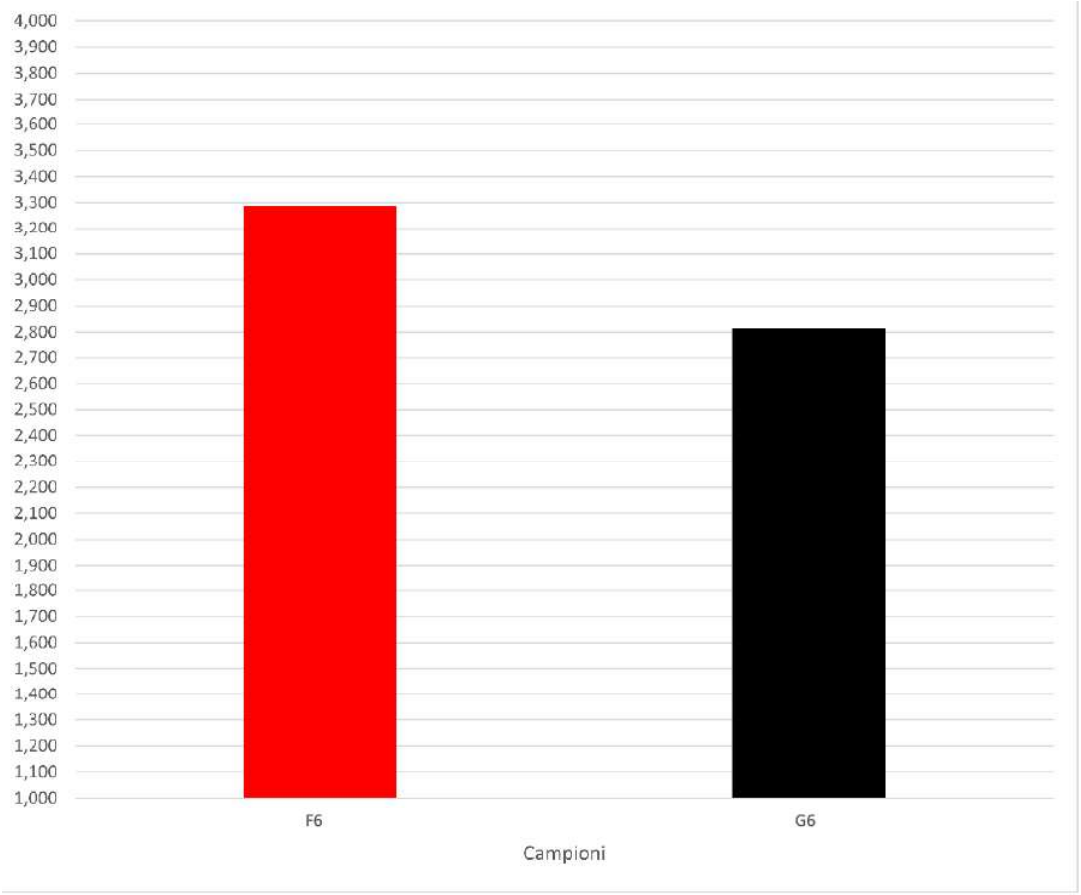
IMPASTO G - peso provini mattone - giorno 3



IMPASTO H - peso provini mattone - giorno 3



IMPASTO F e G - peso provini cubici - giorno 7



3.7.1.2 GRAFICI

Nel grafico sottostante (figura 12) vengono messi a confronto i vari campioni. Le linee orizzontali indicano il peso medio dei provini per ciascun impasto. Si può notare che i provini più pesanti sono quelli relativi all'impasto F, nonostante questi siano stati fatti inserendo il materiale nel dosatore, e non direttamente nello stampo (questo ha consentito l'inserimento di un poco di materiale in più).

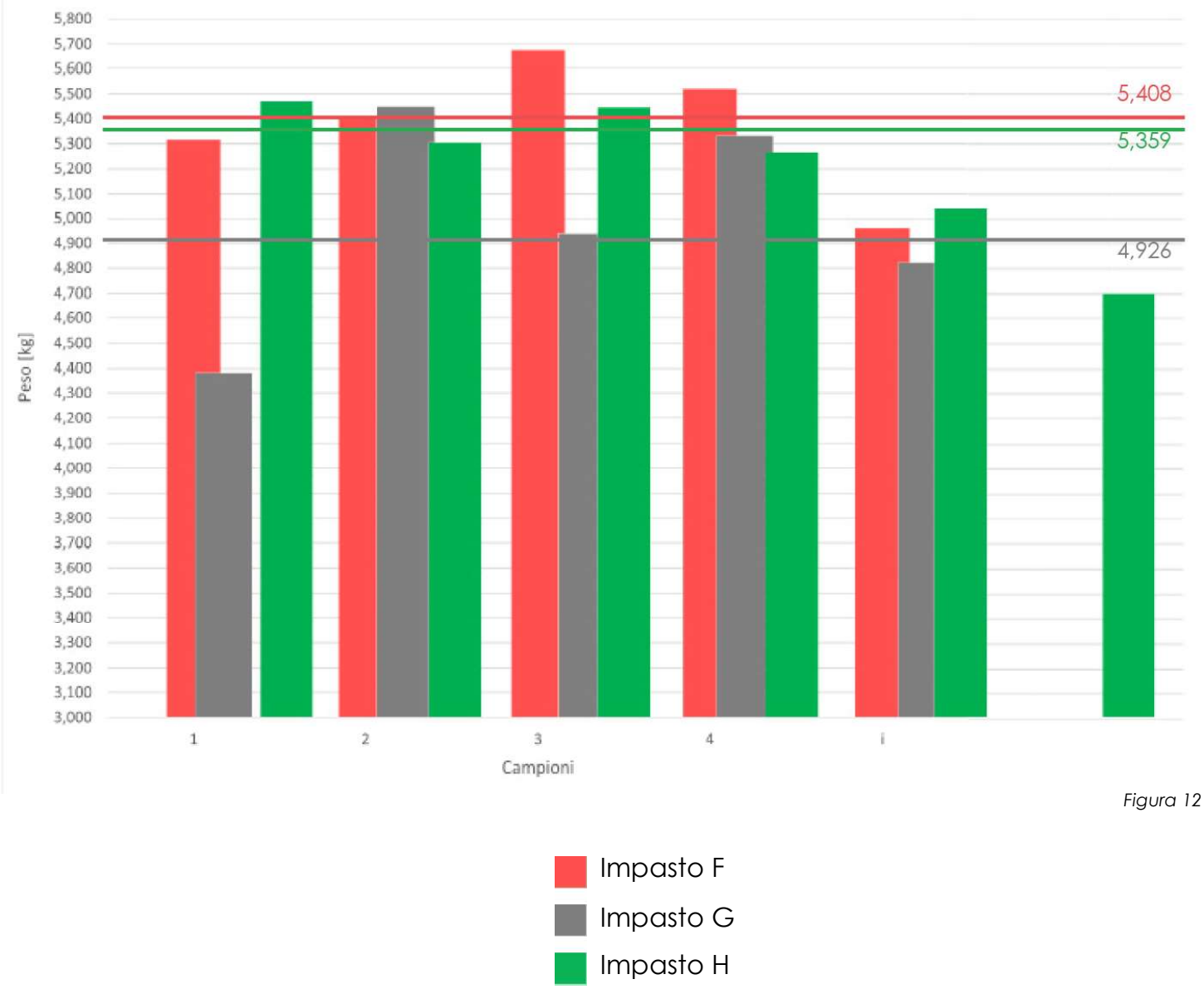


Figura 12

Nel grafico sottostante (figura 13) sono stati elencati gli elementi utilizzati per la produzione dei diversi impasti e le quantità impiegate. In questo modo si può osservare una corrispondenza tra i pesi dei campioni e la composizione di ognuno di questi, La differente quantità di componenti determina notevoli differenze di peso.
I campioni più pesanti sono quelli realizzati con l'impasto F, che contiene, rispetto agli altri:

- un quantitativo maggiore di acqua
- un quantitativo inferiore di canapulo

I rapporti tra quantitativo di legante, fibra e acqua sono dunque:
- rapporto legante-fibra: L/F = 0,66,
a differenza dell'impasto G con L/F = 0,56 e dell'impasto H con L/F = 0,62.
- rapporto acqua-fibra: A/F = 0,62
a differenza degli impasti G e H con A/F = 0,34.

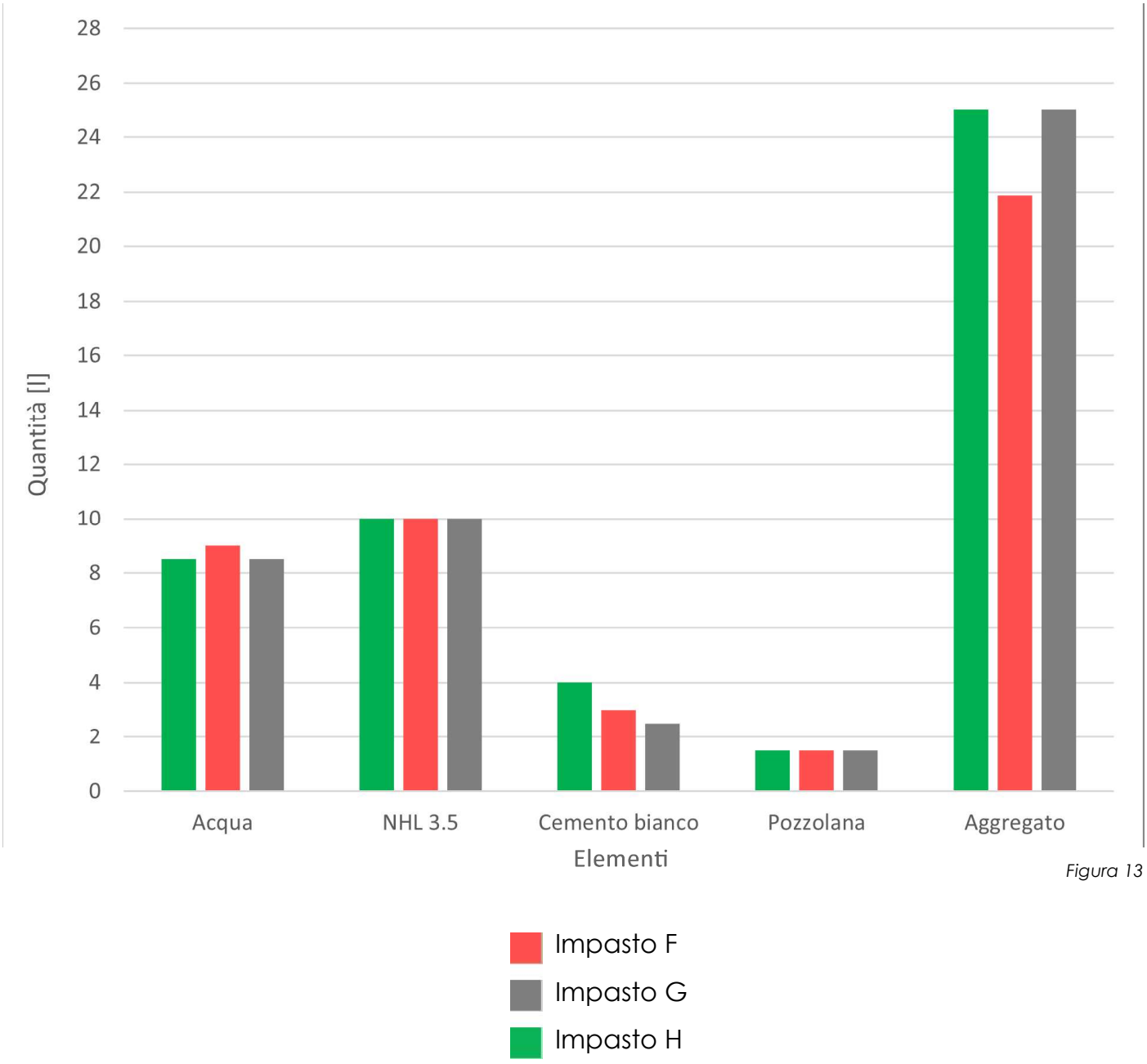


Figura 13

3.7.1.3 IMPASTO F

L'impasto F contiene un grande quantitativo di acqua, assorbita in parte dal legante per attivarsi, e in parte dall'aggregato che si espande, contribuendo all'aumento del peso.
I campioni risultano essere i più pesanti, nonostante la quantità di aggregato di cui sono composti sia minore rispetto agli impasti G e H.
Anche considerando i campioni cubici, vediamo come quello prodotto con l'impasto F abbia un peso di circa 0,5 kg in più rispetto al campione prodotto con l'impasto G.

3.7.1.4 IMPASTO G

I campioni più leggeri sono invece quelli realizzati con l'impasto G.
Questi, a parità di quantità di aggregato, legante, acqua e pozzolana, presentano un peso medio piuttosto inferiore rispetto a quello dei campioni realizzati con l'impasto H.

La differenza sostanziale tra i due impasti è il contenuto di cemento bianco: nell'impasto G infatti ne sono stati utilizzati 1,5L in meno rispetto all'impasto H, in cui ne sono stati impiegati 4L. Una riduzione del contenuto di cemento bianco di circa il 38% comporta una riduzione di peso totale di circa l'8%. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che, essendo il cemento bianco responsabile della durezza del materiale, presente in quantità minori preserva maggiormente le caratteristiche di porosità dell'aggregato, rendendo il prodotto finale più leggero.

3.7.2 DIMENSIONI

La dimensione media dei "provini-mattone" è di circa 30x14,5x12 cm.

I campioni realizzati con l'impasto F misurano circa 1 cm in meno in altezza rispetto agli altri due impasti.
Questo è dovuto alla modalità di creazione del provino. Infatti, come spiegato precedentemente, i campioni all'impasto F sono stati creati riempiendo prima il dosatore e poi trasferendo il materiale nello stampo. Questo non è avvenuto per i campioni G e H, in quanto sono stati creati direttamente versando il materiale nello stampo, che è leggermente più profondo rispetto al dosatore.

Avendo però ottenuto nel primo caso campioni con difetto laterale, si continuerà a procedere inserendo il materiale direttamente nello stampo, quindi consideriamo come misura costante del mattone finale 30x14,5x12 cm.

3.7.3 ASCIUGATURA

Al giorno 3 (12/11/2021), i campioni conservati all'interno mostravano un livello di asciugatura molto maggiore rispetto ai campioni conservati all'esterno. Probabilmente le condizioni meteorologiche piovose, durante i primi giorni di asciugatura, hanno comportato alti valori di umidità nell'aria esterna, rallentando l'asciugatura.
Un altro fattore determinante potrebbe essere stato la temperatura.
L'ambiente interno ha una temperatura media di circa 20°C; il sistema di riscaldamento è attivo solamente durante il giorno, con conseguente abbassamento di temperatura durante la notte. Essendo l'ambiente chiuso e isolato, però, lo sbalzo termico è ridotto. Invece la temperatura dell'ambiente esterno, in novembre va dai 7 ai 12°C, registrando notevoli sbalzi termici nel corso della giornata. Dunque la temperatura dell'ambiente interno è molto più alta e più costante rispetto a

quella dell'ambiente esterno.
Dopo la pesatura di ogni campione, abbiamo deciso di spostare all'interno un ulteriore provino per ogni impasto, selezionando quello più umido (con peso maggiore): F3, G2 e H1.

3.7.3.1 AMBIENTE INTERNO

Notando come i campioni conservati in ambiente interno forniscano risultati di asciugatura molto più soddisfacenti, con una variazione di peso pari a circa il triplo di quelli forniti dai campioni in ambiente esterno, si è deciso, al settimo giorno dalla produzione degli impasti (16/11/2021), di permettere a tutti i provini l'asciugatura in ambiente interno, disponendoli su fogli di compensato, mantenendo un distanziamento gli uni dagli altri, in modo da garantire l'esposizione all'aria di tutti i lati di ogni provino.

I cubi sono stati scasserati e a loro volta conservati all'interno.
Da questo momento tutti i campioni sono stati conservati a temperatura e umidità controllate, posizionati su pannelli in legno e a una distanza tale da consentire l'esposizione all'aria di tutte le facce di ogni campione. Nei giorni successivi i campioni sono stati girati, consentendo anche alla faccia appoggiata alla base, che risultava la più umida, l'esposizione all'aria e la conseguente asciugatura uniforme.

Il giorno 7, abbiamo confrontato il campione F5 sottoposto ad asciugatura in ambiente esterno con un provino conservato in ambiente riscaldato F1.
Nel grafico sottostante sono rappresentate le variazioni di peso dei campioni F1 e F5 dal giorno 3 al giorno 8 di asciugatura.
Considerando i 4 giorni trascorsi tra i giorni 3 e 7, si nota come il campione F1 conservato all'esterno abbia presentato una variazione di peso di solamente il 2%, passando da 5,314 a 5,212 kg. Il campione F5 conservato in ambiente interno presenta invece una variazione di peso di circa il 5%, passando da 4,96 kg a 4,714 kg.

3.7.3.2 IMPASTO F

Nelle 24 h tra giorni 7 e 8 (le misurazioni sono state eseguite dopo 24h precise) il campione F1 presenta una variazione di peso di circa il 2% ulteriori, arrivando a 5,122 kg. La diminuzione di peso ottenuta in 24h in ambiente interno è inferiore(di poco) al valore ottenuto in 96h di asciugatura all'esterno. Questo dimostra come in ambiente interno si ottengano livelli di asciugatura tripli rispetto all'ambiente esterno.
Il campione F5 presenta una variazione di circa il 0,93%, con peso di 5,138 kg (figura 14).
Nei giorni seguenti il campione F1 asciuga di più rispetto al campione F5, questo è probabilmente dovuto al fatto che, vista la differente variazione di quest'ultimo dal giorno 3 al giorno 7 (e il differente peso), F1 contenga un quantitativo di acqua da smaltire maggiore.

3.7.3.3 IMPASTO G

Confrontando anche due campioni dell'impasto G con diversa modalità di asciugatura, si nota come il campione G1, asciugato all'esterno, abbia presentato una variazione di peso solamente del 2,5%, passando da 4,372 a 4,260 kg. Il campione G5 asciugato in ambiente interno presenta invece una variazione di peso di poco più del 5%, passando da 4,808 a 4,554 kg (figura 15).

IMPASTO F - Variazione peso - conservazione ambiente esterno / ambiente interno

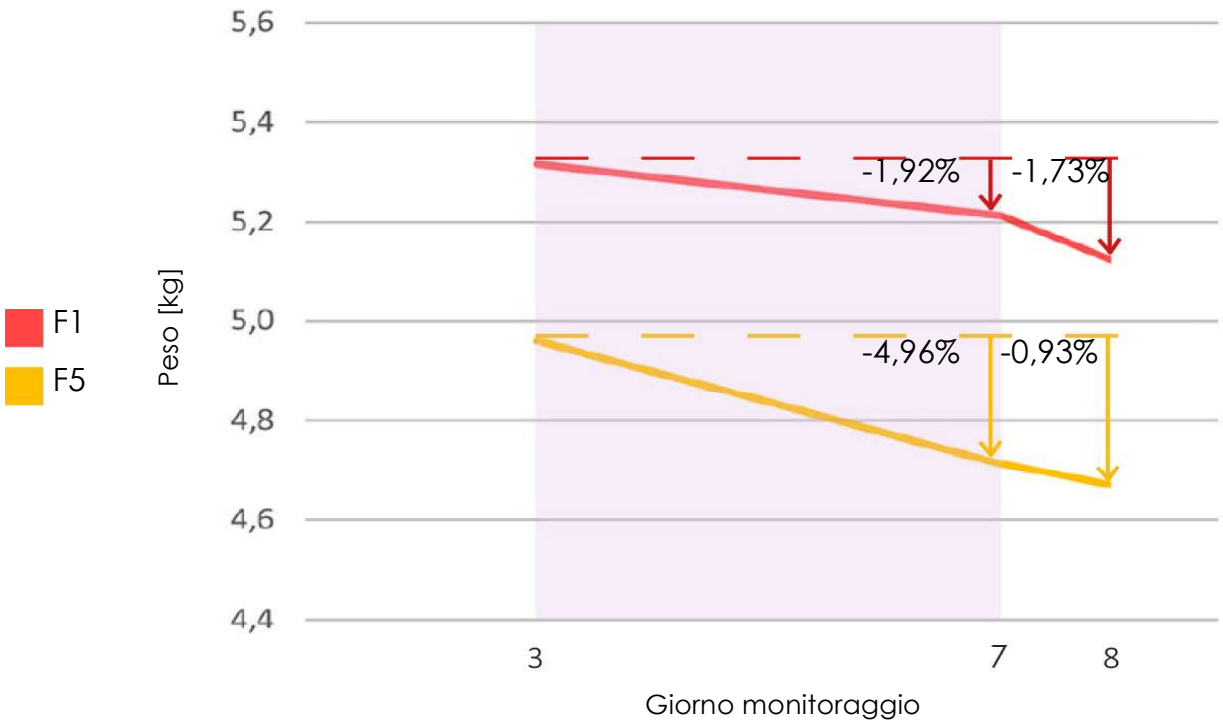


Figura 14

IMPASTO G - Variazione peso - conservazione ambiente esterno / ambiente interno

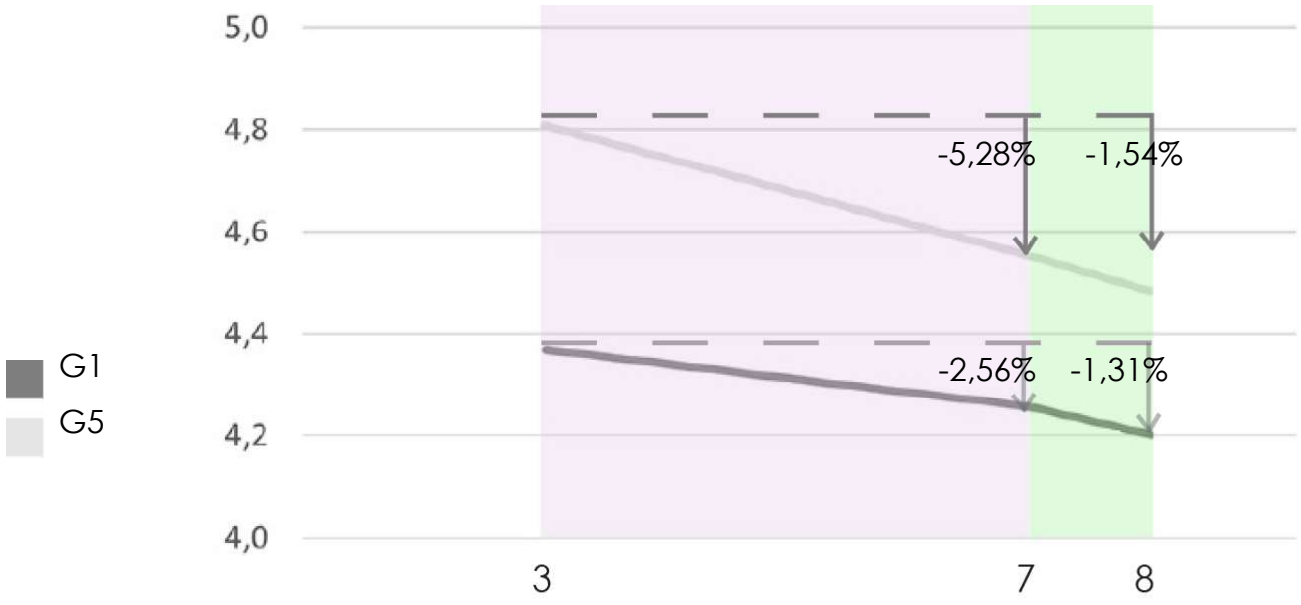


Figura 15

IMPASTO H - Variazione peso - conservazione ambiente esterno / ambiente interno

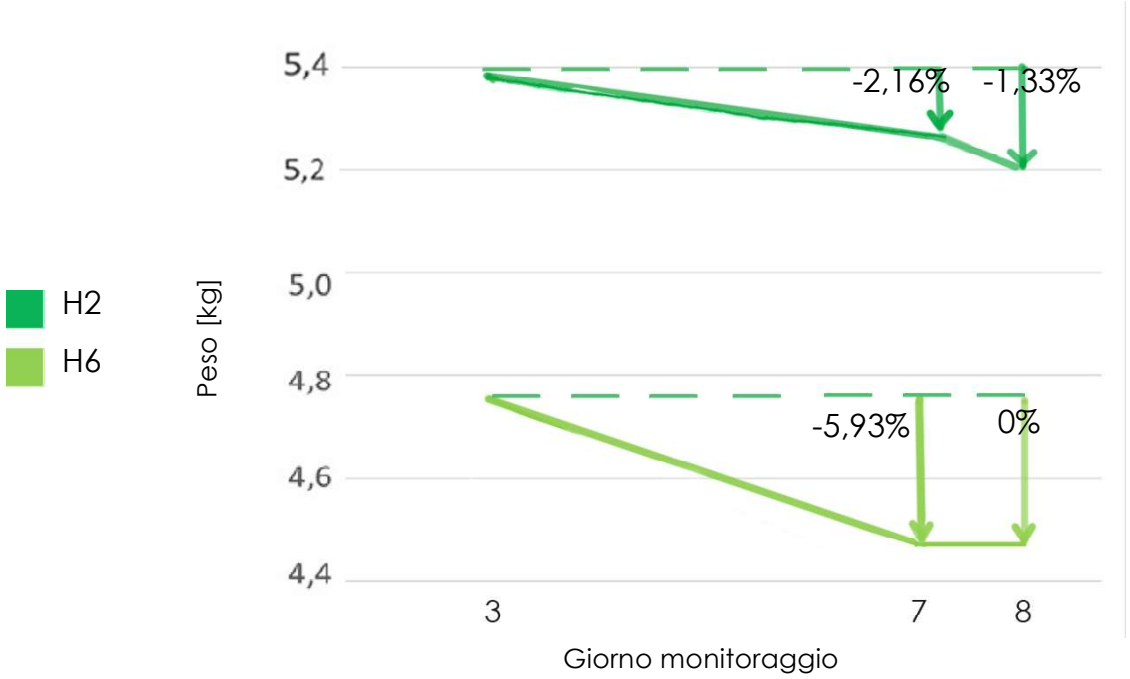


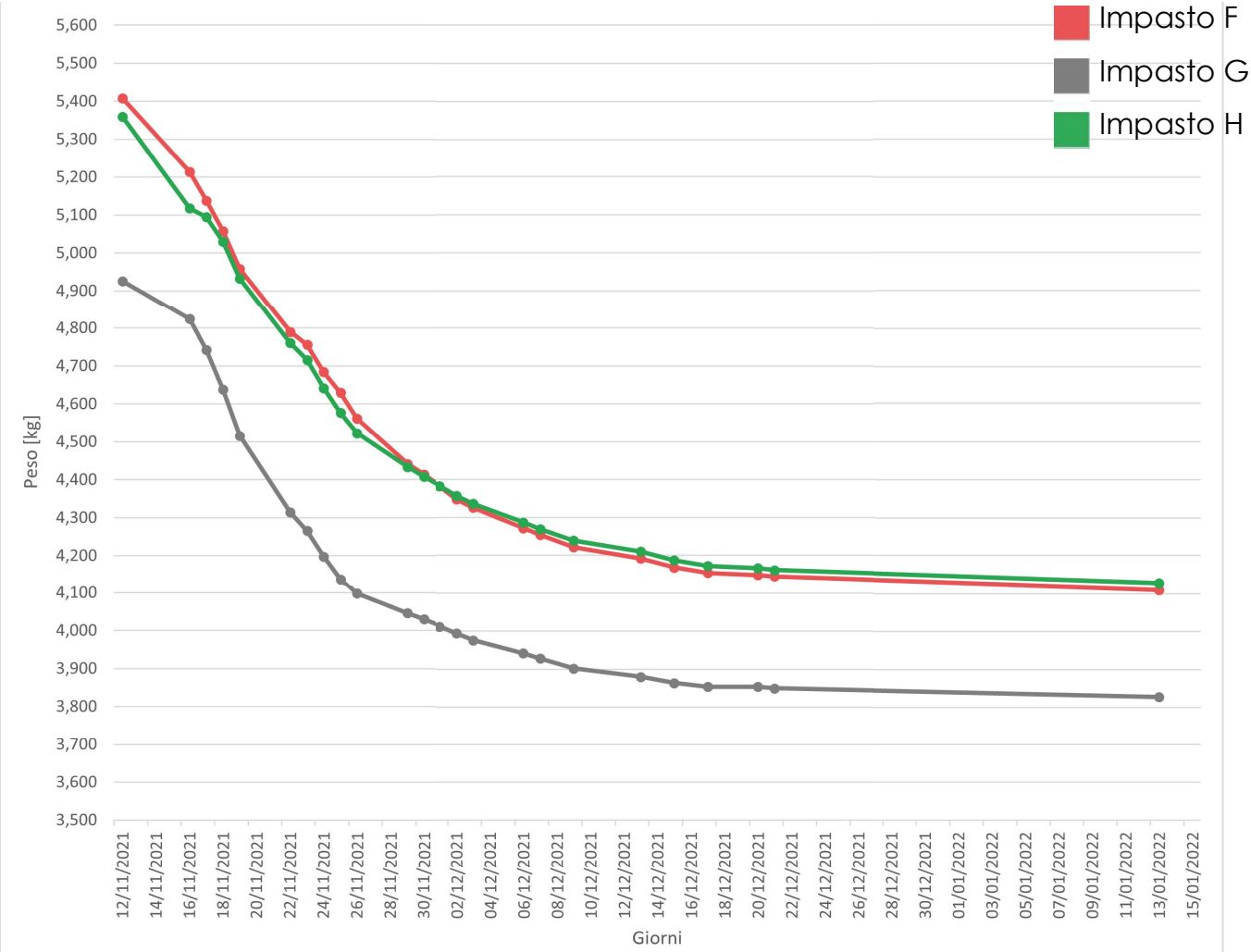
Figura 16

3.7.3.4 IMPASTO H

Per quanto riguarda l'impasto H, si nota come il campione H2, asciugato all'esterno, abbia presentato una variazione di peso solamente del 2%, passando da 5,380 a 5,264 kg.
Il campione Hi asciugato in ambiente interno presenta invece una variazione di peso di circa il 6%, passando da 4,754 a 4,472 kg.
Nei giorni seguenti il campione H2 ha continuato a perdere peso, mentre il campione H6 è rimasto per 24h invariato (figura 16).

3.7.4 GRAFICI MONITORAGGIO

3.7.4.1 PESO MEDIO CAMPIONI NEL PERIODO DI MONITORAGGIO



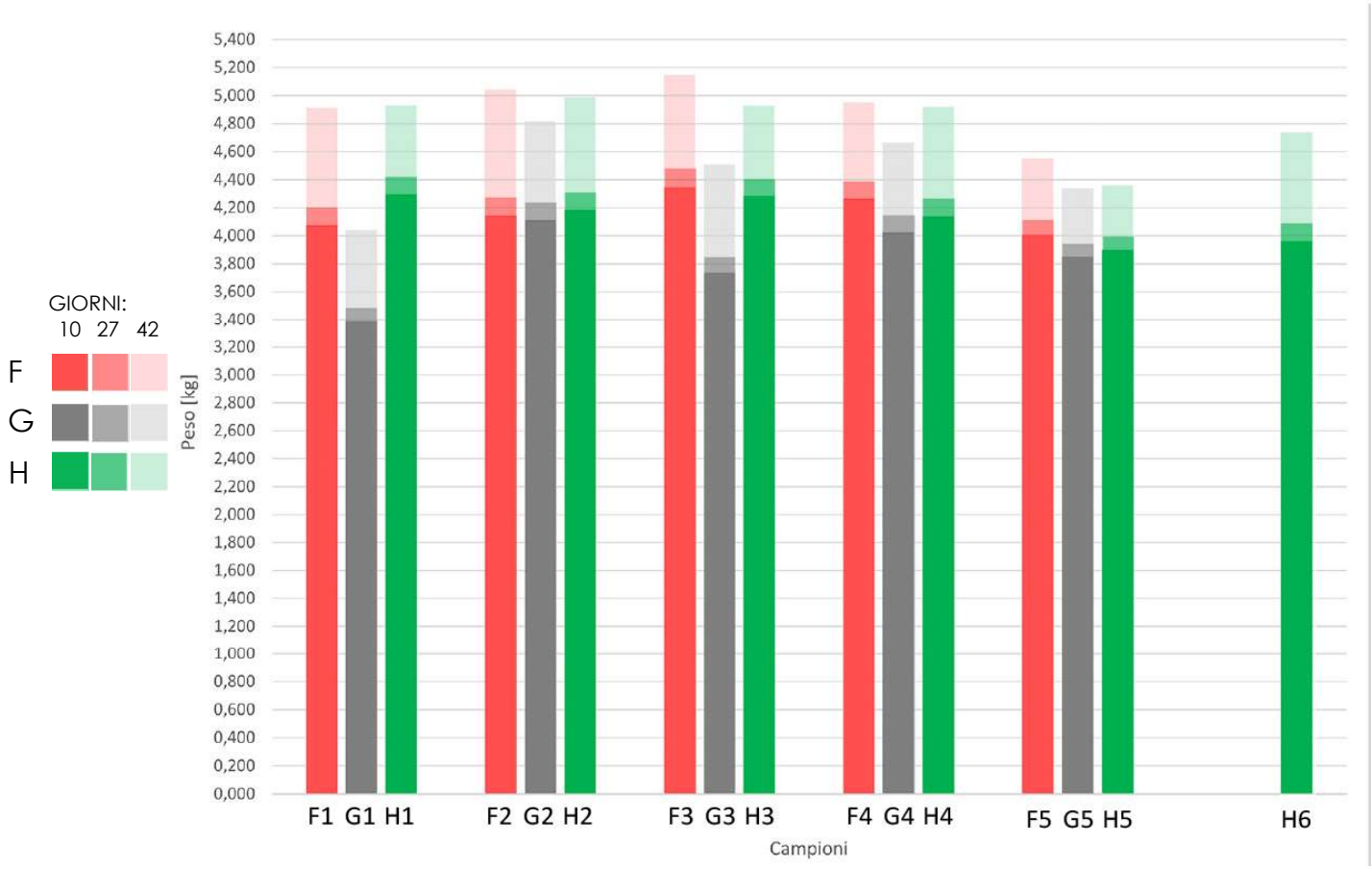
Dal giorno 3 dalla produzione dei provini i campioni sono stati spostati da esterno a interno, girati e rigirati sui lati per garantire un'asciugatura omogenea, fino al giorno 10 (19/11/2021).
Da quel momento in poi, vista l'asciugatura uniforme su tutti i lati, è stato irrilevante quale delle facce fosse appoggiata alla base.

Dal grafico sopra riportato, che rappresenta il peso medio dei campioni per ogni impasto, si può vedere come i provini abbiano mostrato una notevole variazione di peso nei primi 20 giorni, per poi stabilizzarsi nei successivi. Se consideriamo il perido dal giorno 3 (12/11/2021) al giorno 23 (02/12/2021), la variazione di peso media è del 19%, più in specifico:
- 19,6% per l'impasto F
- 18,9% per l'impasto G
- 18,7% per l'impasto H.

Dal giorno 23 al giorno 42 (21/12/2021), la variazione di peso media è del 4,3%, più in specifico:
- 4,7% per l'impasto F
- 3,6% per l'impasto G
- 4,5% per l'impasto H.

Negli ultimi 2 giorni di monitoraggio, i giorni 41 (20/12/2021) e 42, la variazione di peso media è stata solamente dello 0,1%. Nei successivi 23 giorni, fino al giorno 65, si è registrata un'ulteriore variazione dell'1%, in media circa 0,05% di variazione al giorno. Essendo i campioni giunti a un valore di peso stabile, sono stati sottoposti alle prove di laboratorio.

3.7.4.2 CONFRONTO TRA VARIAZIONI DI PESO (giorni 10, 27, 42)



Dal grafico sopra riportato si nota come il peso dei campioni relativi a tutti e tre gli impasti abbia avuto una grande diminuzione nei primi 20 giorni di asciugatura; questa è stata molto più lieve nei successivi 20 giorni, alla fine dei quali si è raggiunto un peso considerato stabile.

3.8 RESISTENZA A COMPRESSIONE

3.8.1 STRUMENTI

Per determinare la resistenza a compressione degli impasti, sono state eseguite sui provini le medesime prove di compressione svolte per i campioni della prima serie: è stata utilizzata la macchina per test di compressione Zwick Roell insieme al software TestXpert II, presso il Laboratorio del Dipartimento DISEG del Politecnico di Torino.
Prima di procedere con la rottura, i campioni sono stati pesati e misurati.
Il grafico in figura 16 illustra la variazione di peso dei provini nel periodo compreso tra il giorno 3 e il giorno 65 in cui si sono svolte le prove di resistenza.

Miscela	Campione	Dimensioni [mm]			S_0 [mm^2]	Volume [cm^3]	Massa [g]	Densità [kg/m^3]	Densità media [kg/m^3]
		a_0	b_0	h_0					
F	F1	295	150	110	44250	48,675	4044	830,82	876,22
	F2	297	147	108	43659	47,152	4110	871,65	
	F3	295	145	112	42775	47,908	4308	899,22	
	F4	297	147	110	43659	48,025	4230	880,79	
	Fi	293	150	107	43950	47,027	3986	847,61	
	Fcubo	145	145	125	21025	26,281	2478	942,88	
G	G1	295	142	113	41890	47,336	3376	713,20	727,62
	G2	297	143	123	42471	52,239	4080	781,02	
	G3	295	148	115	43660	50,209	3712	739,31	
	G4	297	145	123	43065	52,970	3994	754,01	
	Gi	295	145	125	42775	53,469	3828	715,93	
	Gcubo	148	145	145	21460	31,117	2114	679,37	
H	H1	298	145	120	43210	51,852	4260	821,57	802,66
	H2	297	145	125	43065	53,831	4146	770,18	
	H3	300	140	122	42000	51,240	4248	829,04	
	H4	298	143	123	42614	52,415	4108	783,74	
	H5	295	142	120	41890	50,268	3928	781,4116	
	Hi	295	140	125	41300	51,625	3874	750,4116	

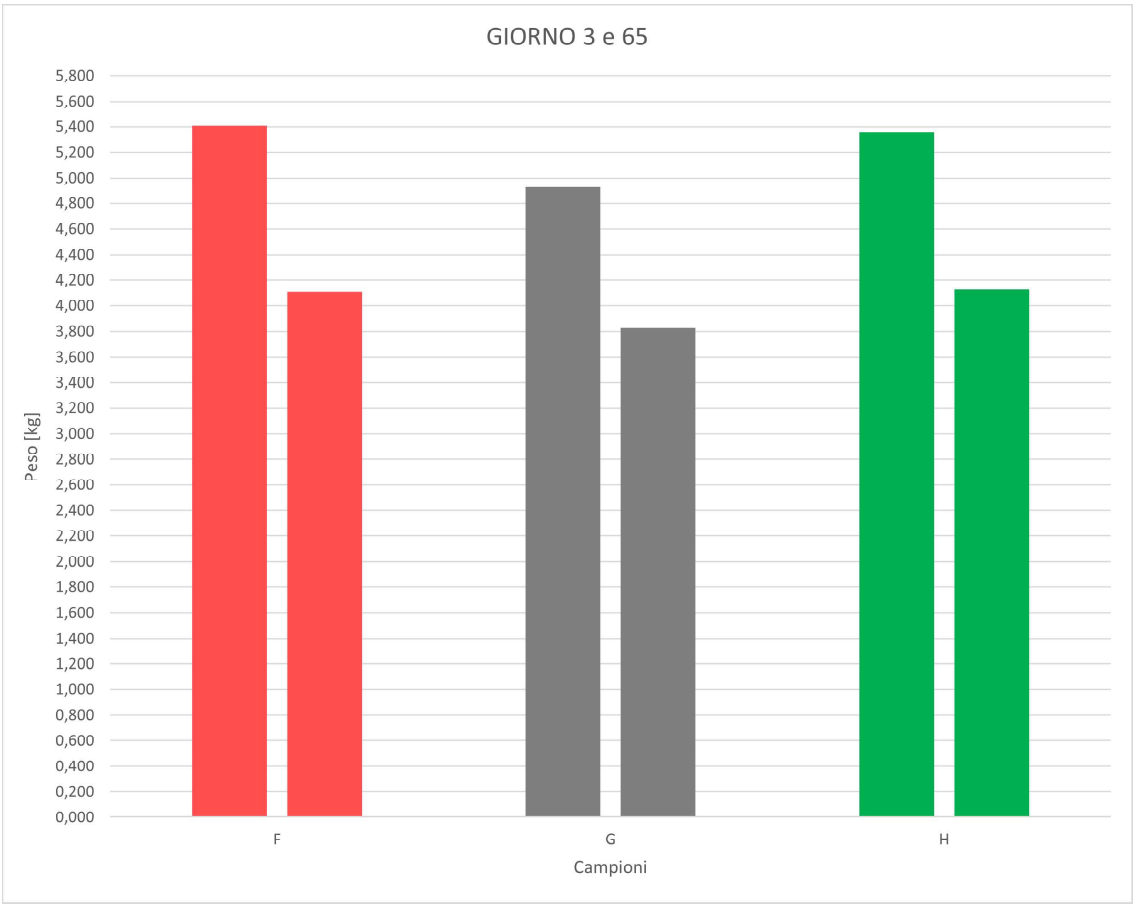

GIORNO 3 e 65
Peso [kg]
5,800
5,600
5,400
5,200
5,000
4,800
4,600
4,400
4,200
4,000
3,800
3,600
3,400
3,200
3,000
2,800
2,600
2,400
2,200
2,000
1,800
1,600
1,400
1,200
1,000
0,800
0,600
0,400
0,200
0,000
F
G
H
Campioni

Figura 16

3.8.2 MODALITÀ DI ROTTURA













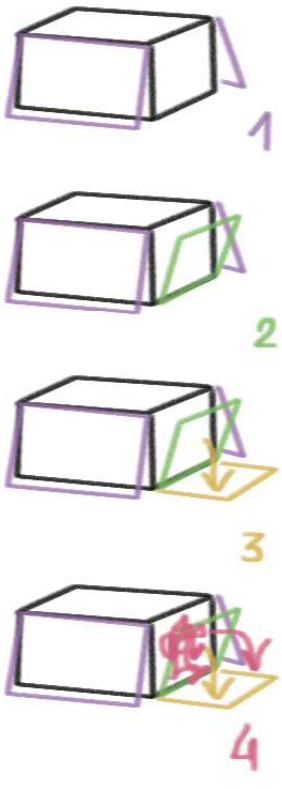
La rottura dei campioni avviene principalmente sulle facce lunghe laterali, secondo due modalità:
1) cedimento della base e scorrimento delle facce laterali

2) dispiegamento delle facce laterali nel punto intermedio
Sulle facce laterali corte notiamo invece un cedimento con conseguente fuoriuscita di materiale, sgretolato.









1. Il campione, non appena sottoposto alla forza di compressione, mostra uno scivolamento delle facciate laterali lunghe.

2. In seguito avviene il distacco della faccia laterale su lato corto: questa, al contrario delle facciate lunghe, si mantiene ferma alla base scivolando sulla pressa.

3. Lo scivolamento delle facciate laterali lunghe continua, mentre la facciata corta si stacca completamente.

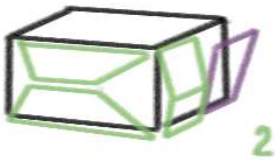
4. Dal lato corto fuoriesce materiale sgretolato.













1. Il campione, non appena sottoposto alla forza di compressione, mostra uno scivolamento della facciata corta, che si mantiene ferma alla base scivolando sulla pressa.

2. In seguito avviene il piegamento della faccia laterale su lato lungo: questo non riguarda tutta la lunghezza, ma solamente zona centrale. Lo scivolamento non avviene né sulla base, né sulla pressa; la faccia si rompe seguendo una linea centrale, aprendosi verso l'esterno.
Anche parte della faccia corta segue la stessa modalità di rottura, limitandosi però al piegamento della superficie.

3. Lo scivolamento delle facce laterali prosegue nella stessa direzione.















I campioni cubici sottoposti a compressione manifestano una notevole deformazione e conseguente distacco delle facciate.

1. La deformazione del campione avviene attraverso lo scivolamento e abbassamento di una faccia del cubo. Questo non avviene tramite scorrimento della faccia sulla base, ma tramite rottura di questa in un punto intermedio e successivo piegamento verso l'esterno. Il punto di rottura non è centrale come nel precedente caso, ma più vicino alla base.

2. L'apertura e l'abbassamento proseguono nella stessa direzione. Si nota un lieve distacco e apertura di parte della faccia adiacente verso l'esterno.

3. La faccia B si apre completamente scivolando verso l'esterno, mentre la porzione di base del campione rimasta fino ad ora intatta si sgretola. Si nota un lie-

ve sgretolamento della base anche sulla faccia A, mentre l'apertura rimane contenuta.

3.8.3 ANALISI DELLA ROTTURA

Analizzando le modalità di rottura precedentemente descritte, l'apertura della facce verso l'esterno lungo la linea intermedia, può essere ricondotta alla modalità di produzione dei campioni. Già nei primi provini, si era formata, sulla faccia lunga, una linea di debolezza trasversale (figure 17 e 18).
Questo difetto è stato risolto introducendo il materiale direttamente nello stampo, eliminando il passaggio dosatore-stampo.
Probabilmente, mettendo il materiale nel dosatore e ribaltandolo, successivamente, nello stampo, si crea una ridistribuzione interna delle fibre disomogenea e labile nel punto centrale del campione.



Figura 17

Lo schema in figura 19 illustra il processo dosatore-stampo:
allo step 1 il materiale si trova nel dosatore per poi essere ribaltato nello stampo.
Durante questo movimento si generano dentro al campione delle forze opposte dovute al peso proprio. Una forza spinge il campione verso la base e un'altra uguale e contraria lo spinge verso l'esterno. Questo provoca un punto di sollecitazione centrale, dove si forma la linea di difetto.
Una volta introdotto nello stampo il campione è stato compattato e dunque sottoposto a un'ulteriore forza: compressione.
Lo schema in figura 19 illustra il processo che prevede l'inserimento del materiale direttamente nello stampo:
in questo caso il provino esercita una forza verso la base (forza peso) e, per la compattazione, viene sottoposto ad un'ulteriore forza nella stessa direzione.
Non si creano quindi punti di particolare sollecitazione né si generano forze verso l'esterno.



Figura 18

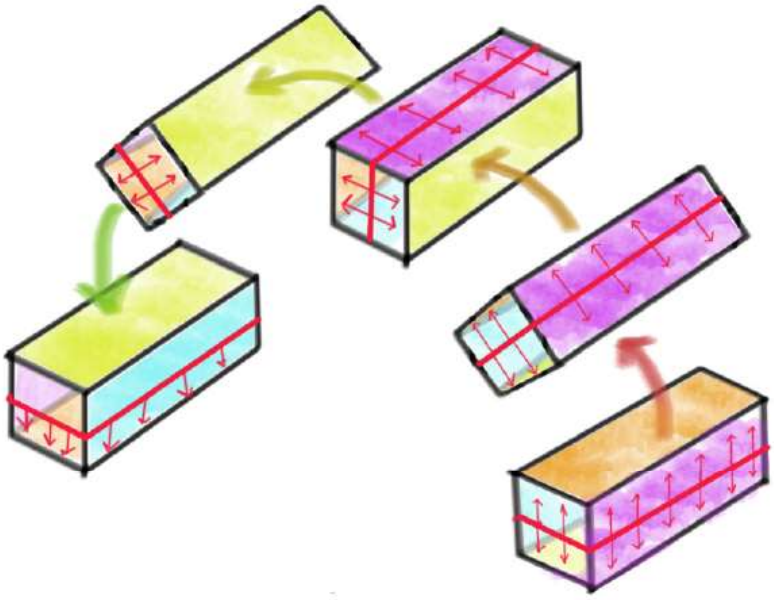


Figura 19

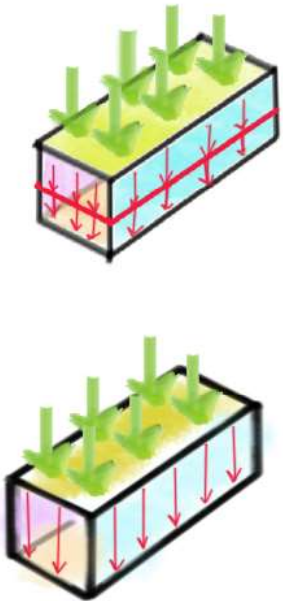


Figura 20

3.8.4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI FINALI

PROVINI		PROVE DI COMPRESSIONE			
Miscela	**Campione**	**Fmax [N]**	**Area [mm²]**	**σC [MPa]**	**σC media [MPa]**
F	F1	12260,125	32450	0,38	0,51
	F2	13328,38281	32076	0,42	
	F3	15589,93457	33040	0,47	
	F4	13920,44141	32670	0,43	
	Fi	11519,06738	31351	0,37	
	Fcubo	20639,76563	21025	0,98	
G	G1	9071,219727	33335	0,27	0,39
	G2	12089,80371	36531	0,33	
	G3	11207,08398	36875	0,30	
	G4	16018,94922	33925	0,47	
	Gi	11169,36426	36875	0,30	
	Gcubo	13931,20898	21025	0,66	
H	H1	18050,48047	35760	0,50	0,47
	H2	14930,61133	36531	0,41	
	H3	18713,48633	36600	0,51	
	H4	16976,38281	36654	0,46	
	H5	16657,56055	35400	0,47	
	Hi	12116,85938	36875	0,33	

I risultati ottenuti dalle prove di compressione sono stati soddisfacenti. I campioni hanno raggiunto una resistenza a compressione media di circa 0,46 MPa, con un valore massimo di 0,51 MPa per l'impasto F e un valore minimo di 0,39 MPa relativo all'impasto G.

IMPASTO F - Grafico forza / deformazione

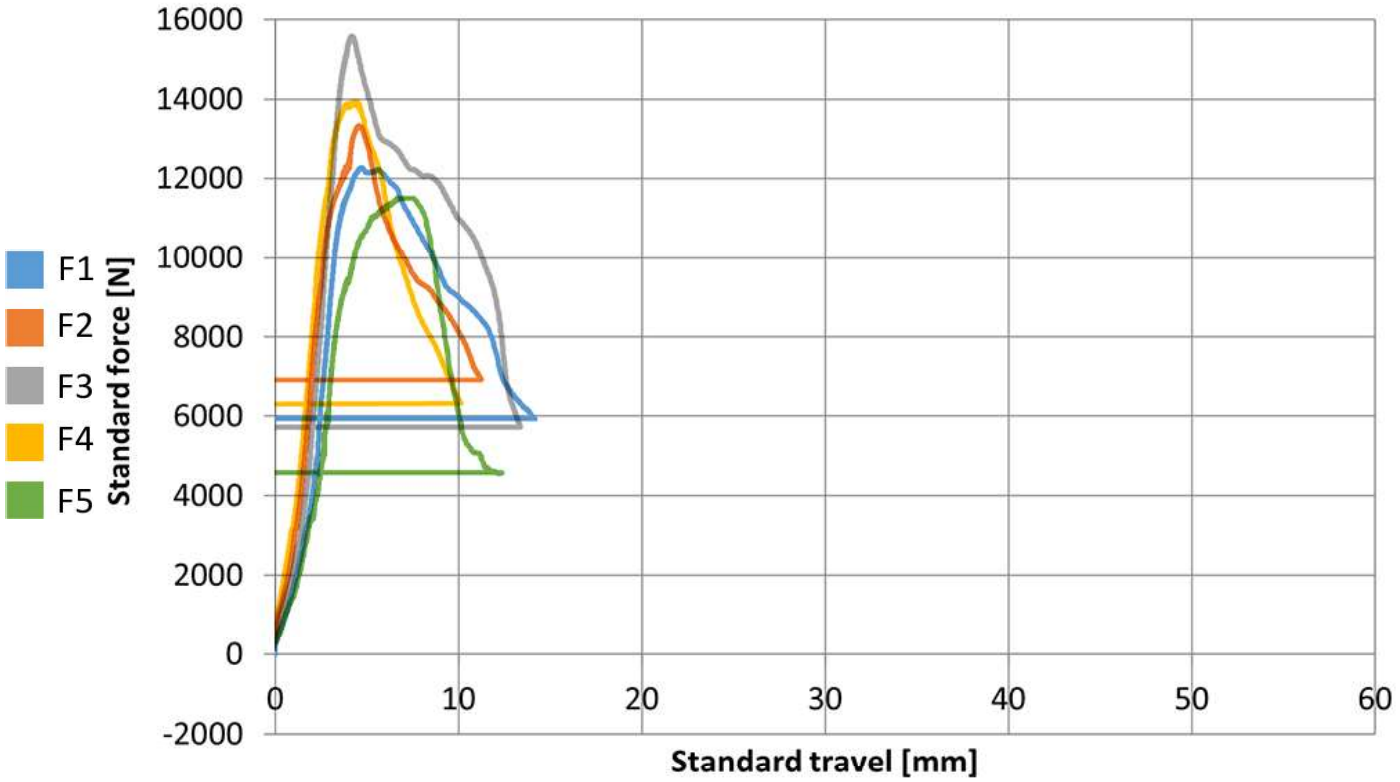


Figura 21

IMPASTO G - Grafico forza / deformazione

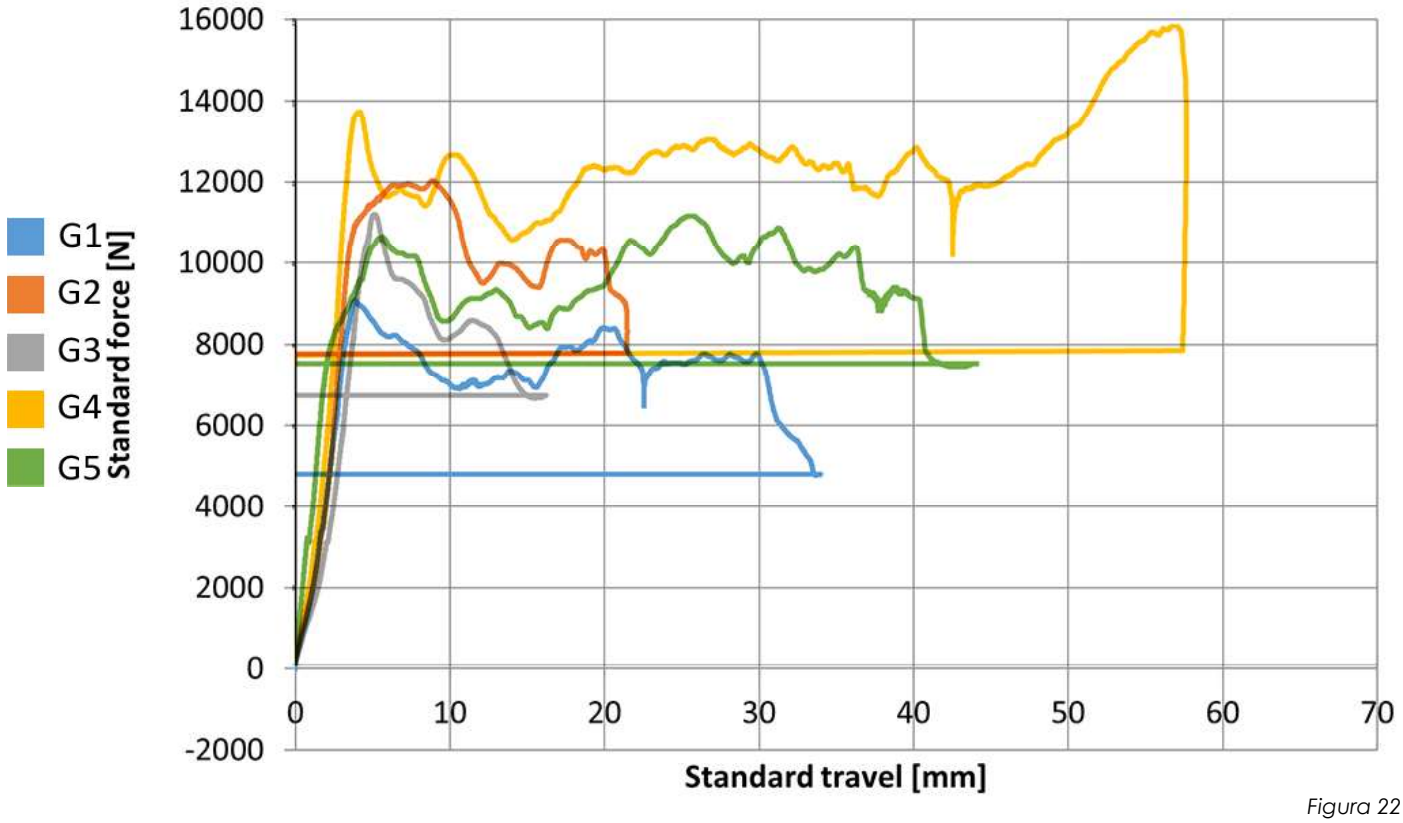


Figura 22

IMPASTO H - Grafico forza / deformazione

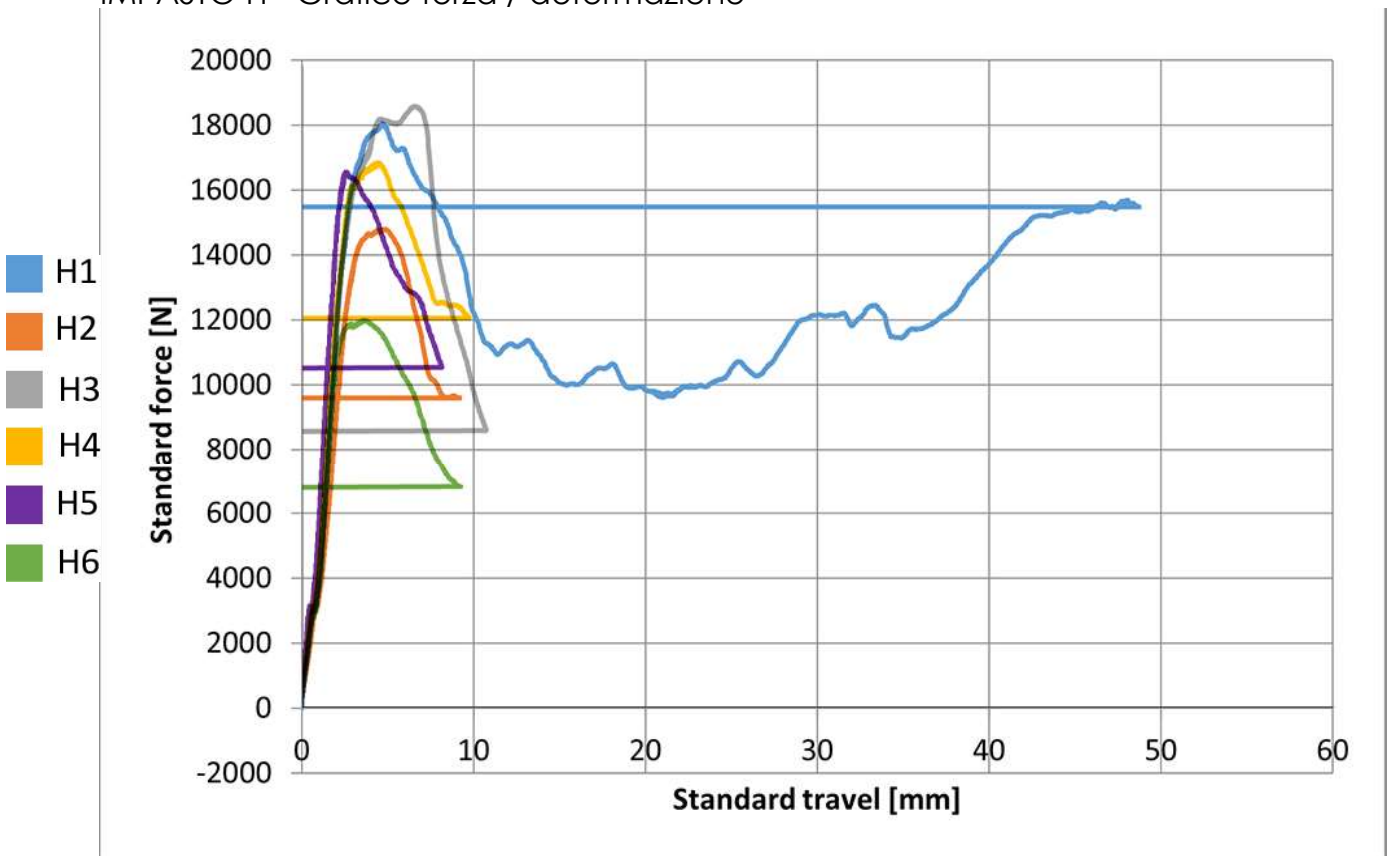


Figura 23

IMPASTO F e G - Campioni cubici - Grafico forza / deformazione

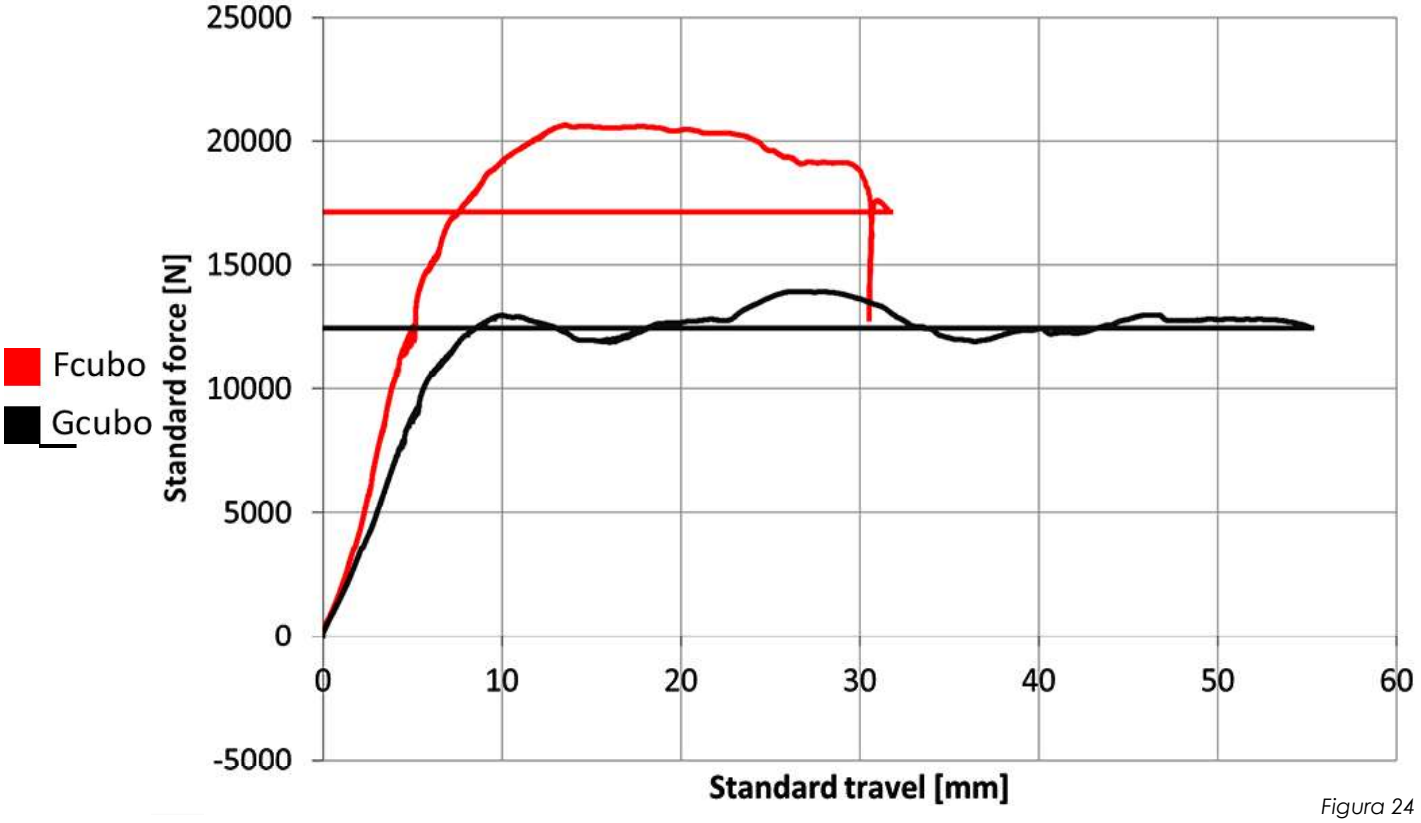
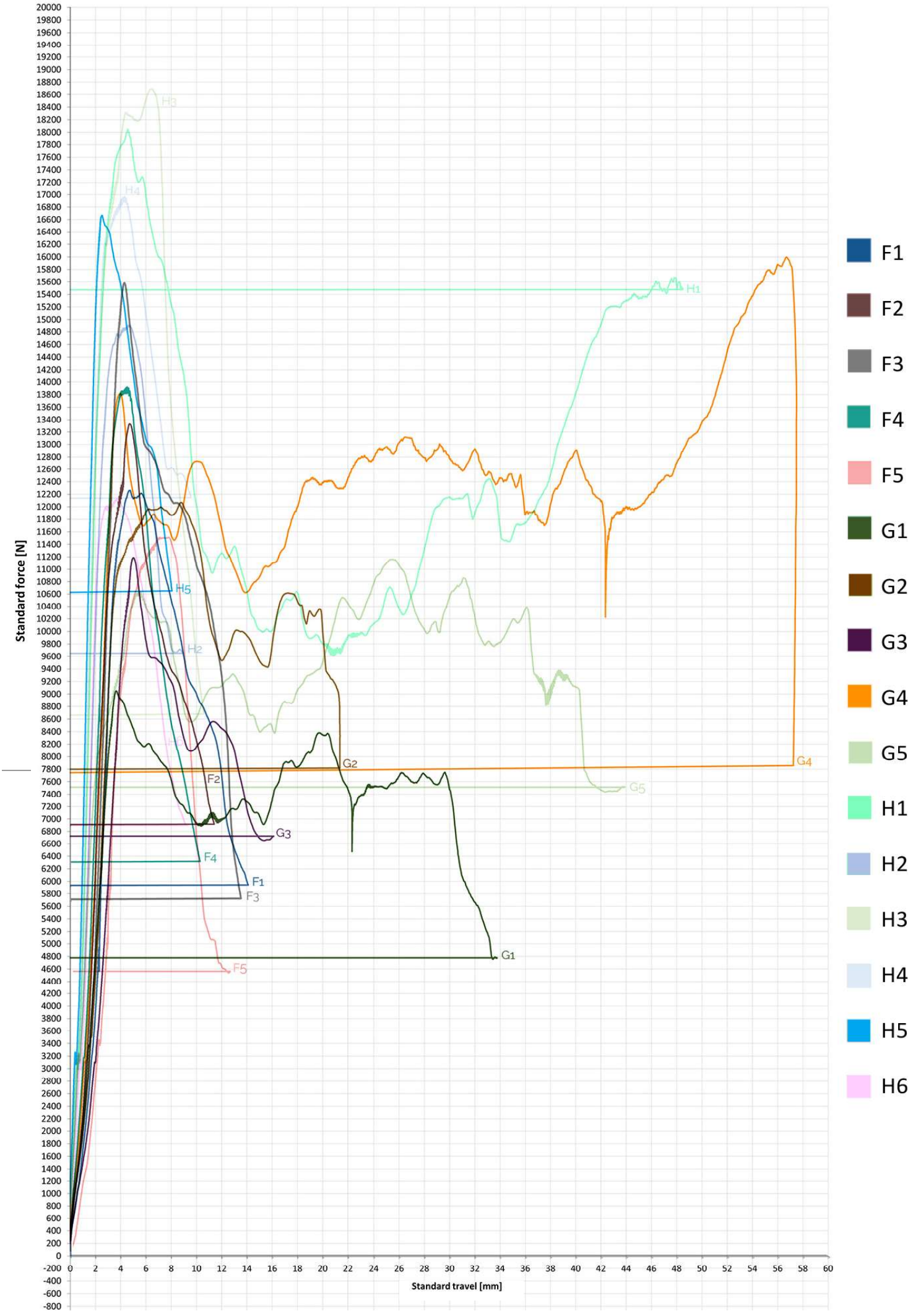


Figura 24

IMPASTI F, G, H - Grafico forza / deformazione



3.8.4.1 CAMPIONI MATTONE

Considerando i campioni-mattone, il provino con maggiore resistenza a compressione è stato H3, con un valore di 0,51 MPa. Questo registra una deformazione complessiva di 10 mm, sottoposto ad una forza massima di 18,7 kN. Con una differenza di soli 0,01 MPa, il campione H1 registra un valore di resistenza molto vicino al provino H3, nonostante si possa osservare una modalità di rottura completamente differente.
Mentre per il provino H3 la deformazione è minima, il provino H1, sottoposto ad una forza massima di 18,1 kN, vede una deformazione di circa 50 mm. Nella prima fase di rottura il comportamento dei due provini è molto simile. Il campione H3 però, a differenza di H1, una volta sottoposto alla forza massima e raggiunta la rottura, sottoposto a ulteriore forza di compressione, continua la dilatazione, arrivando a un valore di 5 volte la precedente (figura 23).

Per quanto riguarda l'impasto F invece, il valore di resistenza massimo raggiunto è stato di 0,47 MPa, dal campione F3. Il provino è sottoposto a una forza massima di 15,6 kN alla quale non reagisce con la rottura netta, ma continua a deformarsi fino a circa 15 mm (figura 21).

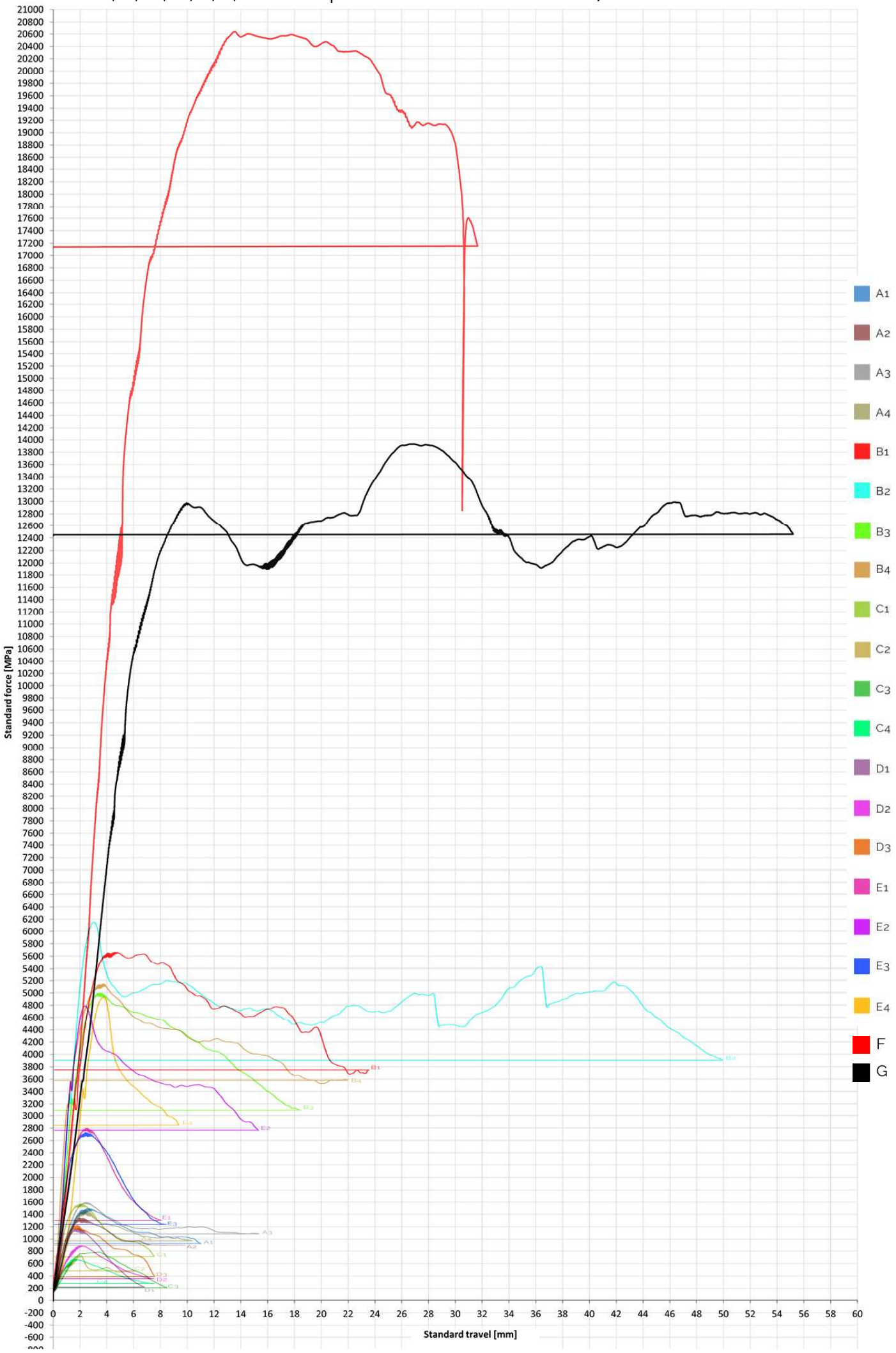
I campioni relativi all'impasto F hanno un comportamento molto simile a quelli relativi all'impasto H, mostrando però una maggiore deformazione complessiva. Considerando la composizione dei due impasti, l'impasto F contiene più acqua e meno cemento bianco rispetto all'impasto H: questo potrebbe aver reso i campioni più friabili e "morbidi", accompagnando allo sforzo una graduale deformazione, piuttosto che una netta rottura.

Anche l'impasto G raggiunge il valore di resistenza di 0,47 MPa, con il campione G4, sottoposto ad una forza massima di 16kN (figura 22).

Il comportamento dei campioni G è totalmente differente rispetto agli altri due impasti. In questo caso, infatti, si osserva una deformazione molto più ampia, fino a circa 60 mm, registrando la forza massima e il punto di rottura solamente alla fine del processo. Nei precedenti casi i campioni, sottoposti alla forza massima, presentavano rottura netta (impasto G) o ulteriore piccola deformazione (impasto F); in questo caso invece prima si verifica una notevole deformazione del provino e poi il picco di forza applicata con la rottura definitiva. Sembra che i provini distribuiscano la forza applicata a loro interno deformandosi, fino ad arrivare a un punto di estrema deformazione, con comportamento plastico e conseguente rottura.
L'impasto G si colloca tra gli impasti precedentemente descritti, in quanto contiene un quantitativo d'acqua pari all'impasto H, e un quantitativo di cemento bianco più prossimo all'impasto F, ma inferiore a questo.

Considerando che il campione G1 contiene un quantitativo di acqua minore rispetto agli altri campioni dello stesso impasto, e anche rispetto a tutti gli altri, e osservando come la sua resistenza a compressione di 0,27 MPa sia la minore ottenuta, si può constatare che minore è il quantitativo d'acqua presente nell'impasto e minore sarà la resistenza a compressione. Questo è dovuto al fatto che l'acqua disponibile per l'attivazione del legante idraulico è inferiore, dunque il materiale risulta meno rigido. A una diminuzione del quantitativo d'acqua è affiancata anche un inferiore quantitativo di cemento bianco, altro responsabile dell'indurimento del materiale. Essendo dunque la quantità di agenti indurenti minore, il materiale risulta più friabile e "morbido", ma anche meno resistente. Una deformazione così ampia su un componente strutturale provocherebbe sicuramente un crollo.

IMPASTI A, B, C, D, E, F, G - Campioni cubici - Grafico forza / deformazione



3.8.4.2 CAMPIONI CUBICI

Considerando i campioni cubici, il valore di resistenza a compressione più soddisfacente, di ben 0,97 MPa, è stato raggiunto dall'impasto F. Questo valore è di gran lunga superiore rispetto all'altro campione cubico prodotto, relativo all'impasto G, che arriva a un valore di resistenza a compressione pari a 0,66 MPa e un processo di rottura completamente differente (figura 24).

La modalità di rottura dei provini cubici è coerente con quella dei provini-mattone, in base alla composizione dell'impasto. Il cubo F, mostra infatti una dilatazione molto minore rispetto al cubo G, che presenta un comportamento molto più elastico.

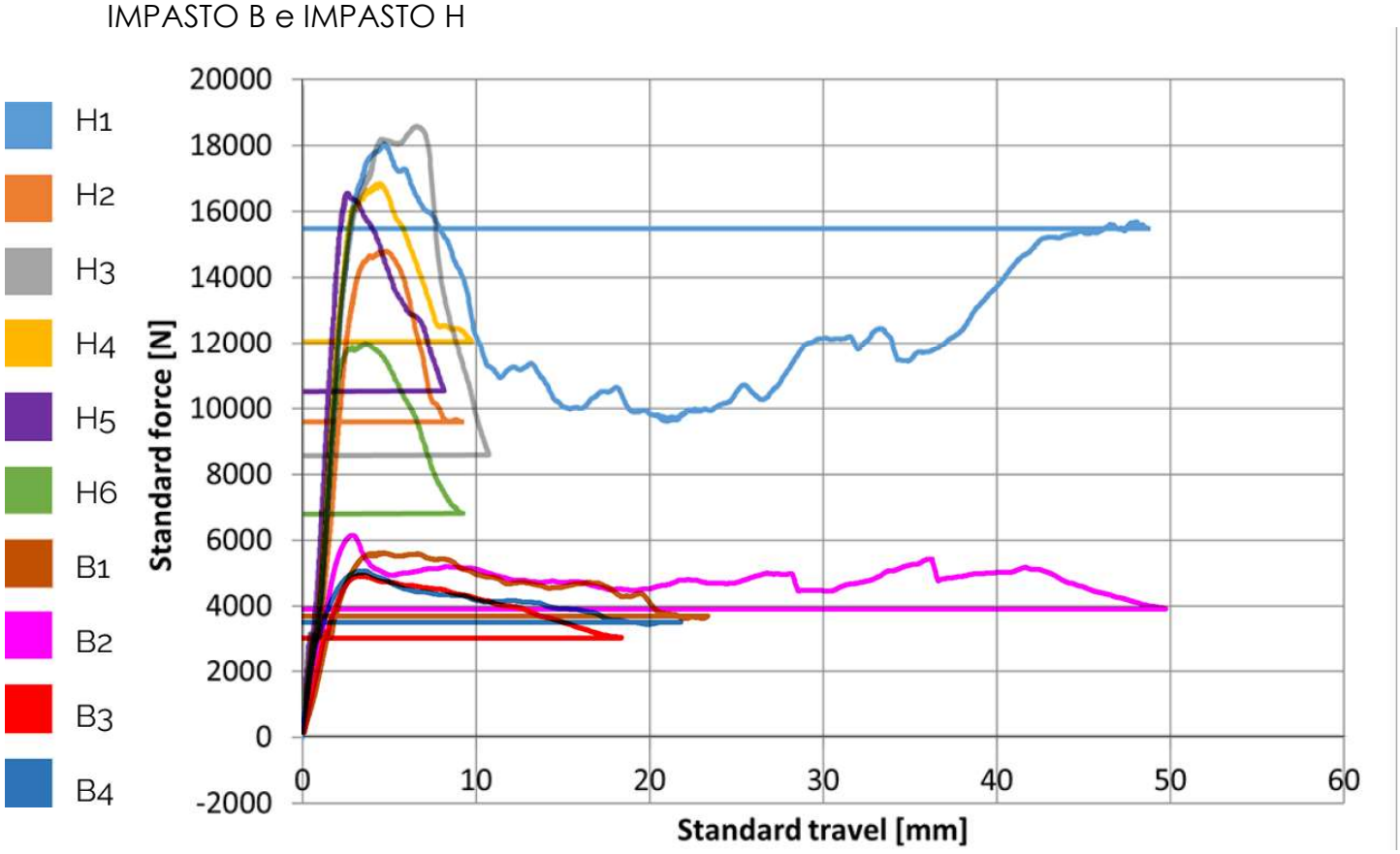
Dal precedente confronto tra provini-mattone, la differenza di resistenza a compressione tra l'impasto F e G era di circa il 20%, mentre in questo caso notiamo una differenza di circa il 33%.
L'unica differenza durante il processo di produzione dei campioni è stata la modalità di compattazione. Infatti, i campioni-mattone all'impasto F sono stati prodotti inserendo il materiale nel dosatore e poi nello stampo, creando la linea trasversale di debolezza illustrata precedentemente, mentre i campioni relativi all'impasto G sono stati inseriti direttamente nello stampo e lì compattati. Per quanto riguarda i campioni cubici, questi sono stati prodotti secondo la medesima modalità utilizzata per la prima serie, facendo attenzione che la compattazione manuale avvenisse secondo lo stesso numero di colpi e dallo stesso soggetto.

Dunque, le differenti modalità di produzione del campione sembrerebbero ridurre la resistenza dei provini F del 13%.
Si potrebbe ipotizzare anche una differenza di risultati tra campioni dovuta alle differenze di forma e di volume tra campioni-mattone e campioni-cubo.

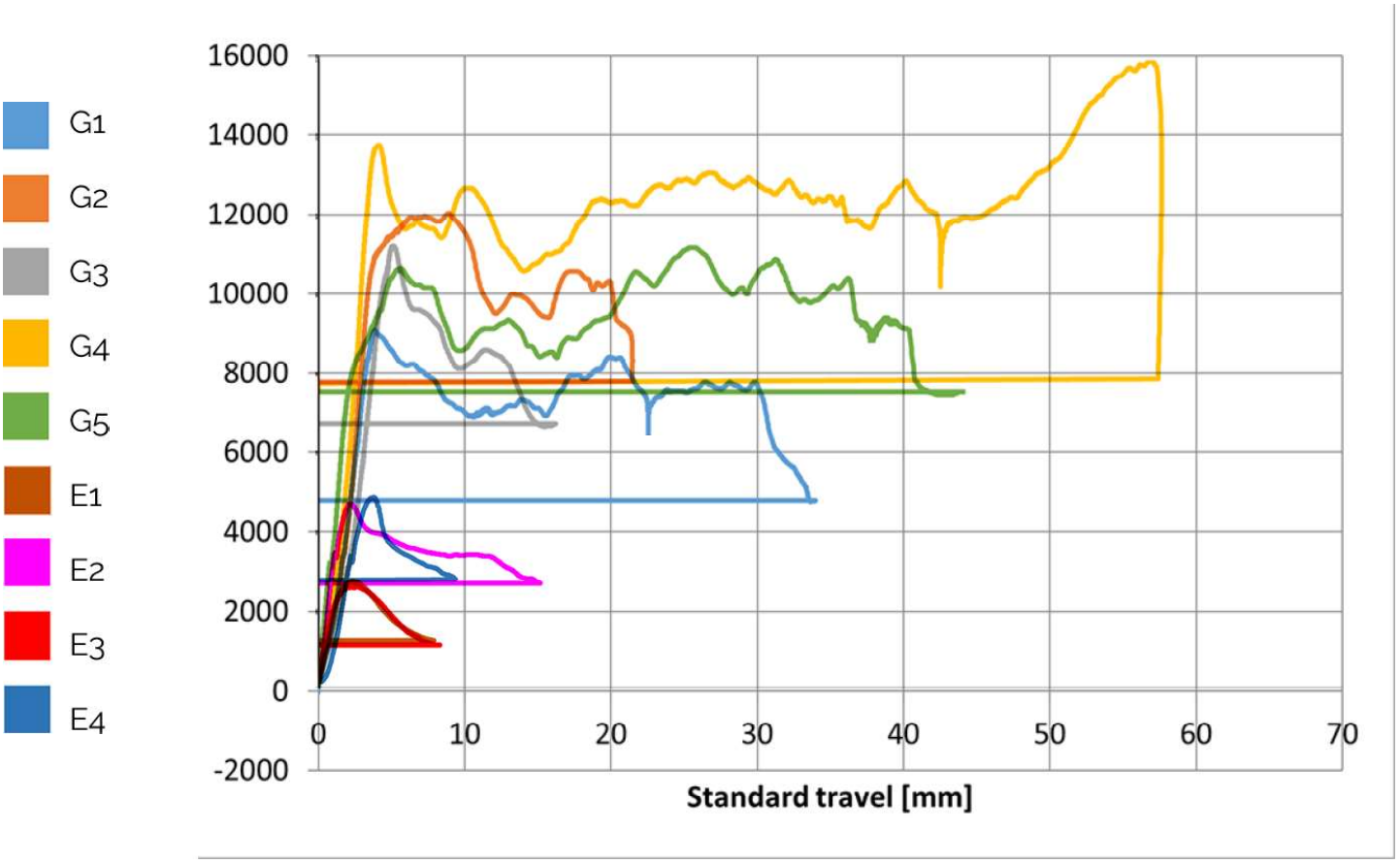
Sarebbe stato interessante produrre un campione cubico con l'impasto H, per verificare se la differenza di modalità di produzione ha un così grande impatto sul risultato.

IMPASTI B,E,G,H - Confronto grafici forza /deformazione

IMPASTO B e IMPASTO H



IMPASTO E e IMPASTO G



3.9 CONFRONTO DELLA COMPOSIZIONE DEGLI IMPASTI B,E,G,H

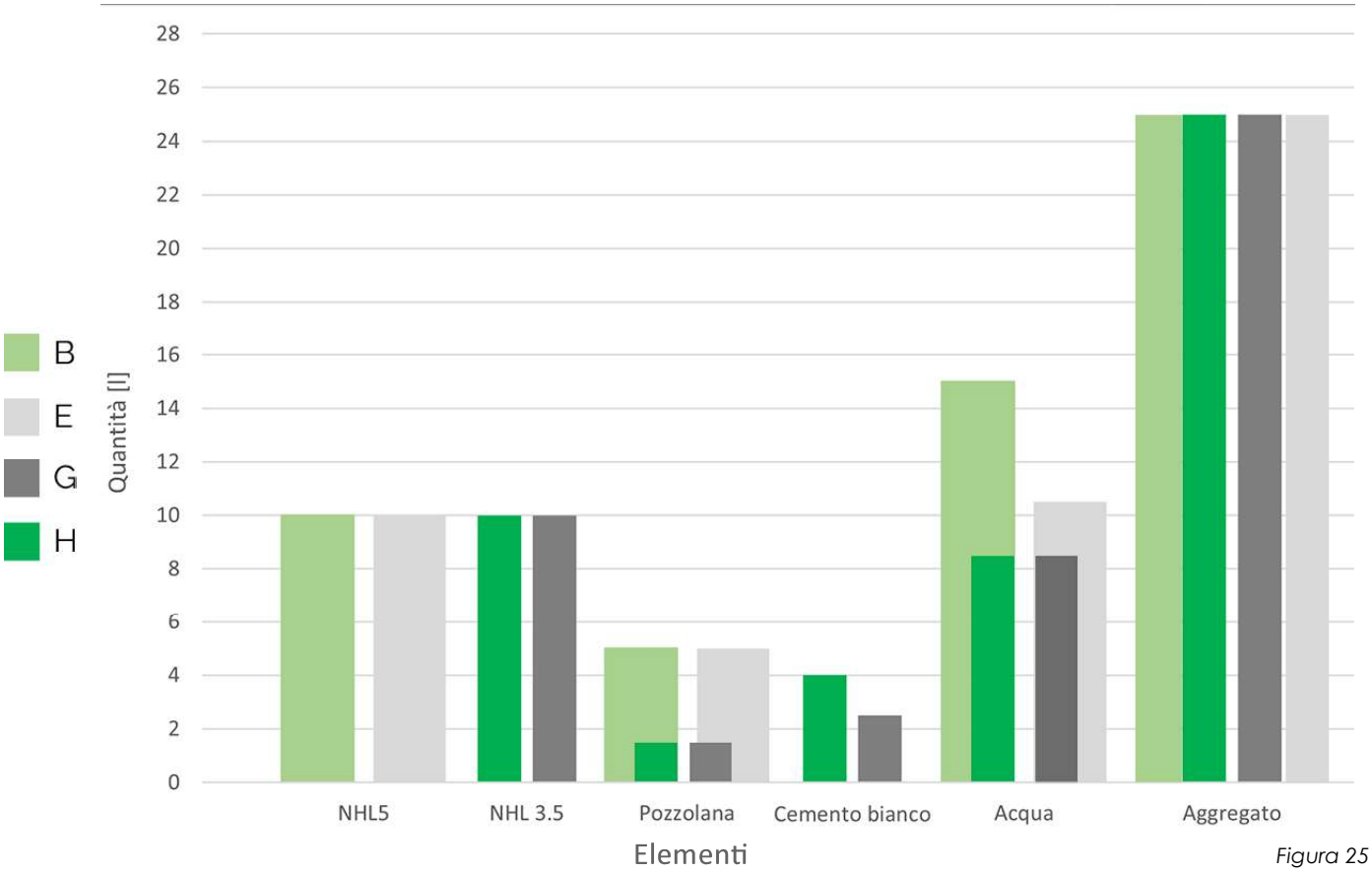


Figura 25

Come specificato nei paragrafi riguardanti la composizione di ogni impasto, per la produzione degli impasti G e H sono state utilizzate le medesime miscele di aggregato rispettivamente degli impasti E e B.
Mentre la quantità di aggregato e la granulometria sono rimaste invariate, abbiamo agito, su consiglio dell'artigiano Cerboni, modificando le componenti legante e acqua.
Dal grafico sopra riportato (figura 25) si può infatti osservare come, per gli impasti G e H, la quantità di aggregato utilizzata sia la medesima che in B ed E, mentre siano variate tutte le altre componenti:

- Calce idraulica: stessa quantità, ma differente classe di resistenza
- Pozzolana: quantità minore
- Cemento bianco: nuova componente assente in B ed E
- Acqua: quantità minore.

3.10 CONSIDERAZIONI FINALI

I risultati ottenuti sono comunque soddisfacenti, soprattutto se confrontati con i risultati ottenuti con la prima serie, in cui l'impasto B, con una valore di resistenza pari a 0,27MPa, e l'impasto E, con 0,16 MPa, erano risultati i più resistenti. I valori di resistenza a compressione ottenuti dagli impasti della seconda serie sono oltre il 50% maggiori dei valori con gli impasti della prima.
A parità di curva granulometrica, si può dunque osservare come l'aggiunta di cemento bianco, la differente modalità di compattazione, e la maturazione dei campioni abbiano determinato un netto miglioramento nei risultati, raggiungendo il valore di resistenza a compressione di 0,5 MPa, pari a quello del miglior mattone in calce-canapa presente attualmente in commercio.

4. CURVA DELLE PRESSIONI - ipotesi 1

4.1 Introduzione

4.2 Ipotesi 1

4.3 Individuazione della porzione di arco da analizzare e divisione in parti uguali

4.4 Peso e baricentro
- 4.4.1 Baricentro conci
- 4.4.2 Baricentro sovrastruttura conci
- 4.4.3 Baricentro totale: conci + sovrastruttura

4.5 Determinazione della risultante

4.6 Determinazione di spinta e reazione

4.7 Tracciamento della curva delle pressioni

4.8 Conclusioni

4.9 Ipotesi 2

4. VERIFICA STATICA DELL'ARCO: METODO DI MÉRY E CURVA DELLE PRESSIONI

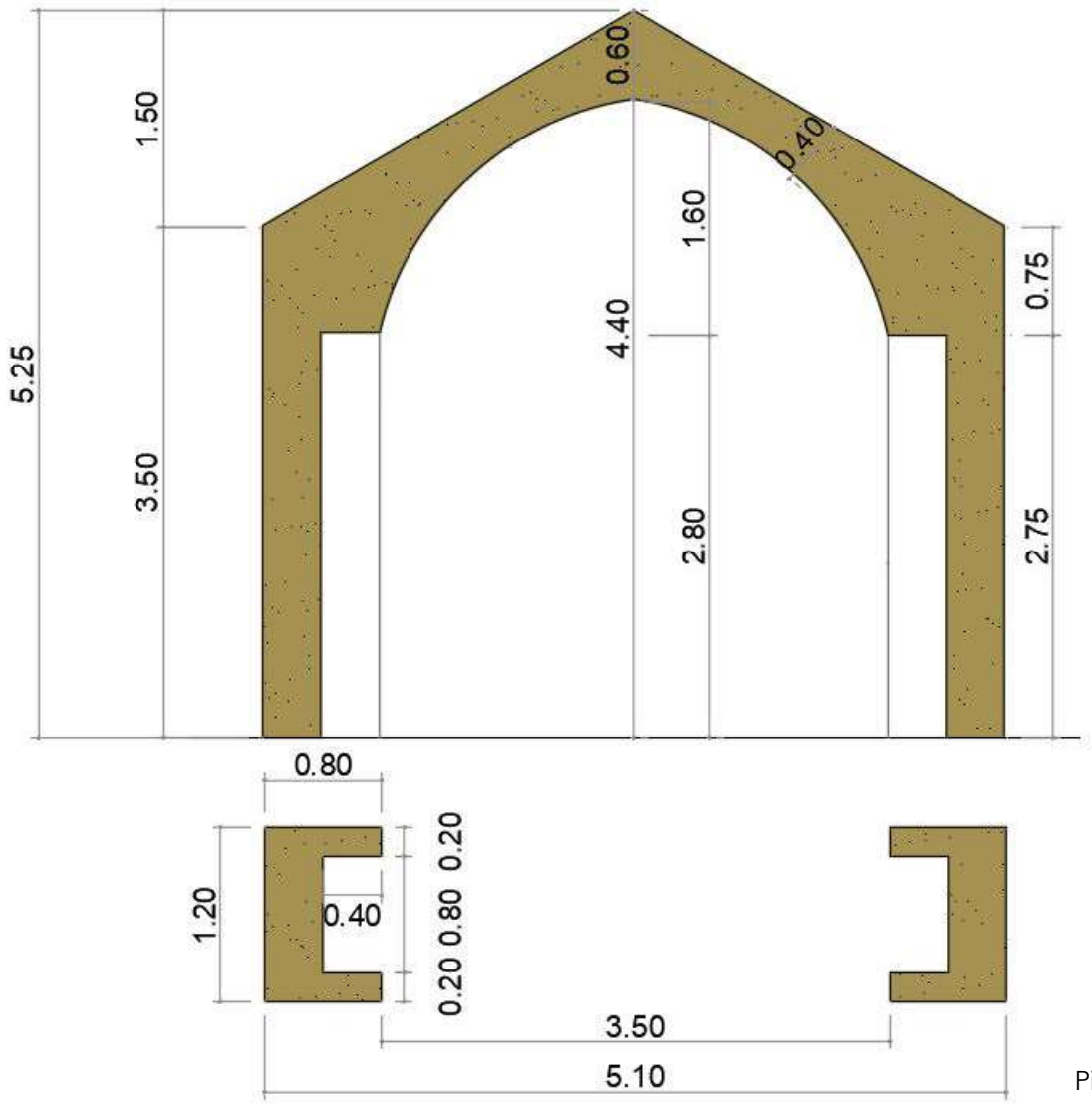
4.1 INTRODUZIONE

Una delle fasi di questa ricerca consiste nel riprodurre una prova distruttiva di compressione in un modello in scala 1:1 a forma di arco, avendo come riferimento la prova eseguita da David Lea presso la Welsh School of Architecture, in Galles, per verificare se la calce canapa può essere utilizzata come materiale strutturale.
Le misure sono state confrontate ed elaborate con misure già stabilite da precedenti studi in ambito Politecnico.
La verifica statica dell'arco richiede la determinazione della curva delle pressioni, per controllare che tale curva sia contenuta nel nocciolo d'inerzia dei conci. Se questa condizione è verificata, l'arco sarà interamente compresso, senza alcuna zona sollecitata a trazione.
L'obiettivo è capire la risposta del materiale agli sforzi di compressione.

4.2 IPOTESI 1

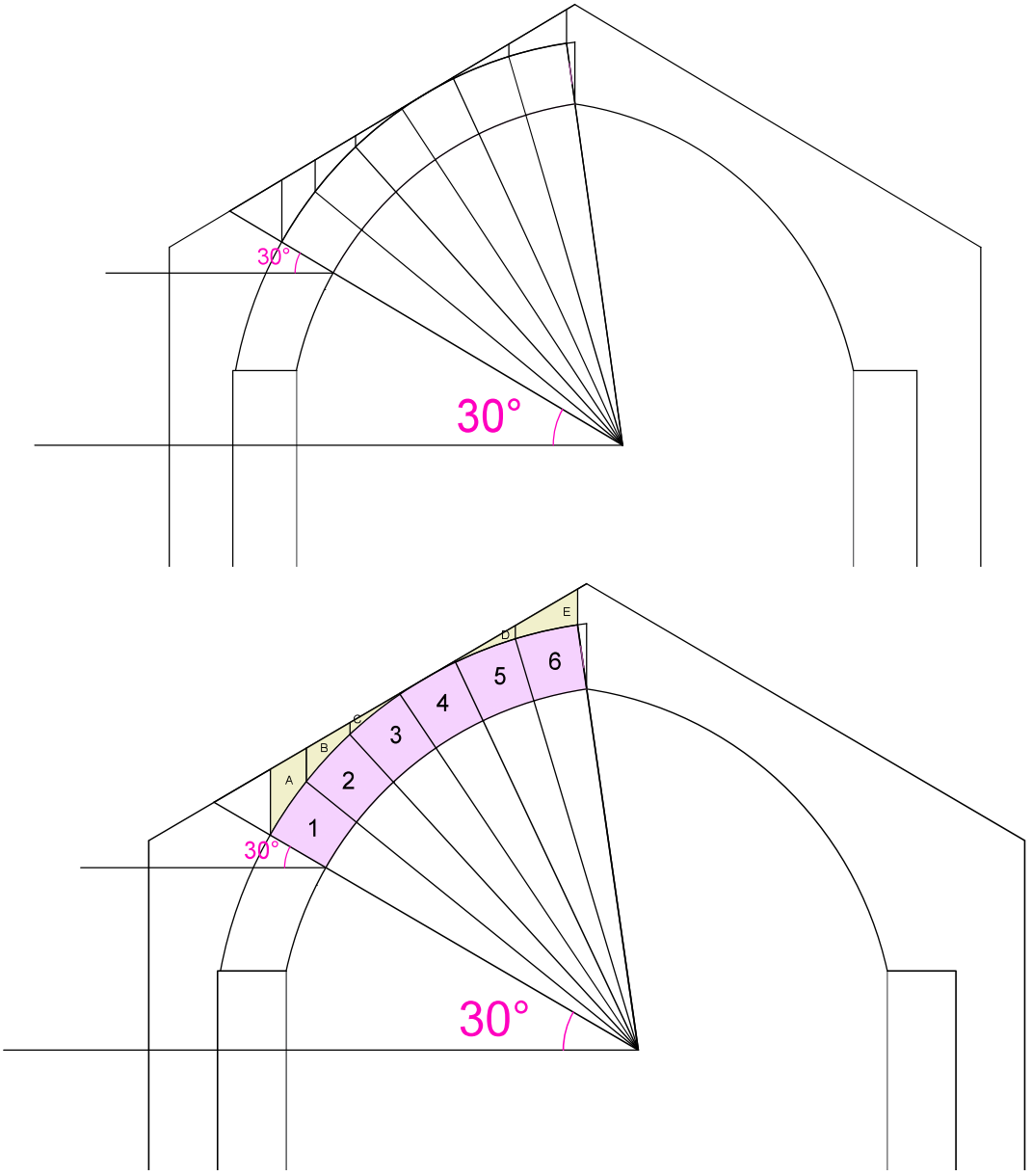
Ipotizzando che il nostro arco sia simmetrico e simmetricamente caricato, possiamo limitare lo studio a metà di esso, applicando, nella sezione di chiave, la forza trasmessa dalla restante parte.

Per determinare la curva delle pressioni bisogna determinare la reazione Q e la spinta dell'arco S.



Pianta e prospetto

4.3 INDIVIDUAZIONE DELLA PORZIONE DI ARCO DA ANALIZZARE E DIVISIONE IN PARTI UGUALI



4.4 PESO E BARICENTRO

CONCI	AREA [m²]	PROFONDITÀ [m]	VOLUME [m³]	DENSITÀ [kg/m³]	PESO [kg]
1	0,1287	1,2	0,1544	829,04	128,0369
2	0,1287		0,1544		128,0369
3	0,1287		0,1544		128,0369
4	0,1287		0,1544		128,0369
5	0,1287		0,1544		128,0369
6	0,1287		0,1544		128,0369

Figura 3

Considerati il volume e la densità del materiale, è stato determinato il peso proprio di ogni concio e è stato individuato il punto di applicazione di quest'ultimo (il baricentro).

Per semplicità il concio è stato considerato di forma trapezia, rettificando i lati curvi e approssimandoli così a due lati rettilinei paralleli.

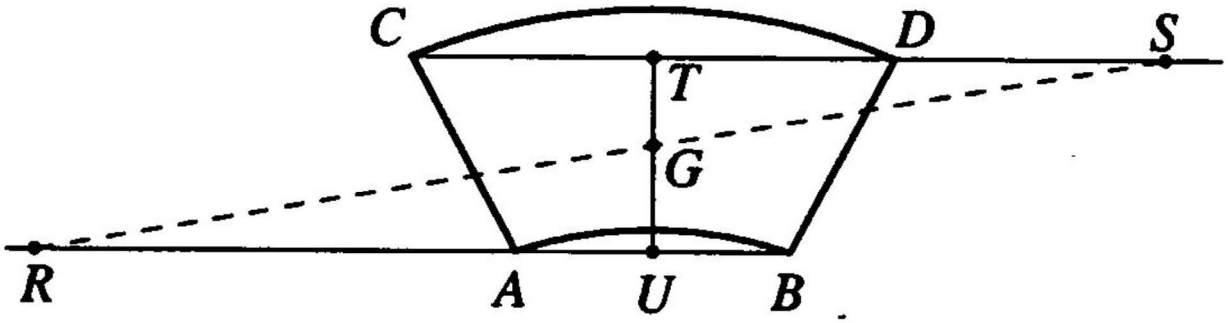


Figura 1

4.4.1 BARICENTRO DEI CONCI

Per la determinazione del baricentro si è applicato un metodo grafico (figura 1), riportando la misura del segmento di estradosso sulla retta individuata dall'intradosso, determinando così il punto R.
Si prolunga la retta individuata dall'estradosso, in direzione opposta rispetto al punto R, della quantità pari al segmento di intradosso: ciò permette di individuare il punto S.
A questo punto, tracciando il segmento TU che congiunge i punti medi dei lati approssimanti estradosso e intradosso, si ha che il baricentro G del concio risulta localizzato all'intersezione della congiungente RS con il segmento TU.

Prendendo come esempio il concio 1, e procedendo secondo il metodo sopra descritto, otteniamo le seguenti rappresentazioni grafiche con conseguente determinazione del baricentro G (vd. figure 2 e 3).

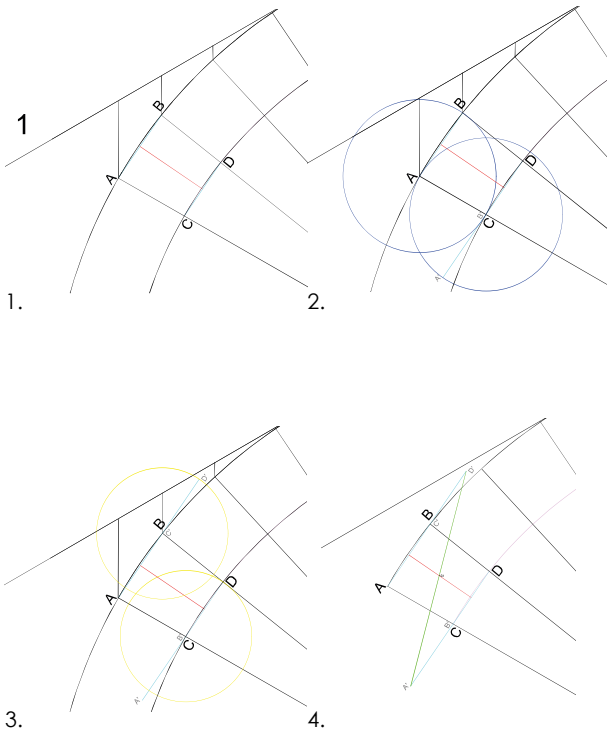


Figura 2

*fig.1: "Verifica dell'arco, verifica della curva delle pressioni con il metodo di Méry", Insegnamento di progettazione di sistemi costruttivi, Prof. Michele M. Lepore

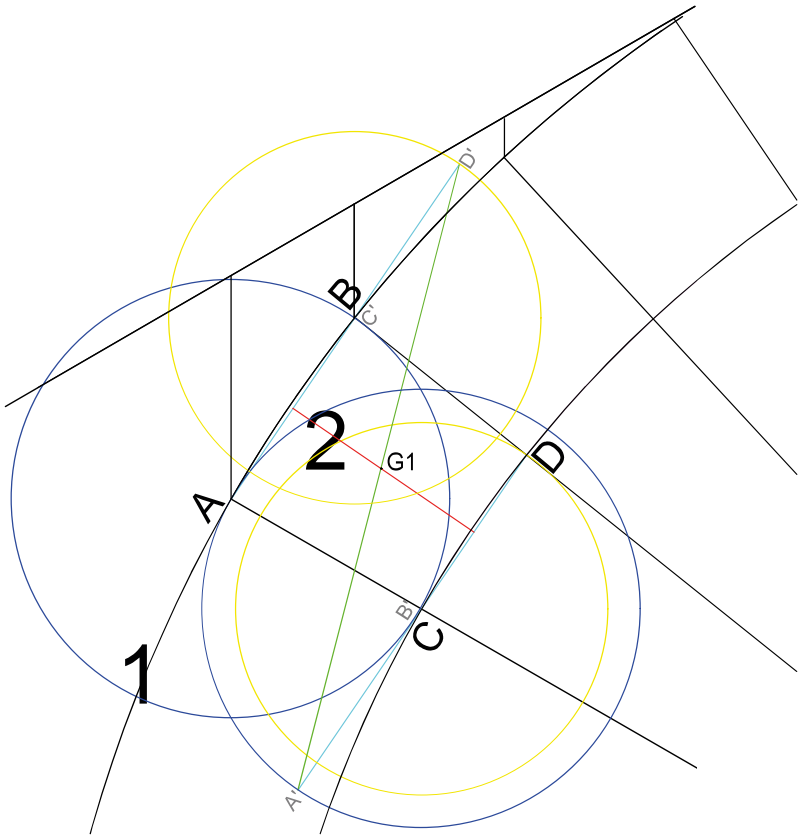


Figura 3

4.4.2 BARICENTRO DELLA SOVRASTRUTTURA DEI CONCI

La sovrastruttura che compete a ciascun concio è stata ottenuta suddividendola in 5 parti, partendo dalle reni, rispettivamente denominate con le lettere A, B, C, D, E. Ogni elemento è stato considerato un trapezio ideale.

Per determinare il baricentro di ogni trapezio si è applicato un metodo grafico (figura 4), dividendo ogni figura in due triangoli e determinando il baricentro delle mediane. Il punto d'intersezione tra il segmento G_2G_1 che congiunge i due baricentri dei triangoli, e il segmento M_1M_2 tra i medi dei segmenti del trapezio opposti, costituisce il baricentro G del trapezio (figura 5).

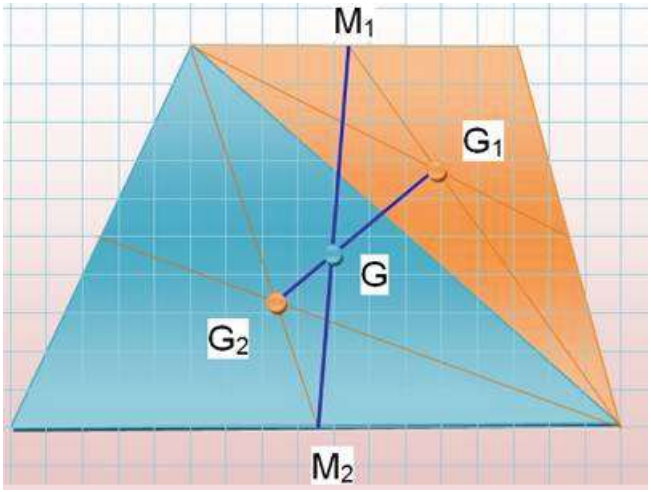


Figura 4

Prendendo come esempio il trapezio ideale A, abbiamo applicato il metodo sopra descritto.

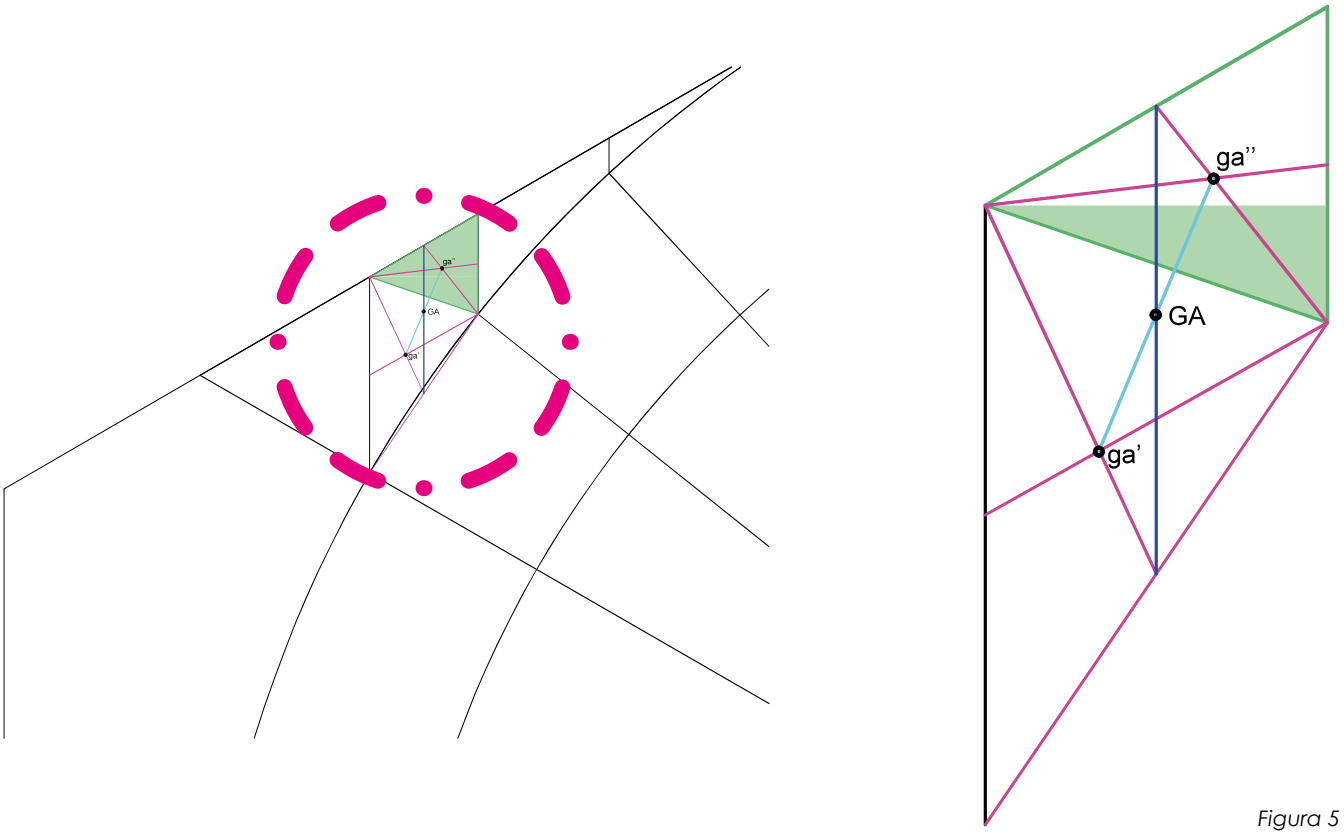


Figura 5

I punti G_1 e G_A saranno dunque i punti di applicazione delle forze peso prima determinate; più precisamente nel baricentro G_1 sarà applicata la forza peso relativa al concio 1, mentre nel baricentro G_A sarà applicata la forza peso relativa alla sovrastruttura A che compete al concio 1.

Di seguito (figura 6) sono riportati i pesi di ogni elemento soprastante i conci.

Nella pagina a fianco, in figura 7, vengono riportate le forze peso relative a ogni concio e ad ogni elemento soprastante, con punti di applicazione i rispettivi baricentri.

ELEMENTI	AREA [m^2]	PROFONDITÀ [m]	VOLUME [m^3]	DENSITÀ [kg/m^3]	Peso [kg]
A	0,107		0,128		106,548
B	0,043		0,052		43,474
C	0,010	1,2	0,012	829,04	10,445
D	0,012		0,014		12,137
E	0,047		0,056		47,056

Figura 6

4.4.3 BARICENTRO TOTALE: CONCI + SOVRASTRUTTURA

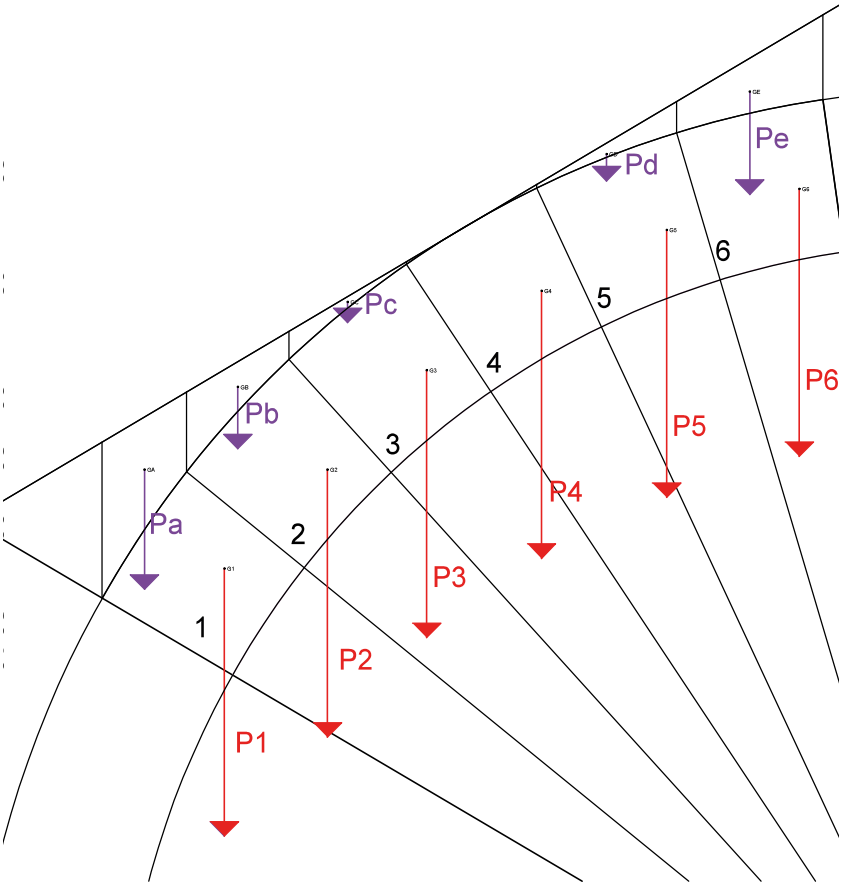


Figura 7

Successivamente è stato determinato il baricentro totale tra il baricentro relativo al concio, in cui agisce la forza peso del concio, e quello relativo all'elemento soprastante, in cui agisce la forza peso relativa all'elemento (figura 8).
In questo baricentro agisce la forza peso risultante tra le due appena citate.

Prendendo come esempio il concio 1 e il relativo elemento sovrastante A, determiniamo graficamente il baricentro G_{1a}.
La forza P_{1a} è la sommatoria della forza peso P_1 relativa al concio 1 e la forza peso P_a relativa all'elemento A (figure 9 e 10).

Considerate le ridotte dimensioni del sovraccarico relativo al concio 4, il suo peso proprio è stato considerato nullo. Dunque la forza peso risultante coincide con il peso proprio del concio.
Per determinare la curva delle pressioni bisogna determinare la reazione Q e la spinta dell'arco S.

4.5 DETERMINAZIONE DELLA RISULTANTE

Note le risultanti del peso dei singoli conci e la relativa sovrastruttura, è stata determinata graficamente la risultante del carico verticale applicato sommando i vettori con il metodo punta coda.
Scelto un polo arbitrario P, sono state tracciate le congiungenti ai vertici di ciascun vettore da P_{6e} a P_{1a} (figura 11 e 12) sono state tracciate le rette d'azione di ciascuna forza peso, da P_{6f} a P_{1a}, riportando le rette delle congiungenti il polo P con i vertici dei vettori P_{6f}-P_{1a}, fino a incontrare le rette d'azione delle forze peso. Tramite la spezzata ottenuta si è potuta individuare

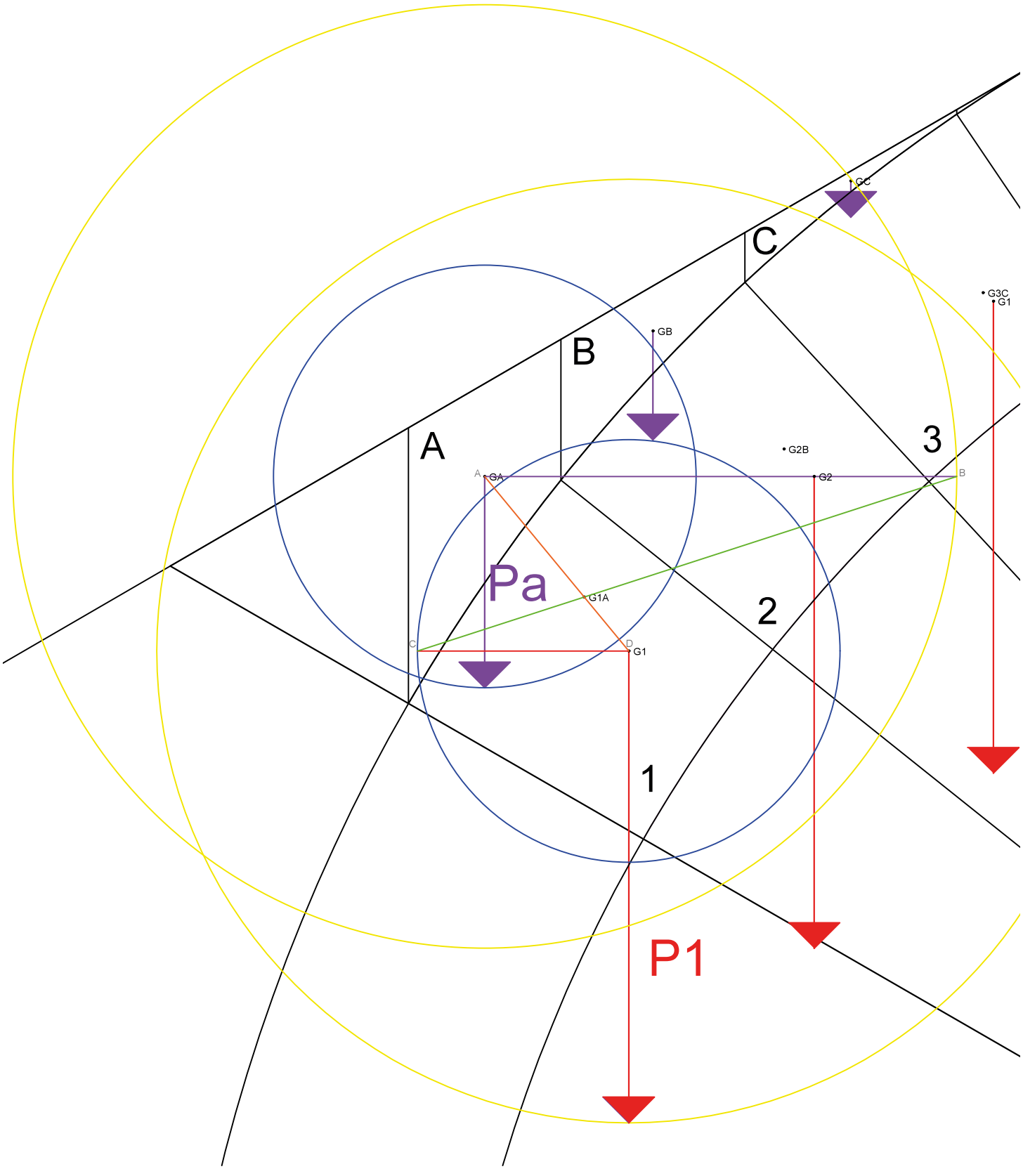


Figura 8

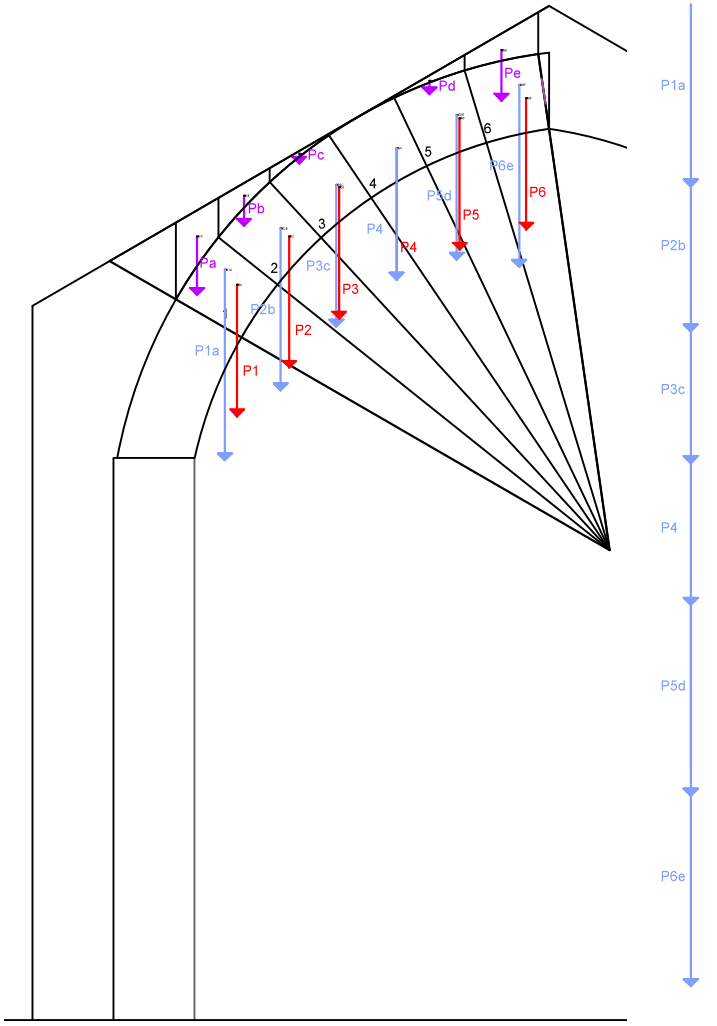


Figura 9

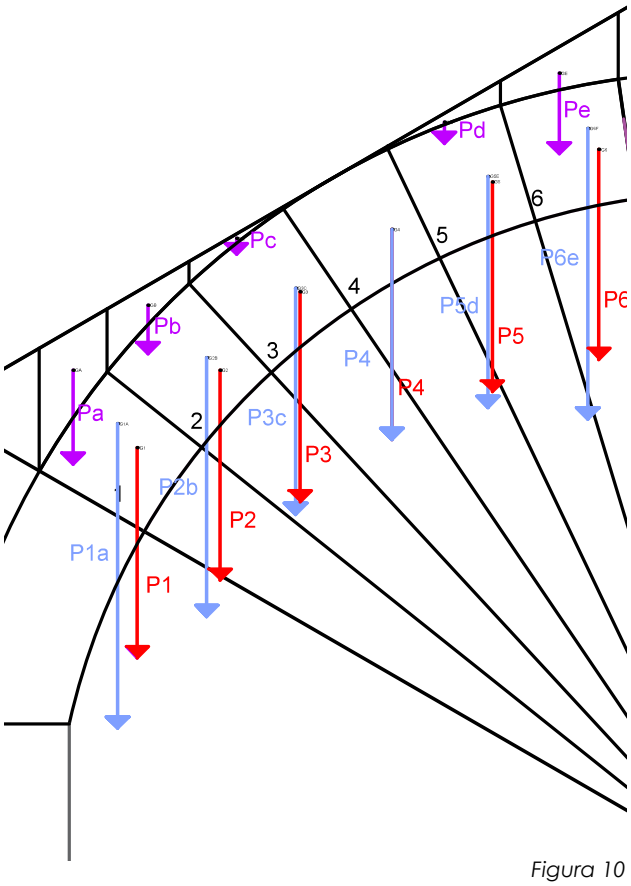


Figura 10

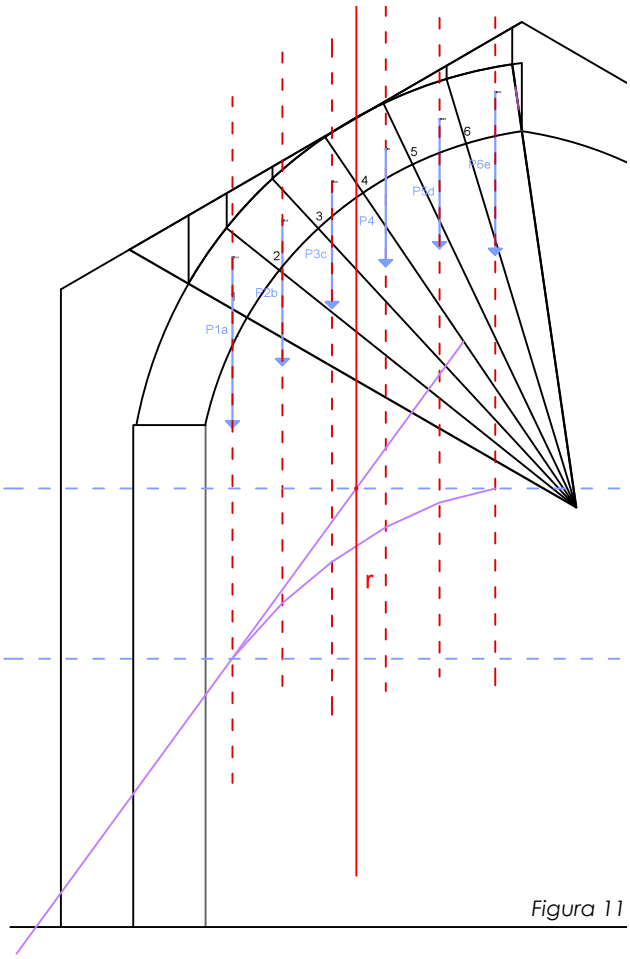


Figura 11

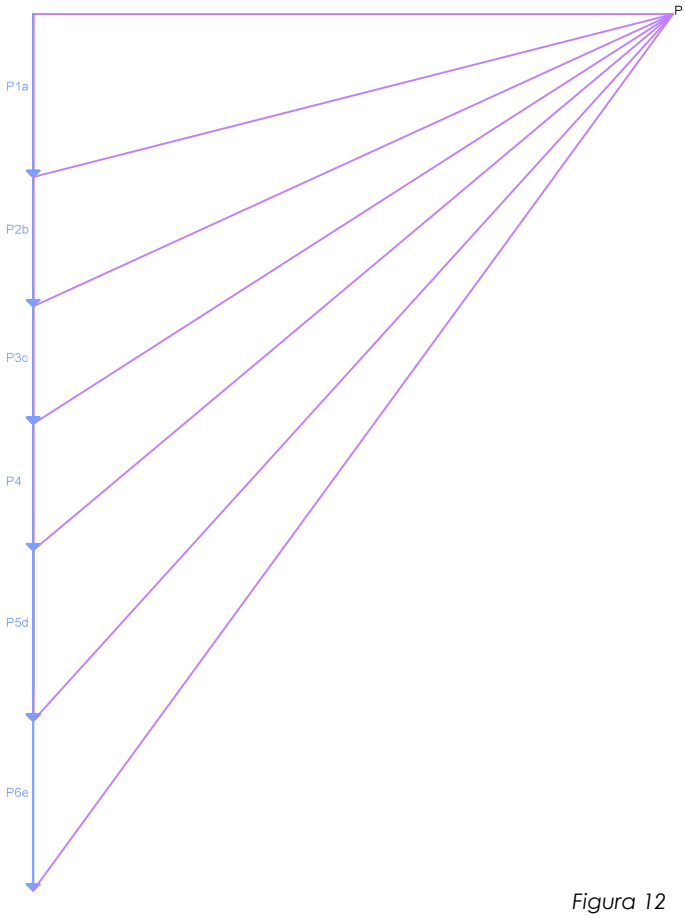


Figura 12

la retta d'azione della risultante R.

4.6 DETERMINAZIONE DI SPINTA E REAZIONE

Nota la risultante R, abbiamo potuto determinare la retta d'azione della spinta S, imponendo il passaggio di tale retta per il terzo medio superiore della sezione alle reni e per l'intersezione tra la retta d'azione della risultante e la retta d'azione della reazione in chiave Q (figure 13, 14 e 15).

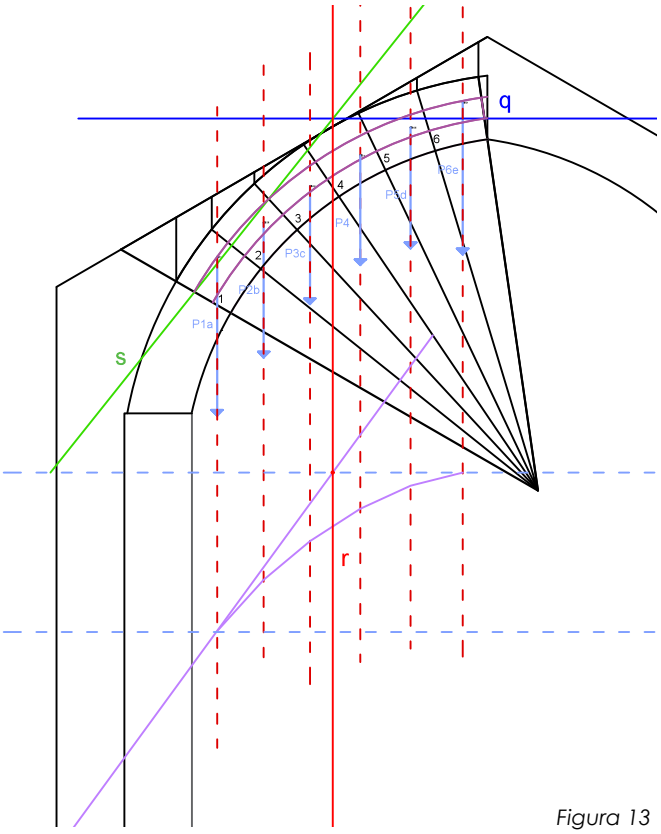


Figura 13

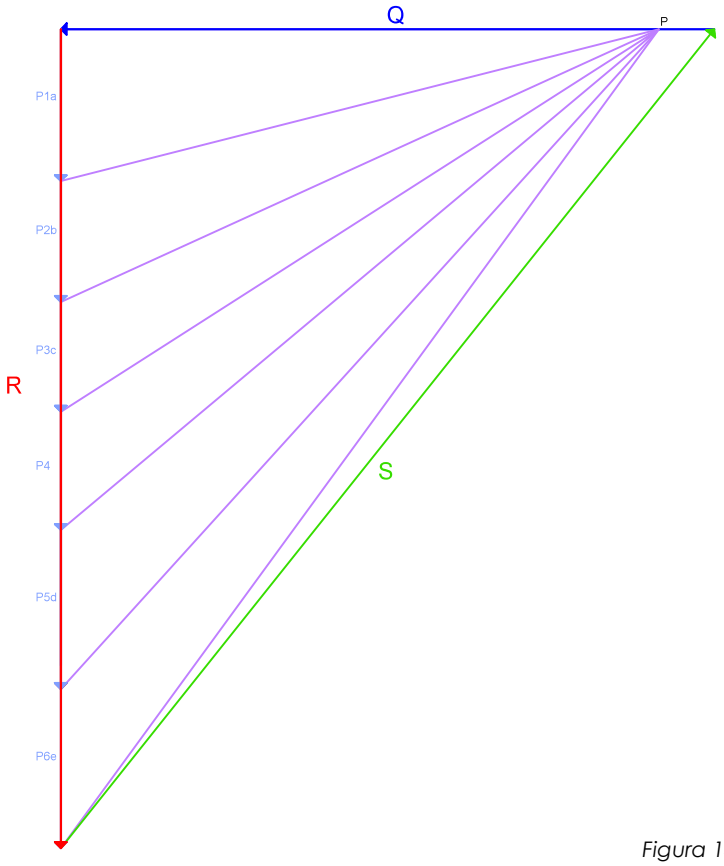


Figura 14

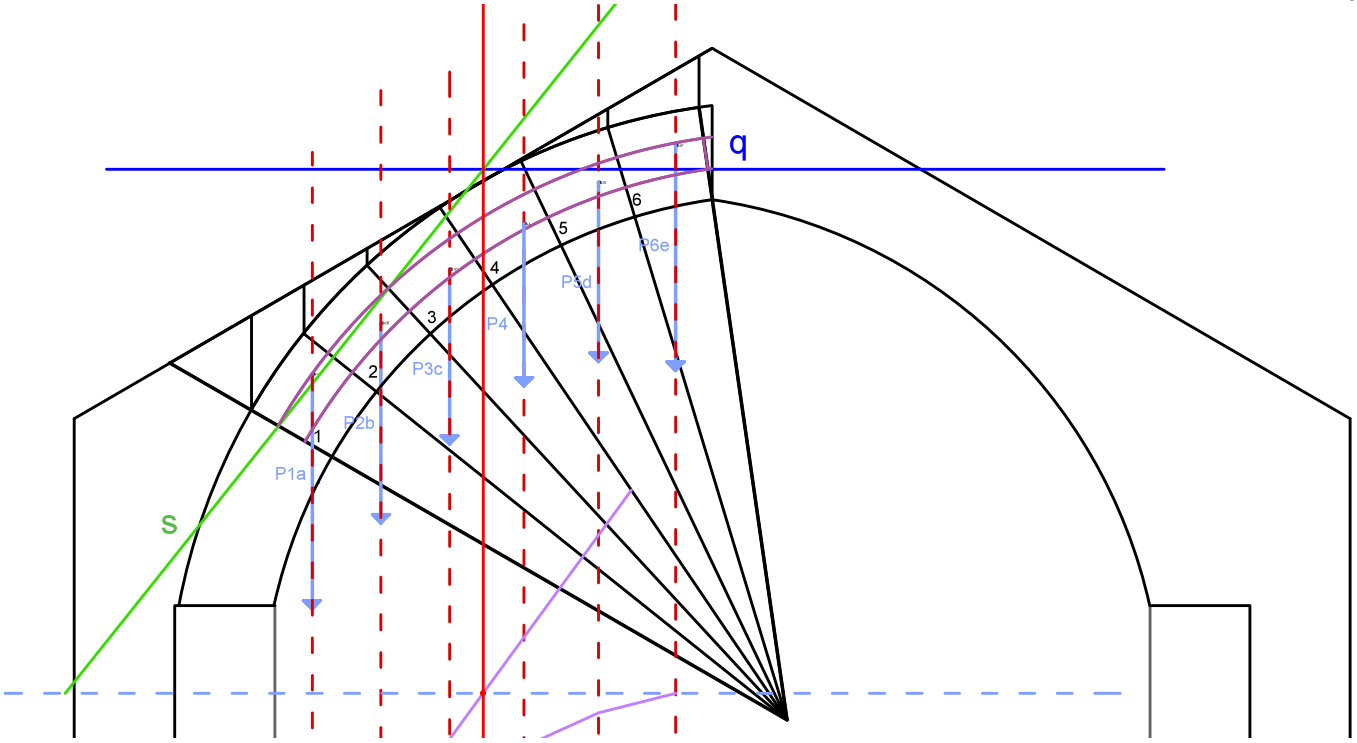


Figura 15

4.7 TRACCIAMENTO DELLA CURVA DELLE PRESSIONI

A questo punto è stato possibile individuare il polo P', individuato dalla retta d'azione della forza Q e della spinta S.
Tracciando le rette congiungenti il polo P' con i vertici dei vettori delle forze peso, abbiamo tracciato la curva delle pressioni (figura 16).

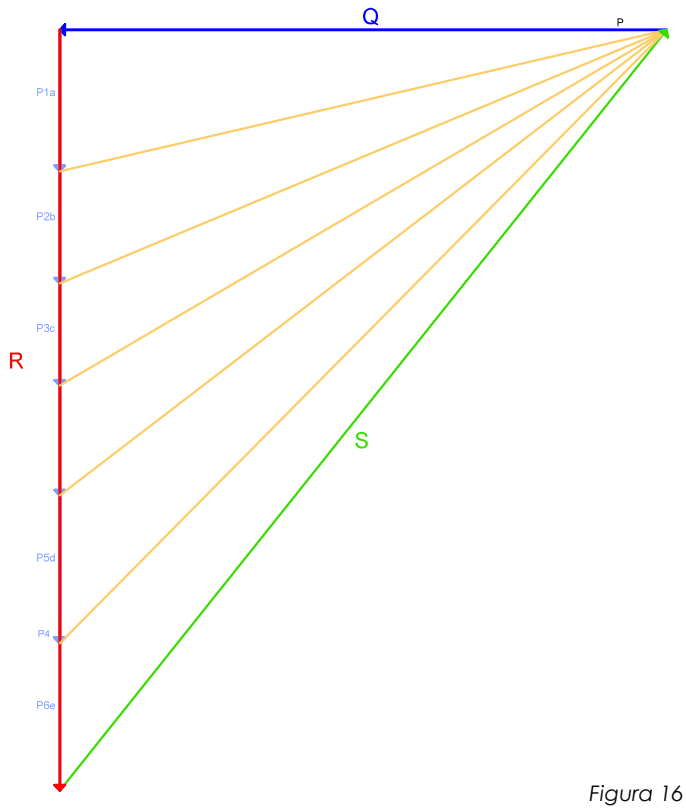


Figura 16

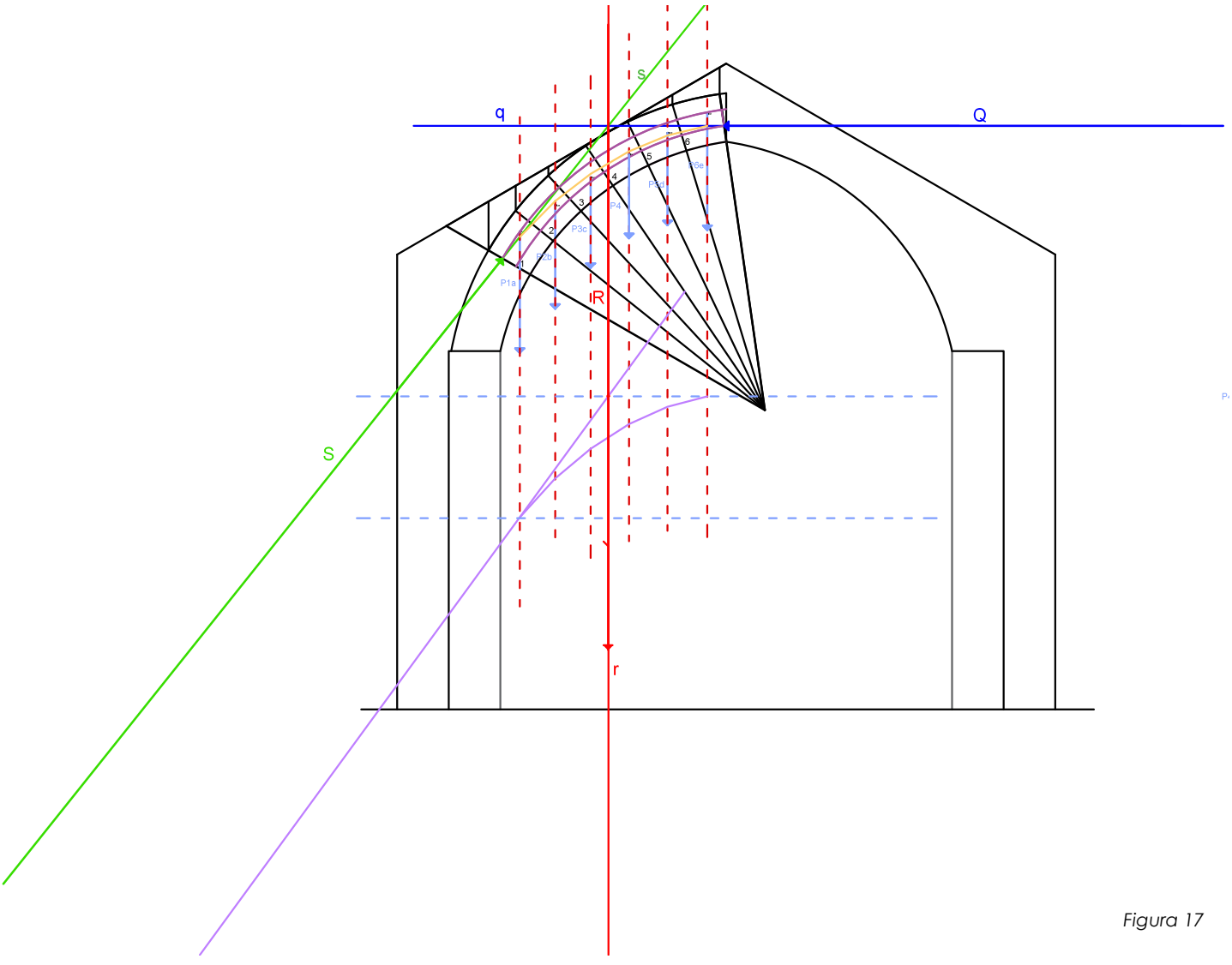


Figura 17

4.8 CONCLUSIONI

Dalle figure 18 e 19 si evince che la curva delle pressioni è contenuta nel nocciolo centrale d'inerzia dell'arco, questo è dunque interamente compresso, senza alcuna zona sollecitata a trazione.

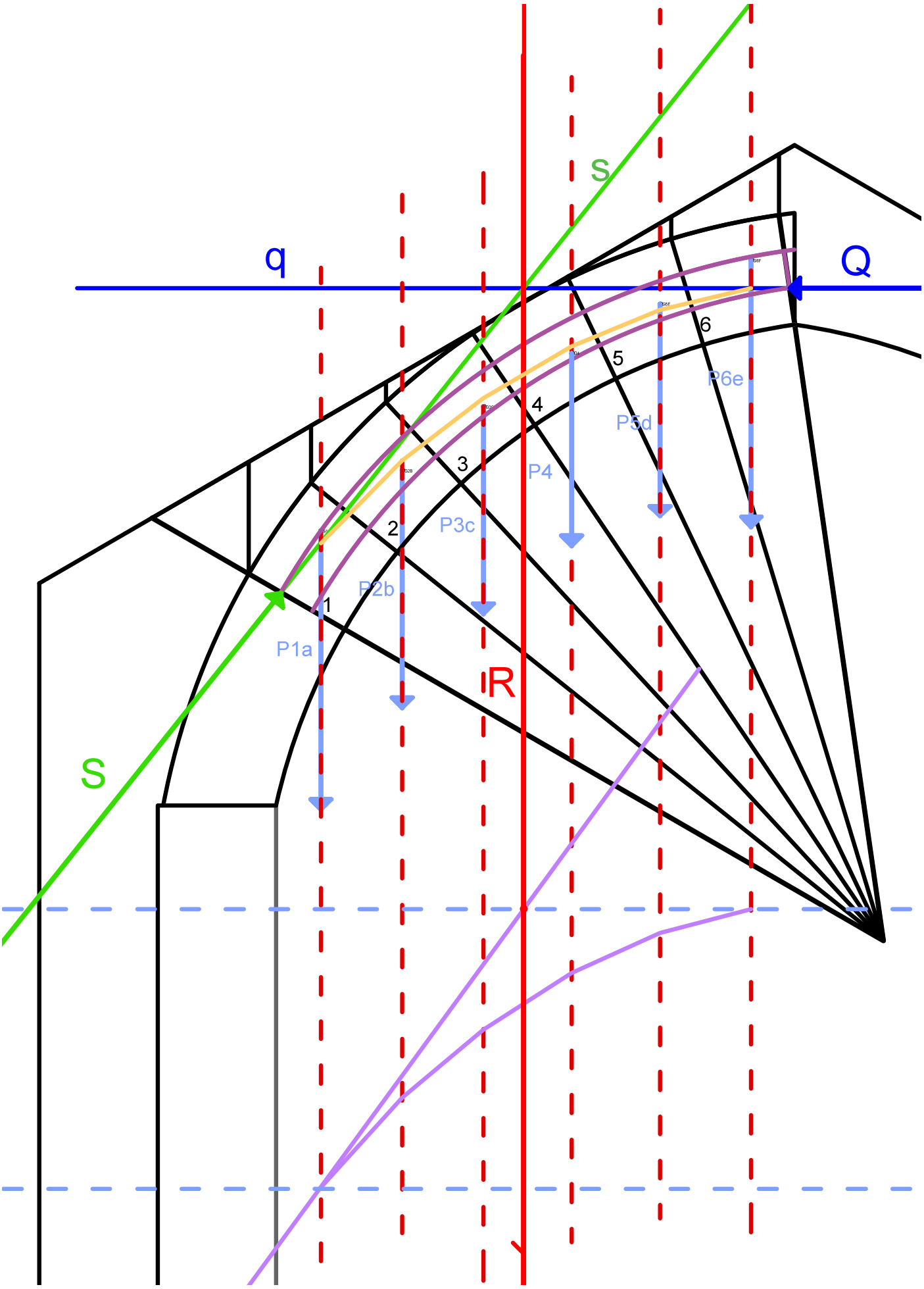


Figura 18

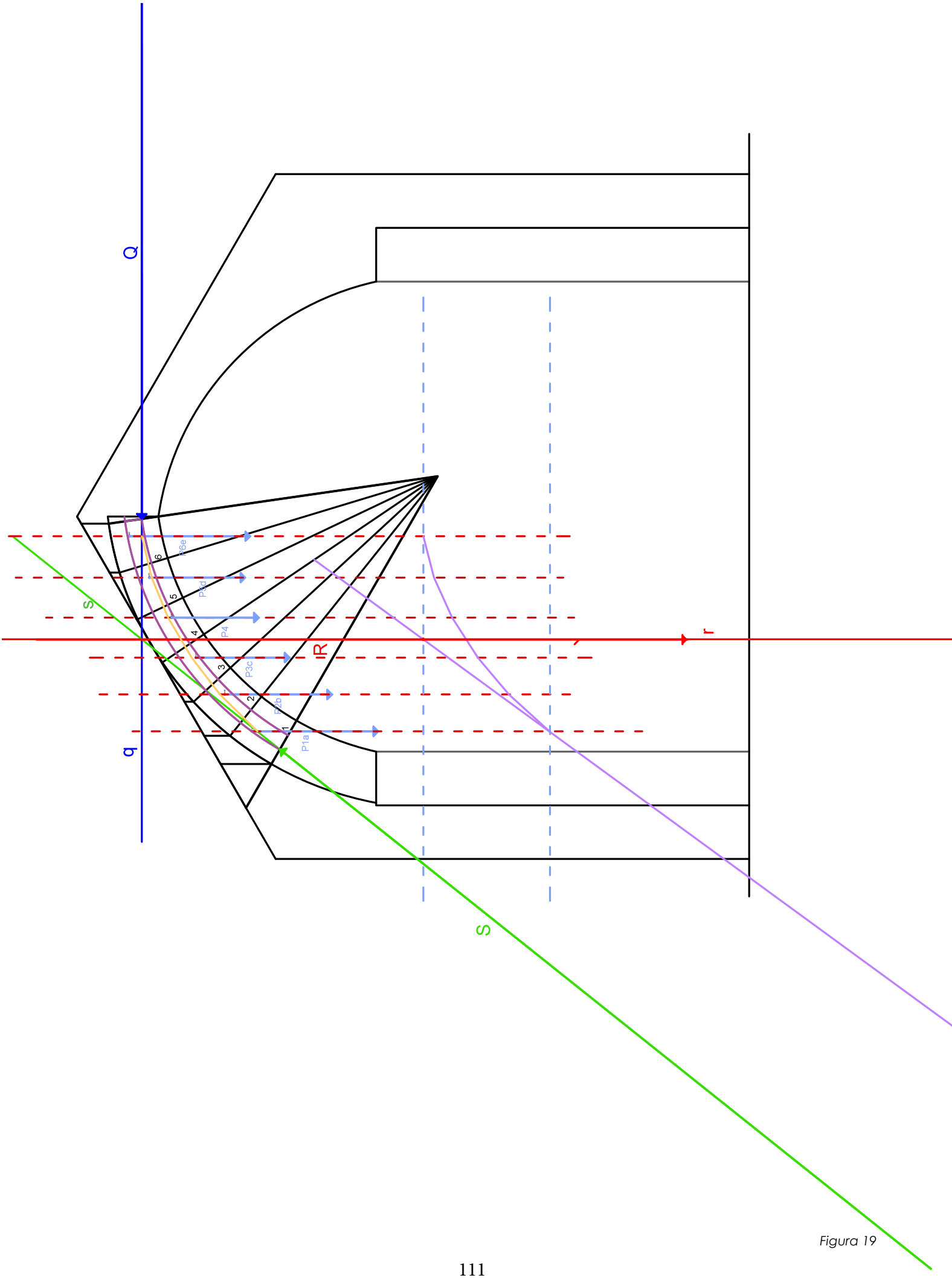
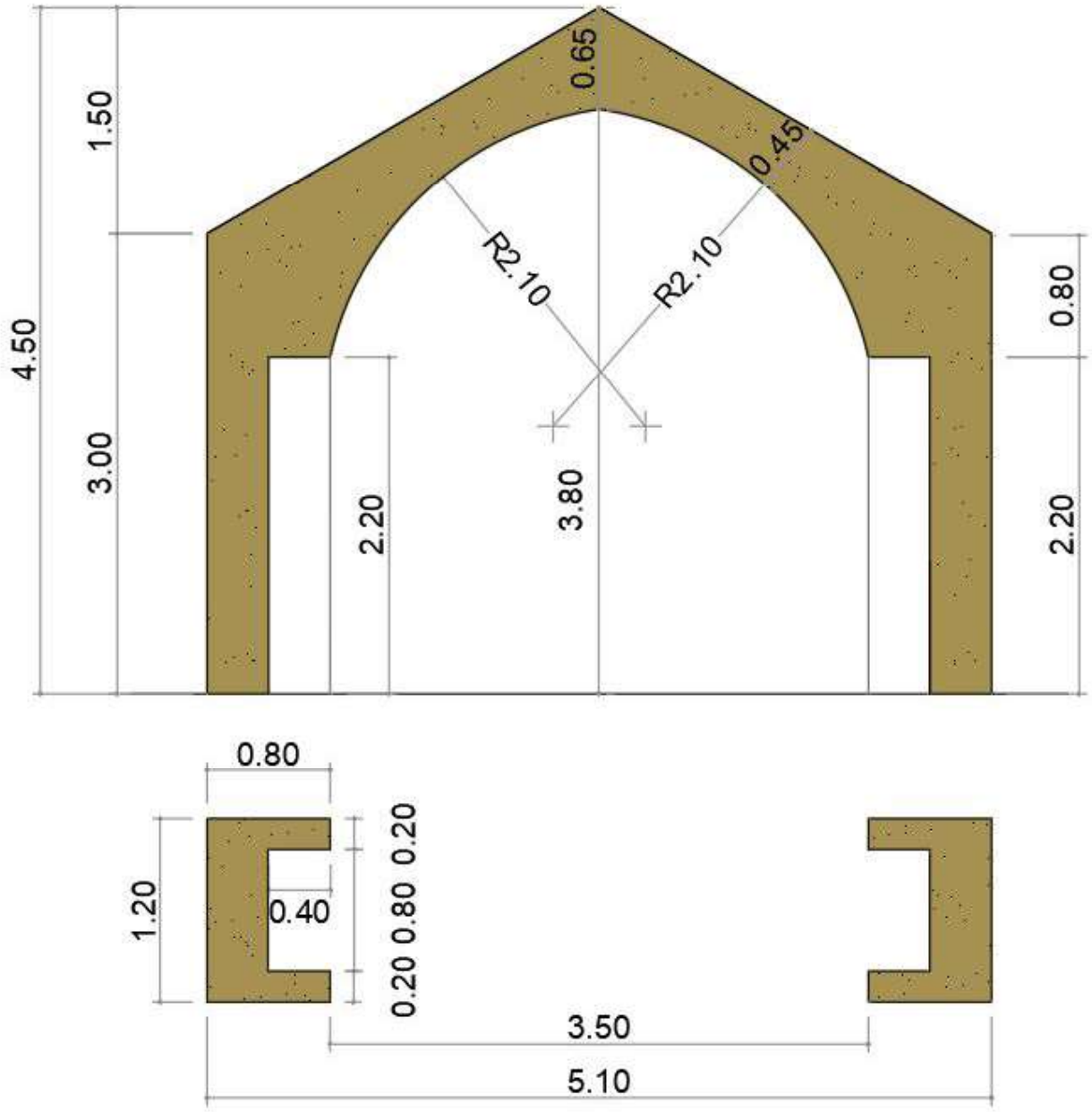


Figura 19

4.9 IPOTESI 2



Pianta e prospetto

Figura 20

Rispetto all'arco analizzato nel caso precedente, la forma sopra riportata (figura 20) presenta un'altezza minore e uno spessore maggiore, risultando, nel complesso, una struttura meno snella.

Secondo la stessa metodologia impiegata per il caso precedente, è stata eseguita la verifica statica dell'arco sopra raffigurata.

Sono stati calcolati i pesi propri dei conci e degli elementi sovrastanti, la risultante e il baricentro di applicazione di questa (figure 21 e 22).

PESO E BARICENTRO

CONCI	AREA [m²]	PROFONDITÀ [m]	VOLUME [m³]	DENSITÀ [kg/m³]	PESO [kg]
1	0,147	1,2	0,176	829,04	146,640
2	0,147		0,176		146,640
3	0,147		0,176		146,640
4	0,147		0,176		146,640
5	0,147		0,176		146,640
6	0,147		0,176		146,640

Figura 21

ELEMENTI	AREA [m²]	PROFONDITÀ [m]	VOLUME [m³]	DENSITÀ [kg/m³]	PESO [kg]
A	0,0607	1,2	0,07284	829,04	60,3872736
B	0,0327		0,03924		32,5315296
C	0,0094		0,01128		9,3515712
D	0,0133		0,01596		13,2314784
E	0,0513		0,06156		51,0357024

Figura 22

CURVA DELLE PRESSIONI

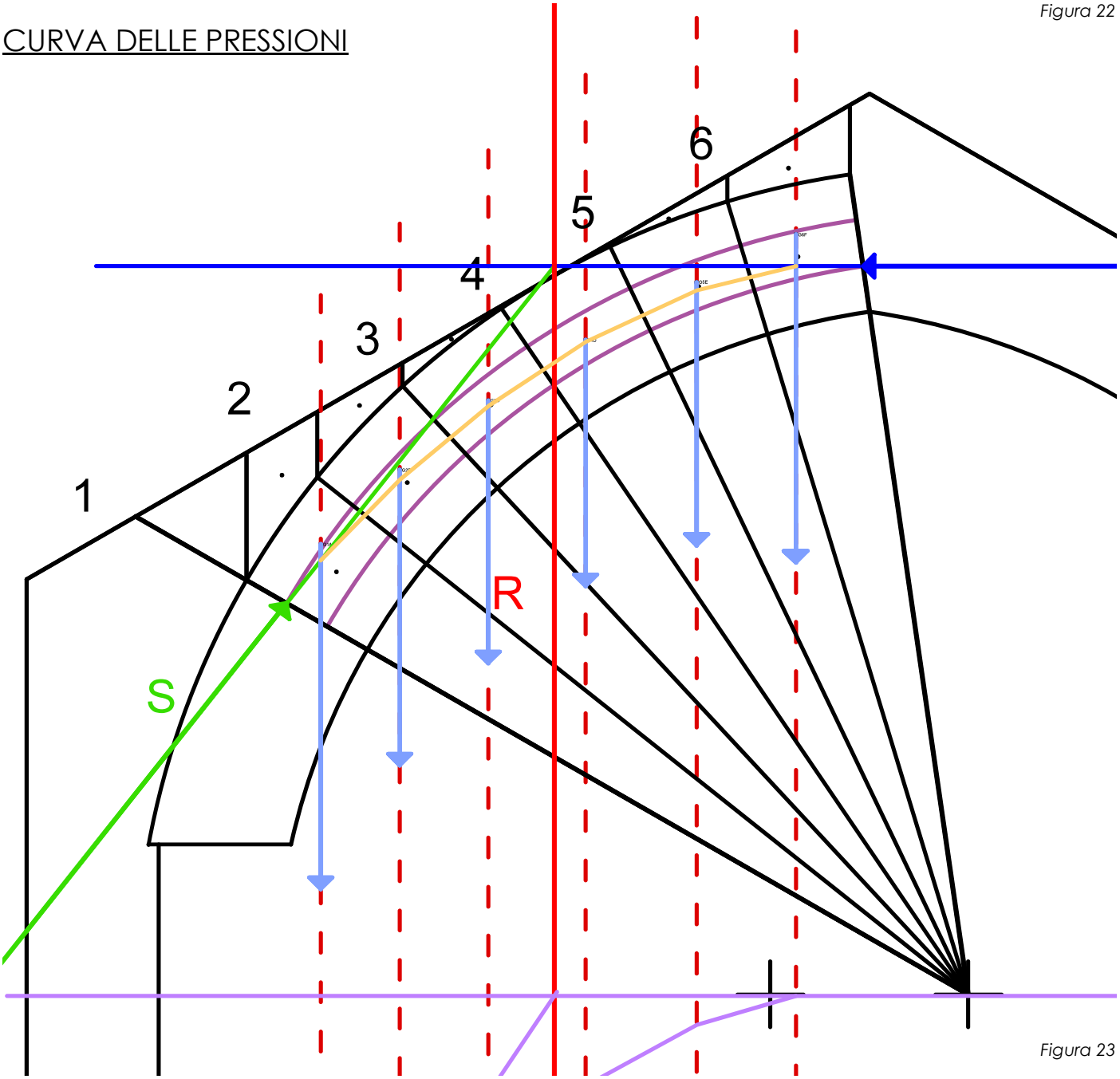


Figura 23

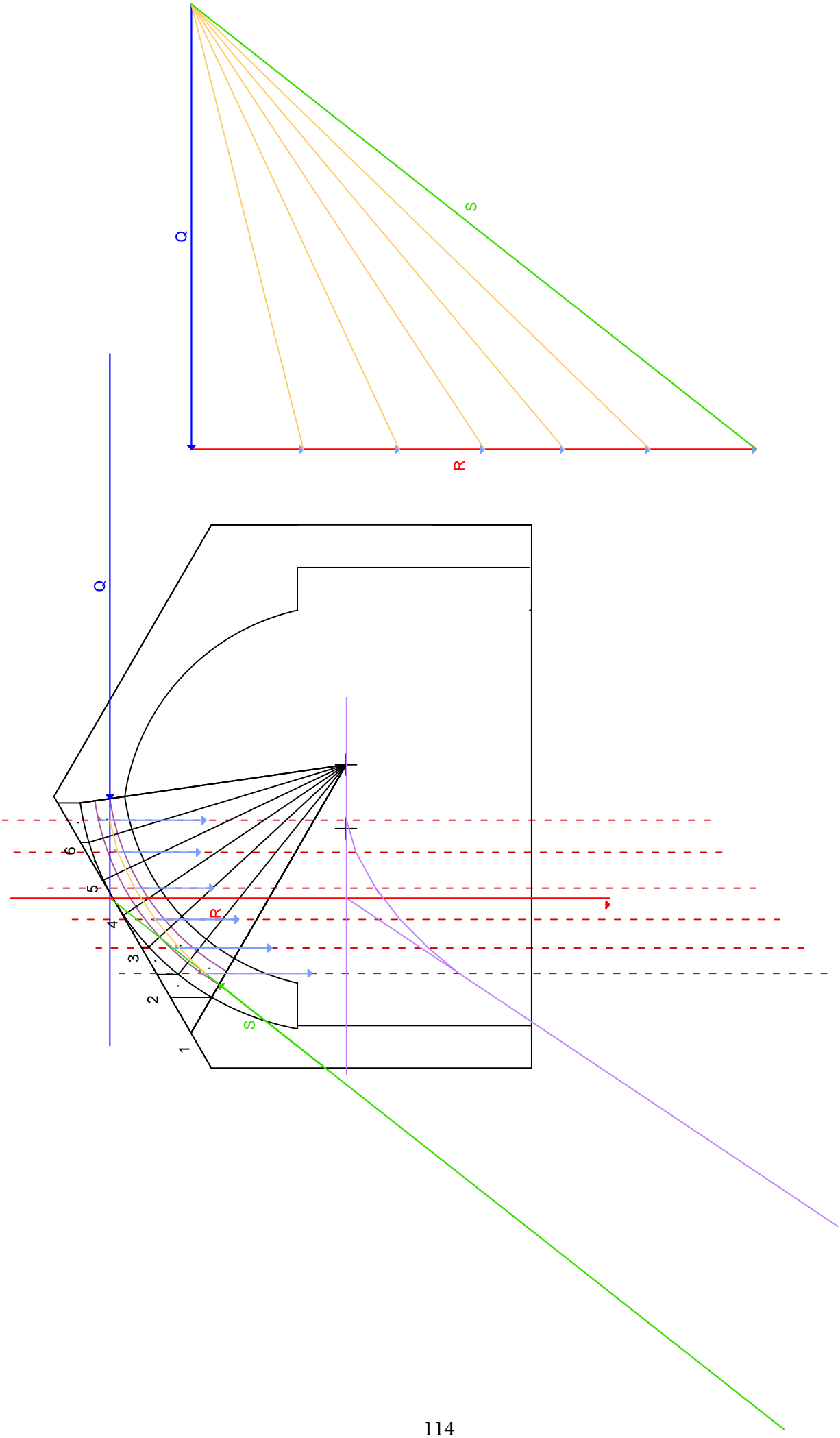


Figura 24

CONCLUSIONI

Dalle figure 23 e 24 si evince che la curva delle pressioni è contenuta nel nocciolo centrale d'inerzia dell'arco, questo è dunque interamente compresso, senza alcuna zona sollecitata a trazione.

5. IPOTESI DI COSTRUZIONE CON MATTONI

5.1 Introduzione

5.2 Pianta

5.3 Vista assonometrica

5.4 Corso A
- 5.4.1 Vista assonometrica
- 5.4.2 Composizione

5.5 Corso B
- 5.5.1 Vista assonometrica
- 5.5.2 Composizione

5.6 Tabella quantità

5.7 Conclusioni

6. COMPUTO

6.1 Introduzione

6.2 Procedimento

6.3 Conclusioni

5. IPOTESI DI COSTRUZIONE CON MATTONI

5.1 INTRODUZIONE

Considerata la possibilità di produzione di mattoni in calce-canapa tramite la pressa manuale Altech, e considerati i buoni valori di resistenza ottenuti dalle prove a compressione, è stato ipotizzato di impiegarli per la costruzione dei piedritti dell'arco in calce-canapa.
Partendo dal prototipo sviluppato da David Lea (figura 1), e mantenendo le grandezze da lui proposte, abbiamo ipotizzato una disposizione dei mattoni, secondo 2 corsi differenti che, ripetendosi, non creassero punti di debolezza.

Un altro fattore che è ha influito sulla scelta della disposizione dei mattoni è stata la possibilità di taglio di questi ultimi: pensando a una realizzazione del prototipo il più accessibile e semplificata possibile, abbiamo cercato di ridurre la difficoltà di taglio del materiale definendo 4 misure di mattoni che si ripetessero, riutilizzando gli eventuali pezzi di risulta.

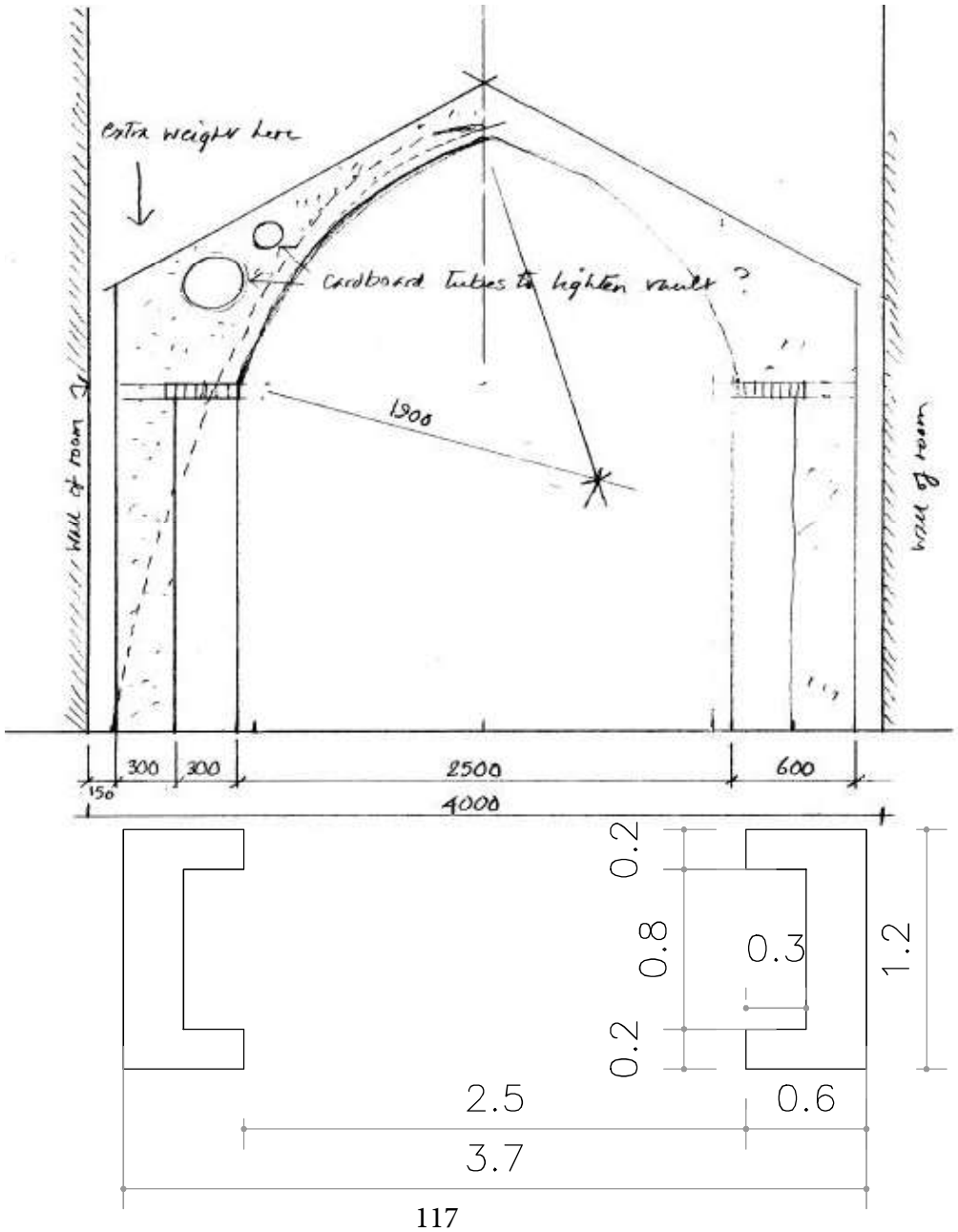
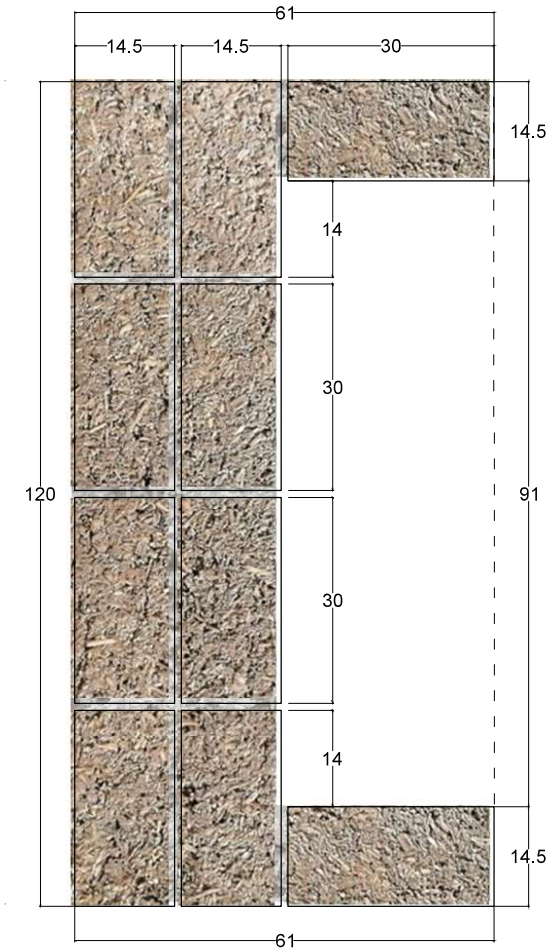
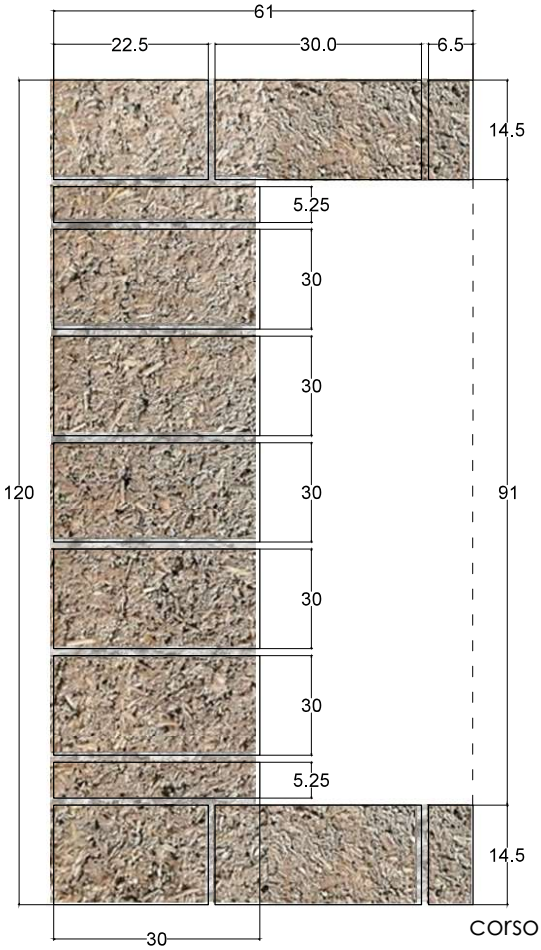


Figura 1

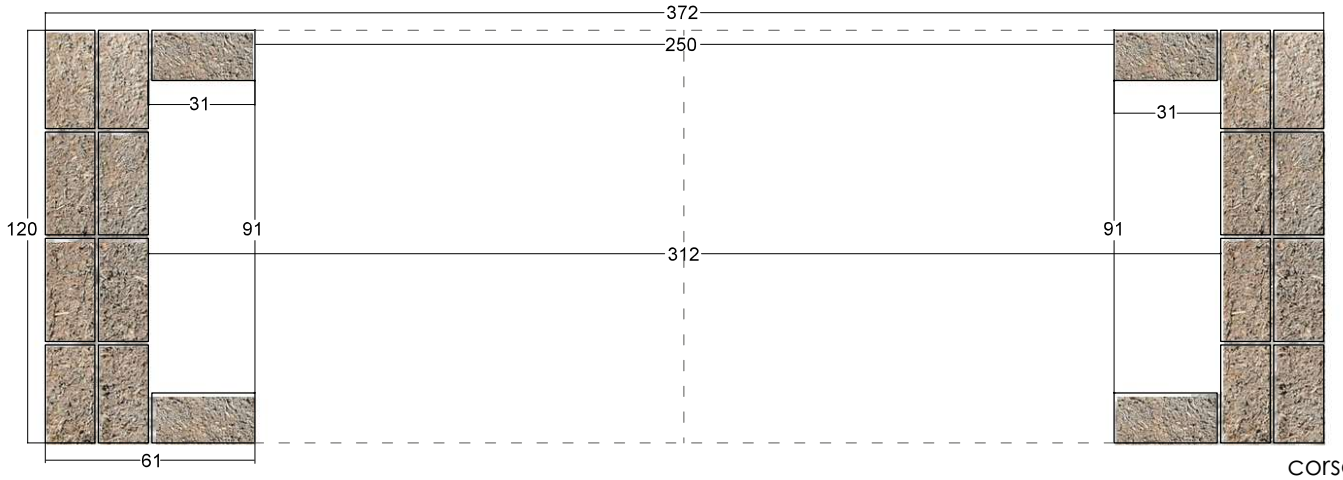
5.2 PIANTA



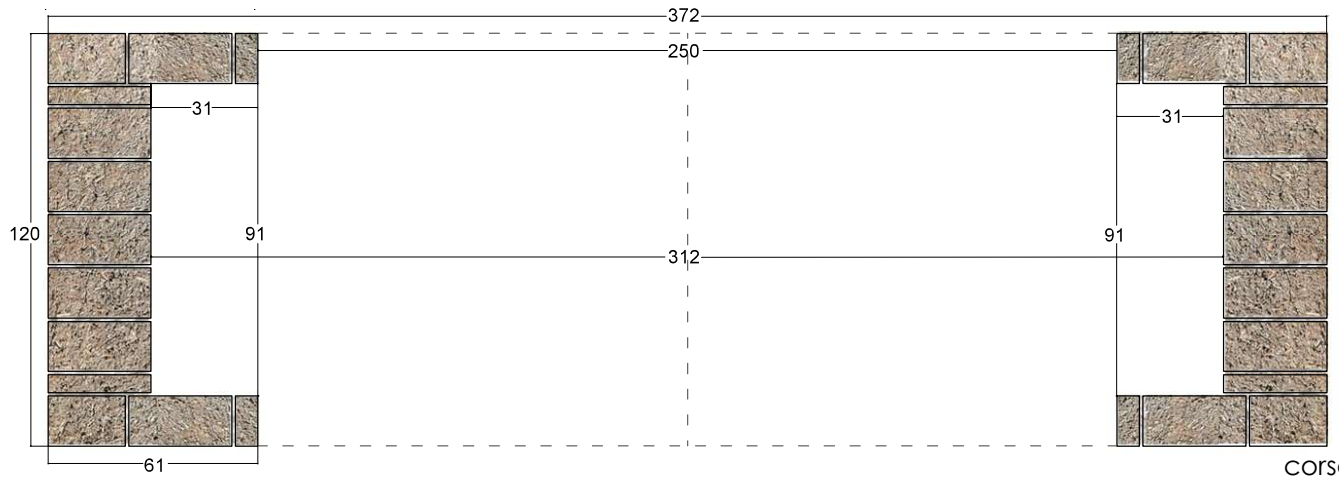
corso A



corso B

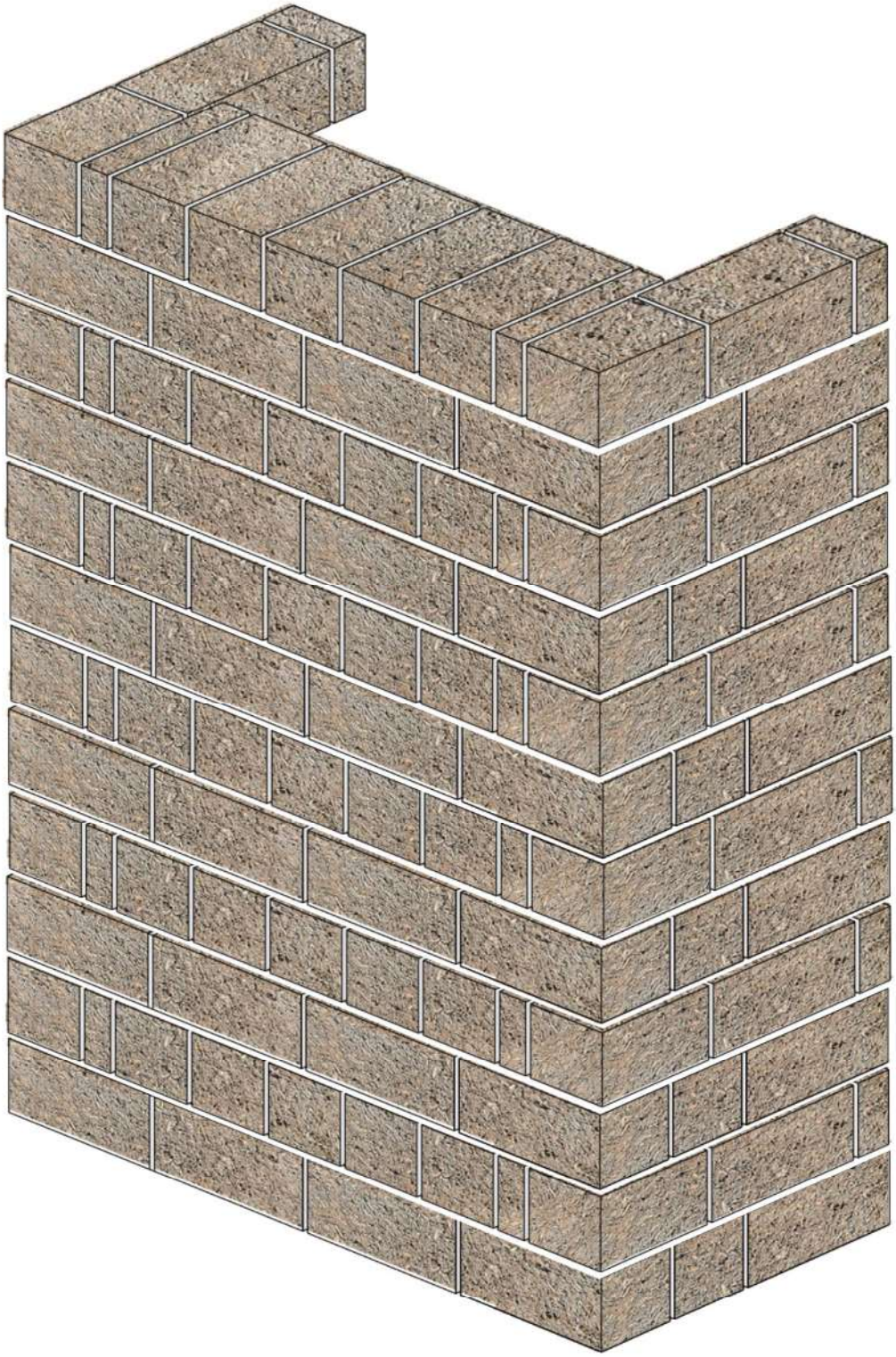


corso A



corso B

5.3 VISTA ASSONOMETRICA

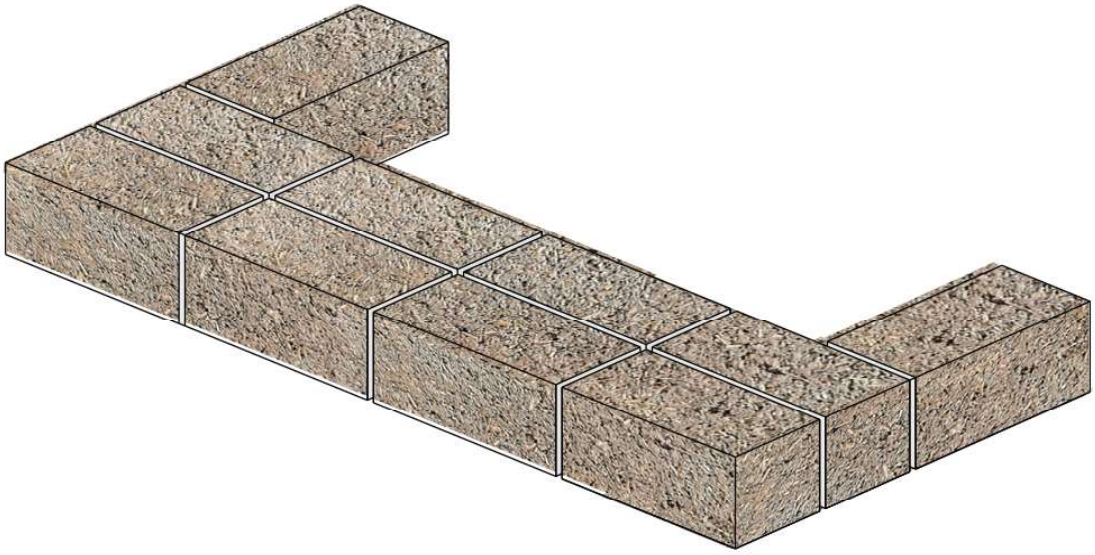


corso A + corso B

Considerando l'altezza del piedritto di 160 cm, ed essendo l'altezza di ogni corso pari all'altezza standard di un mattone, ovvero 12 cm, considerando anche lo spessore del legante tra un corso e l'altro, di circa 1,5 cm, sarebbero necessari circa 12 corsi, ripetendo A e B.

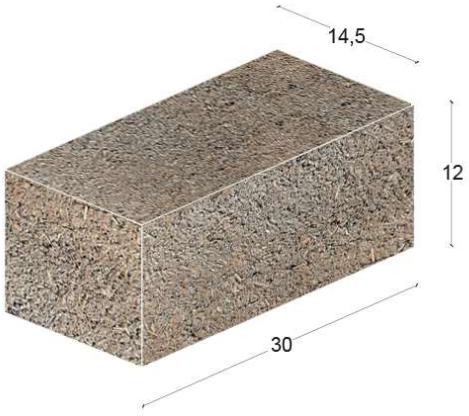
5.4 CORSO A

5.4.1 VISTA ASSONOMETRICA



5.4.2 COMPOSIZIONE

Mattone Standard

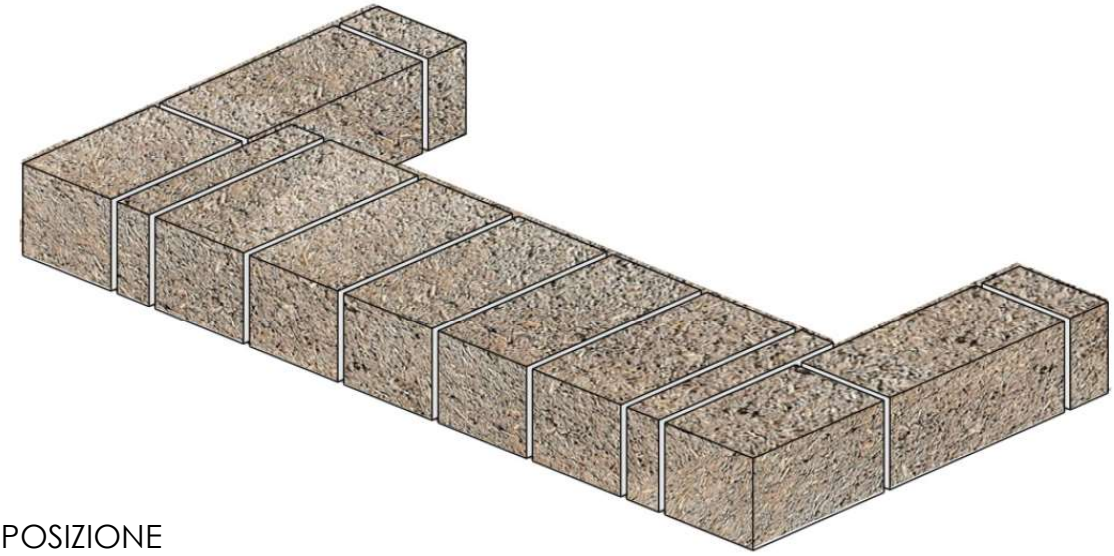


Il corso A è composto da 10 mattoni di misura standard, che non necessitano di tagli.

Considerando che il corso A si ripete per 6 volte, sono necessari 60 mattoni di dimensioni standard per ogni piedritto, dunque in totale 120 mattoni.

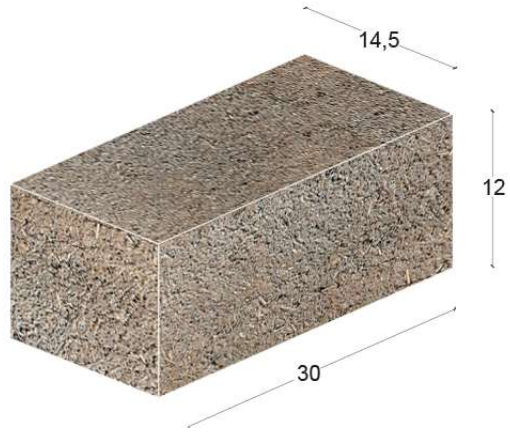
5.5 CORSO B

5.5.1 VISTA ASSONOMETRICA



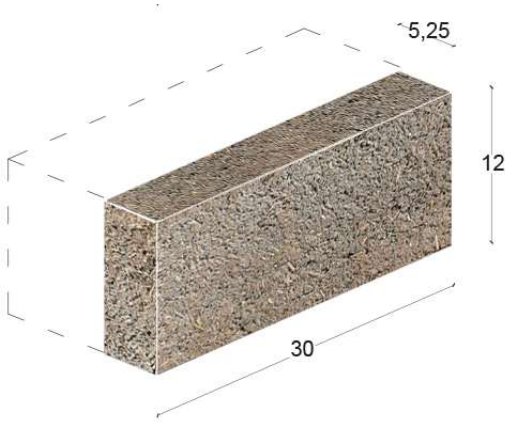
5.5.2 COMPOSIZIONE

Mattone Standard



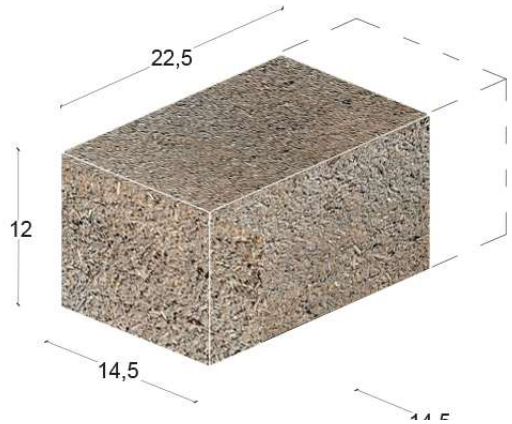
Il Corso B è composto da 7 mattoni standard e altri 3 formati che si possono ricavare dalla prima tramite tagli.
Considerando che il Corso B si ripete per 6 volte, sono necessari 42 mattoni di dimensioni standard per ogni piedritto, dunque in totale 84 mattoni.

Formato 1



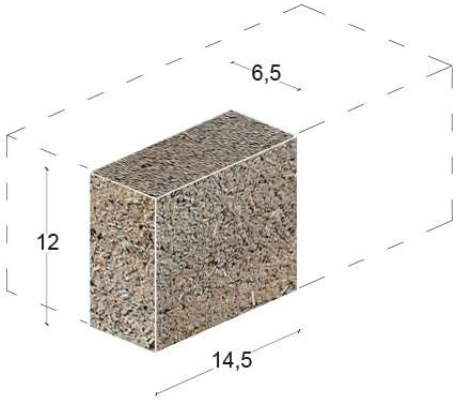
Il formato 1 si ripete per 2 volte. In totale dunque 24 mattoni. Considerando che da ogni mattone standard se ne possono ricavare 4 (preparati inizialmente con materiale ancora fresco, in quanto viste le ridotte dimensioni risulta difficile il taglio in loco) del formato 1, andranno prodotti 6 mattoni standard.

Formato 2



Il formato 2 si ripete per 2 volte. In totale dunque 24 mattoni. Considerando che da ogni mattone standard se ne può ricavare uno del formato 2, andranno prodotti *24* mattoni standard.

Formato 3

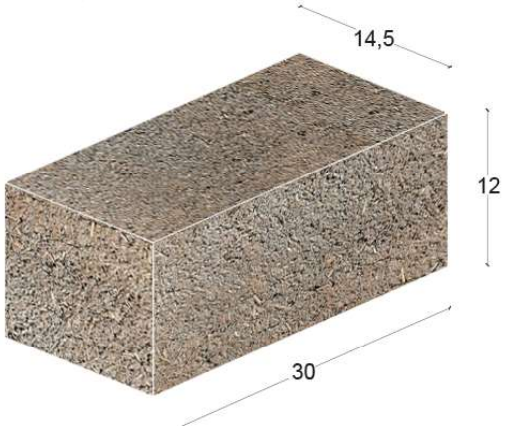


Il formato 3 si ripete per 2 volte. In totale dunque 24 mattoni.

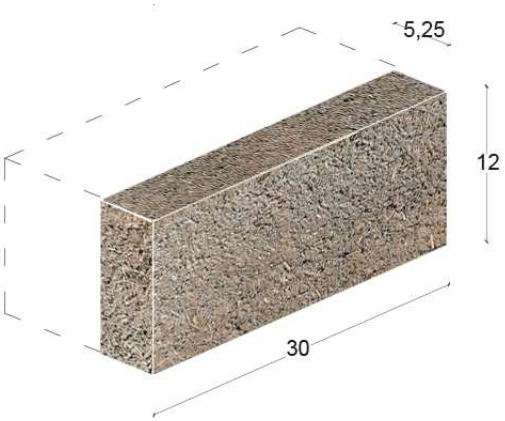
Con il taglio di un mattone standard utilizzato per produre un mattone di formato 2, si può produrre un mattone di formato 3.

Quindi con il taglio di 24 mattoni standard, si otterranno tutti i 24 mattoni di formato 3 necessari.

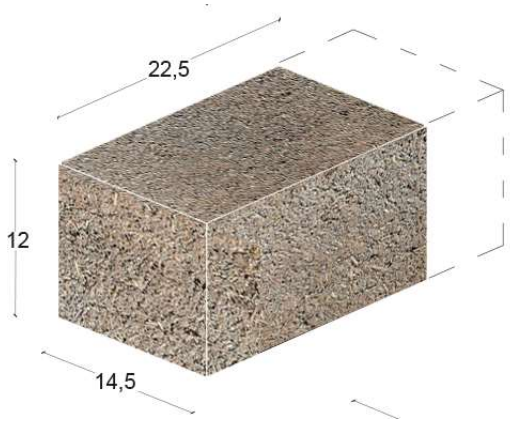
5.6 TABELLA QUANTITÀ

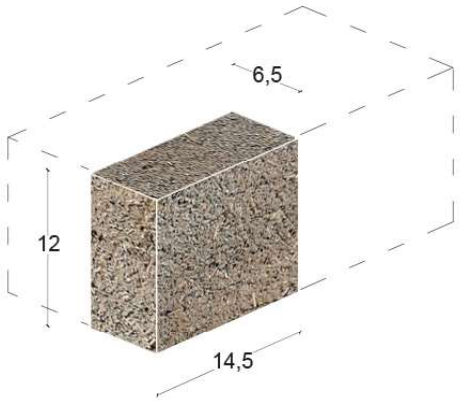


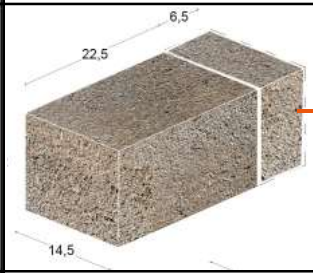
CORSO	A	B
QUANTITÀ/CORSO	10	7
n. CORSI	7	6
TOT/PIEDRITTO	140	84
TOTALE	224	
TAGLIO	Nessuno - intero mattone	
TOTALE STANDARD	224	



CORSO	A	B
QUANTITÀ/CORSO	0	2
n. CORSI	7	6
TOT/PIEDRITTO	0	24
TOTALE	24	
TAGLIO		
TOTALE STANDARD	12	





CORSO	A	B
QUANTITÀ/CORSO	0	2
n. CORSI	7	6
TOT/PIEDRITTO	0	24
TOTALE	24	
TAGLIO		
TOTALE STANDARD	24	

CORSO	A	B
QUANTITÀ/CORSO	0	2
n. CORSI	7	6
TOT/PIEDRITTO	0	24
TOTALE	24	
TAGLIO	Pezzo di risulta 	
TOTALE STANDARD	0	

5.7 CONCLUSIONI

In totale i mattoni di tipo standard da produrre sono 224+12+24, ovvero 260.

Considerando le dimensioni 14,5x12x30 cm, il volume di ogni mattone risulta essere di 5220 cm^3 (5,220 dm^3).

Per ogni mattone sono necessari quindi 5,2 L di materiale.

Considerando il numero totale di mattoni, servirebbero 1352 L di impasto.

Per produrre 6 mattoni delle stesse dimensioni sono stati utilizzati:

- 25 L di canapulo
- 10 L di calce idraulica NHL 3.5
- 4 L di cemento bianco
- 1,5 L di pozzolana
- 8,5 L di acqua

Per la produzione di 260 mattoni sarebbero necessari circa:

- 5637,5 L di canapulo
- 2255 L di calce idraulica NHL 3,5
- 902 L di cemento bianco
- 338,5 L di pozzolana
- 1917 L di acqua

Oltre a un fabbisogno di manodopera e materiale, si pone un'altra questione: l'asciugatura dei mattoni. Come abbiamo visto, i campioni mattone sono stati fatti asciugare in ambiente interno per circa 2 mesi. Bisognerebbe dunque trovare uno spazio in cui poterli conservare. Questo richiederebbe anche l'ulteriore organizzazione del trasporto.

Siamo giunti dunque alla conclusione che l'ipotesi di costruire la volta in mattoni potrebbe essere interessante visti gli ottimi risultati ottenuti alle prove, ma richiederebbe un'organizzazione di produzione e logistica molto più complessa.

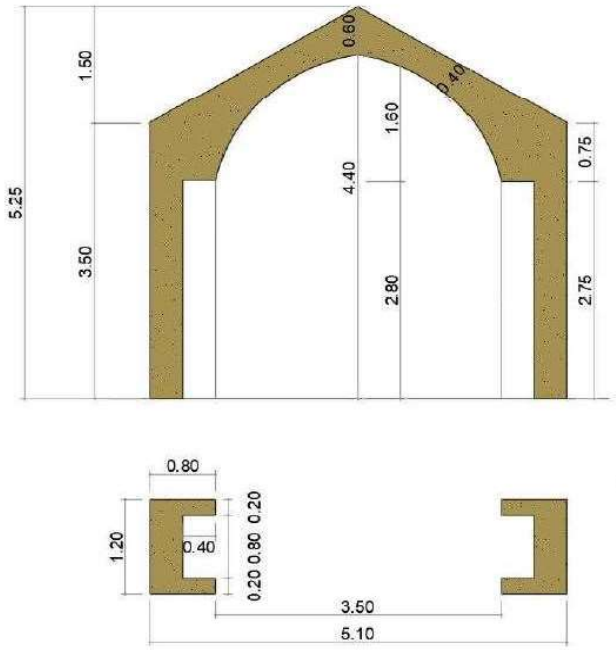
Procederemo quindi con la costruzione della volta tramite getto in calce canapa.

6. COMPUTO

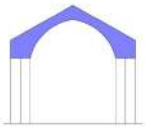
6.1 INTRODUZIONE

Considerando le due ipotesi esaminate tramite la curva delle pressioni, abbiamo calcolato il materiale necessario per la realizzazione di ognuna, per verificare quale fosse la meno dispendiosa.

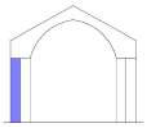
IPOTESI 1



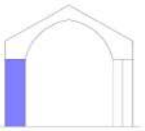
DIMENSIONI	
Profondità totale	1,2
Profondità parziale	0,2
	0,8



AREA [m²]	3,5507
VOLUME [m³]	4,26084
n componenti	1



AREA [m²]	1,1102
VOLUME [m³]	0,88816
n componenti	2
VOLUME TOT [m3]	1,77632



AREA [m²]	2,2204
VOLUME [m³]	0,44408
n componenti	4
VOLUME TOT [m3]	1,77632

MATERIALE TOTALE

Volume [m³]	7,81348
Litri [dm³]	**7813,48**

Considerando le dimensioni standard **14,5x12x30 cm**, il volume di ogni mattone risulta di **5220 cm³**, ovvero **5,220 dm³**.

Per produrre 6 mattoni delle stesse dimensioni sono stati utilizzati:

- 25 L di canapulo
- 10 L di calce idraulica NHL 3.5
- 4 L di cemento bianco
- 1,5 L di pozzolana
- 8,5 L di acqua

Volume 1 mattone [cm³]	n. mattoni	Volume TOT [cm³]
5220	6	31320
		Litri impasto TOT
		31,32

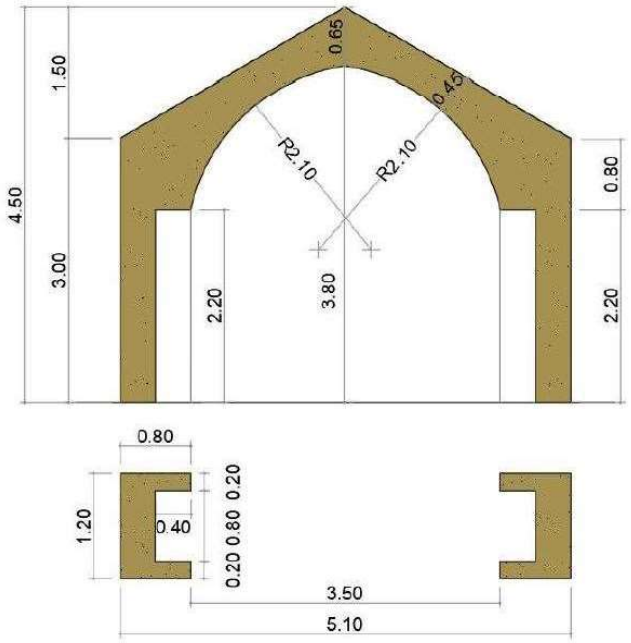
Materiale per produrre 31,32 L di impasto

ELEMENTO	QUANTITÀ [L]
Canapulo	25
Calce idraulica NHL 3.5	10
Cemento bianco	4
Pozzolana	1,5
Acqua	8,5

Materiale per produrre **7813,48 L** di impasto

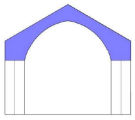
ELEMENTO	QUANTITÀ [L]
Canapulo	**6237**
Calce idraulica NHL 3.5	**2495**
Cemento bianco	**998**
Pozzolana	**374**
Acqua	**2121**

IPOTESI 2

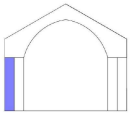


DIMENSIONI

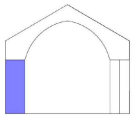
Profondità totale	1,2
Profondità parziale	0,2
	0,8



AREA [m2]	3,8433
VOLUME [m3]	4,61196
n componenti	1



AREA [m2]	1,1102
VOLUME [m3]	0,88
n componenti	2
VOLUME TOT [m3]	1,76



AREA [m2]	1,76
VOLUME [m3]	0,352
n componenti	4
VOLUME TOT [m3]	1,408

MATERIALE TOTALE

Volume [m³]	7,77996
Litri [dm³]	**7813,48**

Considerando le dimensioni standard **14,5x12x30 cm**, il volume di ogni mattone risulta di **5220 cm³**, ovvero **5,220 dm³**.

Per produrre 6 mattoni delle stesse dimensioni sono stati utilizzati:

- 25 L di canapulo
- 10 L di calce idraulica NHL 3.5
- 4 L di cemento bianco
- 1,5 L di pozzolana
- 8,5 L di acqua

Volume 1 mattone [cm³]	n. mattoni	Volume TOT [cm³]
5220	6	31320
		Litri impasto TOT
		31,32

Materiale per produrre 31,32 L di impasto

ELEMENTO	QUANTITÀ [L]
Canapulo	25
Calce idraulica NHL 3.5	10
Cemento bianco	4
Pozzolana	1,5
Acqua	8,5

Materiale per produrre **7780 L** di impasto

ELEMENTO	QUANTITÀ [L]
Canapulo	**6210**
Calce idraulica NHL 3.5	**2484**
Cemento bianco	**994**
Pozzolana	**373**
Acqua	**2111**

6.2 PROCEDIMENTO

In entrambi i casi la volta è stata scomposta in 3 parti, per agevolarne il calcolo del volume. Questo è stato messo a confronto con il volume dei mattoni prodotti in laboratorio, utilizzandoli come unità di riferimento per dimensionare tutta la costruzione.

Considerando dunque il materiale utilizzato per la realizzazione di un mattone di un determinato volume e paragonando questo con il volume della volta, siamo riusciti a stimare un totale di materiale necessario per entrambe le ipotesi, con l'obiettivo di eseguire un confronto che ci permettesse una scelta che considerasse più fattori, tra cui il risparmio di materiale.

6.3 CONCLUSIONI

Nonostante la differenza sia minima (vd. tabella sotto riportata), l'ipotesi 2 risulta essere la migliore in quanto permette di risparmiare 26,76L di canapulo, 11L di calce idraulica, 4L di cemento bianco, 2L di pozzolana e 9L di acqua.
Inoltre, essendo le dimensioni dei piedritti minori risetto all'ipotesi 1, si avrà un ulteriore risparmio di legname per le casseformi, di cui discuteremo in seguito.

CONFRONTO TRA LE IPOTESI

	IPOTESI 1	IPOTESI 2	IPOTESI 1 vs IPOTESI 2
MATERIALI	Quantità [L]		Quantità [L]
Canapulo	6237	6210	26,76
Calce idraulica NHL 3.5	2495	2484	11
Cemento bianco	998	994	4
Pozzolana	374	373	2
Acqua	2121	2111	9

7. FORMWORK

In order to build the prototype, this section will explain the form-work designs that were proposed highlighting the pros and cons of each option. This should allow us to choose the method to cast the material during the workshop.

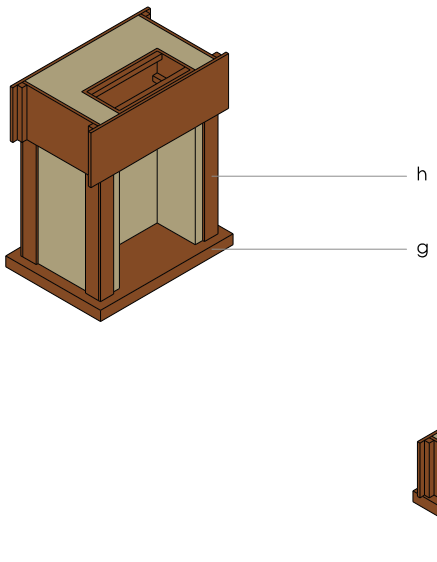
Taking into consideration that hempcrete needs some time to cure and show some strength, it is needed to leave the material for some time in the shuttering so it doesn't fall apart, and it can gain some strength to support its own weigth without crumbling. So either an extra set of shuttering is built to speed the construction process, or the structure that holds the material will have to stay in place until the end of the setting process.

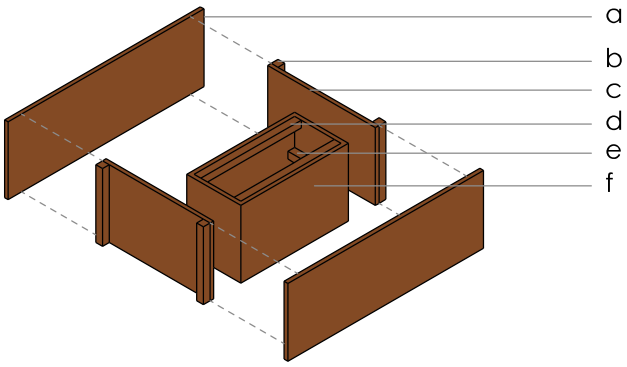
An other important point is to define how the shuttering will slide up and where it will be fixed, respecting the depth limit needed to allow the proper manual compaction of the material, that means the shuttering height should not be grater then the space needed for a worker to cast and press the material. For this reason, it is not possible to create a single monolithic form, as usually done with concrete; so a set of shuttering forms must be designed in order to gradually build the prototype in layers, an approach used in natural materials building processes such as rammed earth.

The workshop will be open to students, so it is also important to consider that the levels of construction skills are going to be diverse, which means that the form-work will also have to be simple and easy to assemble.

7.1 OPTION **a, b, c, d, e, f**: COMPARISON

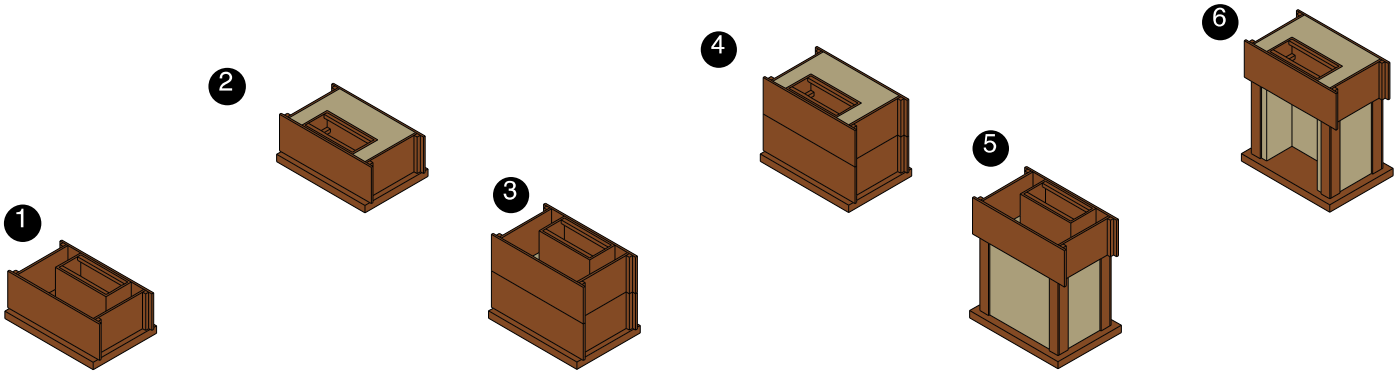
7.1.1 Option **a**





As a start, a simple shuttering was proposed. The idea, in this case, was to create an external box, fixed by vertical wood profiles (element b) at the corners with screws in order to join the wood boards (a,c). To create the 'C' shape of the pillar, a smaller box is placed inside the larger one and also fixed with screws where the surfaces touch (elements f and a). To increase the resistance of the box, much needed due to the hits to compact the hempcrete, four wood pieces are to be fixed internally (elements d and e). As highlighted above, the material needs

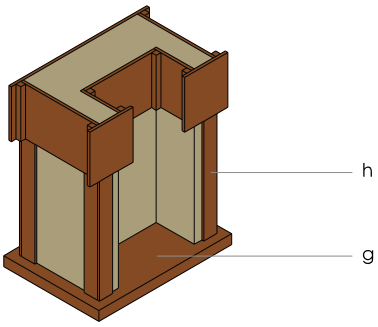
some time to harden, so two sets of the form-work should be built, and after the first one is filled and the material compressed, the second one can be positioned on top of it, not only guaranteeing the alignment of the pillar, but also being the support for the second shuttering piece (step 3). In the following step (4) wood supports (element h) would be necessary to hold the upper wood boxes, being fixed directly in the hempcrete and in the wood base with L-shaped steel profiles. The downside of this technique is that it is not known if the hempcrete will be dried enough to hold the screws for the wood supports, and the holes created due to the fixation of the elements h, may cause weak points in the structure.

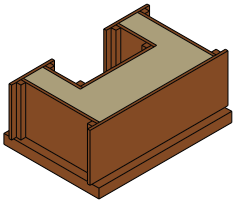


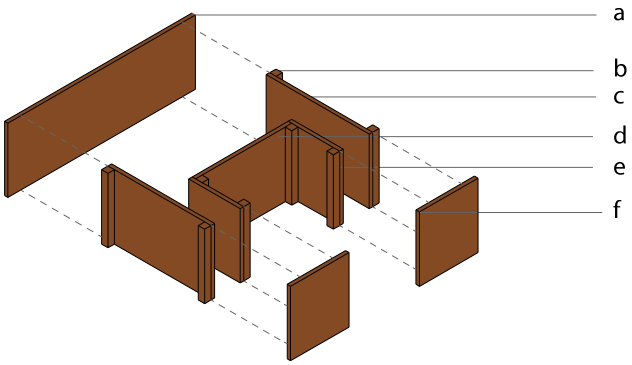
List of Materials					
Elements	Description	Dimensions [cm]	Units	To buy	Quantity
a	Plywood board	145x50	8	50x300cm plywood board 25mm thickness	4
b	Wood profile	5x5x50	16	5x5x250cm wood batten	4
c	Plywood board	80x50	8	50x300cm plywood board 25mm thickness	2
				50x100cm plywood board 25mm thickness	2
d	Wood profile	5x5x75	16	5x5x250cm wood batten	6
e	Wood profile	5x5x35	8	5x5x250cm wood batten	1
f	Plywood box	40x80x50	4	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
g	Plywood board	140x100	4	140x100cm plywood board 25mm thickness	2
h	Wood profiles	100x15	16	15x1,2cm wood profile 100cm length	16
h.2*	Wood profiles	200x15	16	15x1,2cm wood profile 200cm length	16

*Element h.2 is the same of element h, only with a different height.

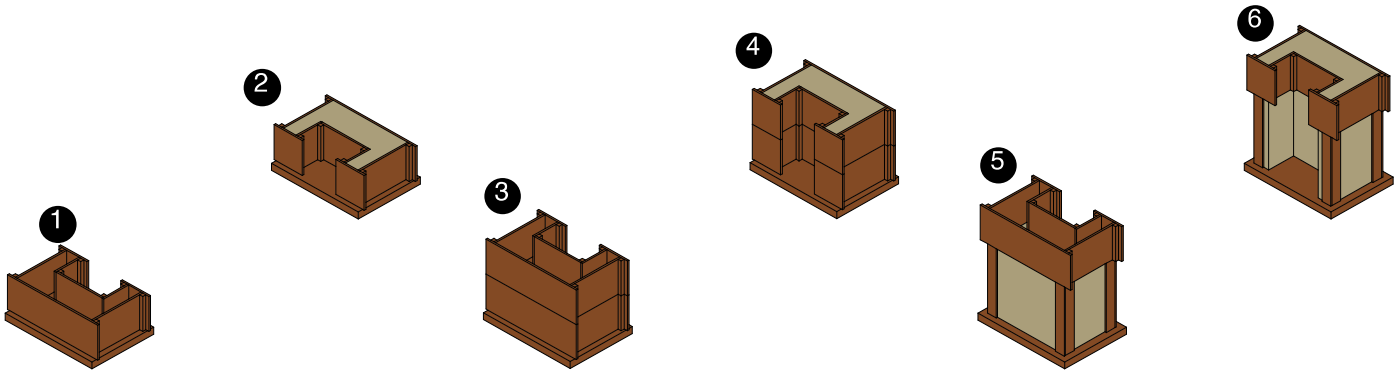
7.1.2 Option **b**







The same remarks for option a go for option b; what is different is the amount of wood used to build the form-work. Instead of placing a smaller box inside the bigger one, the shuttering has the same 'C' shape as the pillar's section, with the vertical wood profiles serving as joints in each corner. This means that a more precise work will be needed and a possibility of reduced strength in the structure of the shuttering is foreseen.

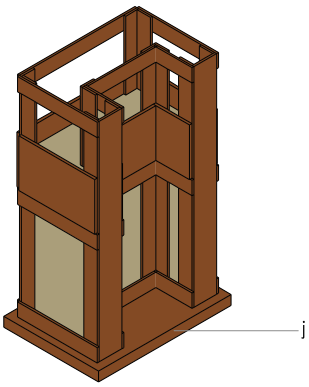


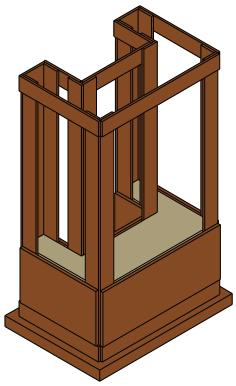
List of Materials					
Elements	Description	Dimensions [cm]	Units	To buy	Quantity
a	Plywood board	145x50	4	50x300cm plywood board 25mm thickness	2
b	Wood profile	5x5x50	32	5x5cm wood batten 250cm length	7

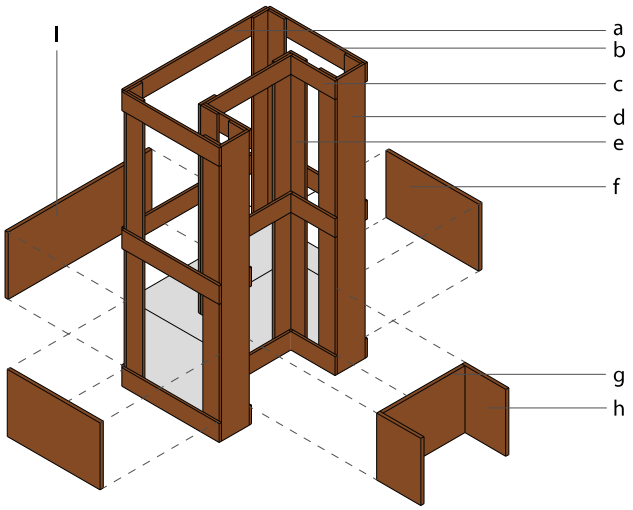
c	Plywood board	80x50c	8	50x300cm plywood board 25mm thickness	3
d	Plywood board	75x50	4	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
e	Plywood board	40x50	8	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
				50x100cm plywood board 25mm thickness	1
f	Plywood board	45x50	8	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
				50x100cm plywood board 25mm thickness	1
g	Plywood board	140x100	4	140x100cm plywood board 25mm thickness	2
h	Wood profiles	100x15	16	15x 1,2cm wood profile 100cm length	16
h.2	Wood profiles	200x15	16	15x1,2cm wood profile 200cm length	16

*Element h.2 is the same of element h, only with a different height.

7.1.3 Option **c**

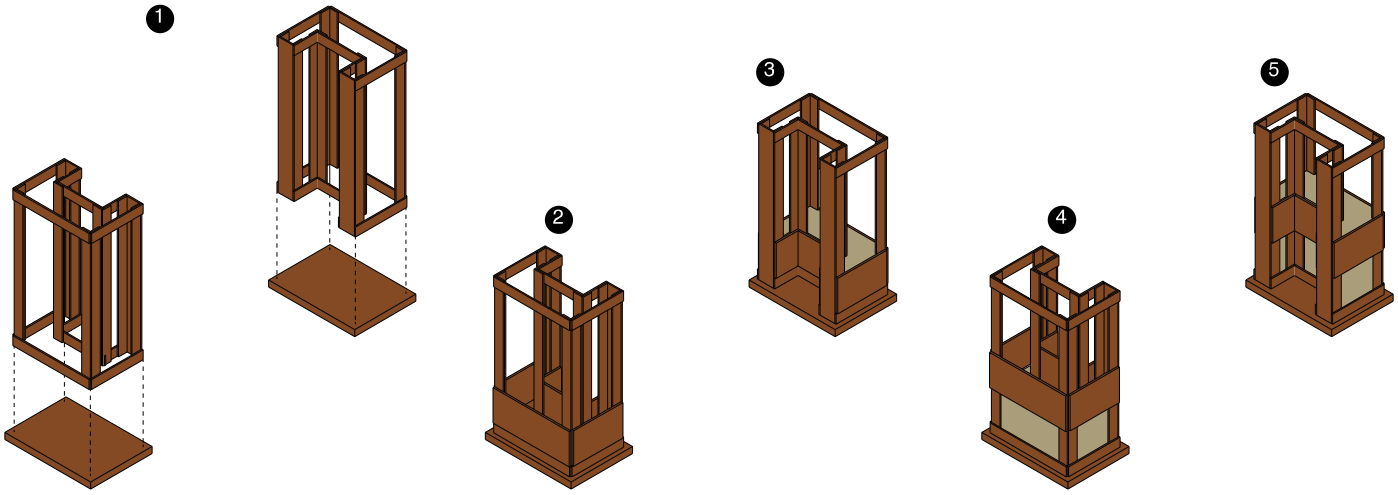






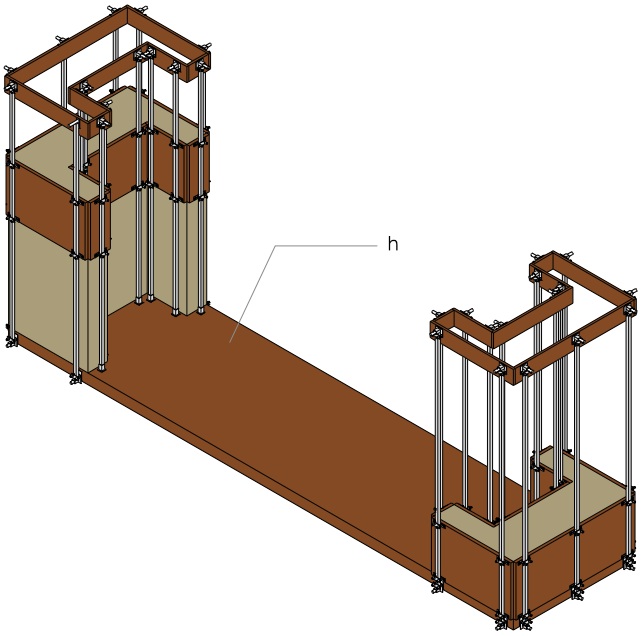
One of the big concerns about the previous options (a,b) is the stability of the structure responsible for supporting the shuttering boards when they are lifted up. Because of that, an independent wood structure was hypothesized, that would have the same shape as the pillars, in a way that it can stand and support the shuttering boards at the same time. The structure can be set in position and guarantee the precision and alignment of the pillars, in a regular building process with

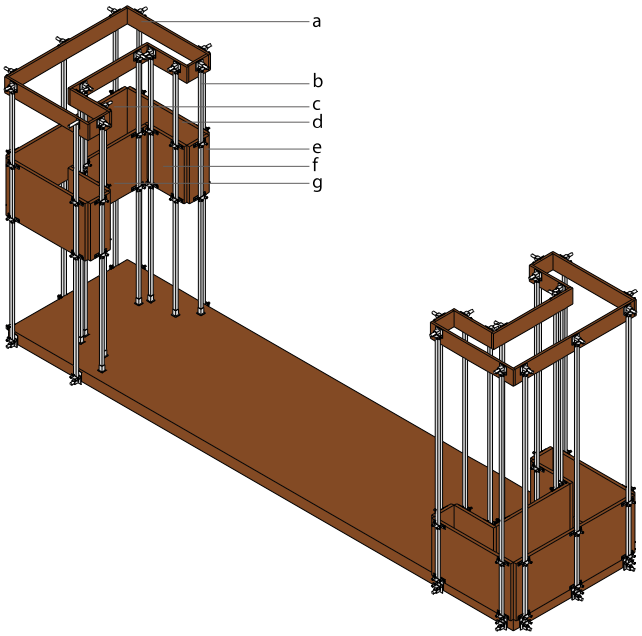
easy workability, being only necessary to unscrew and lift the wood boards in a upper position. This method also provides open spaces in the structure to allow the proper placement of the material. But it requires a good amount of wood and work to build it. To build the wood structure that is going to hold the shuttering boards, some skill and precision are required.



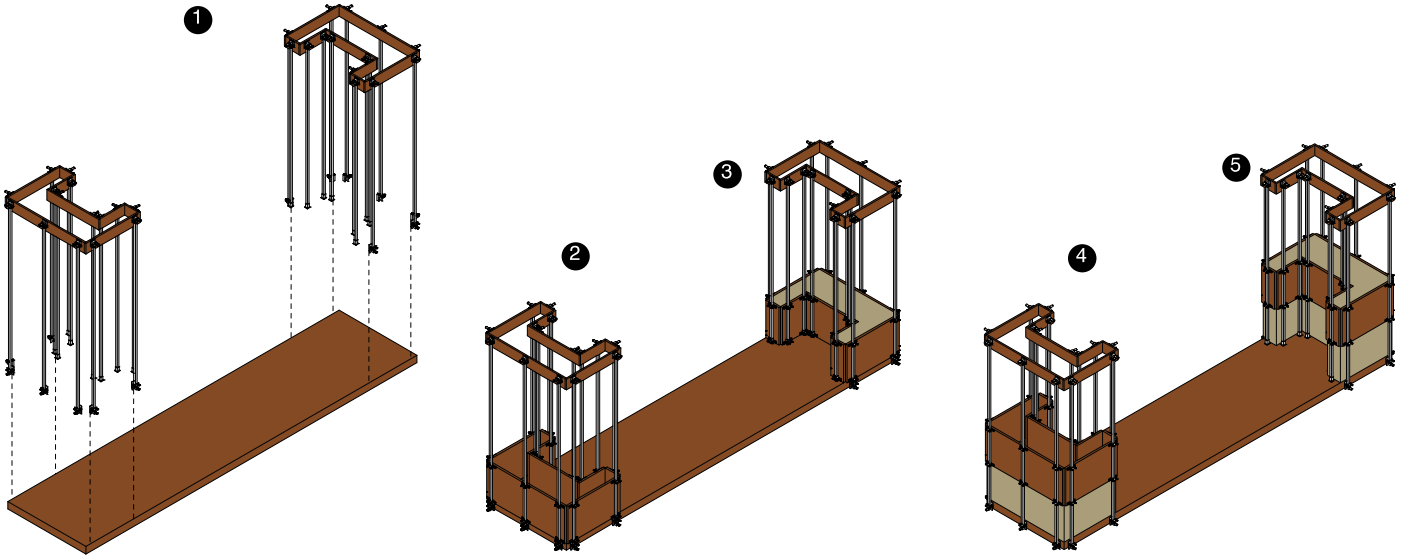
List of Materials					
Elements	Description	Dimensions	Units	To buy	Quantity
a	Plywood profile	120x15cm	6	15x1,2cm wood profile 120cm length	6
b	Plywood profile	85x15cm	12	15x1,2cm wood profile 85cm length	12
c	Plywood profile	40x15cm	12	15x1,2cm wood profile 40cm length	12
d	Plywood profile	25x220cm	4	25x1,2cm wood profile 220cm length	4
e	Plywood profile	15x220cm	24	15x1,2cm wood profile 220cm length	24
f	Plywood board	80x50cm	4	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
				50x100cm plywood board 25mm thickness	1
g	Plywood board	70x50cm	2	50x100cm plywood board 25mm thickness	2
h	Plywood board	40x50cm	4	50x100cm plywood board 25mm thickness	2
i	Plywood board	125x50cm	2	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
j	Plywood base	140x100cm	2	140x100 plywood board 25mm thickness	2

7.1.4 Option **d**



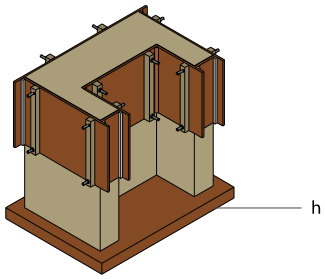


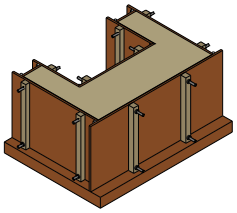
As an alternative to option c and following the same idea of a structure against which the shuttering slides up, option d design is composed by steel elements fixed both on top and at the bottom on wood boards, which work like rails onto which the shuttering board can be fixed and moved up. This reduces to a minimum the amount of wood, and it is possible to rent it instead of buying it, which means also a minimum amount of waste. What remains in question is the stability of the structure itself, since it is not known if the steel profiles are strong and stable enough to hold the shuttering boards.

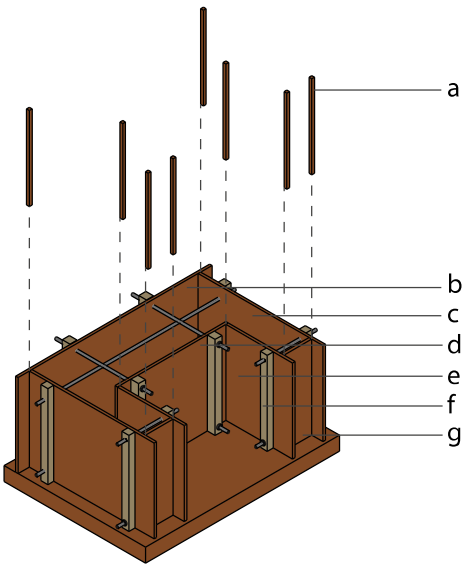


List of Materials					
Ele-ments	Description	Dimensions	Units	To buy	Quantity
a.1	Wood profile	14x120cm	1	14x1,2cm wood profile 120cm length	1
a.2	Wood profile	14x84cm	2	14x1,2cm wood profile 84cm length	2
a.3	Wood profile	14x20cm	2	14x1,2cm wood profile 20cm length	2
a.4	Wood profile	14x40cm	2	14x1,2cm wood profile 40cm length	2
a.5	Wood profile	14x80cm	1	14x1,2cm wood profile 80cm length	1
b	Steel profile	225cm	30	Steel profile 5x5cm 225cm length	30
c	Plywood board	120x50cm	2	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
d	Plywood board	80x50cm	4	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
				50x100cm plywood board 25mm thickness	1
e	Plywood board	20x50cm	4	50x100cm plywood board 25mm thickness	1
f	Plywood board	40x50cm	4	50x100cm plywood board 25mm thickness	2
g	Plywood board	75x50cm	2	50x100cm plywood board 25mm thickness	2
h	Plywood base	120x510cm plywood base	1	120x255cm plywood board 25mm thickness	2

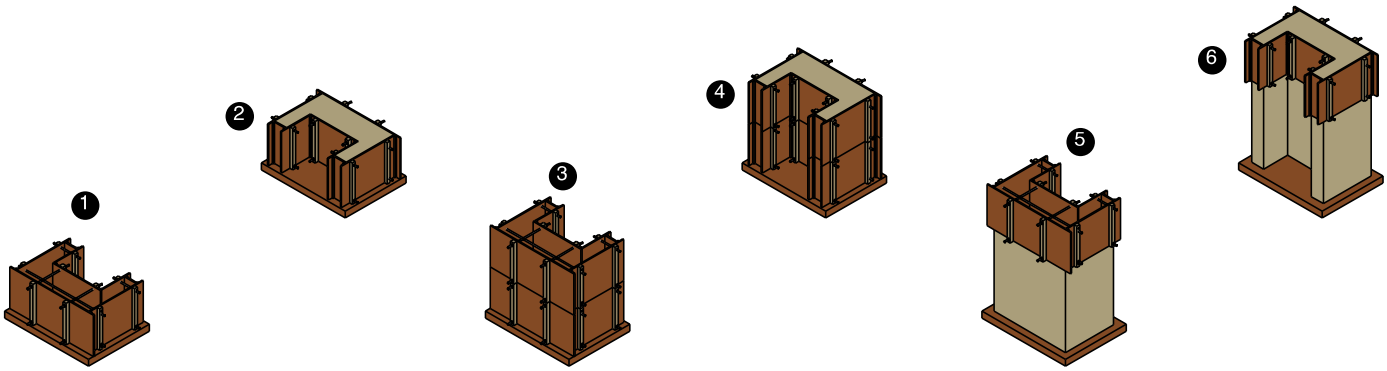
7.1.5 Option **e**







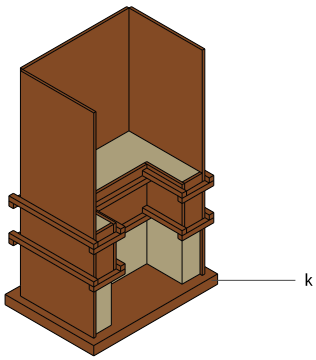
This option is based on the form-work for rammed-earth buildings. The wood panels are held together by elements connected by steel rods that when tensioned, compress the boards against each other. The wood shuttering have to be screw and unscrew when pacing the material since the cables have to be removed once the material is harden, they also have to be protected by a membrane that will allow the steel rods to slide out. The following layers can be cast while the hempcrete is not dry enough to remove the shuttering, using the first set as support. This option shows a good solution for the form-work, but there is still the possibility of loosing the precision required.

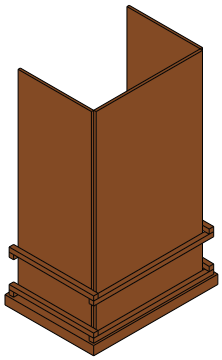


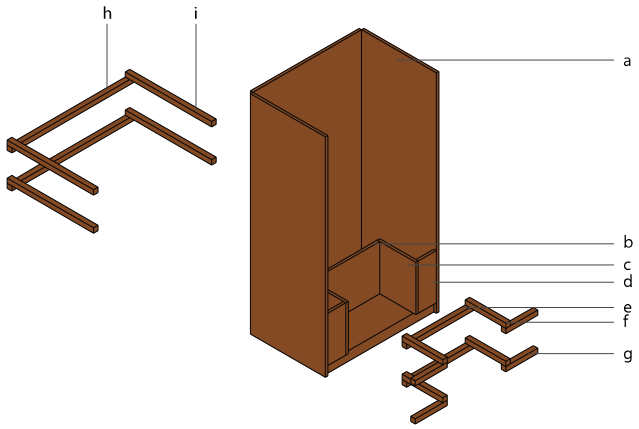
List of Materials					
Elements	Description	Dimensions	Units	To buy	Quantity
a	Wood profile	5x5x50cm	32	5x5x250cm wood batten	7
b	Plywood board	140x50cm	4	50x300 plywood board	2
c	Plywood board	90x50cm	8	50x300cm plywood board	2
				50x100cm plywood board	2
d	Plywood board	80x50cm	4	50x300cm plywood board	1
				50x100cm plywood board	1
e	Plywood board	50x50cm	8	50x300cm plywood board	1
				50x100cm plywood board	1
f	Pipe clamps	-	40	PONY pipe clamps	40

g	Plywood board	20x50cm	8	50x100cm plywood board	2
h	Steel rods	45 cm	16	45 cm steel rod Ø 4mm	16
h.1	Steel rods	70 cm	16	70 cm steel rod Ø 4mm	16
h.2	Steel rods	150 cm	8	150cm steel rod Ø 4mm	8
i	Plywood base	40x100cm	2	140x100cm plywood board 25mm thickness	2

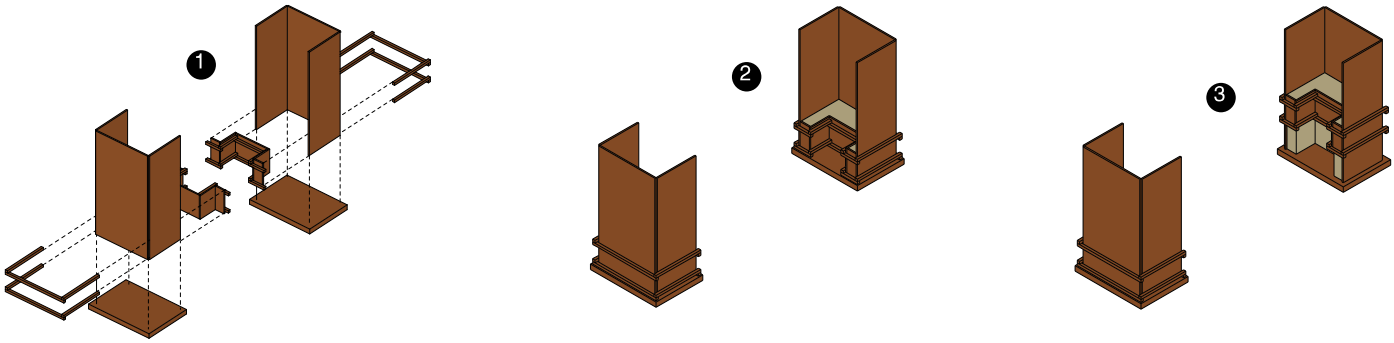
7.1.6 Option **f**





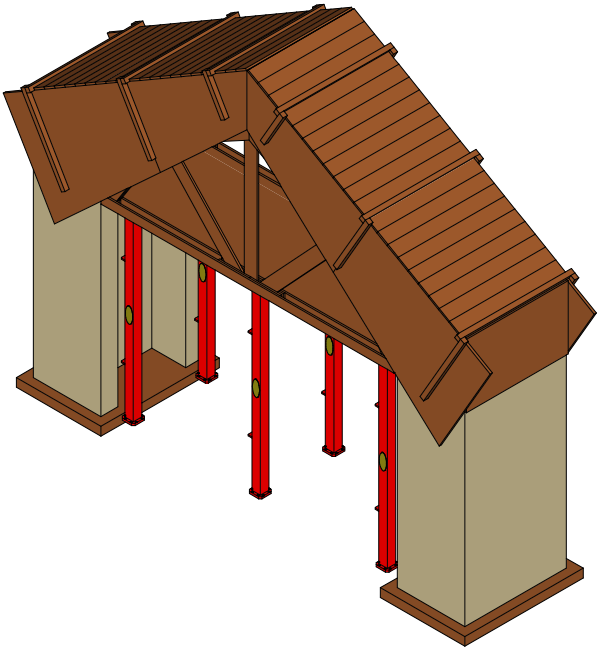


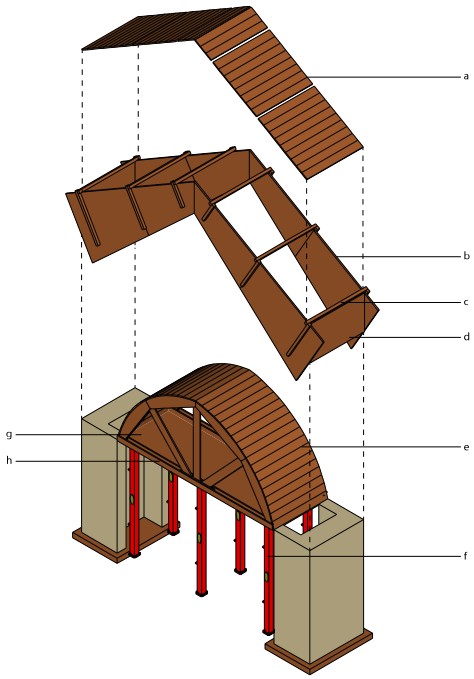
Option f is based on David Lea's workshop at Welsh School of Architecture and is very simple to build. It is formed by three wood panels that are not going to move during the building process, and will guide the sliding shuttering and will hold hempcrete while it dries. Leaving the front open, being closed only partially by a 50 cm hight shuttering board, this boards provides the space needed to the hand placing of the material to compact it. This shutter is the one sliding up, being fixed to the structure by 5x5 cm wood pieces that surround the pillar, and connect it to the back panels. This kind of ring can be screwed and unscrewed again onto the panels, allowing to add the following layers. Although there is a great amount of wood material, this option is the one that better provides the structure needed in term of strength and workability, assuring the regularity of the shape and supporting the moving shuttering while it goes up.



List of Materials					
Elements	Description	Dimensions [cm]	Units	To buy	Quantity
a	Plywood panel	120x230	2	120x230cm plywood panel 25mm thickness	2
b	Plywood panel	85x230	4	85x230cm plywood panel 25mm thickness	4
c	Plywood board	75x50	2	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
d	Plywood board	40x50	4	50x300cm plywood board 25mm thickness	1
e	Plywood board	20x50	4	50x100cm plywood board 25mm thickness	1
f	Wood profile	5x5x75	4	5x5x250cm wood batten	2
g	Wood profile	5x5x545	8	5x5x250cm wood batten	2
h	Wood profile	5x5x35	8	5x5x250cm wood batten	1
i	Wood profile	5x5x135	4	5x5x250cm wood battens	3
j	Wood profile	5x5x95	8	5x5x250cm wood batten	4
k	Plywood Base	140x100	2	140x100cm plywood board 25mm thickness	2

7.2 ROOF





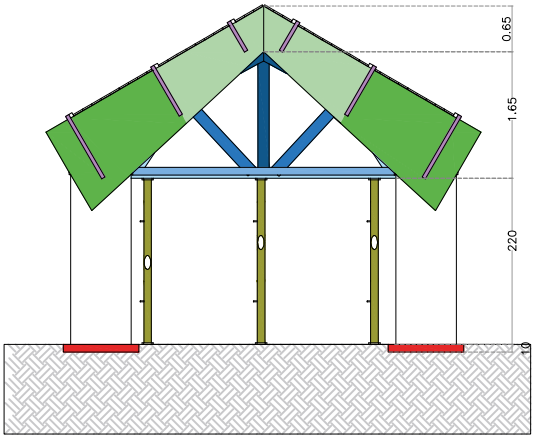
The design roof form-work is composed by basically two elements, the centering frame, supported by props, and the lateral boards. These boards are connected with the same method we explored in the wall formwork option f. After the pillars are dry enough to support the roof weight, the centering frame is positioned, and following, the lateral board, with the connection wood profiles. The shuttering must remain in place until the material is hard enough but it has to be removed right after, so the hempcrete can dry.

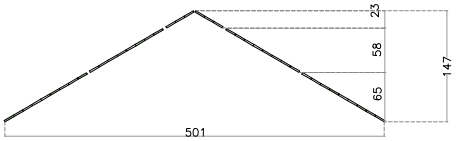
List of Materials					
Elements	Description	Dimensions	Units	To buy	Quantity
a	Wood profile	14x125cm	40	14x1,2cm wood profile 125cm length	40
b	Plywood board	170x120cm	4	50x300cm plywood board 25mm thickness	4
c	Wood profile	5x5cm	18	5x5x250cm wood batten	18
d	Plywood board	120x75cm	2	120x75cm plywood board 25mm thickness	2
e	Wood profile	14x120cm	36	14x1,2cm wood profile 120cm length	36
f	Props	228cm	8	228cm props 60mm diameter	8
g	Plywood board	120x350cm	1	120x350 plywood board 25mm thickness	1

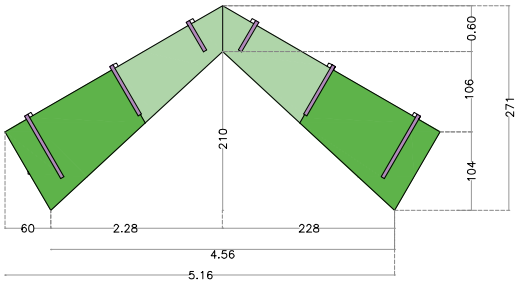
Centering frame	1	Wood profile	120cm	36	14x1,2cm wood board 120cm length	36
	2	Wood profile	120cm	16	22x1,2cm wood board 120cm length	16
	3	Wood profile	347cm	4	10x1,2cm wood board 347cm length	4
	4	Wood profile	75cm	4	10x1,2cm wood board 75cm length	4
	5	Wood profile	155cm	2	15x1,2cm wood board 155cm length	2
	6	Wood profile	140cm	4	15x1,2cm wood board 140cm length	4

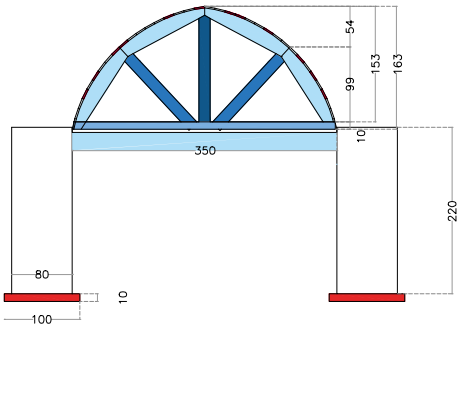
7.3 CASSERI: STUDIO DELLE PARTI

PROSPETTO FRONTALE

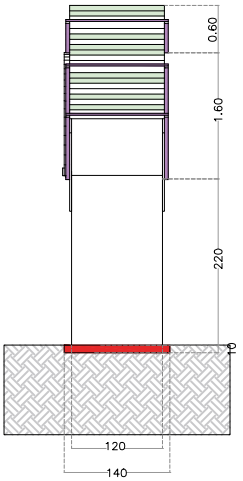


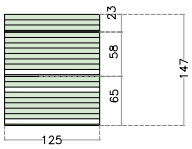


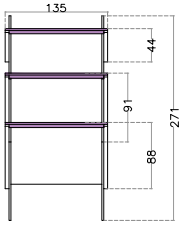


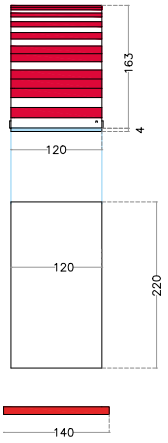


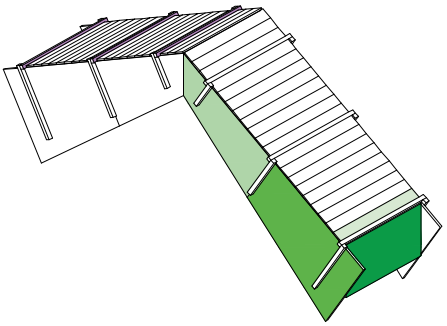
PROSPETTO LATERALE

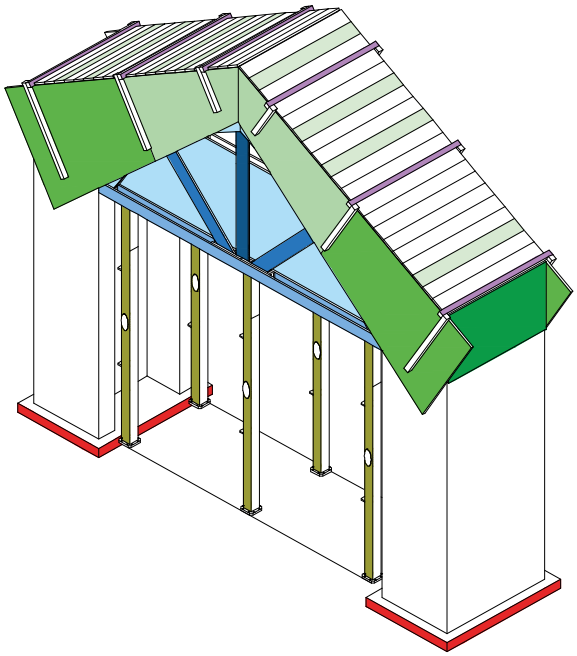


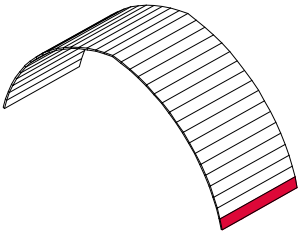


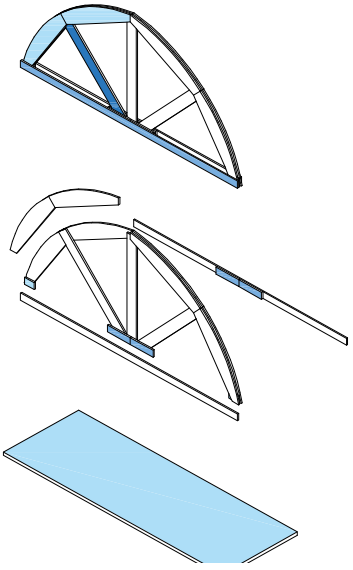




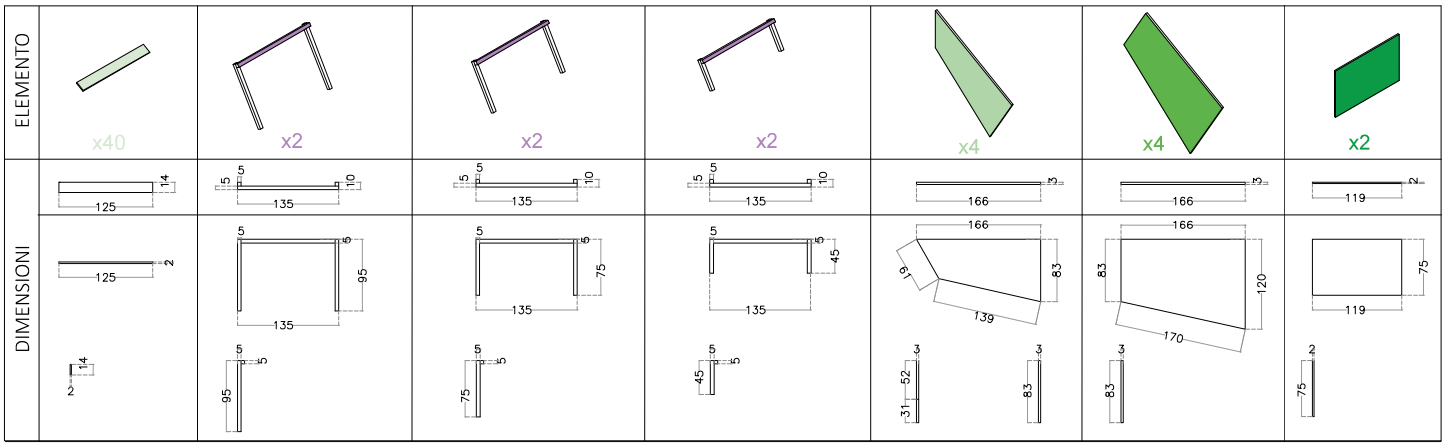




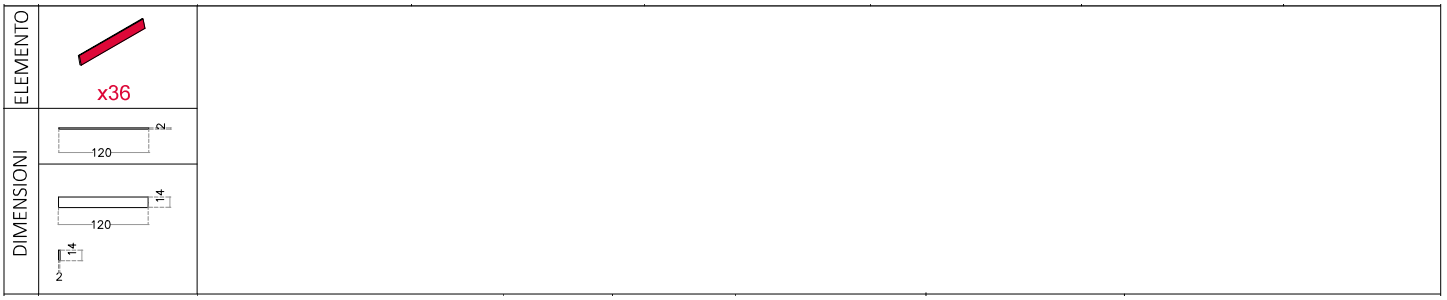




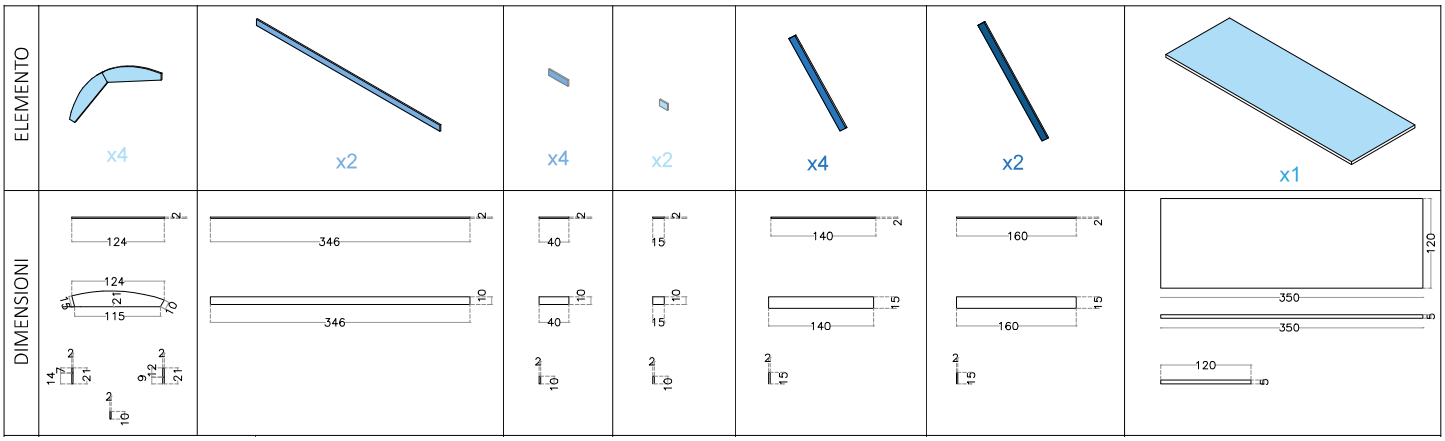
ELEMENTI DI SOSTEGNO E CONTENIMENTO VOLTA - LATI

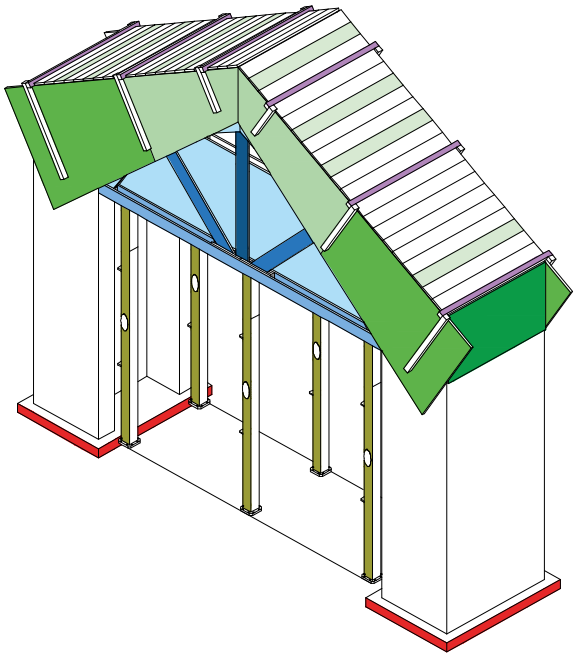


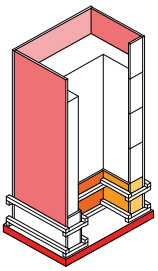
ELEMENTO DI CHIUSURA - POTEZIONE



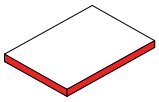
ELEMENTI DI SOSTEGNO E CONTENIMENTO VOLTA - BASE



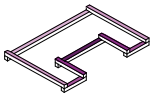




(x2)



x2



x2

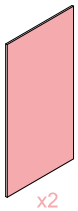
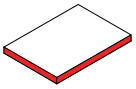
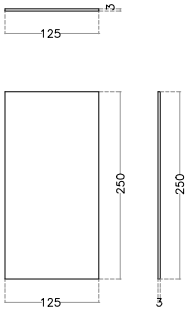
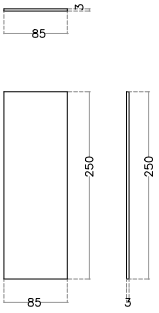
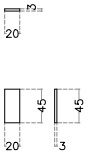
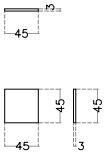
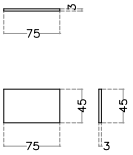
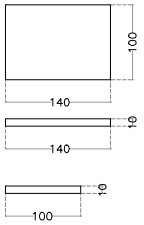


x6

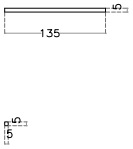
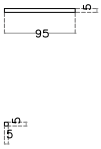
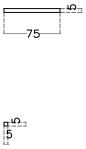


x6

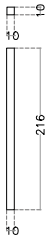
ELEMENTI DI SOSTEGNO E CONTENIMENTO PIEDRITTI

ELEMENTO						
	 x2	 x4	 x2	 x2	 x2	 x2
DIMENSIONI						

ELEMENTI DI SOSTEGNO E CONTENIMENTO AI CASSERI

ELEMENTO							
	 x2	 x4	 x4	 x4	 x2		
DIMENSIONI							

ELEMENTI DI SOSTEGNO E CONTENIMENTO AI CASSERI

ELEMENTO		
	 x6	x12
DIMENSIONI		

8. DESIGN

8.1 DRAWINGS

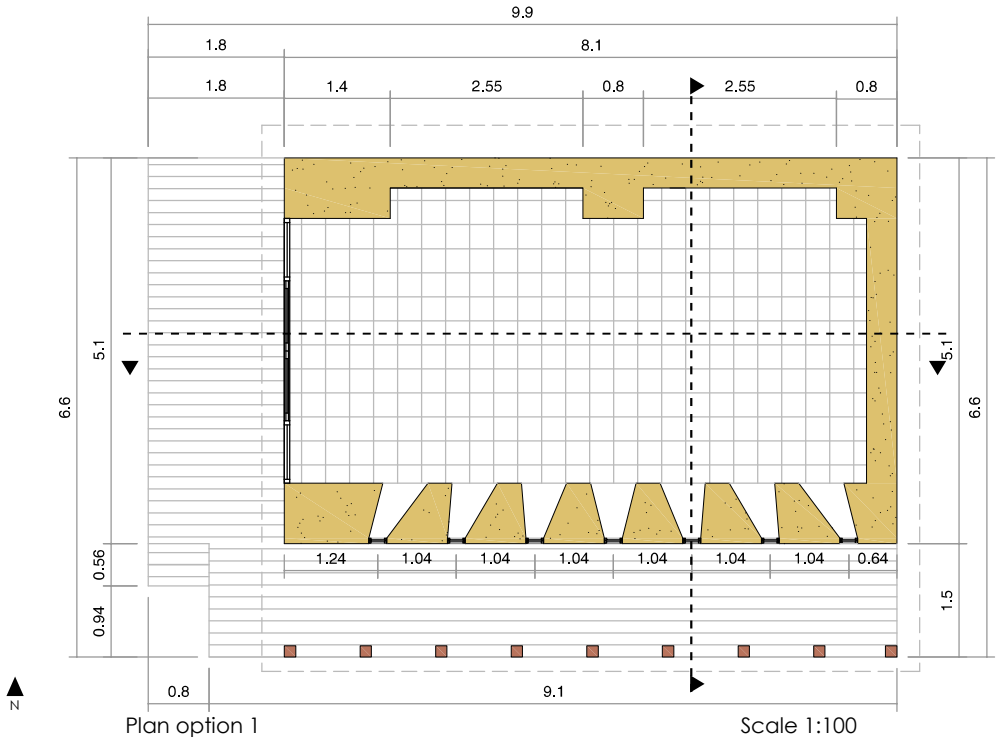
Taking David Lea's plan design as a reference, a study was made to define which plan fits better the requirements of the pavilion. The general dimensions (5,1x8,1m) were set according to the other two pavilions (straw-bale and light-earth) that are going to be built. Also the dimensions of the arch and the building's height were taken from the previous tests performed by David Lea.

The main changes were the windows and the shape of its openings. Option 1 follows the design proposed by David Lea, while the options 2 and 3 are alternatives trying to simplify the window installation. It is possible to observe that option 1 contains openings that are different among themselves; the second option brings a pattern in the windows openings but maintains the concept of small windows with sloped internal openings; and the option 3 has regular openings with dimensions that allow the use of commercial window frames.

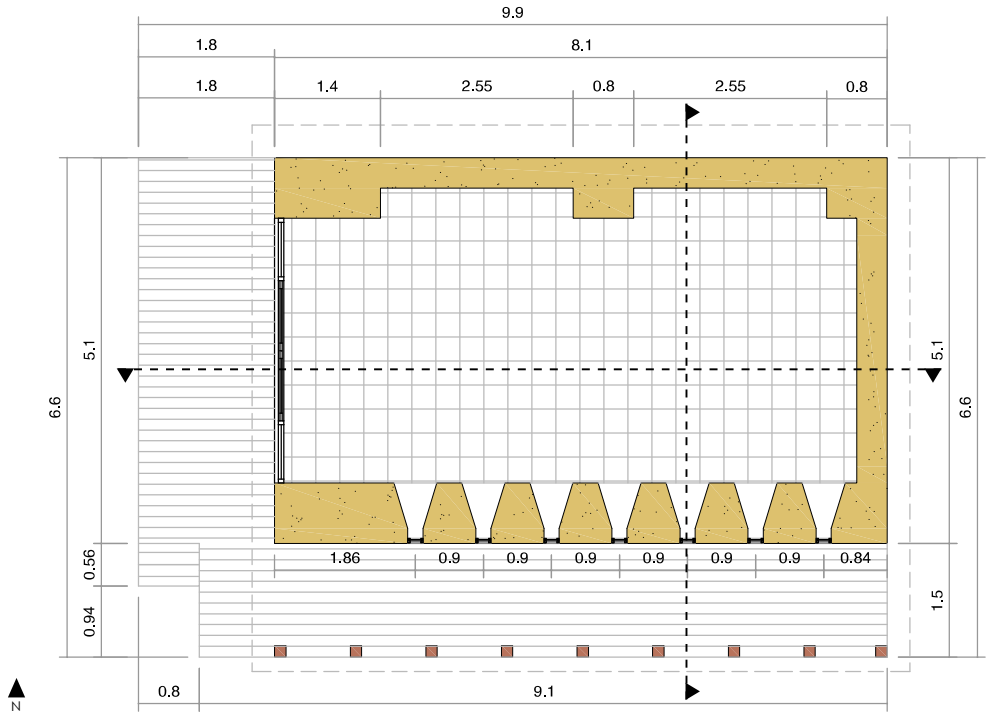
In order to take a decision about the plan design, some criteria were taken into consideration. The amount of material can make a significant difference in the cost; the design interest that goes according to the dynamism concept followed for the windows openings. The ease of construction is also a point to care about: the less orthogonal are the shapes to be achieved, the more difficult it is to build the form-work. Besides that, the amount of light and the type of shuttering to be used should be considered.

Amount of material: respectively the amount of material needed for each option would be 25,18, 25,63 and 26,96 m³. Those values refer to the walls only, since both the floor and the roof are the same for all options. This means that both **option 1 and 2** can be interesting, since their values are very close and they are lowest ones.

Design interest: as mentioned before, the openings in the option 1 are different among each other, they are slightly sloped, with different inclinations. This characteristic not only provides rhythm, but also dynamism for the internal space.



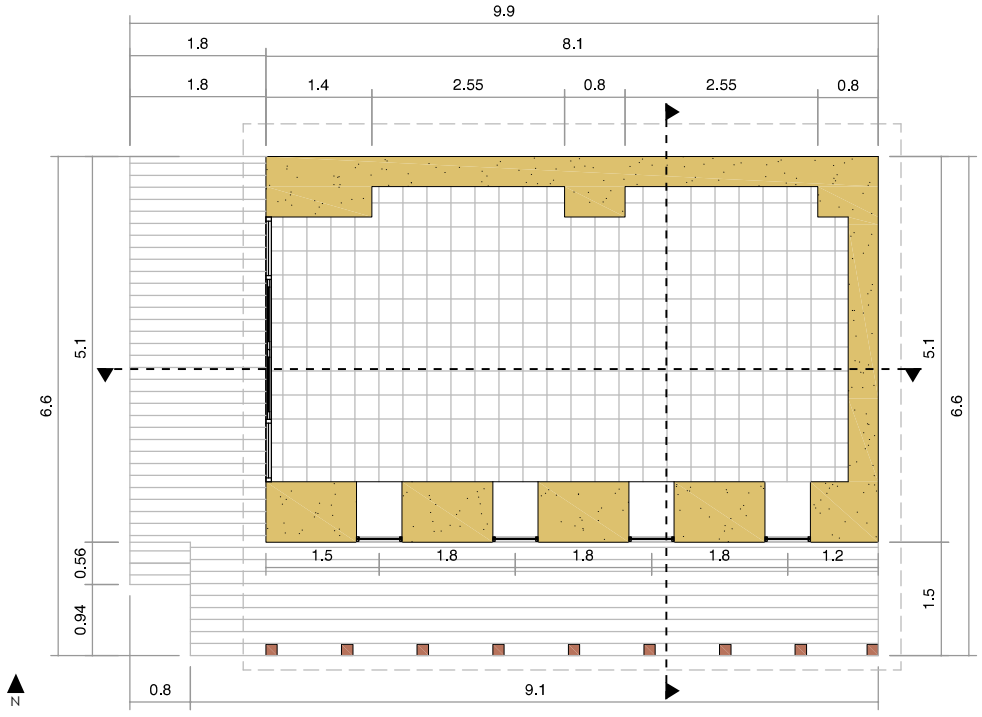
Plan option 1 Scale 1:100



Plan option 2 Scale 1:100

When the sun-light hit those sloped surfaces and is redistributed, it created a dramatization in the internal space. The option 2, buy increasing the internal opening brings more light inside the building but it's regularity looses both the dynamism and the dramatization in the internal space. Option 3 facilitates the work, but standardizes the window openings, which makes the building loose its singularities.

Ease to build and shuttering type: these two topics can be addressed together since they are correlated. Option 1, having openings with different shapes require a more detailed shuttering design, and having in mind that the shuttering proposed for the arch prototype was designed for orthogonal shapes, it may



Plan option 3 Scale 1:100

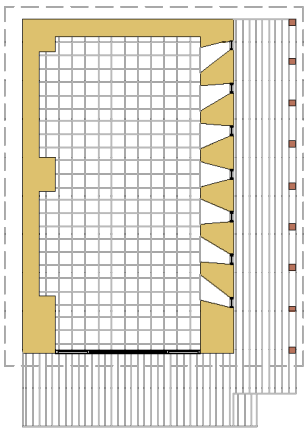
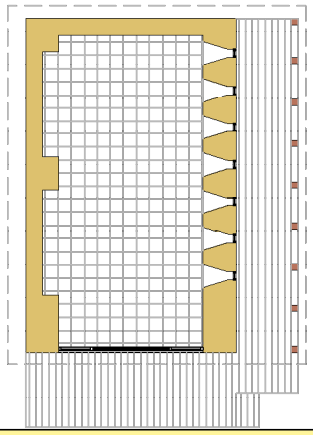
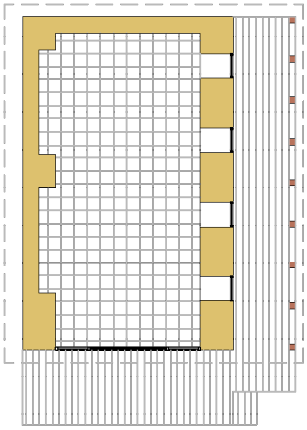
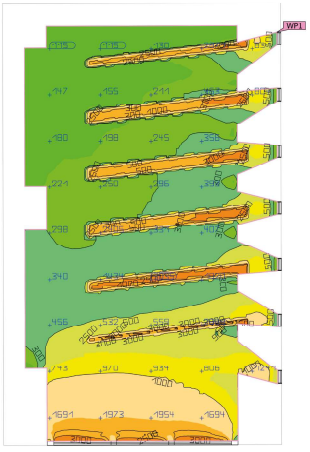
	Hempcrete Pavilion		
	Option 1	OPTION 2	OPTION 3
			
Amount of hempcrete [m³]	25,18	25,63	26,96
Design Interest	High	Medium	Low
Difficulty to build	High	Medium	Low
Internal amount of light	SUMMER: 782 LUX; ID: 0,15 WINTER: 801 LUX; ID: 0,14	SUMMER: 640 LUX; ID:0,14 WINTER: 629 LUX; ID:0,13	SUMMER: 841 LUX; ID:0,17 WINTER: 948 LUX ID:0,13

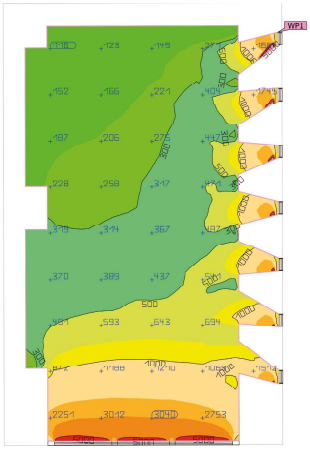
Table 1 - Comparison of plans

need adjustments to fit this option, moreover a grater amount of labour on site is expected. Option 2, although it doesn't have orthogonal joints, it can be built with shuttering of the same dimensions. Option 3 have only orthogonal openings that can facilitate the form-work and reduce the amount of material required for it.

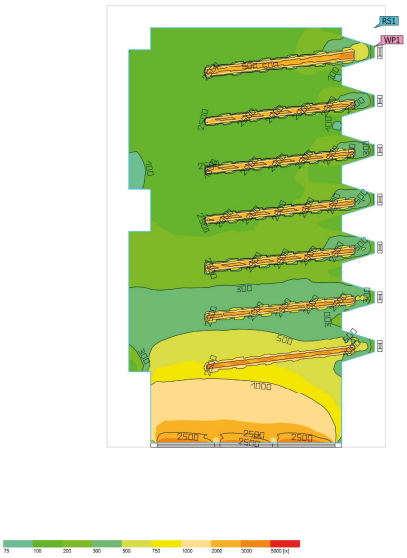
Internal light: to develop this analysis a model was created with Dialux, a software for lighting design. Before making considerations about each case, it is important to define the target values of the analysis. The software shows us the average illuminance in the city of Turin, on the longest and smallest days of the years, June 21 and December 22, respectively. The target illuminance value for a work-place is 550 lux. But this is not the only reference we should consider, the illuminance distribution (ID) is also important. The software makes an average calculation of the illuminance value; and analyses if there are spots with a strong incidence



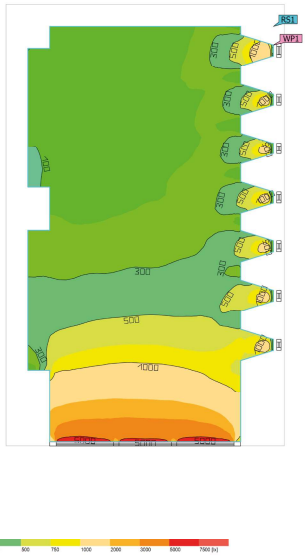
False colour chart Plan 1 - 22 December



False colour chart Plan 1 - 21 June



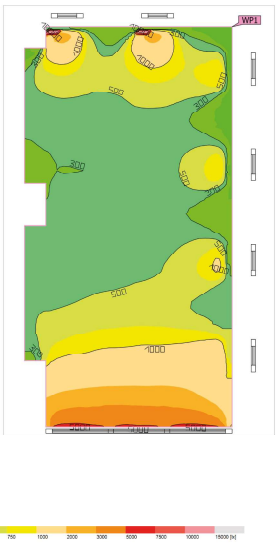
False colour chart Plan 2 - 22 December



False colour chart Plan 2 - 21 June



False colour chart Plan 3 - 22 December

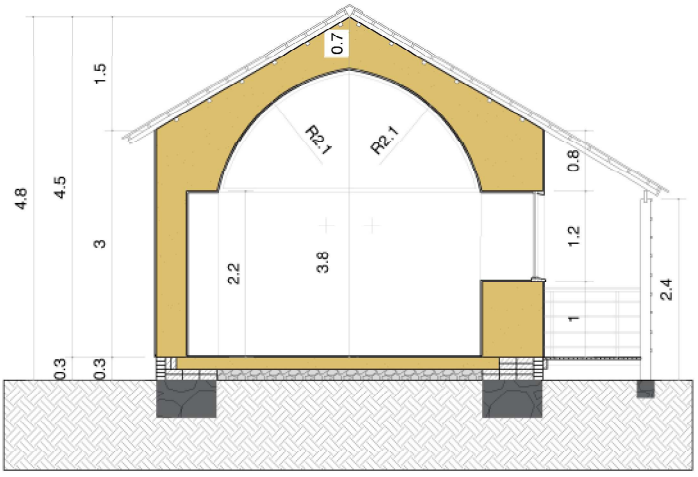


False colour chart Plan 3 - 21 June

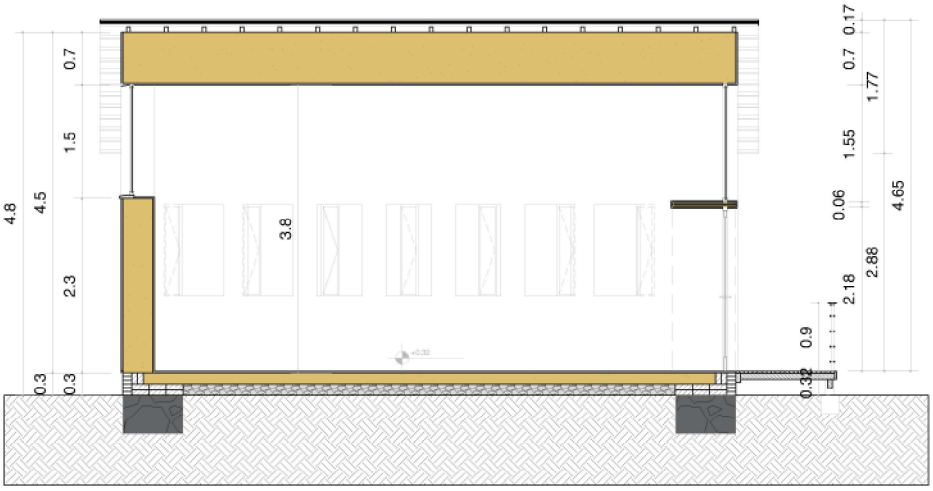
of light (as it happens in these cases), this value will influence in the final result of the ID. The illuminance distribution, quantifiies how distributed the light is in the indoor environment. The usual target value for a workplace is higher than 0.7.

Table 1 shows the illuminance values for each plan, option 3 having the highest values and the option 2 lower ones. The charts shows that the regular angles of the option 2 do not have the expected effect of increasing the light distribution, by the reflection of the light in the sloped surfaces, especially in relation to the different angles formed in option 1. There is a higher amount of light in the option 3 due to the sizes of the openings. In the false colour graphics It is possible to observe, that the surface reflects part of the light, increasing the distribution of light inside the building, which does not happen in the option number two. It is believed that the different angles in the option 1 may be the cause for how the light is distributed inside the building.

In therms of ID, all the options show



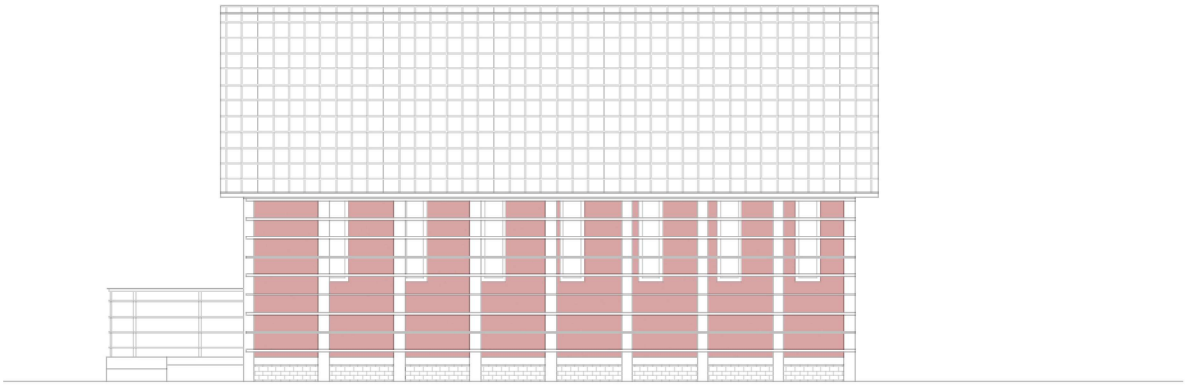
Section AA Scale 1:100



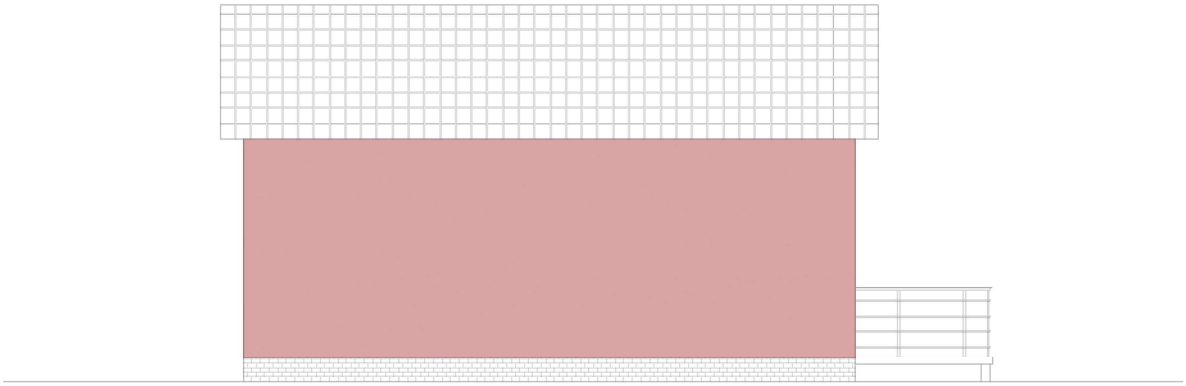
Section BB Scale 1:100

a bad result, this can be understand due to the fact that there are windows only in one facade of the building, and no internal lights were included in the calculation. In order to achieve a better ID the back window have to be included in the calculation, and more windows may be needed in the project. But nevertheless, to assist the decision between the plan's options, it is a value that can be used as a parameter.

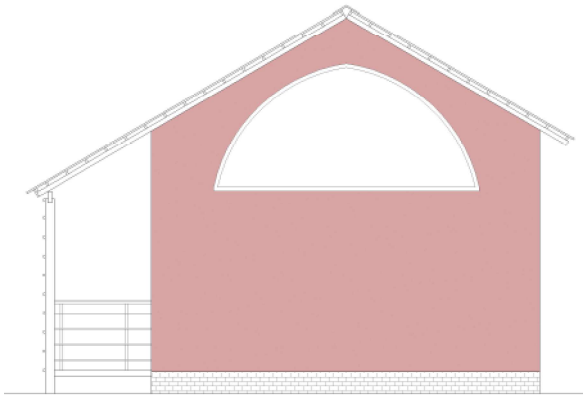
Thus, option 1 and 3 show better results, with the first only requiring a special attention to the form-work planning. Therefore, the option 1 design was taken base. The details of the windows and how to fix them to the building are going to be discussed.



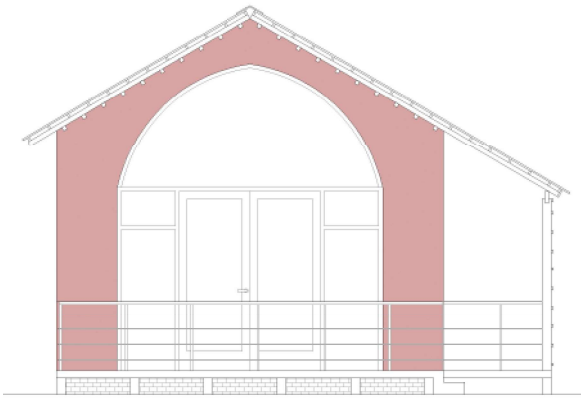
South Facade Scale 1:100



North Facade Scale 1:100



East Facade Scale 1:100



West Facade Scale 1:100

8.2 INTERNAL AND EXTERNAL FLOORING

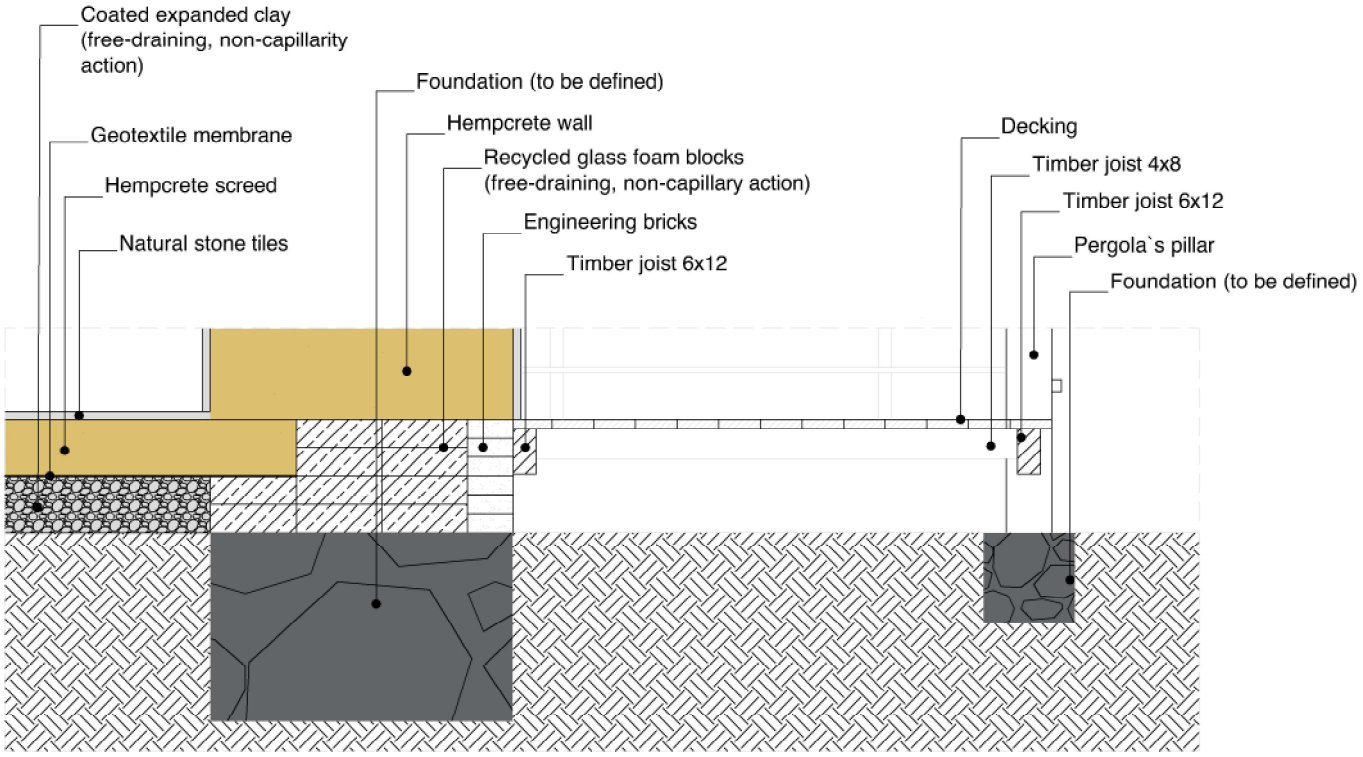
According to Stanwix and Sparrow (2014), hempcrete is a vapour permeable material, developed in the mid-1980 as an alternative to the use of Portland cement that prevents the construction to 'breathe'. The block of the vapour flow can led to the retention of moisture and the rotting of the structure. As the hempcrete cannot be used alone, other vapour permeable materials have to be combined to create a breathable floor, which prevent the moist to build up in the ground below the building. The addition of another breathable insulation material increases the thermal mass, helping the floor to store heat [5].

The maintenance of the breathability of the floor must be kept whit breathable finishings, otherwise there is the risk of moist to be stocked in the hempcrete layer which can rot and deteriorate the material [5].

Usually, hempcrete slabs have a higher density then hempcrete walls, but in this research, the mix is already aiming a higher density due to its higher structural performance. For this reason, the same mix can fit all - floor, windows and roof.

"The hempcrete layer is cast on top of a free-draining, insulating sub-base layer. It provides a layer through which water can only drain out, not rise up. It also provides a firm base on which to build. In addition, it provides extra insulation, which compensates for the reduced insulation value of the hempcrete." (Stanwix and Sparrow, 2014, p. 222)

For the pavilion, we proposed to employ coated expanded clay (15 cm) as a free-draining material, due its lack of capillarity action. Followed by a geotextile membrane that allows the natural dilatation and contraction of the materials (coated expanded clay and hempcrete).



Detail Floor

Scale 1:20

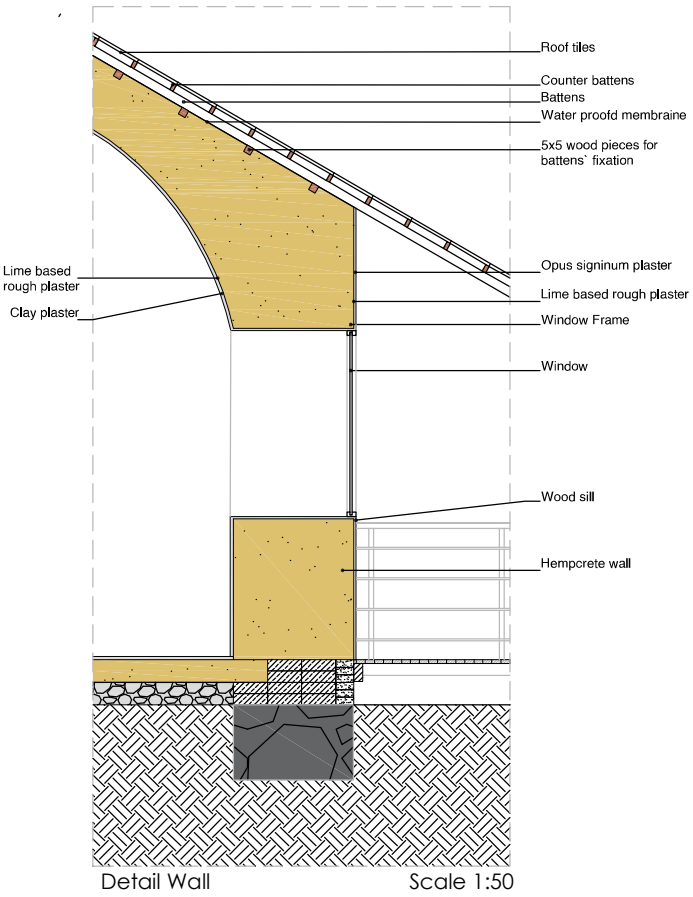
Then the 15 cm thickness hempcrete slab can be set and finished with natural flagstones tiles with lime mortar. All those materials, are vapour permeable. **(see Detail Floor)**

8.3 WALLS AND OPENINGS

"A hempcrete wall is built with natural materials and provides a very high level of thermal and acoustic insulation and is 'breathable', so provides moisture buffering – passive regulation of humidity, which is beneficial both for human health, because it improves indoor air quality, and for the fabric of the building." (Stanwix and Sparrow, 2014, p.131)

In the pavilion, the wall will support the roof weight. For this reason, and to meet the insulation requirements, the thickness of the walls is from 40 until 80 cm. The higher density of the mix (when compared to a regular insulation hempcrete that does not support weight), reduces the thermal properties of the material, which means that the wall should be more thick to also provide good thermal insulation.

Also here the finishings should not block the moist flow, so Portland cement based materials should be avoided. Both internal and external walls, could receive a lime-based rough plaster. For the finishing layer in the external walls, the material should be resistant to water and weather, not allowing liquid water to enter the envelope, but allowing the vapour to exit: plasters based on *opus signinum that* "is a biocompatible mortar, to be prepared on site, free of cement or compounds belonging to the clinker group, consisting of opus *signinum* obtained from the crushing of low temperature cooked clay (solid bricks, tiles) with continuous grain size curve from 0 to 4 mm."[9] For the internal finishing layer, the material can be less resistant, so a clay plaster, that provides a bigger range of colours could be used.



One of the many challenges of this project is how to fix the windows, especially plans options 1 and 2, due to their limited opening space. There are some points to be taken into consideration:

- Will the windows be handmade or commercial ones? If commercial, the window will have to be fixed on the surface of the wall, or a cut for hosting it would be necessary. If handmade, it can be installed in carves made in the hempcrete to host the elements, but the thermal properties might be lower.
- Where would the windows be fixed? Especially in the case of options 1 and 2, the smaller the frame is, or the less space the frame obstructs, the bigger is the amount of light that enters the pavilion. Fixing the window in the external wall, or making carves in the wall that would host the window, can be more advantageous and allow proper maintenance.
- How is the maintenance going to be done? It is important to remember that

eventually the windows will need to go through repairs, so the elements of the window should be removable.

- The amount of and type of materials. It can be a relevant point to the budget. And many different materials, might imply the creation of cold bridges and the reduction of airtightness.
- How to build it? The construction of the pavilion will be done in a students' workshop, the more work is needed and the more complex it is to install an build the windows, more difficult it will to be to manage the correct installation at the construction site.
- Will it be needed to carve the wall to install the windows, or cast an additional structure? Although it is expected that the whole wall structure supports the roof's weight, the hempcrete's surface is very brittle, which means it can be difficult to cut it neatly. Any additional structure should be placed in the shuttering before casting the hempcrete.

Based on this points, eight of window were hypothesised. The options represent the development of the design process.

Window A: This option is found in the market. Its principle is to increase the contact area with the wall, and reduce the width of the frame. But still, the fixation would be done internally, which leaves a smaller glass area when compared to the following proposals.

Window B: this is a handmade window, fixed internally. Although there was an attempt to increase the contact surface to ensure the stability of the window, the frame became too big, almost entirely blocking the glass surface.

Window C: it is also a handmade window, but its frame is positioned in a cut in the wall, in which the elements of the window are fixed. The frame would be almost a part of the building, with every piece of it joined by a screw that goes directly into the wall. A simple 'L' shaped outer frame is needed in addition to a small wood board where the glass would sit in between. It is easy to maintain, and the elements can be individually substituted.

Window D: this option is a simple frame fixed against the surface of the hempcrete wall, that due to its fixation position in the exterior wall, does not obstruct the opening. The doubt is if the hempcrete is strong enough to hold the window without any additional elements. Moreover, it will not be very airtight. For maintenance the whole frame needs to be unscrewed.

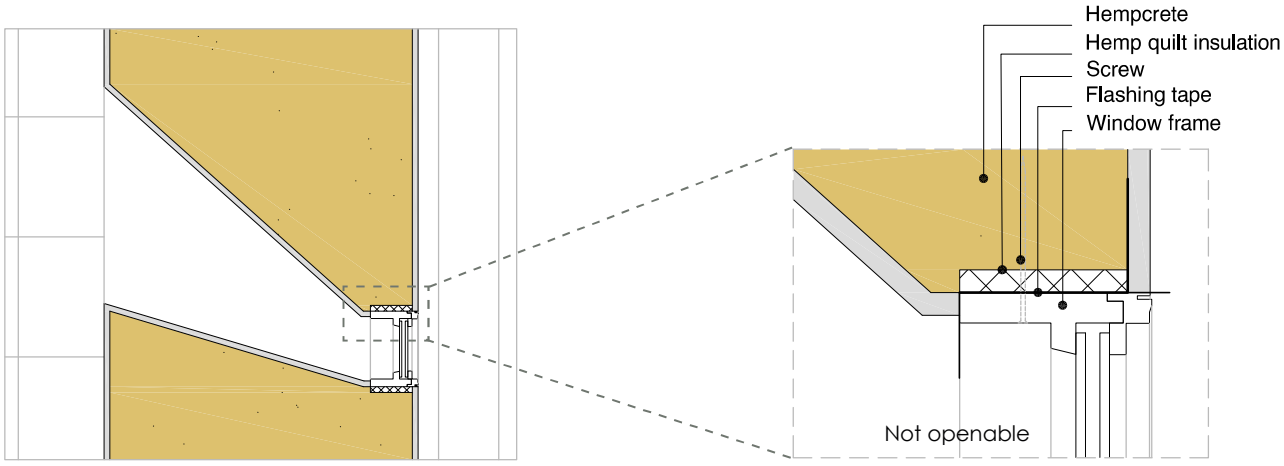
Window E: it provides a solution for the maintenance in relation to the option D. It is also fixed in the external surface of the hempcrete wall, but having a frame that can be disconnected from the piece fixed in the wall, it allows that only the piece that holds the glass be changed, if necessary.

Windows F and G: these options can be addressed together, since they provide a solution to try to increase the insulation characteristics and we proposed to carve the wall to host the window providing a more stable installation. Moreover, the window is aligned with the wall, which avoids water and dust accumulation on top of the frame.

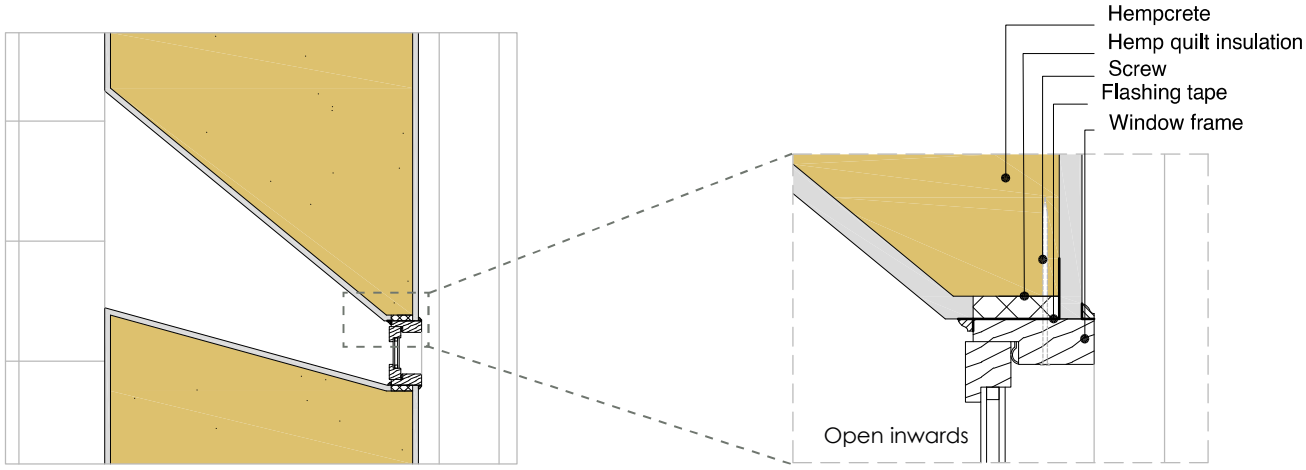
Window H: This option proposes a counter-frame to be cast inside the hempcrete wall, that would provide a surface with higher strength for installing the window. It is expected that the thermal insulation is not unimproved since the application of hemp-quilt all around both the counter frame and the frame, avoids the creation of cold bridges. It is advised that the counter-frame is placed when casting the hempcrete, so the walls don't need to be carved for hosting the window elements.

A summary of this analysis can be seen in the **tables 2 to 7**. A table for each plan option was created in order to compare the windows issues, but the main difference between options 1 and 2, and option 3 is the glazed area, with window

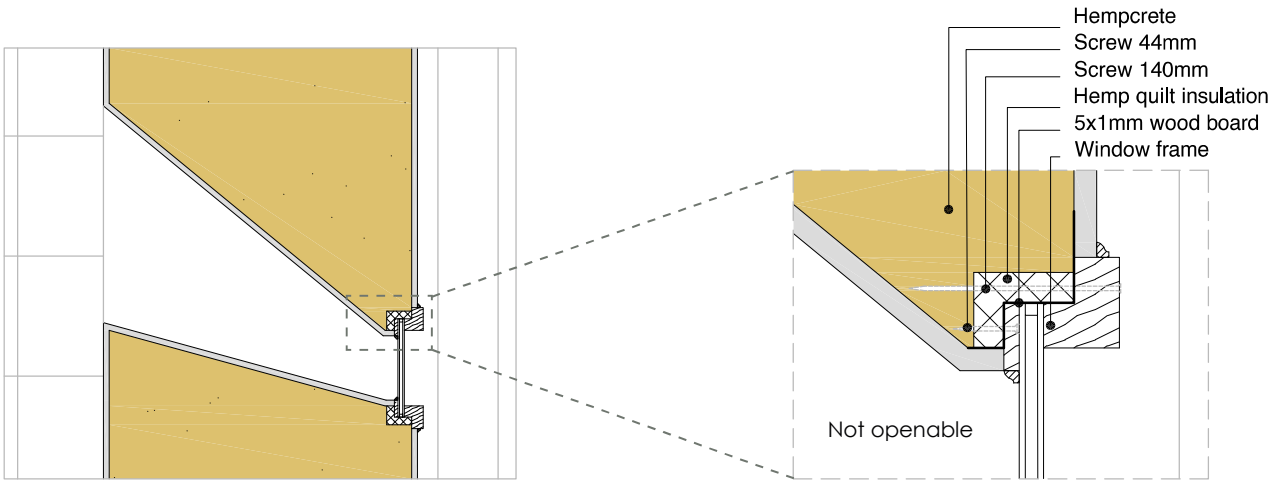
dimensions of 20x120 cm and 60x120 cm, respectively. While the fixation, materials and dimensions of the frame pieces are the same. One of the strengths of the windows in plan option 3 is that their dimensions are standardized, so it is easier to find commercial sizes windows on market, instead of having to order them by measure.



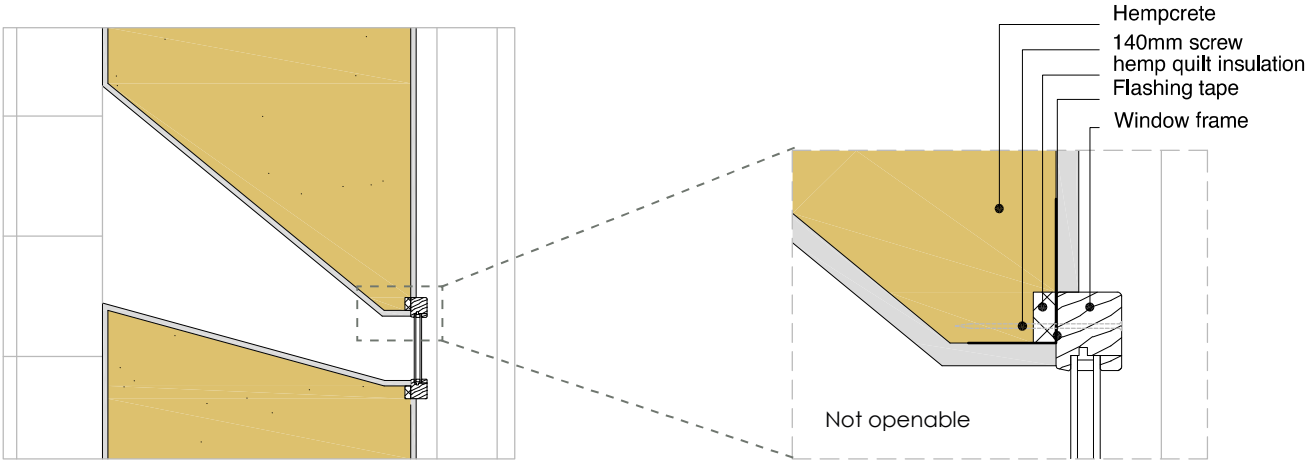
Window 1A Plan Scale 1:20 Window 1A Detail Scale 1:5



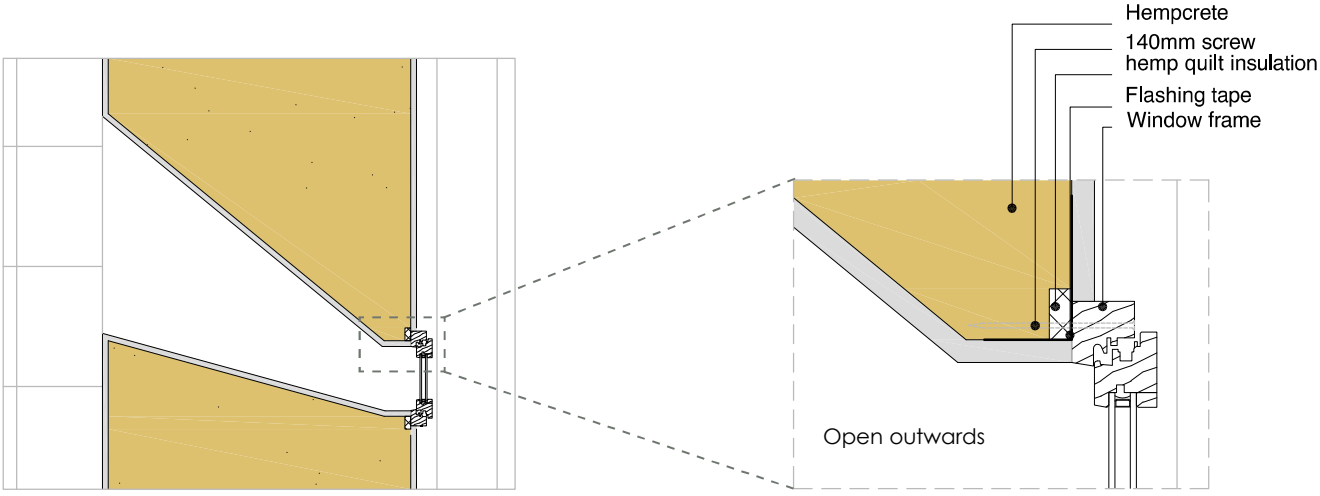
Window 1B Plan Scale 1:20 Window 1B Detail Scale 1:5



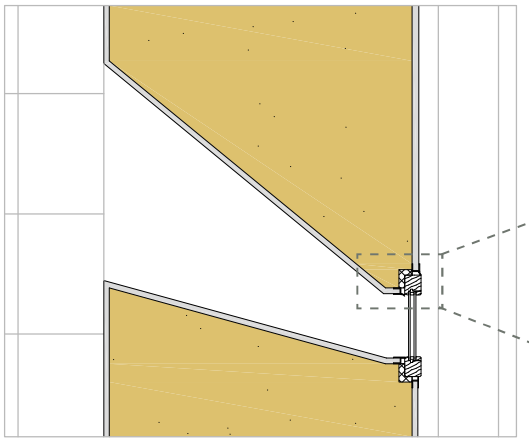
Window 1C Plan Scale 1:20 Window 1C Detail Scale 1:5



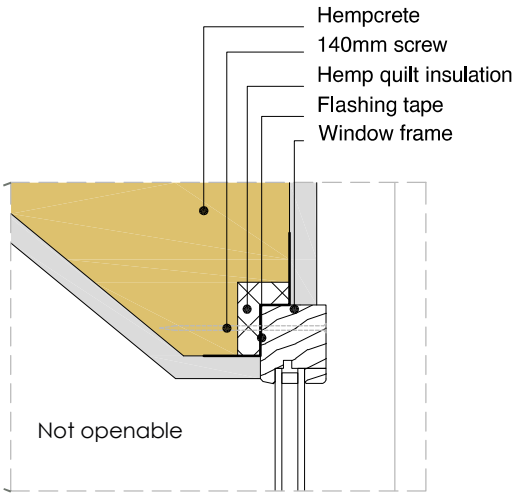
Window 1D Plan Scale 1:20 Window 1D Detail Scale 1:5



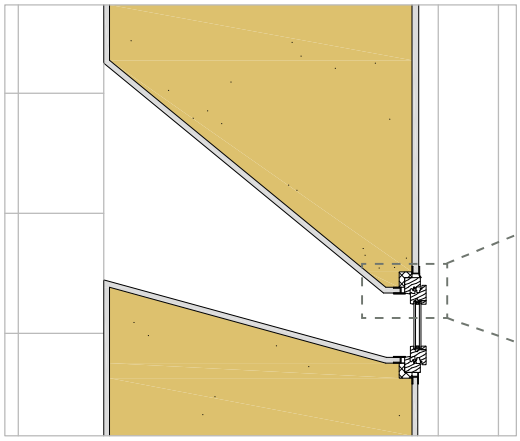
Window 1E Plan Scale 1:20 Window 1E Detail Scale 1:5



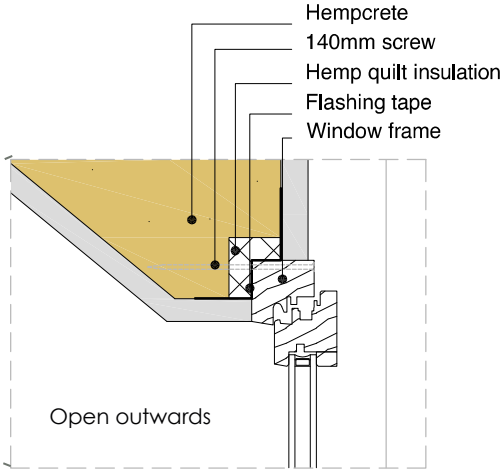
Window 1F Plan Scale 1:20



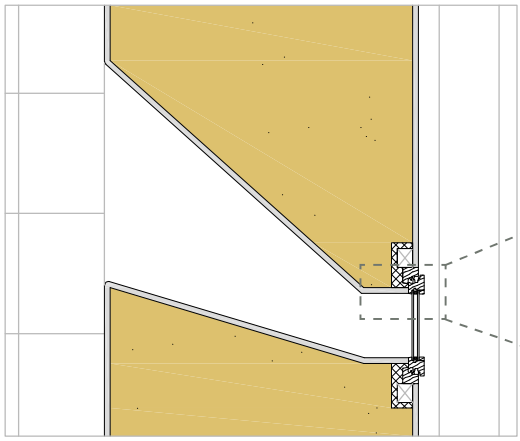
Window 1F Detail Scale 1:5



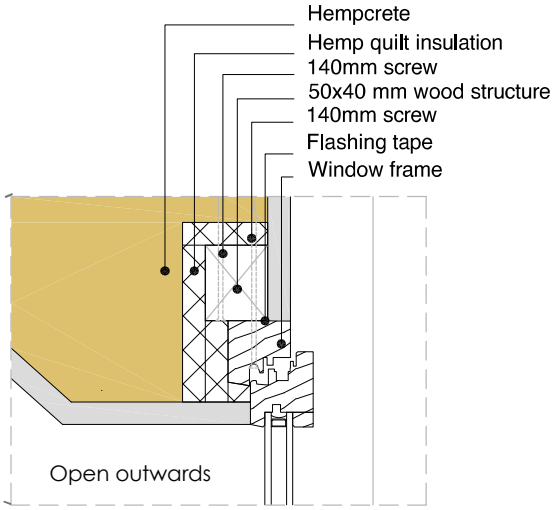
Window 1G Plan Scale 1:20



Window 1G Detail Scale 1:5



Window 1H Plan Scale 1:20



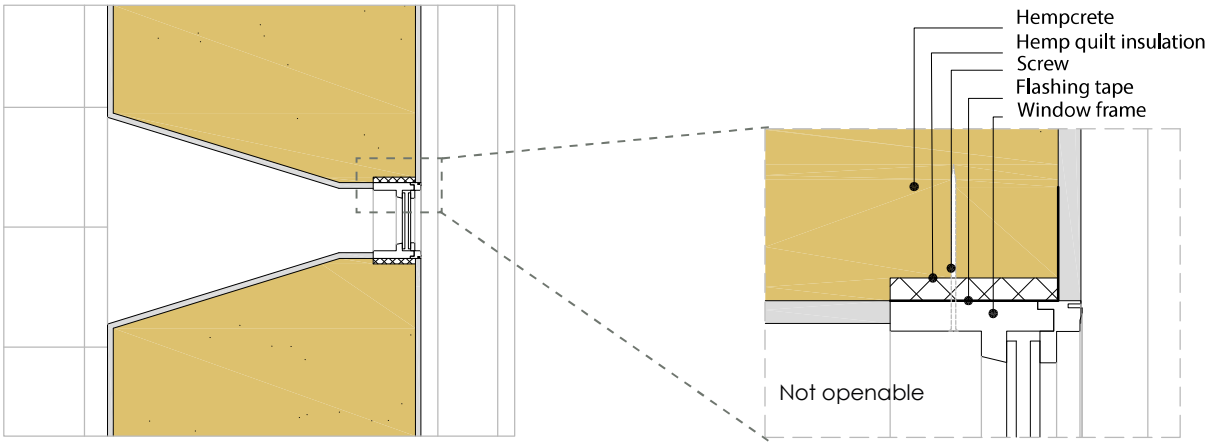
Window 1H Detail Scale 1:5

	Parameters							
	Frame Width [cm]	Glazed Surface	Net width of glazed surface [cm]	Material Description	Easy of maintenance	How to build it?	Commercial or handmade?	Carves in the wall
W 1a	4	0,12 x 1,12 m =0,13 m²	12	-Hemp quilt insulation -Picture window frame -Screws -Flashing tape	For maintenance, the hole frame would have to be taken out to replace damage piece.	Prepare the surface with the hemp quilt insulation to prevent thermal bridging. On top, set flashing tape for airtightness. Place the window frame and screw it into the hempcrete wall.	Commercial	No carve
W 1B	5	0,06 x 1,06 m = 0,06 m²	6	-Hemp quilt insulation -3x8cm wood profiles (counter-frame) -3x8cm wood profiles (window frame) -Wind sealant rubber -Screws -Flashing tape -Window bead -Burnt sand mastic -Flashing tape -Insulated double glass	With the frame, it is possible to remove the wind sash to replace damage piece	First the frame has to be built, it is composed by the outer wood frame, profile 30x80 mm, where the glass frame will sit, in the connection there are air rubber sealants. Then, the surface is prepared with the hemp quilt insulation and flashing tape. Place the window frame and screw it into the hempcrete wall.	Handmade	No carve
W 1C	7	0,17 x 1,17 = 0,2 m²	15	- L shape wood profile (external frame) -Hemp quilt insulation -1x4,5cm wood profile (internal frame) -140mm screw -80mm screw -Wood window bead -Burnt sand mastic -Insulated double glass	Since the window is composed by independent pieces, the external frame can be removed to release the other pieces and replace what is needed	Prepare the hempcrete wall by carving it, then prepare the surface with hemp quilt insulation and flashing tape. Position the first wood profile 4,5x1,5mm and screw it in the wall. Position the glass, then the external wood frame in 'L' shape, fixing this on the wall, which will compress all the parts together.	Handmade	5x7 cm carve
W 1D	5	0,163 x 1,163 = 0,19 m²	16	-Commercial window, with front fixation. Only frame -Hemp quilt insulation -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done.	Prepare the contact hempcrete surface with hemp quilt insulation, next add flashing tape to provide airtightness. Screw the window frame into the wall.	Comercial	No carve

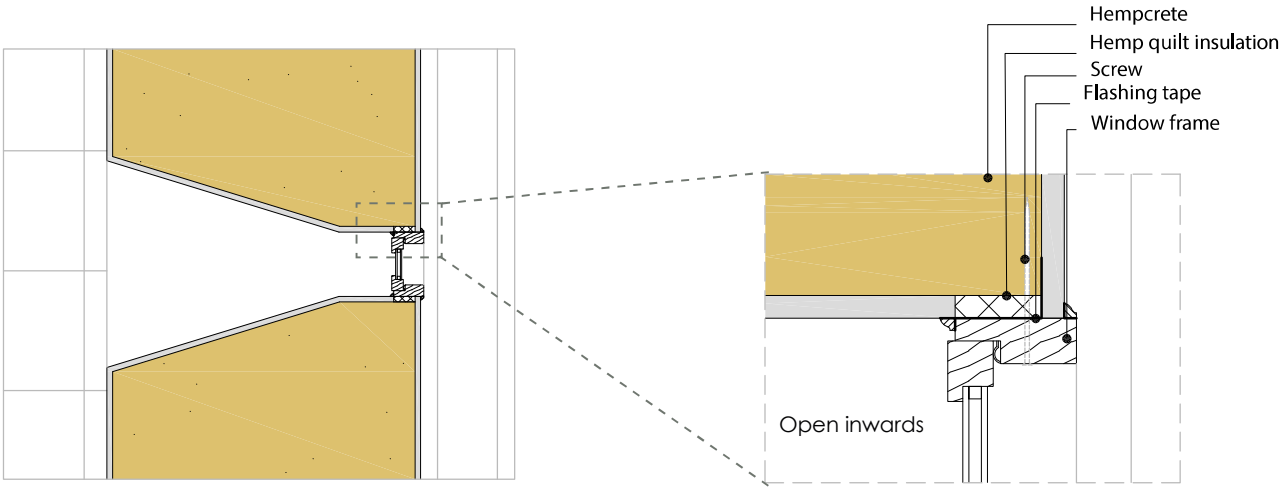
Table 2 - Comparison of windows plan option 1

	Parameters							
	Frame Width [cm]	Glazed Surface	Net width of glazed surface [cm]	Material Description	Easy of maintenance	How to build it?	Commercial or handmade?	Carves in the wall
W 1E	7	0,11 x 1,11 m =0,12 m²	13	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation -Hemp quilt insulation -Screws -Flashing tape	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the wall and conect the window shash into the frame.	Commercial	No carve
W 1F	5	0,16 x 1,16 m = 0,19 m²	18	-Commercial window, with front fixation. Only frame -Hemp quilt insulation -Mashed frame seal bead -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done.	Prepare the hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the cut in the wall. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial	5x3 cm carve
W 1G	7	0,11 x 1,11 = 0,12 m²	13	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation -Hemp quilt insulation -Screws -Flashing tape	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the cut in the wall, and conect the window shash into the frame.. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial	4x4 cm carve
W 1H	7	0,17 x 1,17 = 0,20 m²	19	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation. -Hemp quilt insulation -5x4cm wood structure. -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the wood structure so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape also around the wood structure to provide airtightness. Screw the window frame on the wood frame, and connect the window sash into the frame. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial	12x6 cm carve

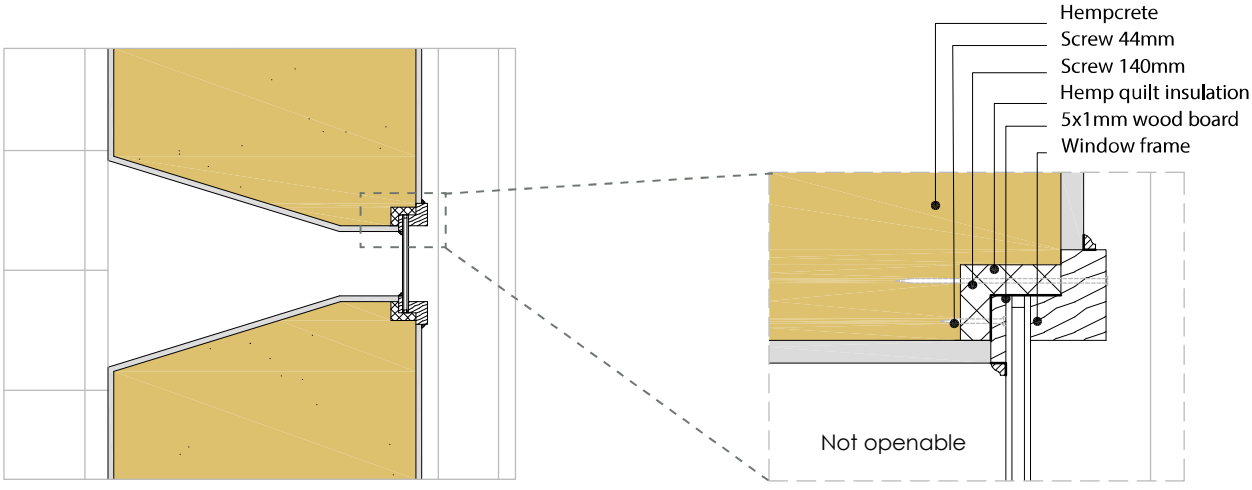
Table 3 - Comparison of windows plan option 1



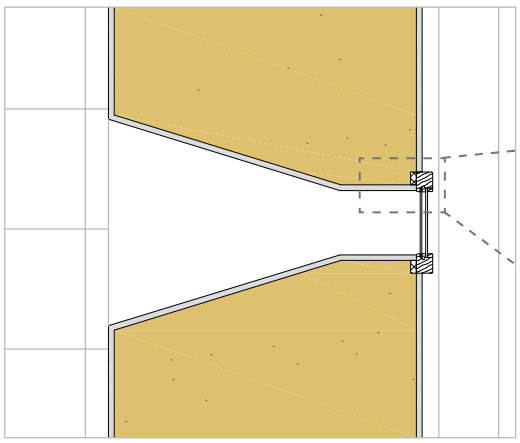
Window 2A Plan Scale 1:20 Window 2A Detail Scale 1:5



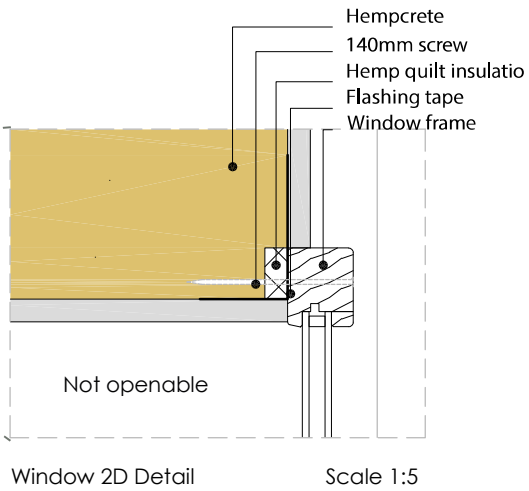
Window 2B Plan Scale 1:20 Window 2B Detail Scale 1:5



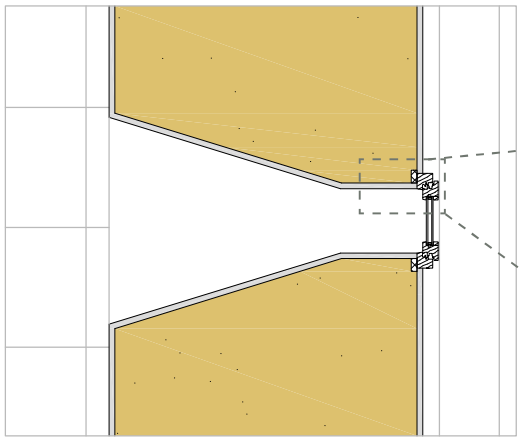
Window 2C Plan Scale 1:20 Window 2C Detail Scale 1:5



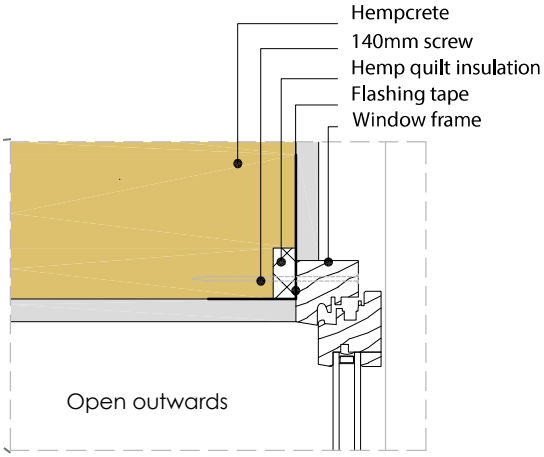
Window 2D Plan Scale 1:20



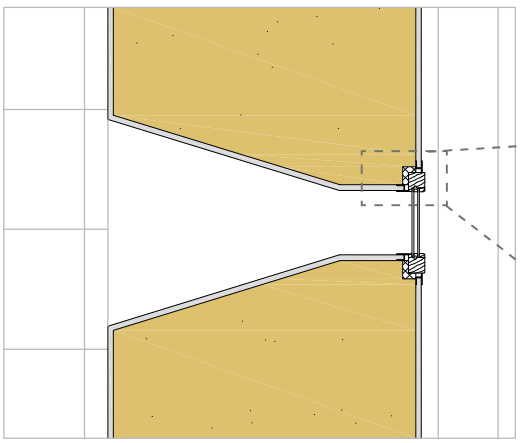
Window 2D Detail Scale 1:5



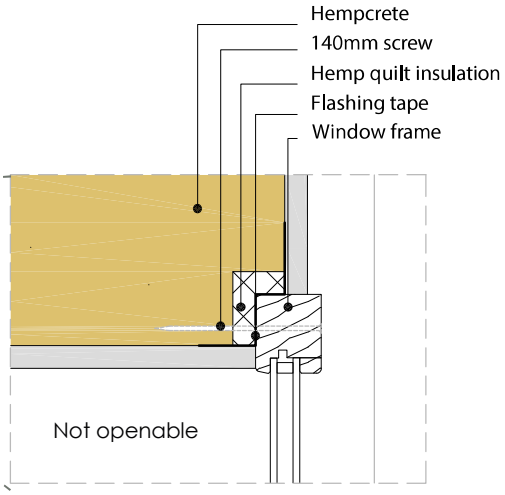
Window 2E Plan Scale 1:20



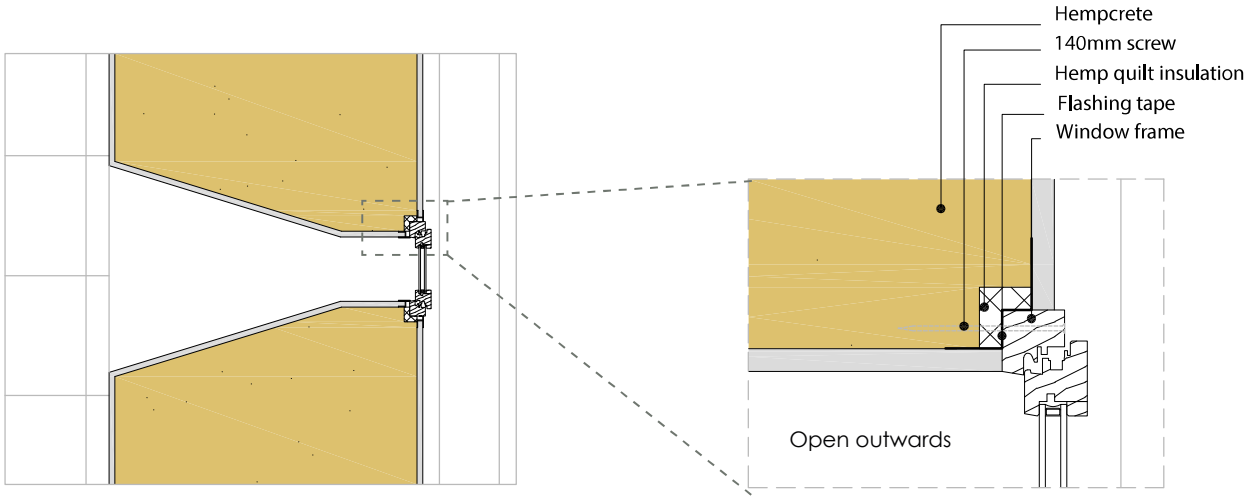
Window 2E Detail Scale 1:5



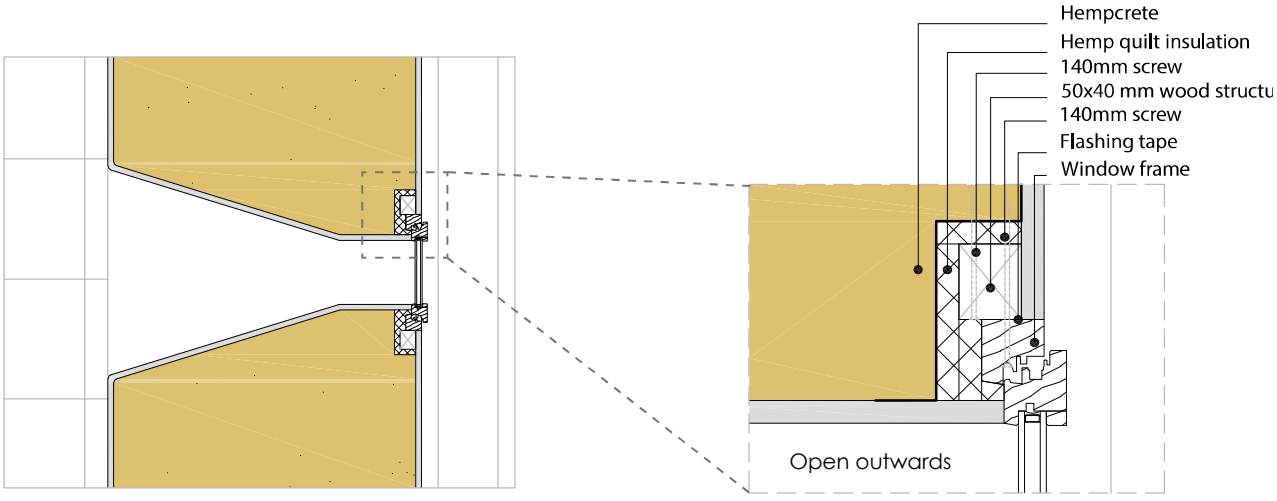
Window 2F Plan Scale 1:20



Window 2F Detail Scale 1:5



Window 2G Plan Scale 1:20 Window 2G Detail Scale 1:5



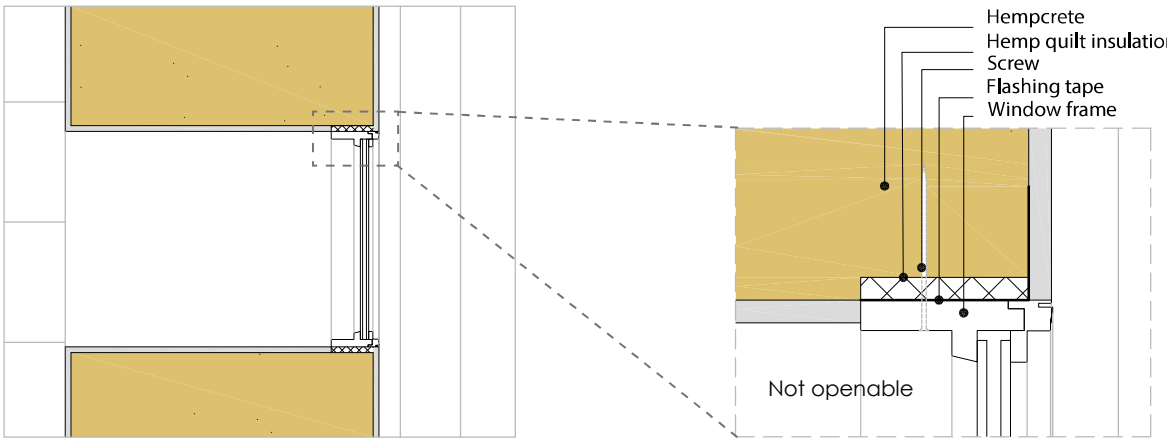
Window 2H Plan Scale 1:20 Window 2H Detail Scale 1:5

	Parameters							
	Frame Width [cm]	Glazed Surface	Net width of glazed surface [cm]	Material Description	Easy of maintenance	How to build it?	Commercial or handmade?	Carves in the wall
W 2a	4	0,12 x 1,12 m =0,13 m²	12	-Hemp quilt insulation -Picture window frame -Screws -Flashing tape	For maintenance, the hole frame would have to be taken out to replace damage piece.	Prepare the surface with the hemp quilt insulation to prevent thermal bridging. On top, set flashing tape for airtightness. Place the window frame and screw it into the hempcrete wall.	Commercial	No carve
W 2B	5	0,06 x 1,06 m = 0,06 m²	6	-Hemp quilt insulation -3x8cm wood profiles (counter-frame) -3x8cm wood profiles (window frame) -Wind sealant rubber -Screws -Flashing tape -Window bead -Burnt sand mastic -Flashing tape -Insulated double glass	With the frame, it is possible to remove the wind sash to replace damage piece	First the frame has to be built, it is composed by the outer wood frame, profile 30x80 mm, where the glass frame will sit, in the connection there are air rubber sealants. Then, the surface is prepared with the hemp quilt insulation and flashing tape. Place the window frame and screw it into the hempcrete wall.	Handmade	No carve
W 2C	7	0,17 x 1,17 = 0,2 m²	15	- L shape wood profile (external frame) -Hemp quilt insulation -1x4,5cm wood profile (internal frame) -140mm screw -80mm screw -Wood window bead -Burnt sand mastic -Insulated double glass	Since the window is composed by independent pieces, the external frame can be removed to release the other pieces and replace what is needed	Prepare the hempcrete wall by carving it, then prepare the surface with hemp quilt insulation and flashing tape. Position the first wood profile 4,5x1,5mm and screw it in the wall. Position the glass, then the external wood frame in 'L' shape, fixing this on the wall, which will compress all the parts together.	Handmade	5x7 cm carve
W 2D	5	0,163 x 1,163 = 0,19 m²	16	-Commercial window, with front fixation. Only frame -Hemp quilt insulation -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the wall.	Comercial	No carve

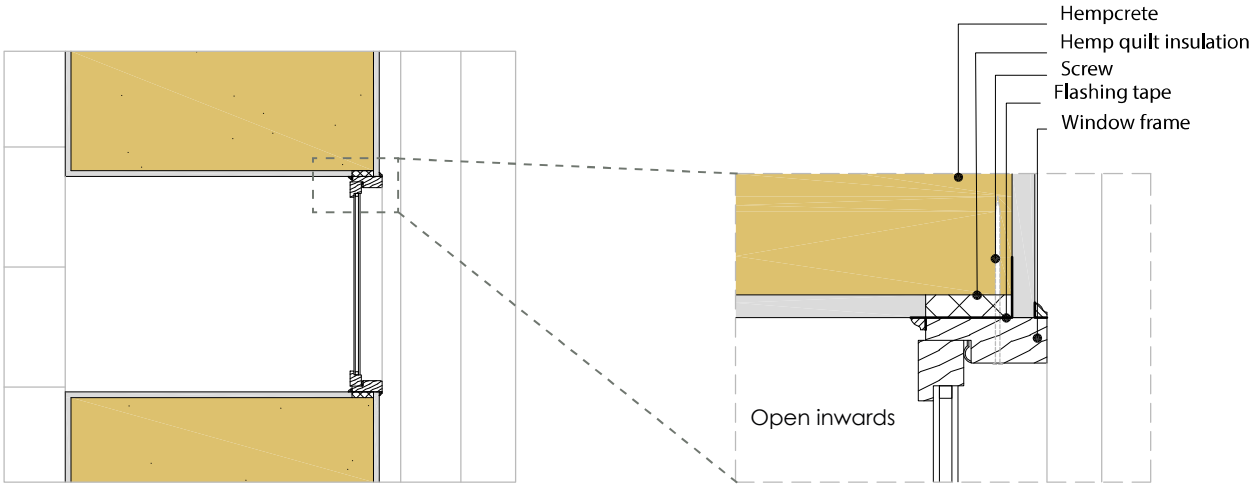
Table 4 - Comparison of windows plan option 2

	Parameters							
	Frame Width [cm]	Glazed Surface	Net width of glazed surface [cm]	Material Description	Easy of maintenance	How to build it?	Commercial or handmade?	Carves in the wall
W 2E	7	0,11 x 1,11 m =0,12 m²	13	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation -Hemp quilt insulation -Screws -Flashing tape	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the wall and conect the window shash into the frame.	Commercial	No carve
W 2f	5	0,16 x 1,16 m = 0,19 m²	18	-Commercial window, with front fixation. Only frame -Hemp quilt insulation -Mashed frame seal bead -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done.	Prepare the hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the cut in the wall. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial	5x3 cm carve
W 2g	7	0,11 x 1,11 = 0,12 m²	13	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation -Hemp quilt insulation -Screws -Flashing tape	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the cut in the wall, and conect the window shash into the frame.. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial	4x4 cm carve
W 2h	7	0,17 x 1,17 = 0,20 m²	19	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation. -Hemp quilt insulation -5x4cm wood structure. -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the wood structure so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape also around the wood structure to provide airtightness. Screw the window frame on the wood frame, and connect the window sash into the frame. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial with handmade counter-frame	12x6 cm carve

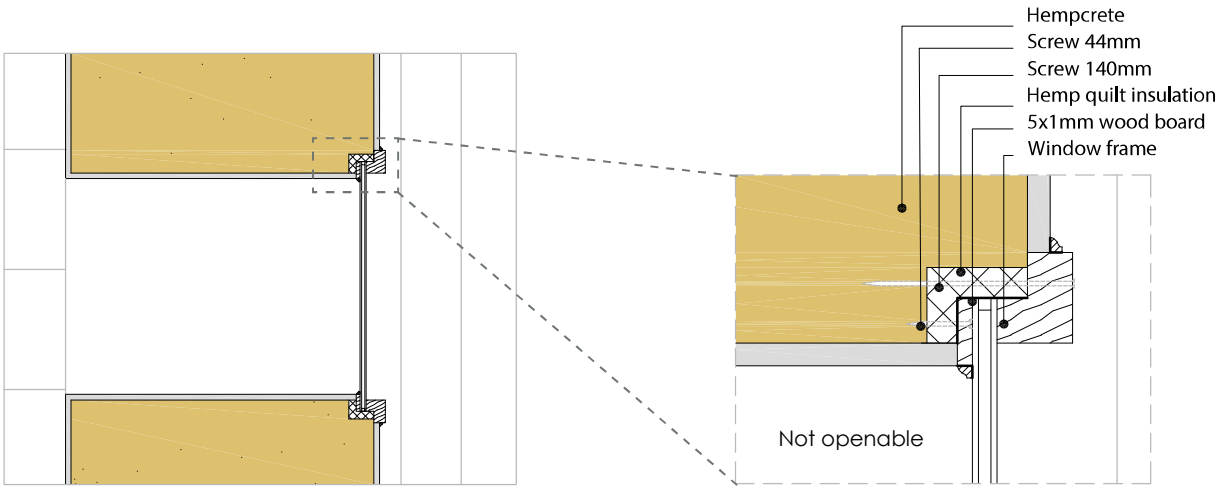
Table 5 - Comparison of windows plan option 2



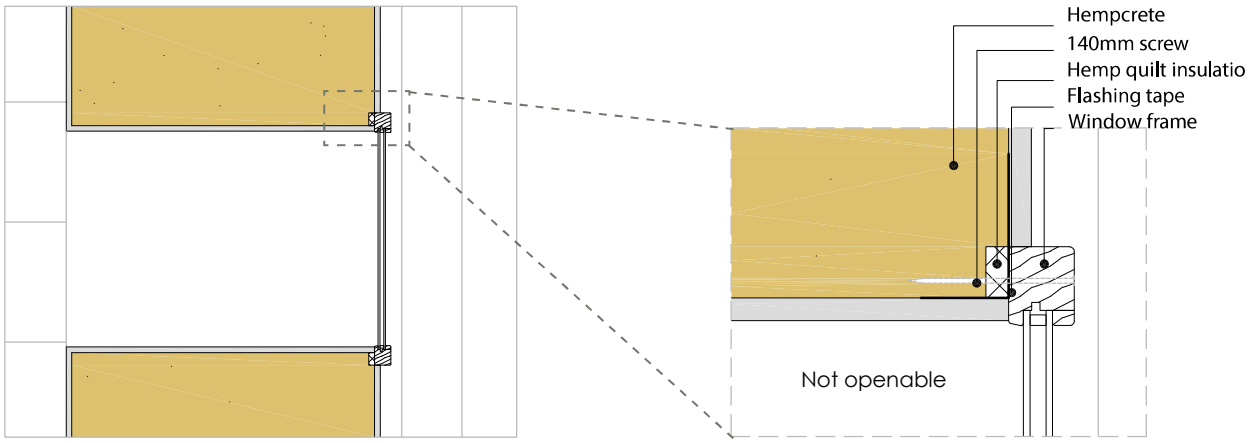
Window 3A Plan Scale 1:20 Window 3A Detail Scale 1:5



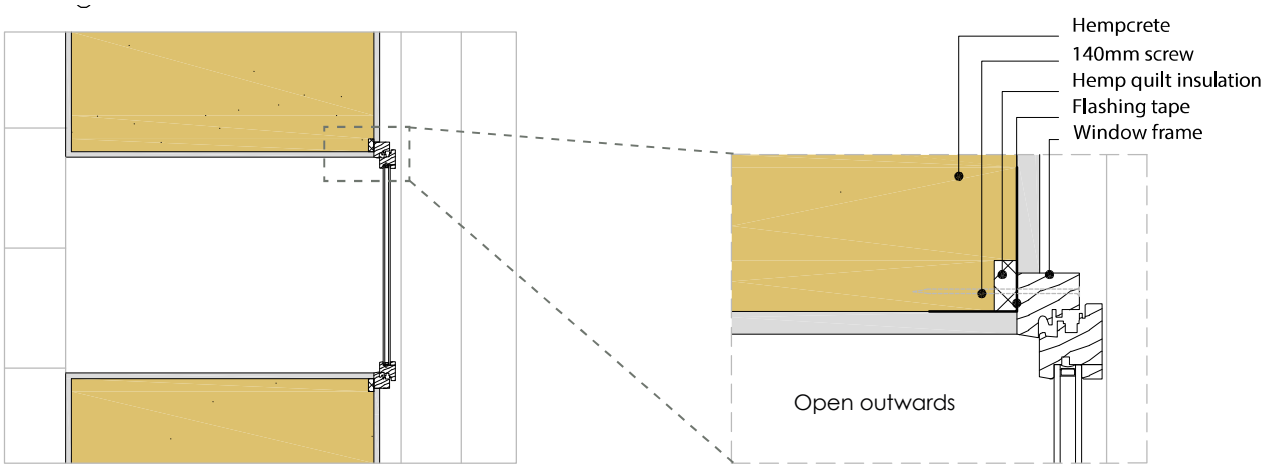
Window 3B Plan Scale 1:20 Window 3B Detail Scale 1:5



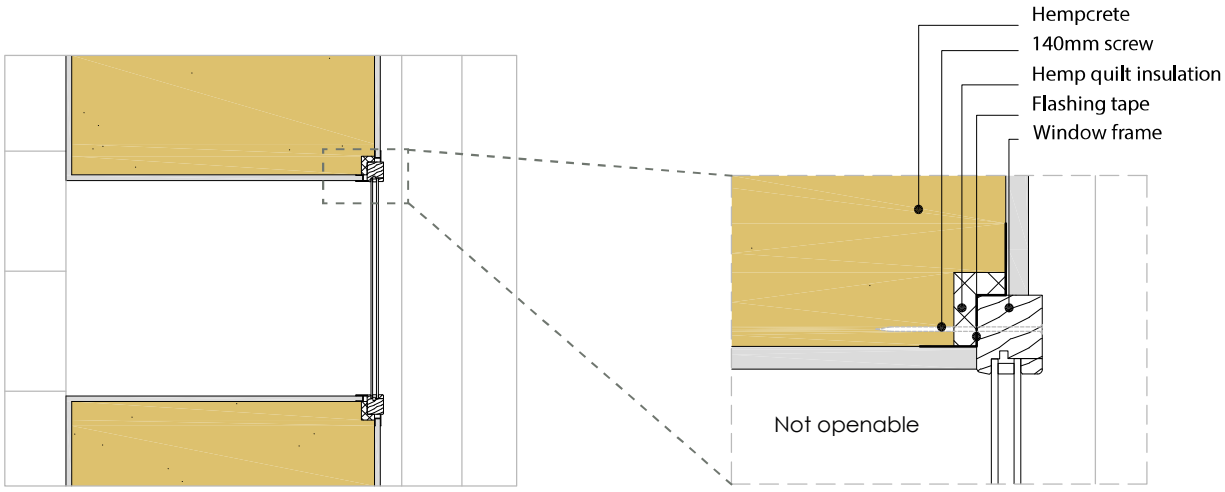
Window 3C Plan Scale 1:20 Window 3C Detail Scale 1:5



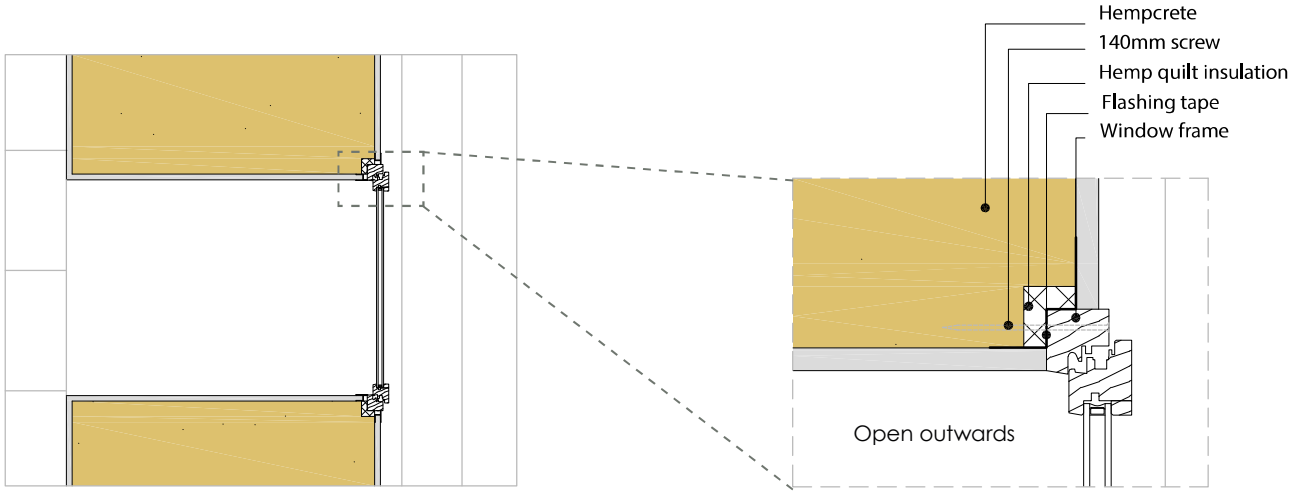
Window 3D Plan Scale 1:20 Window 3D Detail Scale 1:5



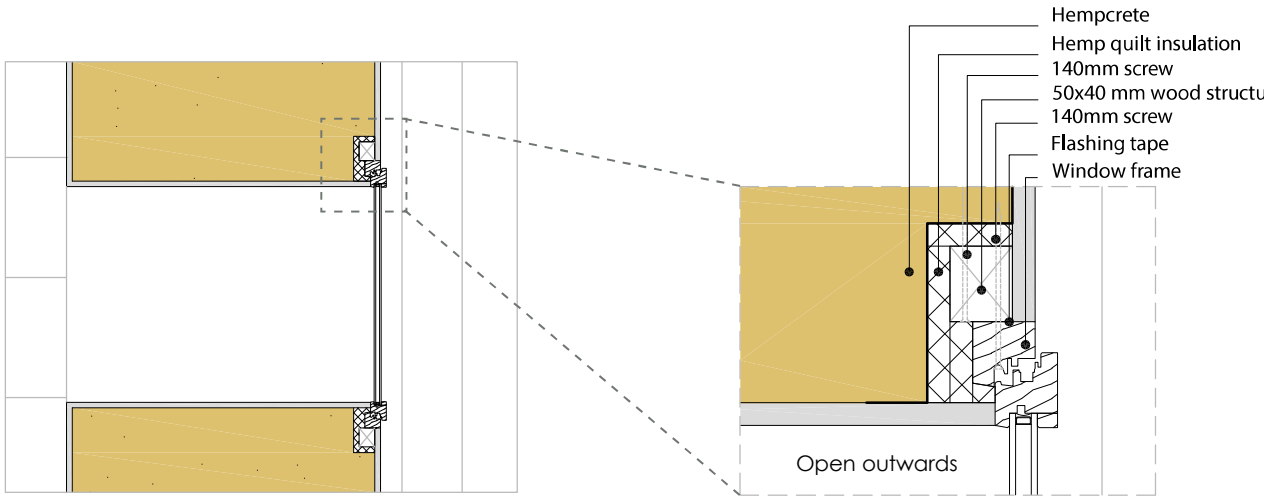
Window 3E Plan Scale 1:20 Window 3E Detail Scale 1:5



Window 3F Plan Scale 1:20 Window 3F Detail Scale 1:5



Window 3G Plan Scale 1:20 Window 3G Detail Scale 1:5



Window 3H Plan Scale 1:20 Window 3H Detail Scale 1:5

	Parameters							
	Frame Width [cm]	Glazed Surface	Net width of glazed surface [cm]	Material Description	Easy of maintenance	How to build it?	Commercial or handmade?	Carves in the wall
W 3a	4	0,49x1,09 = 0,53m²	51	-Hemp quilt insulation -Picture window frame -Screws -Flashing tape	For maintenance, the hole frame would have to be taken out to replace damage piece.	Prepare the surface with the hemp quilt insulation to prevent thermal bridging. On top, set flashing tape for airtightness. Place the window frame and screw it into the hempcrete wall.	Commercial	No carve
W 3B	5	0,46x1,06 = 0,49 m²	48	-Hemp quilt insulation -3x8cm wood profiles (counter-frame) -3x8cm wood profiles (window frame) -Wind sealant rubber -Screws -Flashing tape -Window bead -Burnt sand mastic -Flashing tape -Insulated double glass	With the frame, it is possible to remove the wind sash to replace damage piece	First the frame has to be built, it is composed by the outer wood frame, profile 30x80 mm, where the glass frame will sit, in the connection there are air rubber sealants. Then, the surface is prepared with the hemp quilt insulation and flashing tape. Place the window frame and screw it into the hempcrete wall.	Handmade	No carve
W 3C	7	0,56x1,16 = 0,65 m²	58	- L shape wood profile (external frame) -Hemp quilt insulation -1x4,5cm wood profile (internal frame) -140mm screw -80mm screw -Wood window bead -Burnt sand mastic -Insulated double glass	Since the window is composed by independent pieces, the external frame can be removed to release the other pieces and replace what is needed	Prepare the hempcrete wall by carving it, then prepare the surface with hemp quilt insulation and flashing tape. Position the first wood profile 4,5x1,5mm and screw it in the wall. Position the glass, then the external wood frame in 'L' shape, fixing this on the wall, which will compress all the parts together.	Handmade	5x7 cm carve
W 3D	5	0,56 x 1,16 = 0,65m²	58	-Commercial window, with front fixation. Only frame -Hemp quilt insulation -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the wall.	Comercial	No carve

Table 6 - Comparison of windows plan option 3

	Parameters							
	Frame Width [cm]	Glazed Surface	Net width of glazed surface [cm]	Material Description	Easy of maintenance	How to build it?	Commercial or handmade?	Carves in the wall
W 3e	0,07 m	0,51x1,11 = 0,57m²	0,53 m	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation -Hemp quilt insulation -Screws -Flashing tape	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the wall and conect the window shash into the frame.	Commercial	Non
W 3f	0,05 m	0,58x1,18 = 0,68 m²	0,60	-Commercial window, with front fixation. Only frame -Hemp quilt insulation -Mashed frame seal bead -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done.	Prepare the hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the cut in the wall. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial	5x3 cm
W 3g	0,07 m	0,53x1,13 = 0,60m²	0,55m	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation -Hemp quilt insulation -Screws -Flashing tape	The window frame can be unscrew from the hempcrete so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the contact hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape to provide airthigthness. Screw the window frame into the cut in the wall, and conect the window shash into the frame.. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial	5x7 cm
W 3h	0,07 m	0,59x1,19 = 0,70 m²	0,60m	-Commercial window (frame and counter-frame) front fixation. -Hemp quilt insulation -5x4cm wood structure. -Flashing tape -Screws	The window frame can be unscrew from the wood structure so the maintenance can be done. Also, in this case, the sash can be disconnected from the frame, allowing it's replacement if needed.	Prepare the hempcrete surface with hempquilt insulation, next add flashing tape also around the wood structure to provide airtightness. Screw the window frame on the wood frame, and connect the window sash into the frame. Add mashed frame seal bead in the window frame angle with the hempcrete wall.	Commercial with handmade counter-frame	4x4 cm

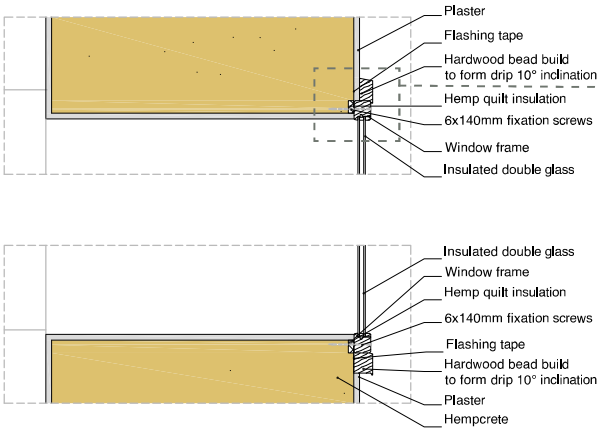
Table 7 - Comparison of windows plan option 3

After analysing all the window options, two have shown to better meet the requirements highlighted above.

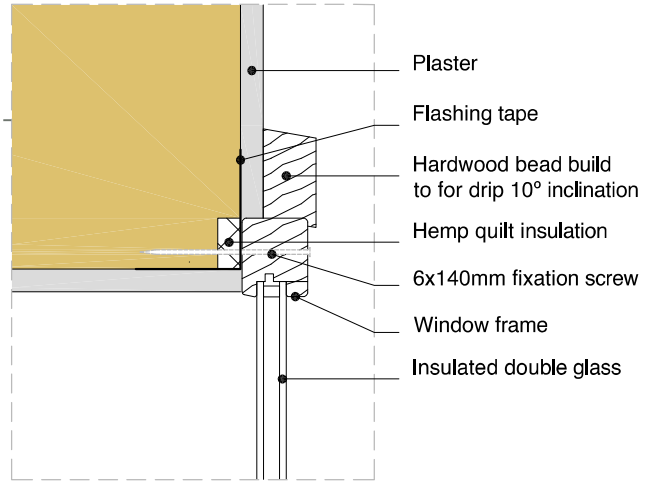
Window **d** is of simple execution, using a small amount of materials, and also it is of easy maintenance, but there is no structure to assure its fixation onto the wall. Since the superficial strength of the hempcrete is yet not known, it is unpredictable if fixation are going to be strong enough to hold the windows in place. The external fixation allows to take advantage of all the opening, and is not difficult to install in spite of the limited size. Also, there is no need for cuts to be done in the wall to accommodate the window. The airtightness is not expected to be ideal.

Window **h**, in other hand, has a wood structure embedded into the hempcrete to improve the strength of the window's fixation. It is, however, a more complex option, requiring a more precise work, with carves in the wall. But it is expected that the airtightness and thermal insulation are better than option d, still with an easy maintenance and using all the space of the opening for glazing.

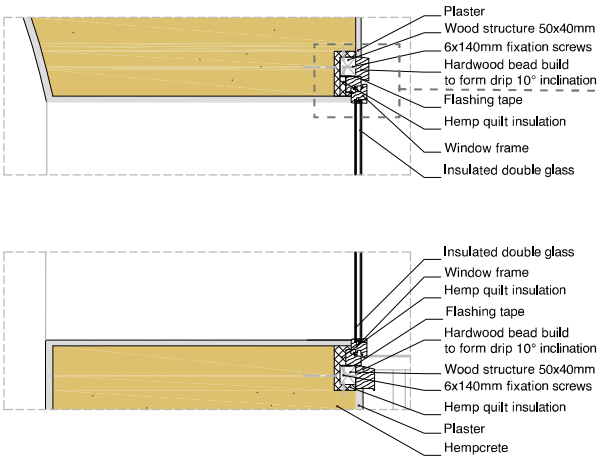
To add more information about the details of the window's installation, we developed the sections of both windows.



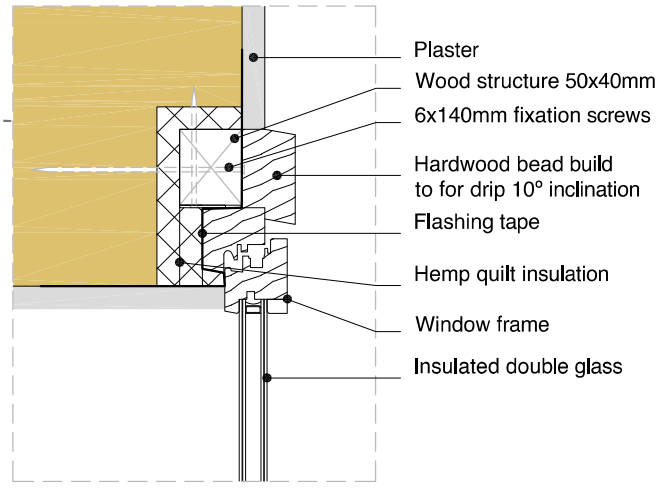
Window 3b Vertical Detail Scale 1:20



Window 3b Vertical Detail Scale 1:5



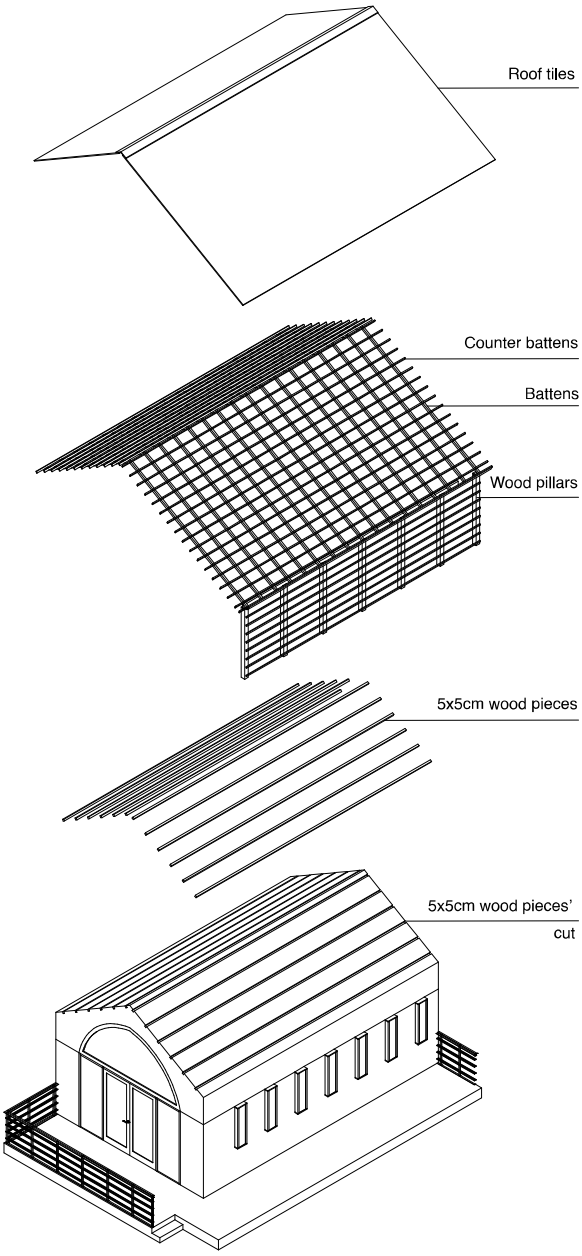
Window 3h Vertical Detail Scale 1:20



Window 3h Vertical Detail Scale 1:5

Option d shows a simpler installation, but a low thermal insulation performance. In other hand, letter h not only assures the proper fixation of the window, but also allows the maximum light inside the building, mantaining the thermal insulation properties of the window. In our opinion, this solution should be adopted for the pavilion.

8.4 ROOFING



Roof isometric

The monolithic building elements provide a continuous surface for setting the roof. Since the hempcrete surface is very brittle, to increase the fixing strength, wood pieces should be cast inside the material, in which the battens can be fixed. This prevents the accumulation of water, making a free path for the water to flow down, if any leakage happens. Furthermore, the surface should be covered with a waterproof membrane, since there is no other finishing protecting the hempcrete from direct moister or liquid water. The following elements were based on traditional wooden roof structures, with the counter battens being fix onto the battens, that are screwed to the wood pieces mentioned before. The roof tiles lay on the counter battens.

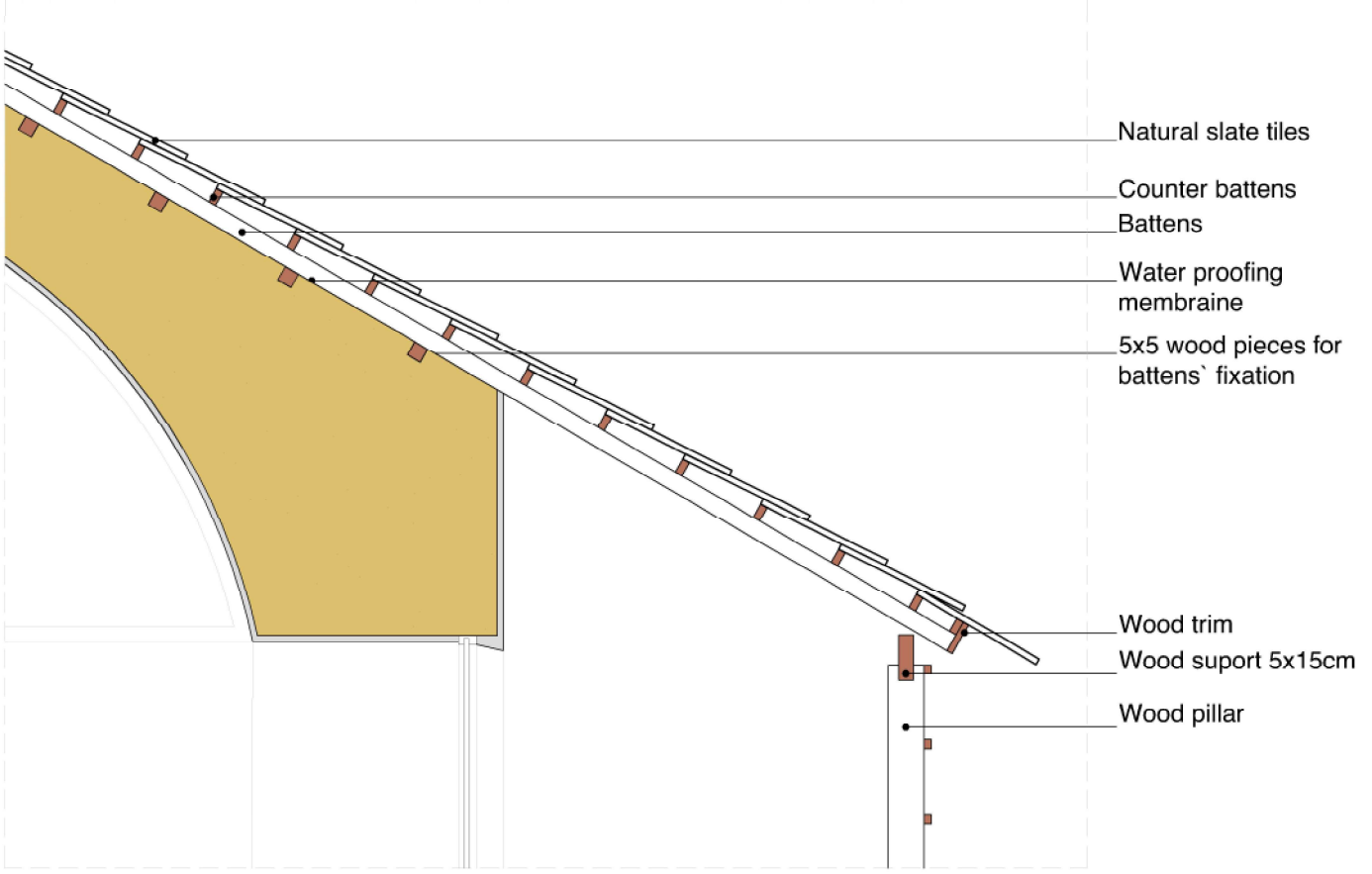
For the roof tiles, it is important to take into consideration not only the cost and design, but also its load. Without the results of the prototype, the actual compressive strength of the material it is not yet know. So, it is also important to choose a lightweight breathable natural material. Three roof tiles were considered, red cedar shakes, clay roof tiles and natural slates.

Red cedar shakes are the lighter, with an average weight of 11,7 kg/m², with good weather resistance. It is a vapour permeable material. But, it requires a grate amount of maintenance.

Manufactured form clay roof tiles demands less maintenance, they are also a natural material and with good vapour permeability. But it is the heaviest of the three options.

A middle term option would be the natural slates, they are a natural material, less heavy than the clay roof tiles, but heavier than red ceder shakes, but it need less maintenance, having a longer durability.

Although the maintenance is a point to consider, the frequency of interventions is uncertain, so it is better to detail a long-lasting material, than the very light



Roof Detail

Scale: 1:25

one which may need more assistance. For these reasons, natural slate roof tiles seem to be the more suitable option.

Since a covered deck is positioned against the south facade of the building, the roof will need to have its extention supported by wood pillars. Attached to them, there may be horizontally wooden slats, to serve as supports, to grow plants.

8.5 MATERIAL'S DESCRIPTION

In order to assist the further development of the construction of the Pavilion, we did a table with a preview of the materials needed to go on with the construction.

The table is divided by building elements, Floor, Deck, Walls and openings, and roof. The hempcrete elements were divided into each element of the mix, Hemp fibres, NHL5 lime, white cement, pozzolan and water.

This bill of quantities is just an average of materials needed, being open for further changes once the prototype has been built and tests performed.

	Quantity of materials			
	Material		Dimension	Quantity
Flooring	Coated expanded clay		22,75 m² 15cm thickness	3,5m³
	Geotextile membraine		6,5 x 3,5 m	22,75m²
	Hempcrete slab	Hemp fibers	4,35m³	3472 L
		NHL5 lime	4,35m³	1389 L
		White cement	4,35m³	556 L
		Pozzolan	4,35m³	208 L
		Water	4,35m³	1181 L
	Natural stone tiles		To de defined	29m²
	Recylced foam glass blocks		22,6x7,5x15cm	1436 units
	Engineering bricks		12x5x22,5cm	708 units
Decking	Timber joist	Profile 6x12 cm	2,1 m length	4 units
			2,55m length	4 units
			1,50m length	1 units
			1m length	9 units
			1,8m length	1 units
	Decking wood	Profile 145x21 mm	2m length	83 units
	Timber joints	Profile 4x8 cm	1,30m length	9 units
			1,60m length	5 units
	Railings		90 cm high	8,25m
Walls and oppenings	Hempcrete for walls	Hemp fibers	24,41m³	19.484 L
		NHL5 lime	24,41m³	7.794 L
		White cement	24,41m³	3.117 L
		Pozzolan	24,41m³	1.169 L
		Water	24,41m³	6.625 L
	Windows	Window H	20x120 cm or 60x120 cm	7 units
	Opus signinum plaster		69,12 m²	7 m³
	Lime based plaster		95,6 m²	9,6 m³
	Lime based rough plaster		164,72 m²	16,5 m³
Roofing	Pergola's pillar	Profile 15x5cm	2,4m heigth	9 units
	Wood pieces	Profile 2x2cm	1 m length	72 units
	Wood support	Profile 5x15cm	2,15m length	4 units
	Wood trim	Profile 2x12 cm	1,70 m length	5 units
	Battens	Profile 6x5 cm	4,7 m length	17 units
			3,35m length	17 units
	Counter battens	Profile 3x5 cm	8,70 m length	29 units
	Roof tiles	Natural slate tiles	75m²	504 units
	5x5 wood pieces	Profile 5x5 cm	8,10 m length	12 units
	Water proofed membraine		2,95m*8,10m	47,76 m²

Table 8 - Quantity of materials for the pavilion.



Hemp pavilion final perspective

Bibliography

Testi e articoli scientifici:

[1] https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement

[2] Programme for Energy Efficiency in Buildings (2020b).
Programme for Energy Efficiency in Buildings – Status 2020.
https://www.peeb.build//imglib/downloads/PEEB_Status%20
2020_final_web%20200519.pd

[3] Technology Roadmap—Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA (International Energy Agency), April, 2018. Available at https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry, access on 10/08/2021.

[4] Y.Florentin, D.Pearlmutter, B.Givoni, E. Gal, A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials, Energy and Buildings https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.097

[5] The hempcrete book. Design and build whit hemp-lime. W. Stanwix; A. Sparrow. 2014, Cambridge [England].

[6] Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties. B. Seng, C. Magniont, S. Lorente. 2018, Journal of Building Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.016

[7] Hempcrete – an environmentally friendly material? H. Bedlivá, N. Isaacs, 2014, Advanced Materials Research Vol 1041, p. 83-86. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.83

[8] The Hemplime Vault. D. Lea and S. Harris. Educating architects towards innovative architecture. 245-252; 2010.

[9] PRODUCT LINE GREEN BUILDING AND RESTORATION - Opus Signinum, technical data sheet, rev. 2, TCS, 2021. available at https://www.tcscalce.it/en/prodotto/cocciopesto, acess 20/05/2022.

[10] "Hemp lime construction- a guide to building with hemp lime composites", Rachel Bevan and Tom Woolley, IHS BRE Press, 2008

[11]Hemplime vault, Vertical Studio 2009, Welsh School of Architecture, Cardiff University,
Tutors: David Lea, Sylvia Harris

[12]"Construction and Building Materials" 28, 2012, pp.50–56, "Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes", Laurent Arnaud, Etienne Gourlay, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Université de Lyon, Département Génie Civil et Bâtiment

[13]"Assessing the variability of hemp concrete properties during experimental tests: a focus to specimens' number", C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, Polytech Clermont-Ferrand. 3rd International
Conference on Bio-Based Building Materials, June 26th-28th 2019, Belfast, UK

[14]"Multicriteria analysis of hemp particles' impact on physical and thermo-mechanical performances of hemp concrete" C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France. 2nd International Conference on

Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIbrous materials, June 21th-23th 2017, Clermont-Ferrand-Mazhoud, B., Viel, M., Collet, F., Phelipot-Mardelé, A., Lanos, C., & Prétot, S. (2017).

[15]"Is hemp lime concrete a mix of hemp and lime?". Academic Journal of Civil Engineering, 35(2), 422-431. 2nd International Conference on Bio-based Building Materials &1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIbrous materials, June 21th - 23th 2017 Clermont-Ferrand, France

[16]EJECE – 13/2009. "Organic materials for construction", pP. 1039 -1050 "Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete", Tai-Thu Nguyen, Vincent Picandet, Sofiane Amziane, Christophe Baley. Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB) Université de Bretagne Sud, Centre de Recherche de Saint-Maudé BP 92116, F-35631 Lorient cedex

[17]"Cement and Concrete Composites" 67 (2016) pp. 60-72, Study of lime hemp concrete (LHC) e Mix design, casting process and mechanical behaviour. Pierre Tronet, Thibaut Lecompte, Vincent Picandet, Christophe Baley, Univ. de Bretagne-Sud, EA4250, LIMATB F, 56100 Lorient, France

[18]Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M. et al. Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: "Characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity". Mater Struct 50, 167, RILEM (2017)

[19] "Analisi, verifiche e consolidamento strutturale di archi e volte, manuale per la valutazione della sicurezza e per la progettazione degli interventi, Elide Tomasoni, Dario Flacconi editore, 2015.

Aziende e prodotti, sitografia:

https://www.hanfstein.eu/home-italiano/propriet%C3%A0/

https://www.bancadellacalce.it/bdc/prodotti-bdc/getto/

https://www.edilcanapasrl.it/azienda/

https://www.senini.it/

https://www.hempecosystems.org/hemphurd

https://drive.google.com/drive/folders/1SgT5fERm_PXdjjDjTKVy56u_8NSwBI03

http://www.technichanvre.com/isolation-chanvre-isolation-ecologique-et-saine/chanvre-etchaux-enduits-et-finitions/

https://www.bcb-tradical.com/en/reference-documents/

http://lachanvriere.

http://www.eurochanvre.eu/#produits

https://www.cavac-biomateriaux.com/applications/

https://www.biofib.com/biofibat/

https://planetechanvre.com/nos-produits/habitat/

https://www.agrochanvre-ecoconstruction.com/

https://gatichanvre.fr/

https://www.construire-en-chanvre.fr/missions

https://www.f-r-d.fr/produits/catalogue/

https://www.interchanvre.org/interchanvre

https://www.hanfundkalk.de/hanf-baustoff-der-zukunft/

https://baubiologie-magazin.de/hanf-baustoff-der-zukunft/

Esempi di utilizzo in edilizia:

EDIFICIO WISE: https://cat.org.uk/info-resources/free-information-service/building/wise-building/

PREMIO CAT: https://cat.org.uk/cat-awarded-for-a-fantastic-creation/

https://www.edilportale.com/news/2020/12/focus/calce-aerea-idrata-grassello-di-calce-e-calce-idraulica_80114_67.html

https://www.forumcalce.it/malte-aeree-o-idrauliche/

https://www.alfatest.it/approfondimenti/granulometria-i-vari-metodi-di-misura

https://www.geoservicelab.it/news/normativa-e-procedure/cls-come-e-quando-sottoporre-a-prova-di-laboratorio-resistenza-a-compressione-i-cubetti-di-calcestruzzo/

http://www.locatelliintonaci.it/scheda_prodotto.php?id_prodotto=3&id_linea=11

https://leroymerlin-res.cloudinary.com/v1/DAMEO/200778

https://www.bricoman.it/pub/media/catalog/product/f/7/8/f/cemento_rapido_vicat_kg_porte_de_france_10056419_securitylabel.pdf

Strumenti prove:

http://www.damp-meter-direct.co.uk/

http://www.damp-meter-direct.co.uk/protimeter-digital-mini.htm#.YL3LH_kzZPZ

www.entpe.fr

https://www.pce-instruments.com/italiano/contatto

https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/igrometro-kat_101460.htm?start=1-https://www.pce-instruments.com

Laboratorio:

https://www.edilportale.com/news/2020/12/focus/calce-aerea-idrata-grassello-di-calce-e-calce-idraulica_80114_67.html

https://www.cavicchiimpianti.com/prodotti/vibrovagli/ https://www.forumcalce.it/malte-aeree-o-idrauliche/

https://www.alfatest.it/approfondimenti/granulometria-i-vari-metodi-di-misura

https://www.geoservicelab.it/news/normativa-e-procedure/cls-come-e-quando-sottoporre-a-prova-di-laboratorio-resistenza-a-compressione-i-cubetti-di-calcestruzzo/

Progettazione volta e curva pressioni:

Corso di progettazione strutturale B, a.a. 2010/2011 Prof. G. Salerno, sezione "gli archi", appunti elaborati da Arch. C. Provenzano

Lezione su "Strutture funicolari: funi ed archi", Principi di statica e di dinamica delle strutture, Facoltà di Architettura, Università degli studi della Basilicata, Michelangelo Laterza

https://www.marcodepisapia.com/verifica-