

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DICAAR - Dipartimento di ingegneria civile, ambientale e architettura



“Diagnosi energetica di un edificio pubblico con caratteristiche tipiche del Sulcis e sviluppo di un prototipo per misurazioni da laboratorio di parametri relativi alle prestazioni termiche dei materiali tipici del Sulcis”

Progetto PAR 2017

Dimensionamento, realizzazione e test di un prototipo di apparecchiatura per la misura in laboratorio delle prestazioni termiche dei materiali costruttivi locali, maggiormente ricorrenti nell’edificazione del patrimonio storico della città di Carbonia.

Roberto Ricciu
Andrea Frattolillo
Roberto Baccoli
Roberto Innamorati
Antonio Mascia
Chiara Salaris

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e Architettura
Università di Cagliari
Via Santa Croce 67
09124 Cagliari
+39 070 6755266
ricciu@unica.it

COMMITTENTE: Sotacarbo SpA
DATA: Settembre 2018

Indice

1	SOMMARIO.....	3
2	INTRODUZIONE	4
3	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
	PROTOTIPO PER MISURAZIONI IN LABORATORIO DI PARAMETRI RELATIVI ALLE PRESTAZIONI TERMICHE DEI MATERIALI TIPICI DEL SULCIS.....	6
3.1	INTRODUZIONE E NORMATIVA.....	6
3.2	RICHIAMI TEORICI SULLA TRASMISSIONE DEL CALORE	6
3.2.1	<i>Modello di trasmissione di calore monodimensionale in regime stazionario</i>	7
3.2.2	<i>Scambio di calore per conduzione</i>	8
3.2.3	<i>Il regime stazionario</i>	11
3.2.4	<i>Materiali non omogenei</i>	14
3.3	LA SCELTA DELLA CELLA DI PELTIER	15
3.4	DESCRIZIONE DEL PROGETTO REALIZZATO	16
3.4.1	<i>Immagini del progetto dell'involucro realizzato</i>	23
3.5	PROVE SPERIMENTALI PER LA CONDUCIBILITÀ TERMICA	23
4	CONCLUSIONI.....	27
5	BIBLIOGRAFIA.....	29
6	ALLEGATO A.....	30

1 Sommario

La presente relazione è stata redatta nell'ambito della ricerca dal titolo "Diagnosi energetica di un edificio pubblico con caratteristiche tipiche del Sulcis e sviluppo di un prototipo per misurazioni in laboratorio di parametri relativi alle prestazioni termiche dei materiali tipici del Sulcis", commissionata dalla Società Sotacarbo SPA al Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e Architettura dell'Università di Cagliari. Tale indagine fa parte del Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2017 per la Ricerca di Sistema Elettrico e si inserisce nell'ambito della sub-attività *"Dimensionamento, realizzazione e test di un prototipo di apparecchiatura per la misura in laboratorio delle prestazioni termiche dei materiali costruttivi locali, maggiormente ricorrenti nell'edificazione del patrimonio storico della città di Carbonia."* di cui al citato Piano Annuale di Realizzazione 2017.

2 Introduzione

L'attività di ricerca svolta ha avuto anzitutto l'obiettivo di progettare e realizzare uno strumento per la caratterizzazione termica dei materiali comunemente utilizzati nell'edilizia per la costruzione della città di Carbonia. Per far ciò ci si è basati sull'indagine storica sull'evoluzione del costruito della città di Carbonia, di cui alla relazione finale dell'attività 2015-16. Il progetto è stato suddiviso in due annualità e viene a completare le attività 2016-17.

La progettazione e realizzazione del prototipo finale per la misura della conducibilità termica dei materiali da costruzione è passato attraverso la realizzazione di una serie di prototipi e test in cui sono stati curati sia i parametri metrologici della catena di misura che ergonomici e di funzionalità dell'interfaccia del software di programmazione.

3 Descrizione delle attività svolte e risultati

In un due anni, corrispondenti ai PAR 17 e 2018 è stato sviluppato un sistema di misura costituito da una parte hardware e una software.

La parte hardware, necessaria per generare in modo controllato il processo di conduzione termica attraverso un materiale sottoposto a test e per acquisire nel tempo i dati relativi alla distribuzione di temperatura e di flussi di calore.

La parte software dedicata alla visualizzazione ed elaborazione numerica dei dati acquisiti.

Il sistema sviluppato si basa sull'utilizzo di due celle di Peltier che svolgono il ruolo di serbatoi di energia termica in grado di sottoporre il provino ad una differenza di temperatura pari a circa 20°C nell'intorno alla temperatura ambiente.

Il software basato sul sistema LabVIEW permette di eseguire la regolazione delle unità termiche e di acquisire tutte le informazioni relative all'evoluzione temporale delle temperature e dei flussi di calore rappresentativi del regime transitorio.

L'elaborazione dei dati sperimentali può essere eseguita attraverso un foglio di calcolo.

Tutto il sistema è stato testato attraverso un provino PMMA che approssima i requisiti di uniformità, omogeneità, ed isotropicità al fine di poter utilizzare la simmetria assiale della trasmissione del calore in tale provino con un modello bidimensionale.

I valori forniti dallo strumento, per confronto con valori di riferimento presentano un'incertezza del 3%.

PROTOTIPO PER MISURAZIONI IN LABORATORIO DI PARAMETRI RELATIVI ALLE PRESTAZIONI TERMICHE DEI MATERIALI TIPICI DEL SULCIS

3.1 Introduzione e Normativa

Oggetto della presente relazione è: **"dimensionamento, realizzazione e test di un prototipo di apparecchiatura per la misura in laboratorio delle prestazioni termiche dei materiali costruttivi locali, maggiormente ricorrenti nell'edificazione del patrimonio storico della città di Carbonia, e test di alcuni suoi componenti"**.

Per inquadrare brevemente l'argomento si specifica che lo studio dei materiali in oggetto secondo le norme ISO 8301 e UNI-EN 12667 fanno riferimento agli edifici di cui sono componenti e il punto di vista è rivolto alle prestazioni energetiche degli edifici tradizionali, la cui diffusione e vasto utilizzo nei centri storici anche nel mondo attuale ne rende interessante lo studio anche in termini di riposta alle prospettive nazionali di riqualificazione e certificazione energetica degli edifici. Il sistema di misura, sarà dunque realizzato in applicazione delle norme ISO 8301 e UNI-EN 12667, e a seguito di uno studio bibliografico si propone lo schema funzionale con l'utilizzo di due unità termiche ad effetto Peltier che avranno il compito di creare e mantenere all'interno del provino un flusso di calore costante, uniforme e unidirezionale, misurato da due termoflussimetri, al fine di stabilirne la conducibilità termica alla temperatura media di prova e intervallo di lavoro a cui è sottoposto il materiale durante il tuo normale utilizzo nella muratura.

- La normativa vigente europea e nazionale sul risparmio energetico nell'edilizia.

In materia di efficienza energetica la comunità europea indica la strada da percorrere ai Paesi membri attraverso la direttiva 2002/91/CE "Rendimento energetico nell'edilizia" e la direttiva 2006/32/CE "Efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici" e successive.

L'Italia risponde a questa chiamata a più riprese pubblicando diversi decreti legislativi (abbreviati DLgs) e per ultimo il DPR 59/09, ovvero il Decreto del Presidente della Repubblica del 2 aprile 2009 n.59 entrato in vigore il 25 Giugno 2009.

Possiamo dividere la situazione legislativa in due tempi: prima della direttiva europea 2002/91/CE e dopo. Prima della direttiva europea la legge 373/76 con il suo regolamento di applicazione, il DPR 1052/77, prescriveva per la prima volta l'isolamento termico degli edifici e i tempi di funzionamento del riscaldamento. La disposizione più rilevante era costituita dall'obbligo del calcolo delle dispersioni che dovevano essere contenute entro un valore massimo prestabilito attraverso l'isolamento termico dell'involucro.

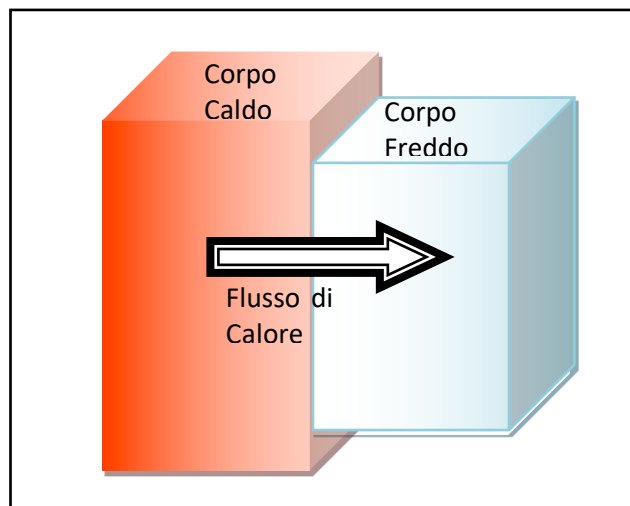
La Legge 10 del 9 gennaio 1991, con i suoi provvedimenti attuativi tra cui il D.P.R. 412/93 e 551/99, dettava le norme per il contenimento dei consumi di energia negli edifici pubblici e privati, qualunque ne sia la destinazione d'uso.

Le novità più rilevanti, rispetto al precedente provvedimento consistevano in:

- Calcolo dei consumi di energia del sistema integrato edificio-impianto.
- La certificazione energetica degli edifici (procedura di informazione dell'utente delle caratteristiche energetiche del sistema).

3.2 Richiami teorici sulla trasmissione del calore

Il calore è quella entità di scambio, assunta a forma di energia in base al primo principio della termodinamica, che viene scambiata fra due corpi quando fra di essi vi è una differenza di temperatura.



1) Schematizzazione del passaggio di calore tra due corpi a differente temperatura

L'esperienza mostra che tali corpi in contatto diatermico scambiano calore fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio. Tale processo avviene in accordo con i principi della termodinamica: il primo principio stabilisce l'equivalenza delle varie forme di energia, inoltre l'energia termica ceduta da un corpo è uguale a quella ricevuta dall'altro; il secondo principio afferma che il flusso di calore passa spontaneamente dal corpo più caldo a quello più freddo, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico.

Si distinguono tre modi di trasmissione del calore: conduzione, convezione e irraggiamento.

Il più delle volte questi tre modi sono concomitanti, ma può succedere che uno dei tre sia prevalente, potendo così trascurare gli altri due. In realtà solo la conduzione ricade rigorosamente nella definizione di scambio termico perché è l'unico che dipende esclusivamente dalla differenza di temperatura. In questo breve documento si tratterà in modo particolare delle relazioni che regolano in particolare lo scambio energetico per conduzione.

3.2.1 Modello di trasmissione di calore monodimensionale in regime stazionario

La nostra analisi è stata condotta ipotizzando il flusso di calore monodimensionale, anche se in generale la trasmissione del calore avviene lungo le tre direzioni spaziali. Se per esempio consideriamo la parete di un edificio, abbiamo che il flusso di calore si sviluppa prevalentemente nella direzione perpendicolare alla parete stessa, ma è probabile che a causa della stratificazione dell'aria, la parte più alta della parete si trovi a temperatura maggiore causando un flusso di calore verso il basso, ma è anche possibile che la temperatura vari lungo la direzione orizzontale per effetto di ponti termici, generati per esempio da finestre.

In laboratorio è possibile realizzare le condizioni per avere un flusso di calore unidimensionale attraverso alcuni accorgimenti:

Imponendo una temperatura uniforme su tutta la superficie della parete, sia sul lato caldo che su quello freddo;

Facendo in modo che la struttura che accoglie il provino abbia spessore e resistenza termica nettamente superiore a quelli del materiale in esame, in modo che effettivamente il flusso di calore fluisca in una sola direzione;

Quando si parla di trasmissione di calore in regime stazionario o permanente si intende che al trascorrere del tempo, in uno specifico punto, le "condizioni" non varino. Per esempio riferendosi al caso della parete di un edificio, dovranno mantenersi costanti: le temperature interna ed esterna, il flusso di calore attraverso la parete, e qualunque altro fattore che possa influenzare la trasmissione di calore nei vari punti di misura.

Adesso limitandoci alla sola trasmissione di calore per conduzione, se non abbiamo pozzi o sorgenti di calore, il bilancio di energia per la parete vale:

Ovvero:
$$\left(\begin{array}{c} \text{potenza termica} \\ \text{entrante} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{potenza termica} \\ \text{uscente} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{potenza termica} \\ \text{accumulata} \end{array} \right)$$

$$Q_e - Q_u = \frac{dE_{\text{parete}}}{dt}$$

Imporre le condizioni stazionarie significa che la potenza termica accumulata deve essere nulla per cui:

$$\frac{dE_{\text{parete}}}{dt} = 0$$

Ne risulta che il flusso termico entrante deve coincidere con quello uscente allora:

$$Q_e = Q_u,$$

e dal momento che la temperatura non varia nel tempo in nessun punto della parete, il flusso termico attraverso la parete deve essere costante $Q_{\text{parete}} = \text{costante}$.

Per verificare in via sperimentale se il flusso di calore è in condizioni stazionarie, si posizionano i flussimetri, sia sul lato caldo che sul lato freddo, quindi quando il segnale delle due sonde è il medesimo, si sono raggiunte le condizioni stazionarie.

3.2.2 Scambio di calore per conduzione

Il fenomeno di trasporto di calore per conduzione può avvenire tra solido e solido, tra solido e fluido, tra fluido e fluido, negli ultimi due casi non si deve manifestare trasporto di massa. Nel caso dei solidi la conduzione è legata alla vibrazione delle molecole all'interno del reticolo e al trasporto di energia da parte degli elettroni liberi, nel caso dei liquidi e dei gas è dovuta agli urti elastici tra le molecole nel loro movimento casuale.

La potenza termica trasmessa attraverso una parete piana di spessore Δx di un materiale omogeneo ed isotropo in regime permanente in condizioni di flusso mono dimensionale vale [Riff. 18]:

$$Q = \lambda A \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad [W]$$

Dove :

Q la potenza termica trasmessa

λ è la conducibilità termica (caratteristica intrinseca del materiale) $[W/m^{\circ}C]$

A è la superficie normale alla direzione della trasmissione del calore $[m^2]$

Δx è lo spessore di materiale considerato $[m]$

Δt è la differenza di temperatura attraverso lo spessore $[^{\circ}C]$.

Più in generale per $\Delta x = 0$ per materiali omogenei e isotropi vale la forma:

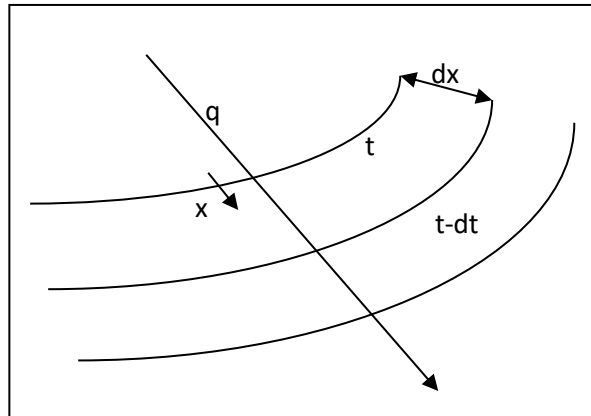
$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Nota come il postulato di J. Fourier per la trasmissione del calore per conduzione dove:

λ è ancora la conducibilità

$\frac{dt}{dx}$

è il gradiente di temperatura nella direzione x del flusso $[^{\circ}C/m]$.



2) Schematizzazione di un campo termico e delle linee di flusso del calore

Il segno negativo deriva dal fatto che il calore si propaga spontaneamente nel verso delle temperature decrescenti come imposto dal II Principio della Termodinamica; quindi per convenzione sui segni il gradiente diminuisce (è negativo) nel senso delle x crescenti.

Quindi in termini finiti l'equazione si può scrivere come [Riff. 18]:

$$\int_0^L Q dx = - \int_{t_{calda}}^{t_{fredda}} \lambda A dt$$

che integrando e ridistribuendo vale:

$$Q = \lambda A \frac{(t_{calda} - t_{fredda})}{L}$$

Il rapporto $R_t = \frac{L}{\lambda A} \left[\frac{W}{K} \right]$ è detto resistenza Termica e rappresenta la "resistenza" che lo strato del

$$C_t = \frac{1}{R_t}$$

materiale oppone al flusso di calore mentre il suo inverso C_t è detto conduttanza.

Si è soliti esprimere la Conduttanza Termica Unitaria, per unità di superficie [Riff. 18]:

$$C = \frac{\lambda}{L} = \frac{1}{R} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$I = \frac{1}{R_e} \Delta V$$

Si ha analogia tra il flusso di calore e il flusso di corrente elettrica, infatti la legge di Ohm $I = \frac{1}{R_e} \Delta V$ e la legge

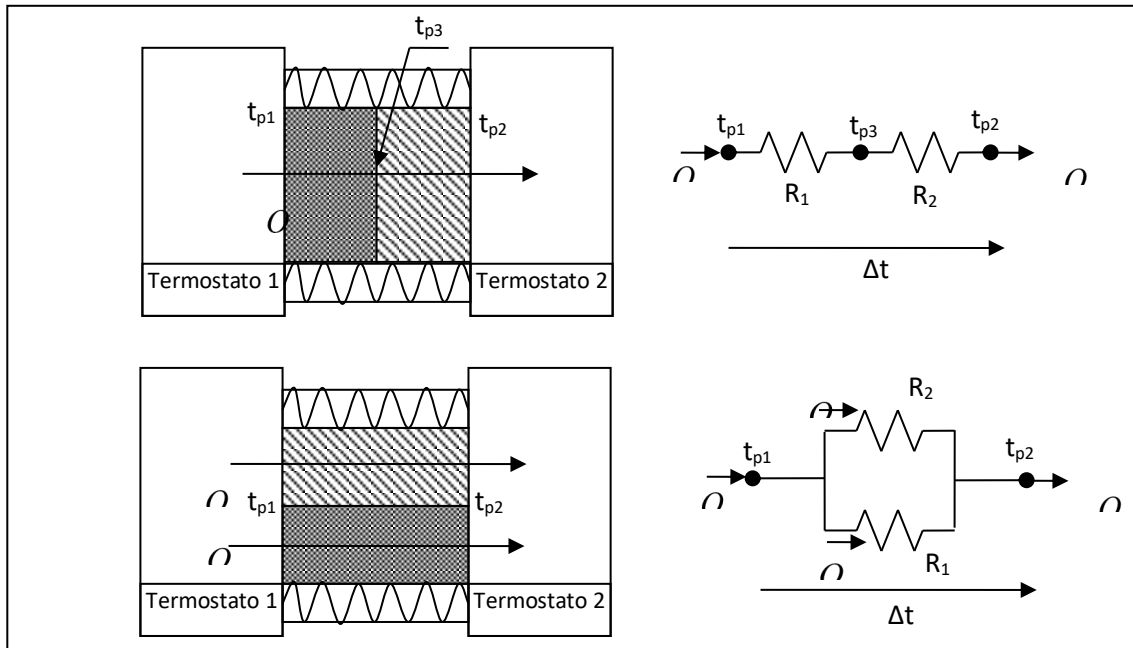
di Fourier $Q = \frac{1}{R_t} \Delta t$ sono formalmente simili:

I e Q rappresentano il flusso rispettivamente elettrico e termico

ΔV e Δt sono i potenziali, cioè ciò che genera la forza motrice rispettivamente nel sistema elettrico e termico

$R_e = \frac{\rho L}{A}$ e $R_t = \frac{L}{\lambda A}$ sono le resistenze elettriche e termiche dove A è la sezione L è la lunghezza del filo nel sistema elettrico oppure lo spessore del materiale nel sistema termico, mentre ρ è la resistività elettrica e $1/\lambda$ la resistività termica.

Questa analogia permette di applicare al sistema termico il concetto di circuito termico mutuandolo dal sistema elettrico; nello specifico per il caso di pareti multistrato la condizione resistenze in serie e parallelo rispetto al flusso di calore.



3) Analogia termoelettrica per la conduzione di calore in assenza di fenomeni capacitivi.

Nel caso serie di resistenze termiche di figura sopra il calore fluente risulta:

$$Q = \frac{A}{R_1} (t_{p1} - t_{p3}) = \frac{A}{R_2} (t_{p3} - t_{p2}) = \frac{A}{R_{eq}} (t_{p1} - t_{p2})$$

Dove la resistenza equivalente vale:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

Generalizzando la conduttanza termica unitaria di una parete multistrato con elementi in serie di sezione uniforme vale:

$$C = \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{s_k}{\lambda_k} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{C_j}}$$

dove

la R_i è la resistenza dello strato i -esimo.

s_k lo spessore dello strato k -esimo

λ_k la conducibilità

C_j la conduttanza del j -esimo strato.

Nel caso di resistenze in parallelo di figura precedente il calore fluente vale:

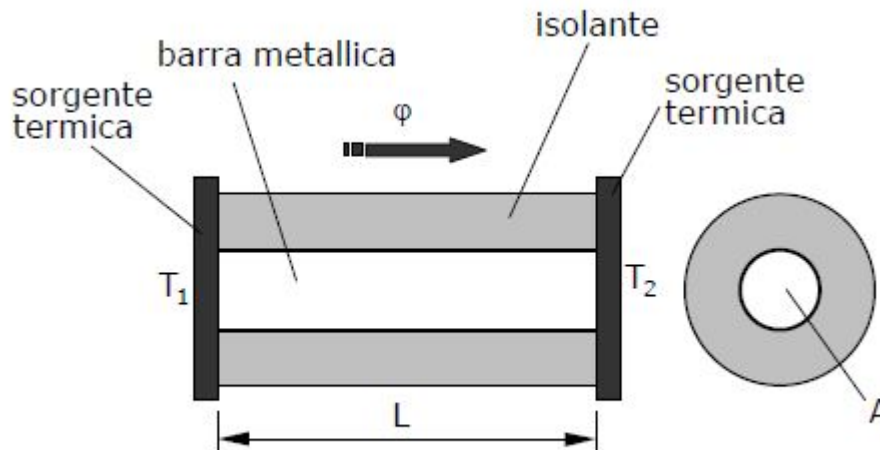
$$Q = Q_1 + Q_2 = \left(\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} \right) * (t_{p1} - t_{p2}).$$

Nel caso semplice di aree uguali la resistenza equivalente vale:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

3.2.3 Il regime stazionario

Si considera una barra di materiale omogeneo di lunghezza L e sezione A , avente superficie laterale adiabatica e sottoposta ad una differenza di temperatura $T_1 - T_2$ tra le estremità tale che $T_1 > T_2$. Le temperature T_1 e T_2 sono imposte uniformi sulle estremità.

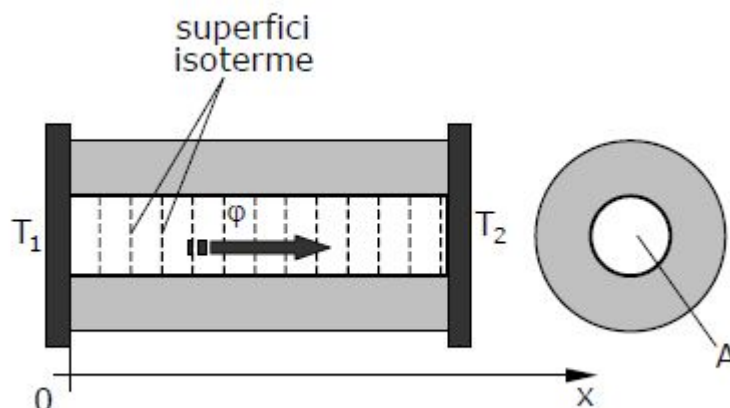


In condizioni di regime stazionario (la temperatura misurata in qualunque punto della barra è costante nel tempo) sperimentalmente si osserva quanto segue:

1. si osserva che su qualunque sezione trasversale della barra la temperatura risulta uniforme, e le superfici isoterme sono superfici piane e parallele tra loro e disposte ortogonalmente all'asse del provino.

Pertanto:

- la temperatura è funzione solo della coordinata x : $T = T(x)$;
- dato che il flusso termico si propaga in direzione normale alle superfici isoterme, risulta monodimensionale in direzione x .



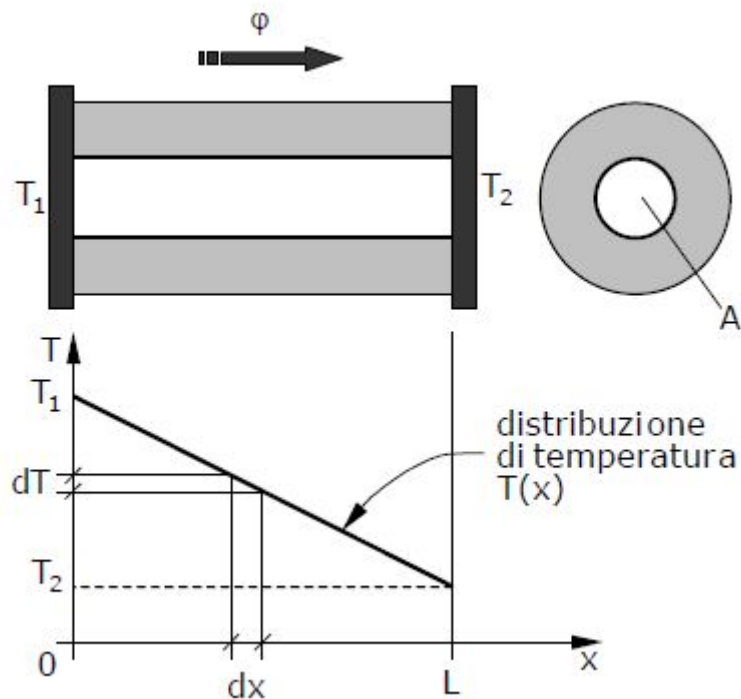
2. si osserva che la quantità di calore Q trasmessa attraverso la barra nell'intervallo di tempo DT è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura $(T_1 - T_2)$, all'area A della sezione trasversale e inversamente proporzionale alla lunghezza L :

$$Q = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{L} \Delta\tau \quad [J]$$

λ = conducibilità termica $\left[\frac{W}{mK} \right]$

Flusso termico $\varphi = \frac{Q}{\Delta\tau} = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{L} \quad [W]$

Flusso termico specifico $\varphi' = \frac{\varphi}{A} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$



Considerando un tratto infinitesimo di lunghezza dx , vale la legge di Fourier:

$$\varphi = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad [W]$$

$$\varphi' = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Il flusso termico è una grandezza vettoriale:

$$\vec{\varphi} = \varphi_x \vec{i} + \varphi_y \vec{j} + \varphi_z \vec{k}$$

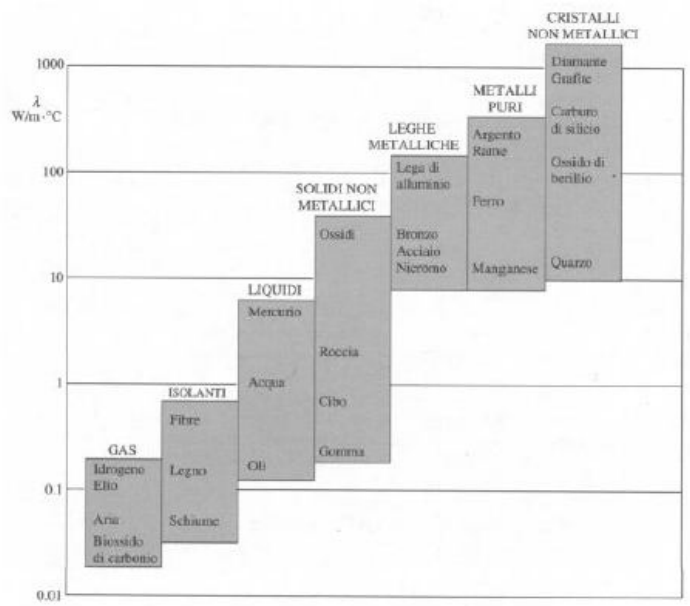
considerandolo monodimensionale in direzione x :

$$\vec{\varphi} = \varphi \vec{i} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \vec{i}$$

In regime stazionario, conoscendo il flusso termico che si trasmette attraverso la barra e le temperature T_1 e T_2 alle sue estremità si può ricavare la conducibilità termica del materiale

$$\lambda = \frac{\varphi L}{A(T_1 - T_2)}$$

In figura sotto è mostrata la conducibilità termica di alcuni materiali a temperatura ambiente

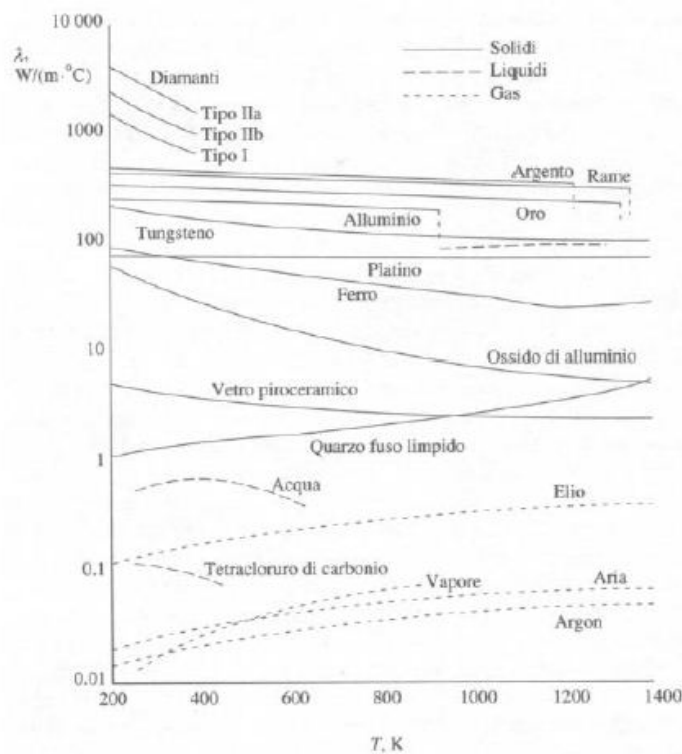


λ elevato \Rightarrow il materiale è un *buon conduttore* di calore.

λ basso \Rightarrow il materiale è un *cattivo conduttore* di calore (*isolante termico*).

4) Conducibilità termiche di alcuni materiali a temperatura ambiente

La conducibilità termica dei materiali varia con la temperatura, quindi $\lambda = \lambda(T)$ come evidenziato in figura sotto.

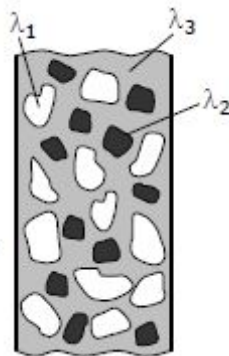


5) variazione della conducibilità termica con la temperatura per alcuni materiali

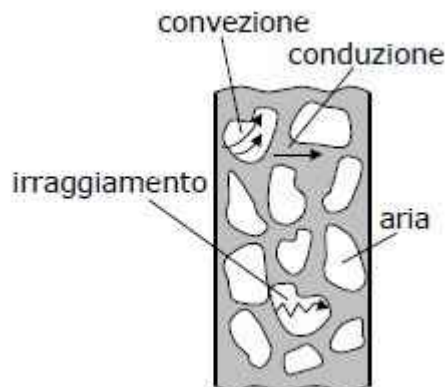
Considerare $\lambda = \lambda(T)$ complica notevolmente lo studio dei problemi di conduzione termica e in prima approssimazione è lecito considerare $\lambda = \text{cost.}$ E' buona norma infatti definire la temperatura alla quale è riferita la conducibilità misurata.

3.2.4 Materiali non omogenei

Un materiale non omogeneo può essere trattato come omogeneo introducendo la conducibilità termica apparente o equivalente λ_{eq} . Nel nostro caso verranno analizzati materiali da tradizionali, che possono essere visti come agglomerati di sostanze diverse, in essi la conducibilità varia da punto a punto e la conducibilità termica apparente tiene conto delle diverse conducibilità termiche dei materiali che costituiscono il conglomerato.

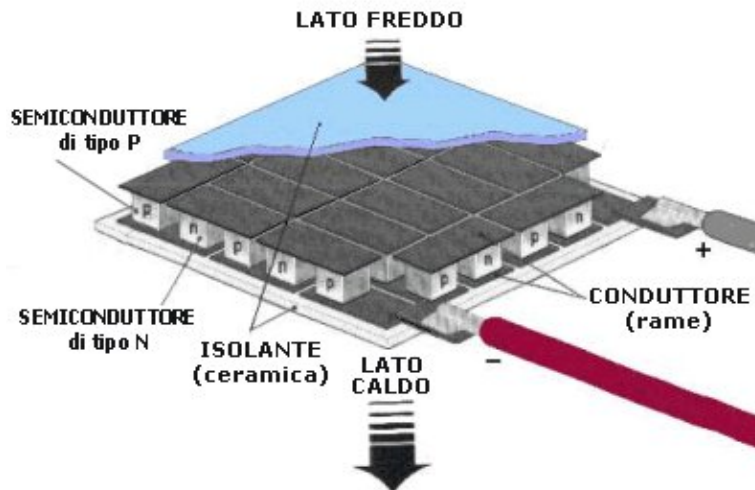


Gli isolanti termici si ottengono mescolando fibre, polveri o fiocchi di materiali a bassa conducibilità termica, come l'aria nel caso del polistirolo. All'interno di un materiale poroso i tre meccanismi di scambio termico intervengono simultaneamente, e tramite la conducibilità termica equivalente si tiene conto di essi nel loro complesso.



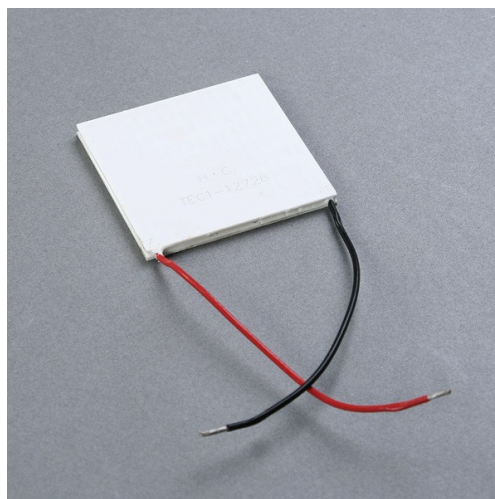
3.3 *La scelta della cella di Peltier*

I moduli termoelettrici, in particolare le celle di Peltier, possono essere considerate delle pompe di calore allo stato solido che operano sfruttando l'effetto Peltier. Sono costituiti da una matrice di elementi semiconduttori di tipo P e di tipo N, fortemente drogati con elementi vettori di carica elettrica. Gli elementi sono collegati elettricamente in serie tramite delle lamelle di rame, ma termicamente invece sono collegati in parallelo. Se si applica al tipo N una tensione positiva e al tipo P una tensione negativa, vedremo che la lamella superiore si raffredderà, mentre quella inferiore si riscalderà.



6) Lo schema di una cella Peltier

La matrice viene quindi racchiusa tra due substrati di ceramica. La figura sotto mostra l'aspetto di una cella di piccole dimensioni e potenza

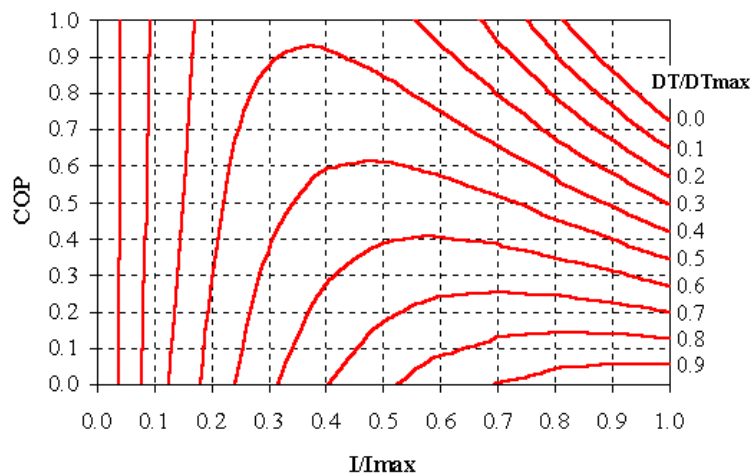


7) Una cella Peltier di piccole dimensioni

Il semiconduttore di tipo P è drogato con atomi di elementi che hanno meno elettroni del necessario per completare i legami atomici all'interno del reticolo cristallino. Quando viene applicata una tensione gli elettroni di conduzione si muovono per completare i legami atomici. Nelle posizioni lasciate libere dagli elettroni si formano quindi delle buche (hole), che in sostanza sono gli atomi all'interno del reticolo cristallino che ora hanno carica positiva. Gli elettroni quindi si muovono di buca in buca, comportandosi come vettori

di carica elettrica. Gli elettroni si muovono molto facilmente in materiali conduttori come il rame, ma non nei semiconduttori. Quando gli elettroni lasciano l'elemento di tipo P ed entrano nel rame sul lato freddo, si creano le buche in quanto gli elettroni saltano fuori ad un livello di energia superiore, raggiungendo lo stato di elettroni di conduzione. L'energia extra che serve deriva dall'assorbimento di calore. Nel frattempo le nuove buche create si muovono verso il basso, in direzione del rame caldo. Gli elettroni presenti in questo strato vanno ad occupare le buche, rilasciando la loro energia sotto forma di calore. Il semiconduttore di tipo n invece è drogato con elementi che hanno più elettroni del necessario per completare i legami del reticolo. Quando viene applicata una tensione questi elettroni vengono facilmente spostati nella banda di conduzione. Tuttavia è necessaria energia supplementare per fare sì che gli elettroni del tipo N raggiungano lo stesso livello di quelli che arrivano dal lato freddo, e tale energia deriva dall'assorbimento di calore dall'esterno. Infine, quando gli elettroni lasciano il lato caldo della zona N, possono muoversi liberamente attraverso il rame, liberando così il calore scendendo ad un livello di energia inferiore. Per riassumere, il calore è sempre assorbito sul lato freddo degli elementi di tipo P ed N, e il calore è poi rilasciato nella parte calda, come avviene appunto nelle pompe di calore. L'efficienza del processo è proporzionale alla corrente che attraversa la cella, e dipende da fattori geometrici, dal numero di giunzioni, dalle proprietà dei materiali. Invertendo la tensione, viene invertito anche il processo, e lo spostamento di energia termica cambierà di verso.

In commercio esistono celle Peltier isolate e altre non isolate: le prime sono rivestite sopra e sotto da materiale ceramico e garantiscono rendimenti maggiori delle seconde. Dovendo produrre lavoro per trasferire calore contro il secondo principio della termodinamica, ovvero creare una differenza di temperatura, le celle Peltier assorbono necessariamente un gran quantitativo di corrente elettrica. Ad esempio una cella di dimensioni $30 \times 30 \times 4$ mm da 25 W, presenta una caduta di tensione ai suoi capi di 8,5 V ed assorbe 2,1 A. Inoltre, a causa della curva tensione-corrente caratteristica per la giunzione, usualmente si alimenta il dispositivo in limitazione di corrente (a corrente costante). Solitamente il rendimento di una pompa di calore si misura facendo il rapporto tra la quantità di lavoro fornita dalla macchina e la potenza assorbita da essa, per i moduli termoelettrici si è soliti usare il termine "coefficiente di prestazione" piuttosto che parlare di efficienza. Il COP è la quantità di calore "pompato" diviso per la quantità di energia elettrica fornita al dispositivo. Esso dipende dal carico termico, dalla potenza in ingresso e dalla differenza di temperatura richiesta. Solitamente è compreso tra 0,3 e 0,7 per moduli a singolo strato. Tuttavia il COP può raggiungere valori superiori all'unità quando il dispositivo si trova ad operare con differenze di temperatura positive, ossia quando devono asportare calore da un oggetto che è più caldo dell'ambiente in cui si trova. In figura sotto è rappresentato un grafico normalizzato del COP in relazione al rapporto I/I_{max} e al dT/dT_{max}



8) Il grafico normalizzato del COP

3.4 *Descrizione del progetto realizzato*

La determinazione della conducibilità termica, per materiali con resistenza termica non inferiore a $0,5 \frac{m^2 \cdot K}{W}$, può essere eseguita secondo i criteri dettati dalle norme UNI EN 12667:2001 e ISO 8301. Il metodo si applica in linea di principio a qualunque temperatura media di prova, anche se nel nostro caso quest'ultima sarà quella ambiente, quindi intorno ai 20°C. Essendo la conducibilità termica funzione della temperatura, è necessario specificare sempre la temperatura media alla quale è stata effettuata la misurazione.

Il metodo è basato sull'applicazione della legge di Fourier per la conduzione termica, approssimata al caso di flusso di calore uniforme, costante e unidirezionale. La misura ottenuta sarà tanto più corretta quanto più si riescono a realizzare queste condizioni al contorno. Naturalmente occorre grande precisione anche nel misurare le altre grandezze necessarie, quali temperature, flusso di calore e caratteristiche dimensionali dei provini. Una volta che il sistema avrà raggiunto le condizioni di regime il valore di conducibilità termica misurato sarà quello corretto.

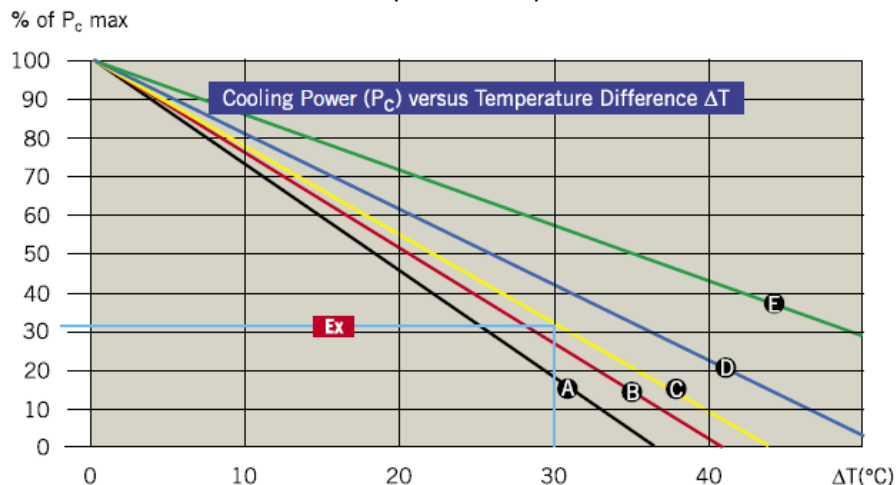
Nelle norme vengono descritti due procedimenti: piastra calda con anello di guardia e metodo del termo flussimetro. Per questo progetto è stato scelto il metodo del termoflussimetro.

- Schema apparato

La densità di flusso di calore viene misurata tramite uno o due termo flussimetri disposti sulle facce del provino a seconda della configurazione adottata. Le configurazioni possibili variano a seconda del numero di provini, di unità termiche e di termo flussimetri adoperati.

- Unità termiche

In riferimento alla modalità di scambio termico, diretta da una parte, tramite una piastra di alluminio, e convettiva dall'altra, tramite dissipatore alettato e ventola. Il cuore del dispositivo sarà costituito da due celle di Peltier da 50W ciascuna, collegate elettricamente in serie e alimentate quindi da una tensione di 24V e corrente massima assorbita di 7,7A. Il costruttore fornisce anche un grafico che mette in relazione la potenza termica disponibile in base alla differenza di temperatura imposta.



9) Il grafico del costruttore

In ascisse troviamo il ΔT rispetto alla temperatura ambiente, mentre in ordinate viene data la potenza termica in percentuale rispetto a quella massima disponibile. La lettura va fatta in base alla curva C, corrispondente al dispositivo selezionato. Nel grafico è presente anche un esempio: ipotizzando una temperatura ambiente di 32°C e una di lavoro di 2°C, quindi con un ΔT di 30°C, si ha a disposizione il 32% della potenza massima, quindi circa 22,7w.

Il dispositivo ha una superficie attiva di scambio termico di 120x60mm, corrispondente all'area effettiva occupata dalle due celle con le quali è a contatto. L'intero apparato sarà dunque dimensionato secondo una superficie di contatto rettangolare di 230x122mm, quindi si è pensato di realizzare due piastre di alluminio

fresato di tale dimensione da fissare a quella della cella, per aumentare la superficie di scambio termico. Per garantire la minore resistenza termica possibile fra le due sarà applicato uno strato di pasta termoconduttiva per applicazioni elettroniche. Di conseguenza i provini dovranno avere proprio dimensione 230x122mm. Le due piastre di alluminio dello spessore di 10 mm, serviranno sia da superficie di scambio termico che da supporto/alloggiamento per gli strumenti di misura: per via della asimmetria una delle due alloggerà le sonde di temperatura e il termoflussimetro e l'altra, solo i fori per le sonde di temperatura. Allo scopo dovranno essere eseguite delle lavorazioni con macchine utensili a controllo numerico per ricavare l'alloggiamento per i termoflussimetri e per le sonde di temperatura.

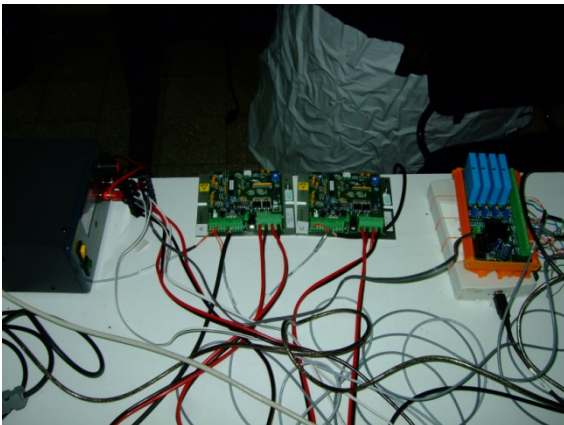
Inoltre sono state eseguite delle asole per il passaggio dei cavi e i fori per le viti di fissaggio. La conduttività termica dell'alluminio per le piastre, sia quelle di partenza che quelle aggiuntive, è di $130 \frac{W}{mK}$. Il volume

rimasto libero tra le piastre e il dispositivo dovrà essere riempito con provino di test.

Per garantire l'isolamento delle superfici laterali di piastre e provino dall'ambiente esterno dovrà essere realizzato un involucro isolante,

- Il controller temperatura

Per pilotare le unità termiche sono stati scelti dei controller elettronici dedicati per celle di Peltier. Dopo aver visionato diversi prodotti è stato deciso di acquistare due controller della OEM-Instruments, modello FG-541-201 OEM.



10) Il controller temperatura

Questo controller integra sia la parte di controllo, svolta da un regolatore di tipo PID, che quella di potenza, ed è in grado di pilotare celle di Peltier con alimentazione variabile da 0 a 48V e correnti fino a 20A. L'interfacciamento col pc avviene tramite interfaccia seriale, ma è stato necessario anche l'utilizzo di un convertitore seriale-usb, dato che ormai tale porta non è più presente sui personal computer attuali. La parte di potenza è realizzata tramite un modulatore PWM. Per il feedback della temperatura utilizza un termistore con resistenza di 10000Ω a 25°C, ed è anche possibile collegarne un secondo da utilizzare come monitoraggio o allarme. In dotazione viene fornito un termistore con precisione di $\pm 1^\circ C$, che sarà sostituito con un altro da $\pm 0,1^\circ C$.

- Alimentatore

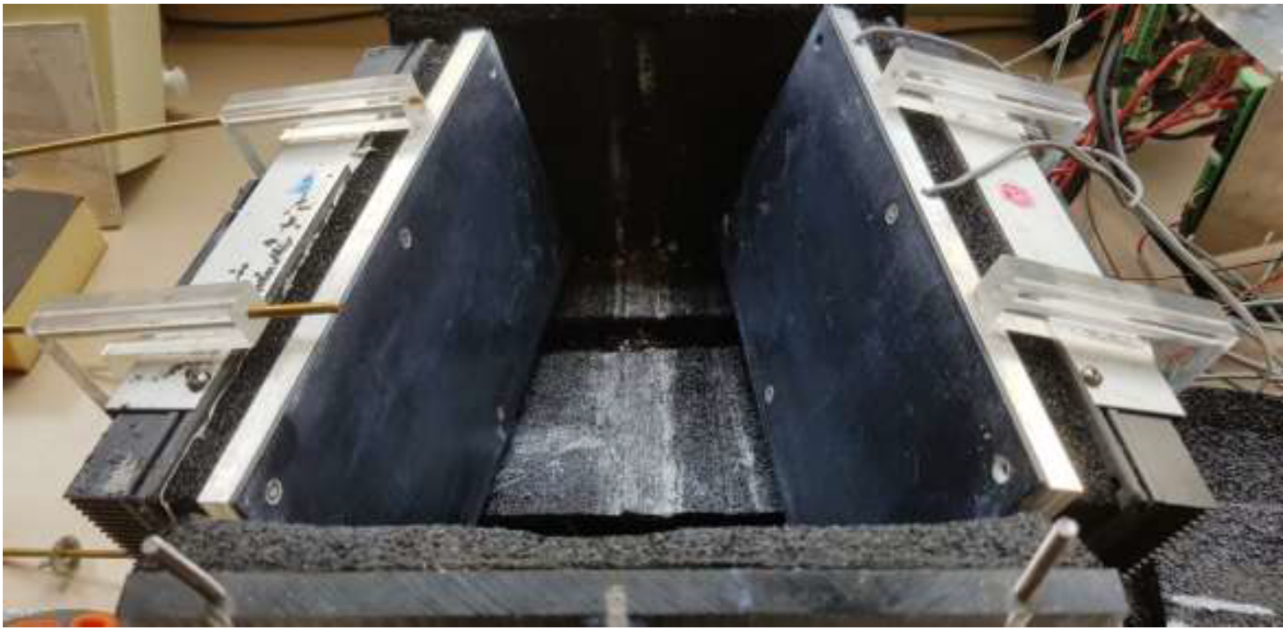
Per l'alimentazione delle unità termiche e delle due schede di controllo si utilizzerà un alimentatore switching Microset PL 530, regolabile in tensione con range 4-30V e capace di fornire 40 A in CC, dotato inoltre di amperometro e voltmetro.



11) Alimentatore

- Termoflussimetro

Per la misura del flusso di calore verrà utilizzato un termoflussimetro della Hukseflux. Questo è costituito da una piastra in materiale plastico-ceramico a bassissima resistenza termica, e da un'uscita in tensione proporzionale al flusso di calore che lo attraversa. Nello specifico la nostra unità fornisce una tensione di $63,9 \frac{\mu V}{W \cdot m^{-2}}$ e può misurare flussi fino a $\pm 2000 \frac{W}{m^2}$ con un range di temperatura che da -30 a $70^\circ C$. La sua resistenza termica è minore di $6,25 \cdot 10^{-3} \frac{K \cdot m_2}{W}$. L'elemento sensibile è costituito da una termopila che genera un segnale in mV proporzionale alla differenza di temperatura rilevata tra le due facce del sensore. Considerando stabile il flusso, costante la conducibilità termica del corpo in misura e trascurabile l'influenza del sensore sulle modalità di propagazione del flusso stesso, il segnale di uscita del sensore è proporzionale alle sole variazioni di flusso che lo attraversano. La lettura del segnale di uscita può essere effettuata con l'impiego di un voltmetro di precisione o con i più comuni datalogger. Per convertire la misura in tensione in flusso di calore è sufficiente dividere il valore rilevato per la costante di calibrazione.

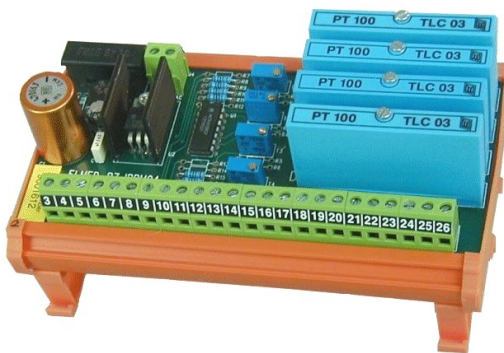


12) I termoflussimetri a piastra piana

- Sonde temperatura

Per la rilevazione della temperatura delle piastre si è pensato di utilizzare delle termoresistenze PT100 che utilizza un controller a quattro canali dedicato.

Le sonde di temperatura saranno collegate al controller della Elmed IBRM-04.



13) Il controller Pt100 e la sonda di temperatura

Il modulo IBRM04 permette la conversione di quattro valori di temperatura rilevati tramite sonde PT100, in altrettanti rispettivi segnali di tensione. La curva di risposta del segnale viene linearizzata tramite moduli ibridi (TLC05) permettendo un interfacciamento molto semplice. Il modulo è tarato in fabbrica per il range di temperatura 0-100°C al quale corrisponde una tensione in uscita di 0-10V, con risposta lineare. Per l'alimentazione del modulo è necessaria una sola alimentazione anche non stabilizzata. Il modulo è alloggiato in un contenitore plastico montabile su guida DIN. Saranno utilizzati elementi Pt100 racchiusi in un involucro di acciaio inox del diametro di 4 mm e lungo 50 mm, in modo da poter essere inseriti nelle sedi ricavate sulle piastre in modo da non rischiare di danneggiarli. Anche qua verrà utilizzata la pasta termoconduttiva per tenere sotto controllo la resistenza termica di contatto.

- L'acquisizione e l'elaborazione dati

È stato sviluppato in ambiente Labview (molto utilizzato in ambito di ricerca) di un programma per l'acquisizione e la registrazione dei segnali provenienti dai sensori di temperatura e dal termoflussimetro e inoltre per realizzare la gestione delle due unità a cella di Peltier, gestione finalizzata al raggiungimento degli andamenti di temperatura e di flussi di calore desiderati sul provino sotto test. Tutti i dati saranno raccolti, elaborati e visualizzati tramite il software Labview installato su un pc (che non sarà fornito). I segnali elettrici provenienti dai vari sensori saranno acquisiti mediante due schede di acquisizione usb della National Instruments (che non saranno fornite) e in dotazione presso il DICAAR. La prima, che riceve i dati dal controller Elmed, è la NI USB-6211 che possiede: 16 canali in ingresso e 2 in uscita analogici (16-bit, 250 kS/s); 4 canali in ingresso e 4 in uscita digitali, oltre a un contatore digitale. Tramite questa scheda, la tensione generata dal controller Elmed viene acquisita e tradotta in una temperatura dal software.

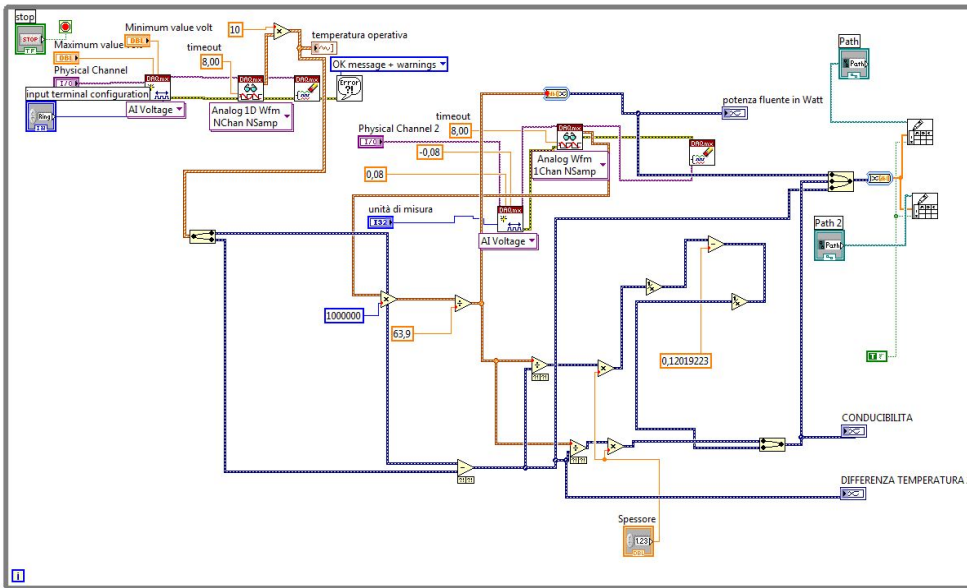
La seconda scheda è una NI USB-9211A, che possiede 4 ingressi a 24bit per termocoppie e termopile. Tramite questa interfaccia viene acquisito il segnale in tensione del termoflussimetro, che viene poi elaborato dal software per avere il dato del flusso di calore in $\frac{W}{m^2}$.



14) Le due schede di acquisizione

Per l'elaborazione dei dati sarà scritto, tramite Labview, un software che applicando la legge di Fourier fornirà il valore della conducibilità termica. Sarà possibile inoltre visualizzare a monitor anche gli altri dati che acquisiti.

Due celle a effetto Peltier controllano la OEM-Instruments attraverso il software di cui sotto si riporta lo schema funzionale in LabView che sta fornendo i risultati attesi.

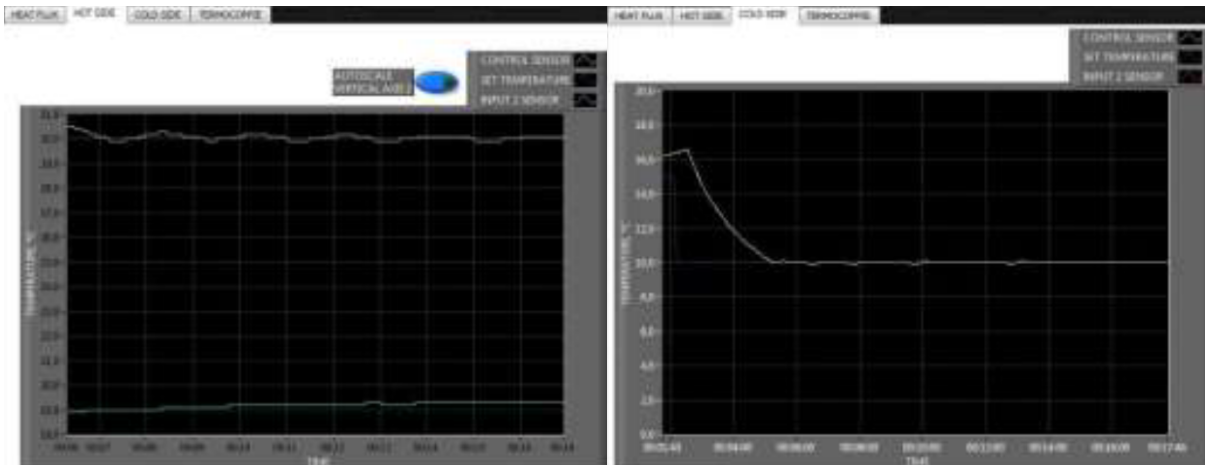


15) Schema funzionale del software di controllo dell'apparecchiatura

Le figure in basso riportano alcune immagini delle fasi di acquisizione del sistema.



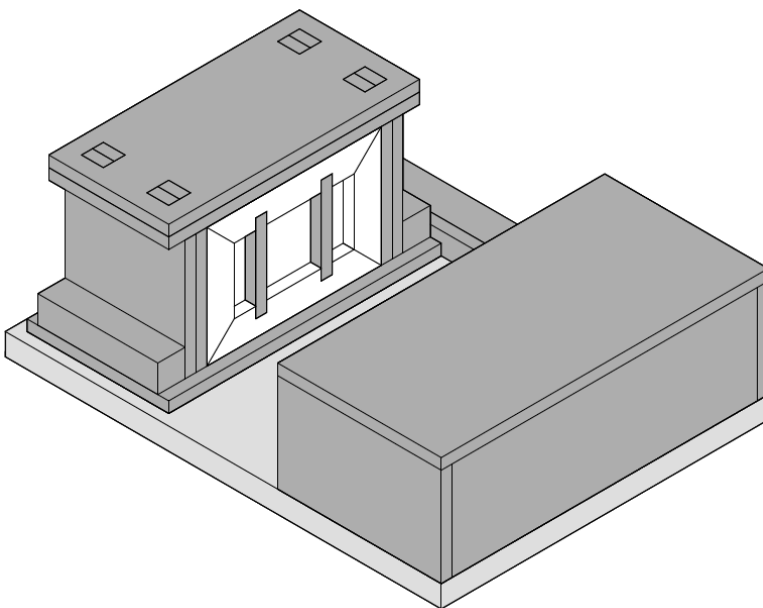
16) rappresentazione grafica dei flussi di calore specifici (grandezza misurata direttamente dal termoflussimetro)



17) evoluzione temporale delle temperature misurate attraverso le RTD

3.4.1 Immagini del progetto dell'involucro realizzato

I componenti sono stati assemblati in un involucro di plexiglass trasparente (alle frequenze d'onda della luce visibile) ed è rappresentato dall'immagine assometrica in 17). In allegato il progetto dell'involucro.



18) assometria dell'involucro

3.5 Prove sperimentali per la conducibilità termica

Sono state condotte delle prove sperimentali per determinare la conducibilità termica di

provini di test in POLIMETILMETACRILATO (PMMA o Plexiglass) di cui è noto il valore della conducibilità termica con incertezza.



19) il materiale oggetto della prova di test

Prima dell'avvio di ogni prova si è provveduto alla preparazione dei provini. Sono state misurate altezza, lunghezza, spessore ed il peso al fine di stabilirne la densità.

Le superfici a contatto con le unità termiche devono essere il più possibile levigate e complanari, in modo da non avere variazioni di sezione e garantire un contatto sempre uniforme con le piastre; prima di ogni prova viene comunque applicato un sottile strato di pasta termica sulle due superfici per eliminare eventuali bolle d'aria e migliorare il contatto termico.

Una volta introdotto il provino all'interno del misuratore vengono impostati i set point di temperatura e le costanti di controllo PID mediante il software implementato su Labview. Per ogni materiale è stato necessario individuare le costanti di controllo PID delle celle Peltier, seguendo le indicazioni fornite dal costruttore, in modo da mantenere un andamento delle temperature il più possibile costante sulle superfici dei provini in contatto con le unità termiche. In figura viene mostrato il pannello frontale del software di controllo. Si possono vedere le barre con indicata la potenza fornita dalle celle, i SET POINT di temperatura, le temperature rilevate dalle termoresistenze sulle piastre di conduzione.



20) pannello frontale LabView

Tramite il software LabVIEW sono stati acquisiti tutti i dati relativi a:

- temperature superficiali sui lati del provino a contatto con le unità termiche, misurate mediante termocoppie di tipo T inserite nelle piastre termoflussimetriche
- temperature misurate tramite termoresistenze alloggiata nella piastra di conduzione interposta tra unità termiche e termoflussimetri (temperature utilizzate per il controllo)
- flussi specifici attraverso le facce del provino a contatto con le unità termiche, mediante termoflussimetri

L'elaborazione dei dati è stata successivamente effettuata con un foglio di calcolo Excel. Dev'essere precisato che nella misura della differenza di temperatura tra le facce del provino, la norma raccomanda una connessione differenziale tra le termocoppie a contatto con la superficie calda del provino e quelle a contatto con la superficie fredda in modo da permettere il rilievo diretto della differenza di temperatura. Tuttavia per come è stato creato, il programma per la stima della diffusività termica richiede in input i dati di temperatura su ogni faccia; per questo motivo non è stata utilizzata una connessione differenziale delle termocoppie ma si è proceduto alla misura della temperatura su entrambe le superfici in maniera indipendente.

La norma UNI 7891 "Determinazione della conduttività termica con il metodo dei termoflussimetri" al punto 9.8 asserisce: Quando si ritiene raggiunto il regime stazionario, si deve continuare la prova eseguendo, ad intervalli di tempo non minori di 15 min, le misure atte a determinare le temperature t_1 e t_2 e la forza elettromotrice E . Il regime stazionario si intende raggiunto quando almeno otto serie successive delle suddette misure diano valori della conduttività termica che differiscano tra di loro meno dell'1,5%. La determinazione del valore della conduttività termica λ è effettuata applicando la legge di Fourier:

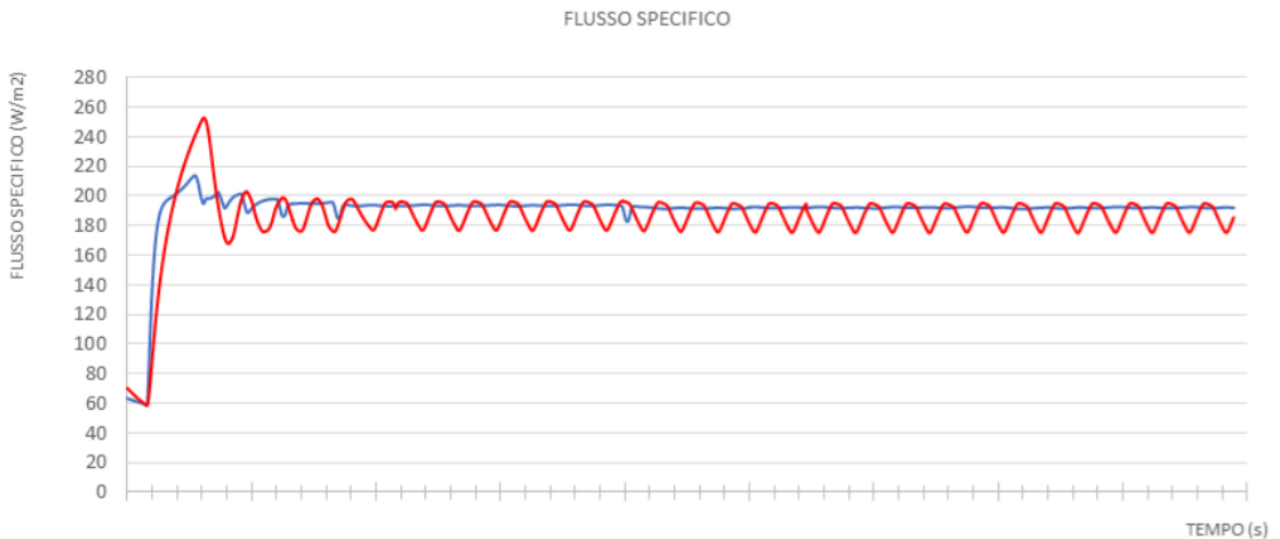
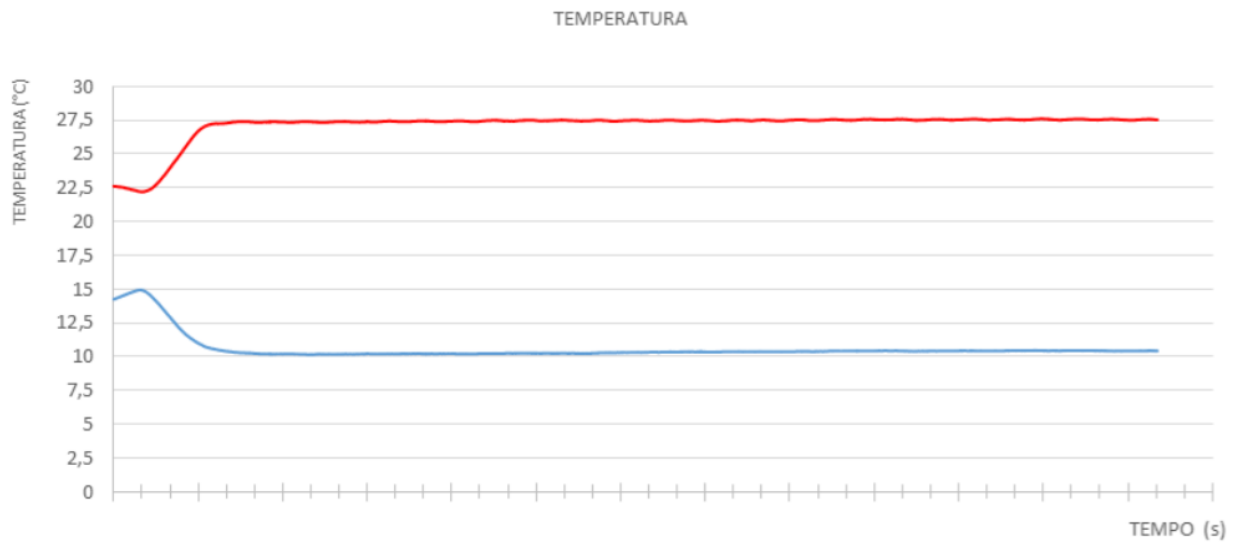
$$\lambda = \frac{Q}{(T_{HOT} - T_{COLD}) \cdot s}$$

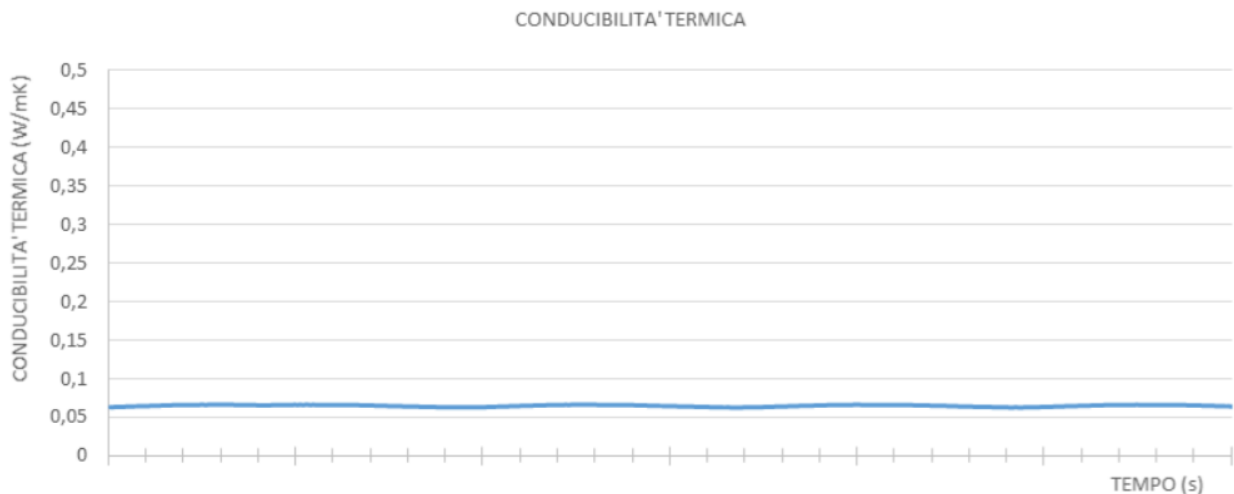
Raggiunto il regime stazionario, per ogni secondo campionato viene calcolato il ΔT a cavallo delle due superfici del provino e il valore del flusso specifico come media dei valori misurati sui due lati. Una volta calcolata la conducibilità termica per ogni secondo, il valore finale viene ottenuto facendo la media di questi.

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi dell'evoluzione temporale delle temperature e dei flussi di calore specifici misurati e i relativi risultati in termini di conducibilità termica.

MATERIALE	PESO (g)	SPESSORE (m)	VOLUME (m ³)	DENSITA' (g/cm ³)
PMMA	544	0,121	0,000465	1,1705

Di seguito si riportano gli andamenti temporali delle temperature e dei flussi specifici misurati sulle due facce opposte del provino elaborati con foglio di calcolo Excel:





Il dato sperimentale rilevato ed elaborato ha fornito il valore medio di conducibilità ottenuto per il provino di PMMA pari a: $\lambda = 0,1949 \text{ W/mK}$

Successivamente a questo test sono ad oggi in fase di misura dei campioni di pietra da costruzione proveniente dalle cave di trachite della zona della città storica di Carbonia.

4 Conclusioni

E' stato progettato, assemblato e testato un prototipo per la misura della conducibilità termica (WmK) di materiali da costruzione il cui campo di misura ricoprisse il valore di conducibilità termica stimato la per la tradizionale trachite, pietra da costruzione della città di Carbonia ($1,15 \text{ W/mK}$ con una densità di circa 1800 kg/m^3).

Con questo obiettivo, è stato realizzato un sistema di misura costituito da due parti: una parte hardware e una parte software.

I componenti hardware hanno il compito di generare e regolare il fenomeno fisico di conduzione termica attraverso la presenza di una differenza di temperatura tra le due facce del provino di test. La temperatura sulle facce del provino e il flusso di calore vengono misurati attraverso dei trasduttori che a loro volta sono componenti fisici come anche sistemi di acquisizione, alimentatori, trasformatori di corrente, cablaggi e quanto necessario al suo funzionamento. Tutto il sistema è stato poi inserito in un involucro che contenesse i componenti hardware e ne agevolasse l' utilizzo da parte dell' operatore.

L' ambiente software è costituito dai driver delle periferiche di misure e regolazione del sistema; in particolare per la regolazione della temperatura tra le due facce del provino di test e della differenza di temperatura stessa. E' stata sviluppata una interfaccia grafica su ambiente National Instruments LabView che è parte di un software può essere installato in ambiente Microsoft Windows su Personal Computer. Questo software è costituito da un file eseguibile che non prevede la necessità dell' installazione o della licenza National Instruments LabView.

L' interfaccia utente è stata studiata per essere la più intuitiva e familiare possibile al tecnico che utilizzerà il sistema di misura.

Attraverso questa interfaccia, il software LabView permette di eseguire la regolazione delle unità termiche e acquisire tutte le informazioni sia sulla regolazione che sulle misure di temperatura e flussi di calore nel tempo.

L'elaborazione dei dati può avvenire sia con software specialistici come Matlab (oppure il suo "equivalente" Octave) che generici fogli elettronici di calcolo (questi software non forniti).

E' stato fornita al committente un esempio di calcolo e sono stati eseguiti dei test in presenza dei responsabili del progetto e di tecnici di loro fiducia.

L'incertezza di misura per confronto con dati forniti in letteratura è di circa il $\pm 3\%$ sul valore 0,2 (W/mK).

Sviluppi futuri del progetto in collaborazione col il centro di ricerca committente, potrebbero riguardare lo sviluppo di un software di calcolo per la della misura della diffusività termica (mm^2/s) o di una qualunque grandezza di carattere dinamico associabile al provino oggetto di test. Questo specifico software di analisi potrebbe dare una stima delle grandezze anche con la le sole misure estraibili dal sistema hardware già presente. L'adeguamento del sistema hardware con maggiori punti di misura della temperatura, trasduttori di misura con minore incertezza, piastre termoflussimetriche con migliori prestazioni porterebbero a una incertezza di misura anche delle grandezze dinamiche di migliore qualità.

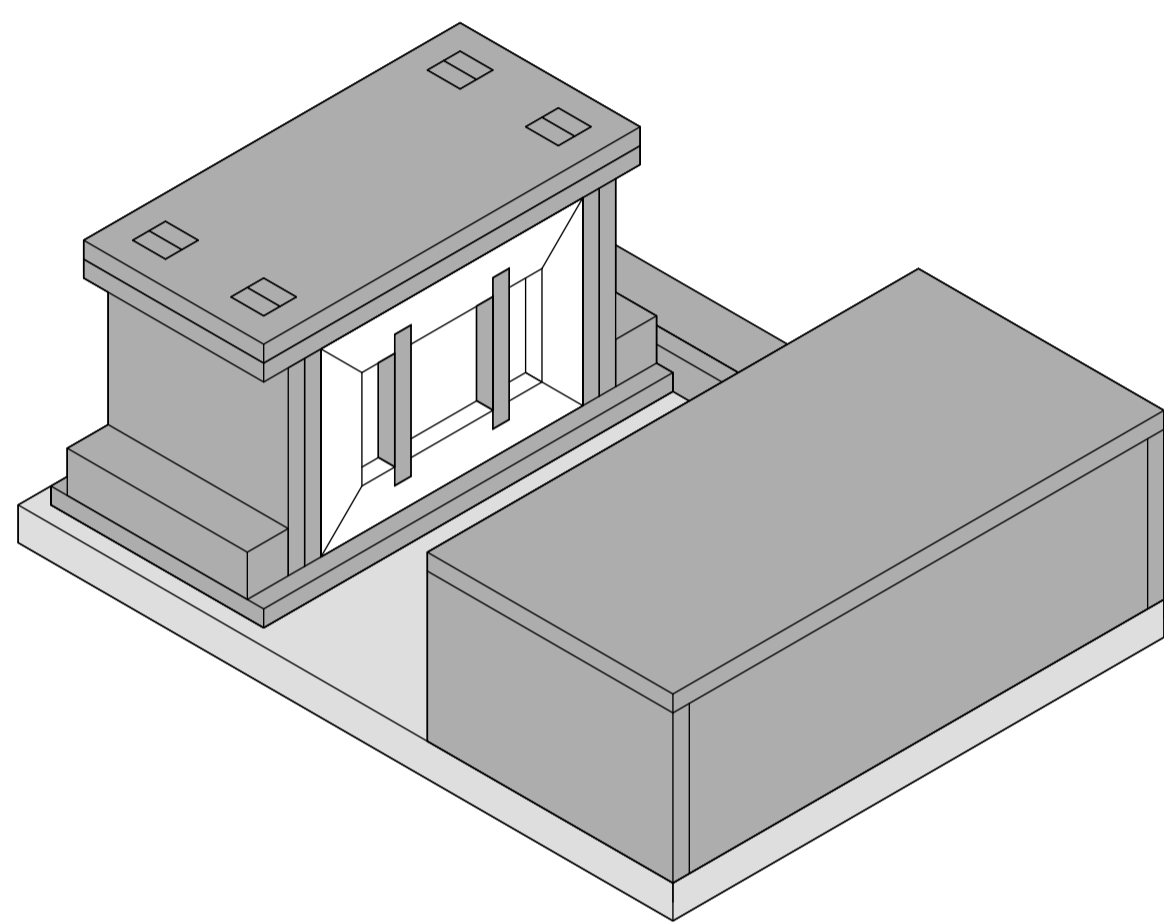
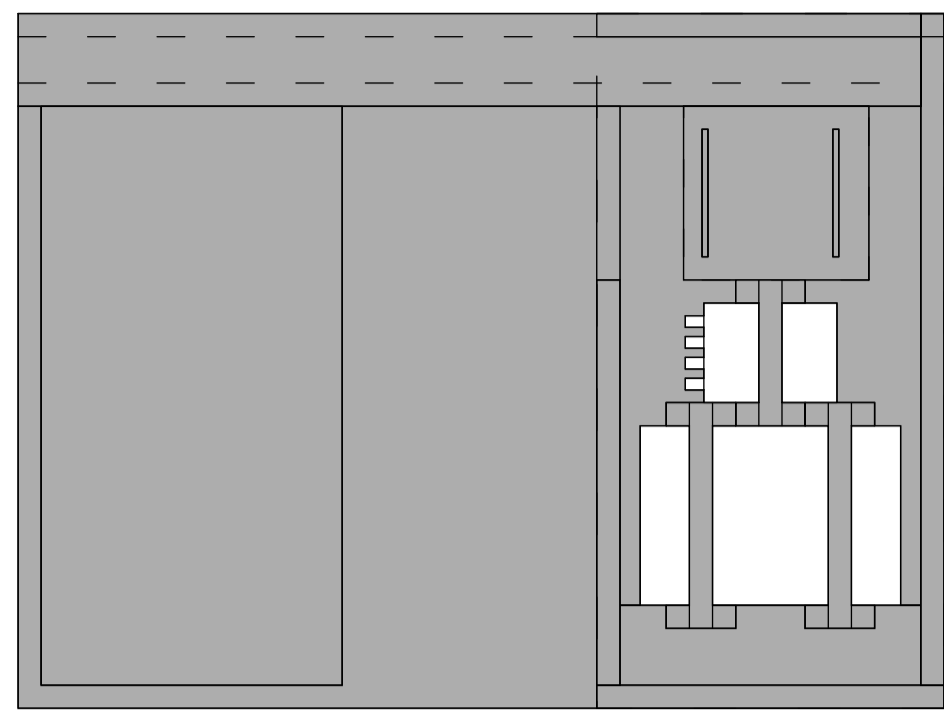
E' inoltre auspicabile una industrializzazione del sistema di misura oggetto della convenzione. Pertanto, il nuovo hardware si presume che sia di carattere monolitico e includente anche il sistema di elaborazione dei dati in modo da rendere il sistema "dedicato". Questo ne faciliterebbe la trasportabilità, la gestione delle resistenze di contatto del provino in modo automatico, un software maggiormente robusto perché ad utilizzo unico ecc. .

5 Bibliografia

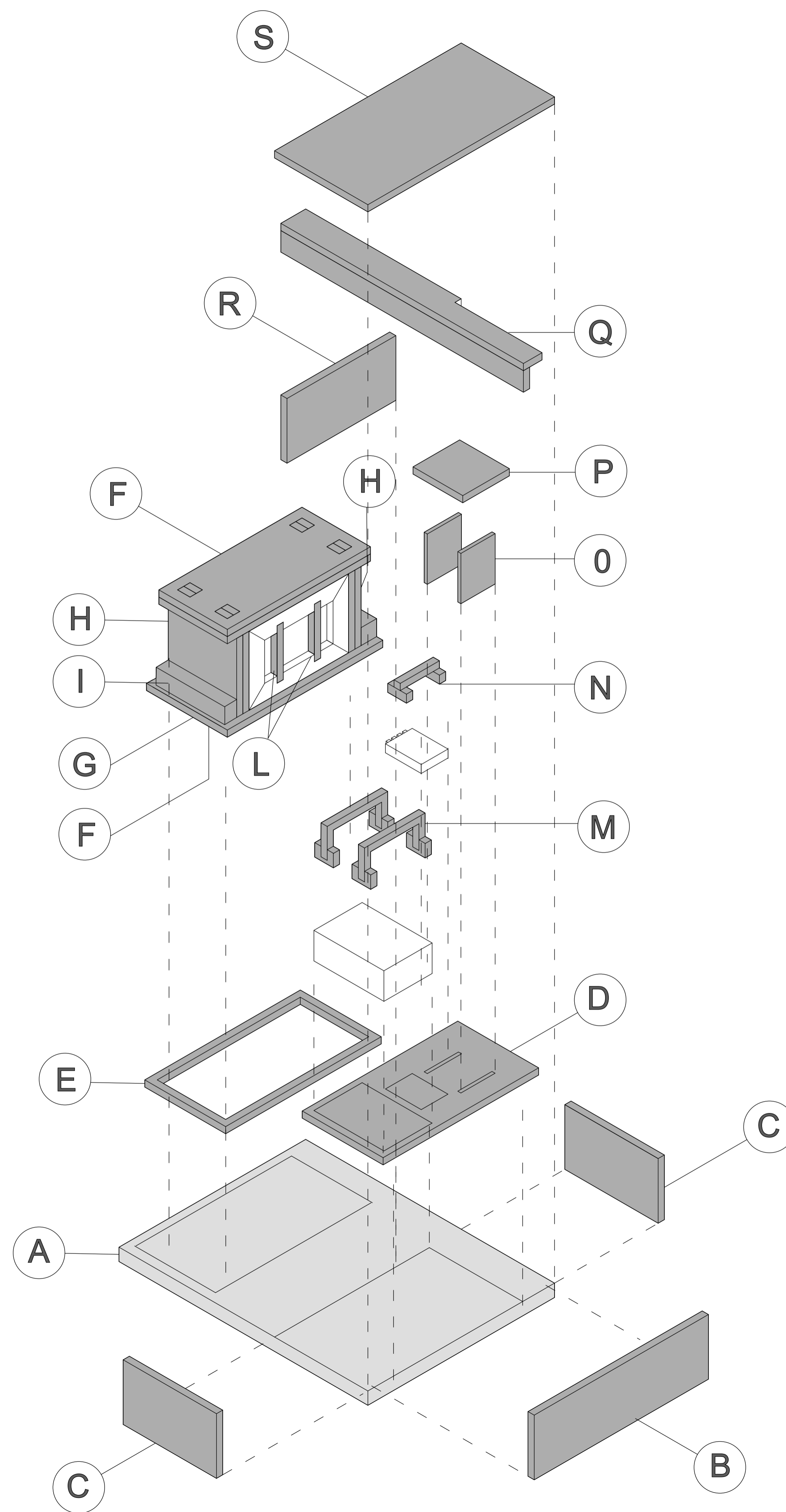
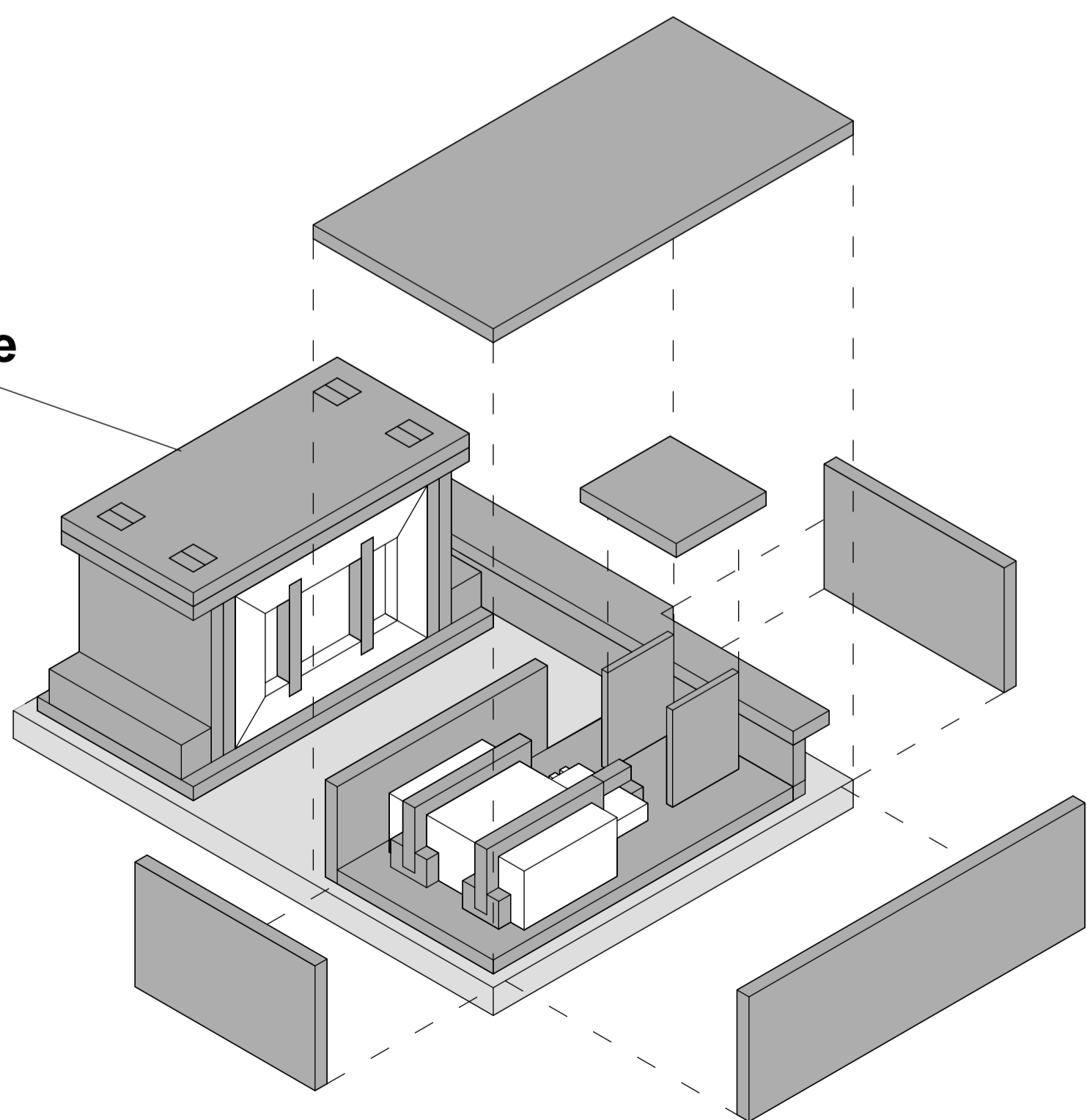
- P. Štefková, O. Zmeskal, *Measurement of thermophysical properties of PMMA by pulse transient method*, 2006
- Nancy Mathis, *Transient thermal conductivity measurements: comparison of destructive and nondestructive techniques*, September 1999
- H.S. Carslaw and J.C. Jager, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford at the Clarendon press 1959
- Rohde M. et al., *Intercomparison of thermal diffusivity measurements on CuCrZr and PMMA*, 2014
- A. Gasparella, *Thermal dynamic transfer properties of the opaque envelope: Analytical and numerical tools for the assessment of the response to summer outdoor conditions*, 2011
- <https://www.cti2000.eu>
- <https://www.ni.com>
- NORMA UNI EN ISO 13786:2008
- NORMA UNI EN ISO 7891-*Determinazione della conduttività termica con il metodo dei termoflussimetri*
- P. Puligheddu, *Progettazione, realizzazione e validazione sperimentale di un misuratore di conducibilità termica a cella di Peltier in regime stazionario*, 2009
- E. Bacciu, *Sviluppo di un sistema di misura per la stima della diffusività termica dei materiali: risoluzione del problema inverso di Fourier*
- A. Salazar, *On thermal diffusivity*, 2003
- B. Lartigue, et M. Faye, *Characterizing the thermal inertia of building envelope: experimental*, 2017
- A.W Leung, *Systems of Finite Difference Equations, Numerical Solutions*, 1989
- Anis Zafirah Azmi *Numerical solution for heat equation*, 2009
- T. Dunset, *The Forward-Backward Stochastic Heat Equation: Numerical Analysis and Simulation*, 2016
- István Faragó, *Optimal mesh choice in the numerical solution of the heat equation*, 1999

6 Allegato A

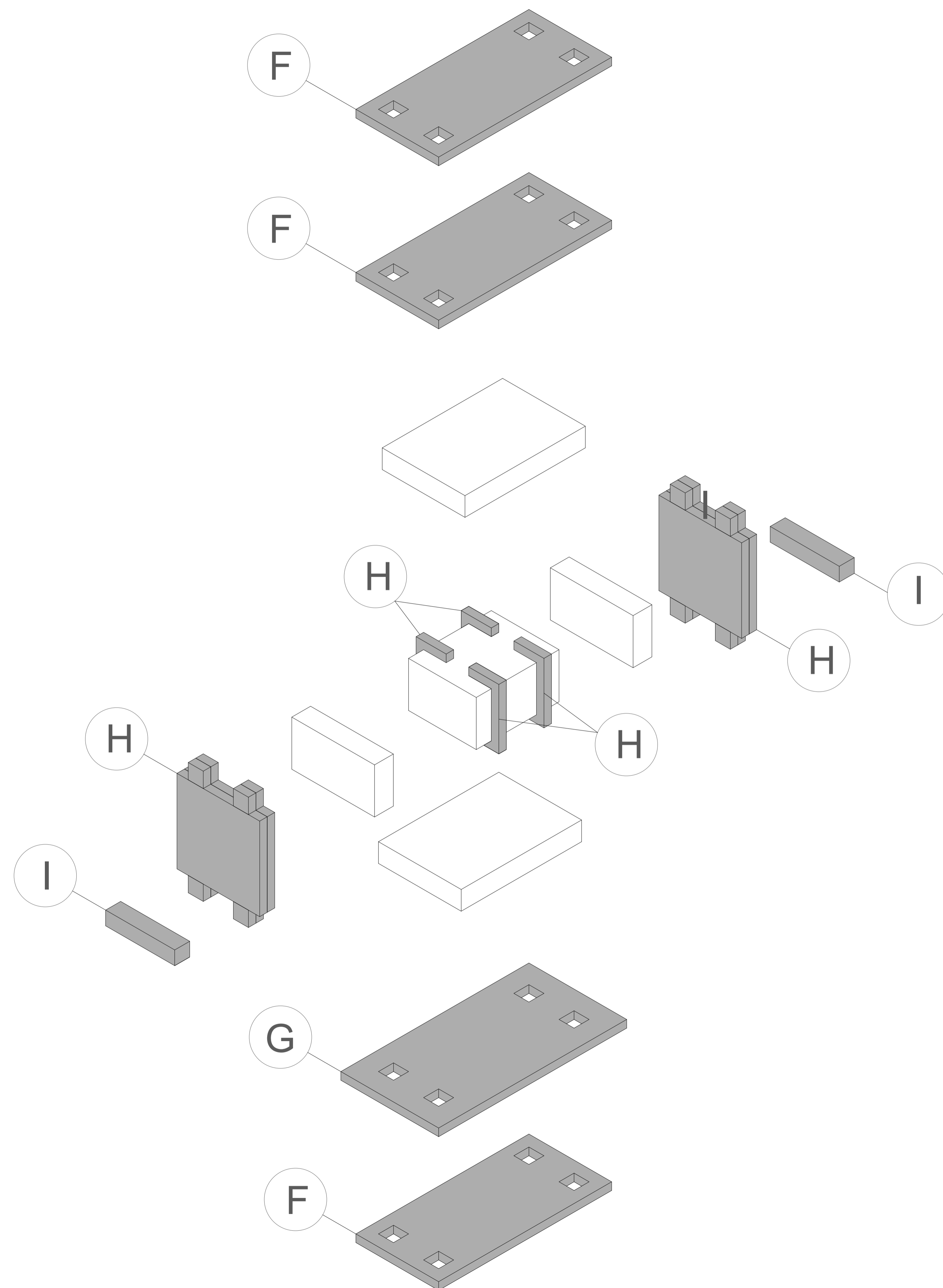
Progetto involucro contenitore del sistema, disegni e logica di montaggio



unità principale

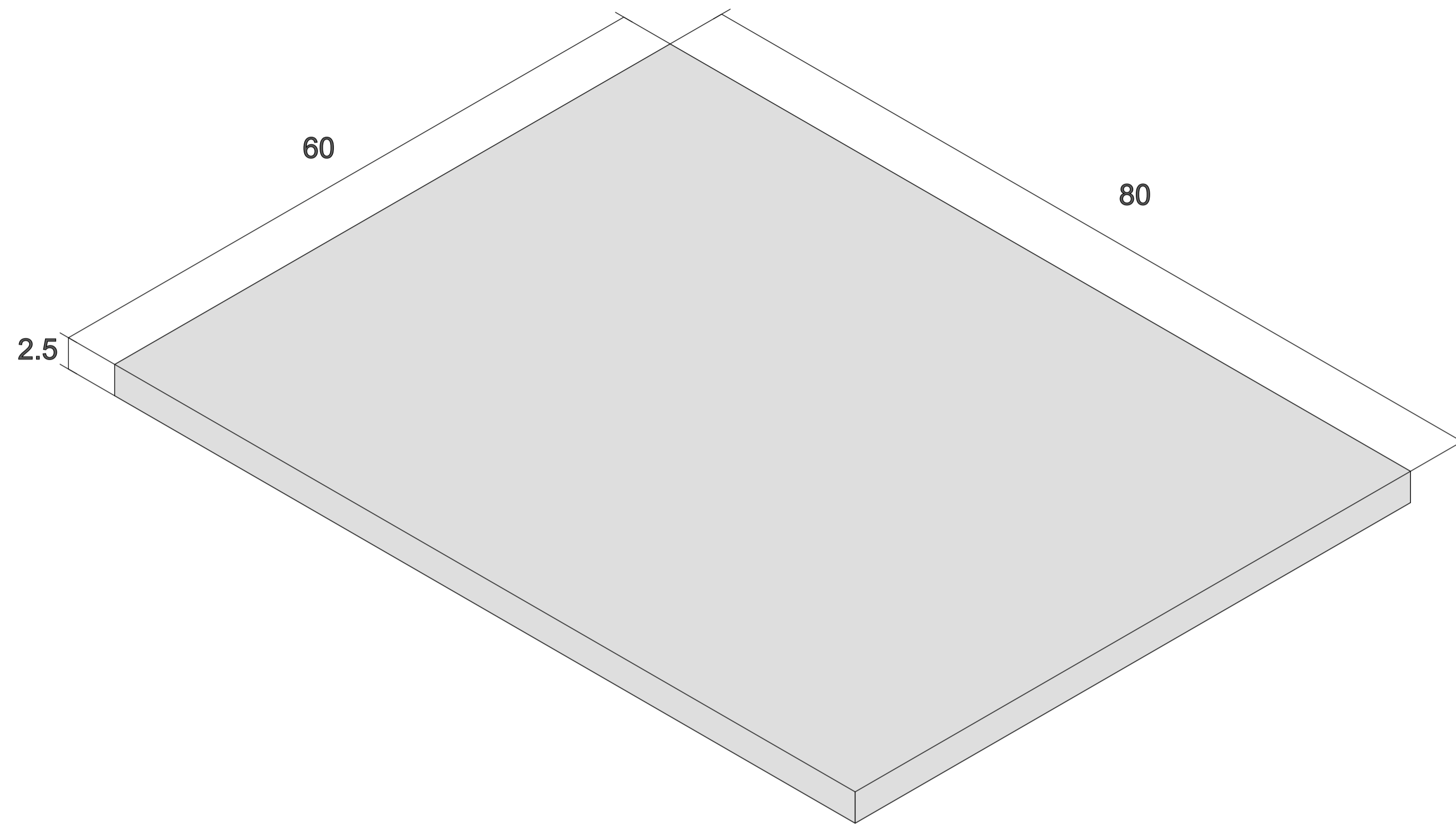


ESPLOSO ASSONOMETRICO DELL'UNITÀ CENTRALE

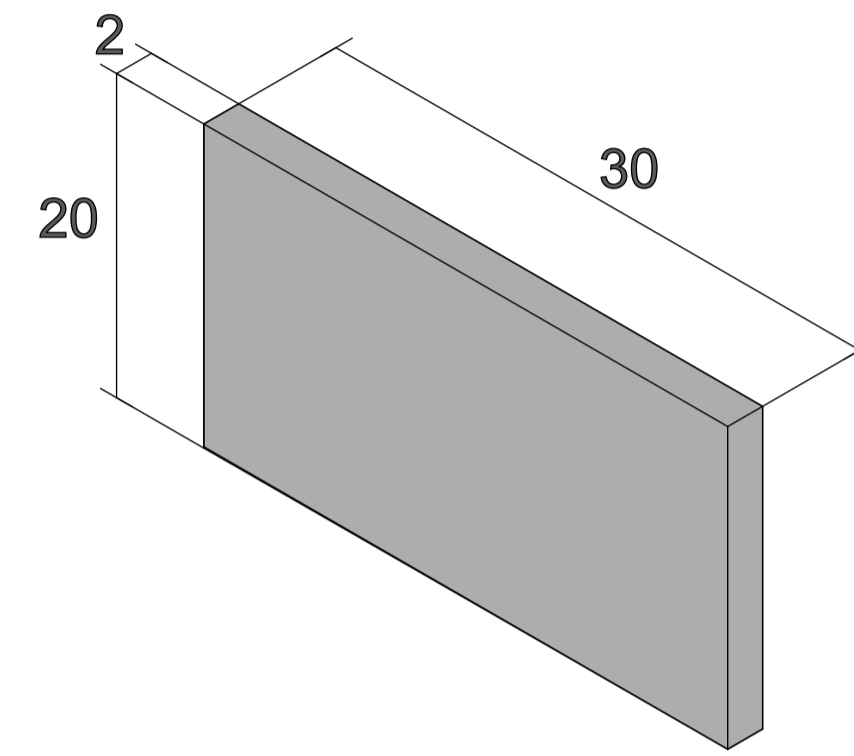


LE MISURE SONO ESPRESSE IN cm.

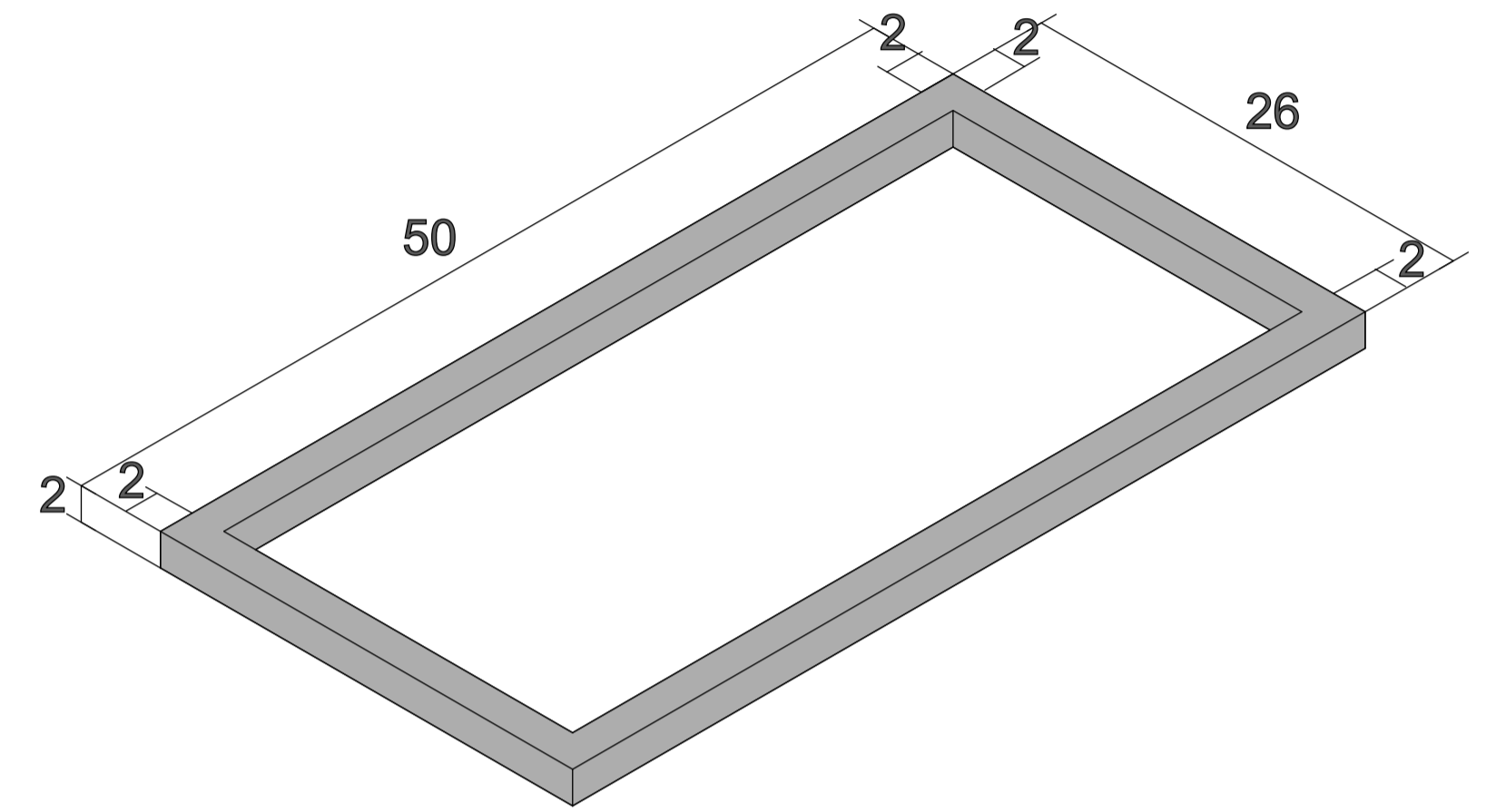
A 1 PEZZO



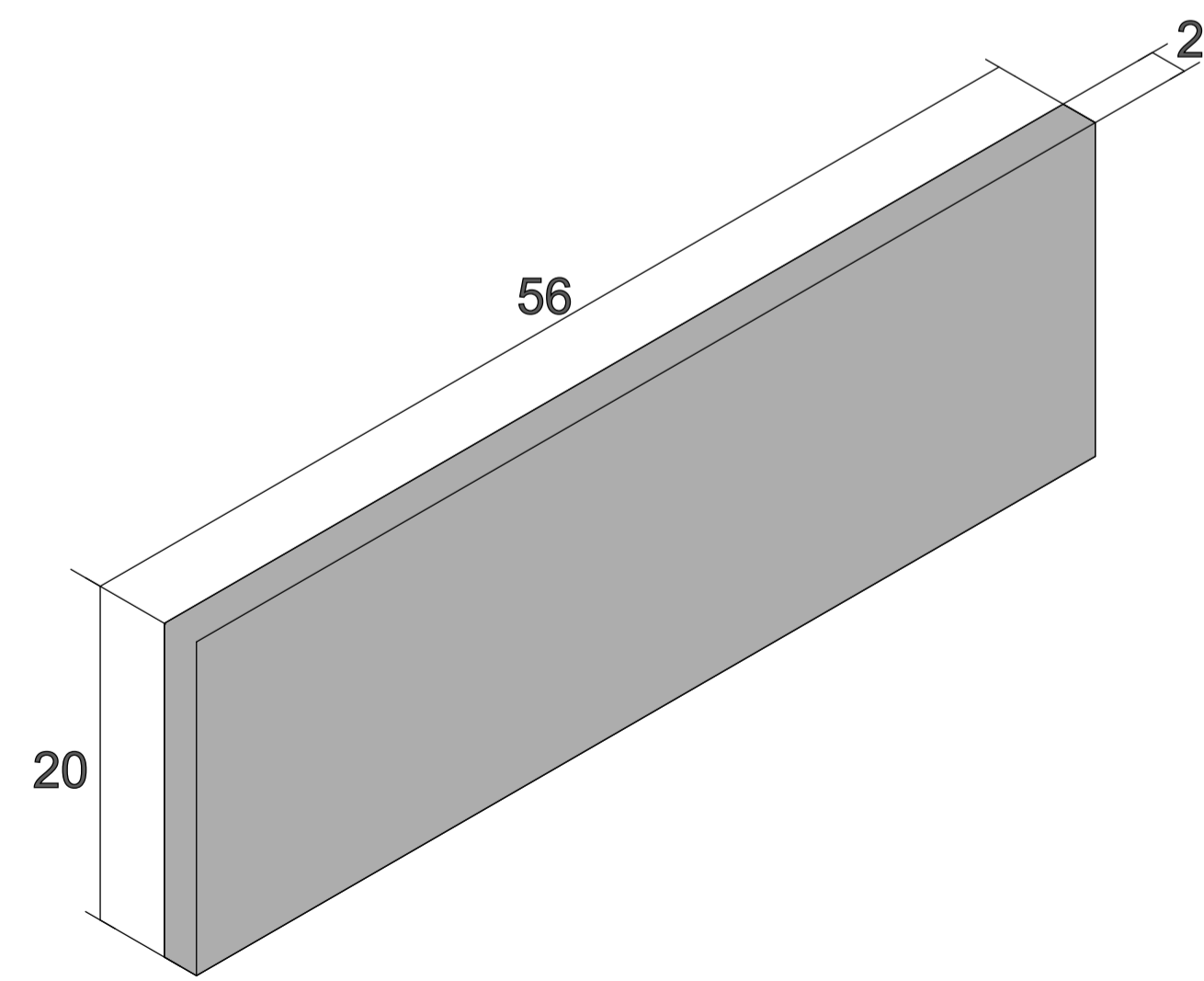
C 2 PEZZI



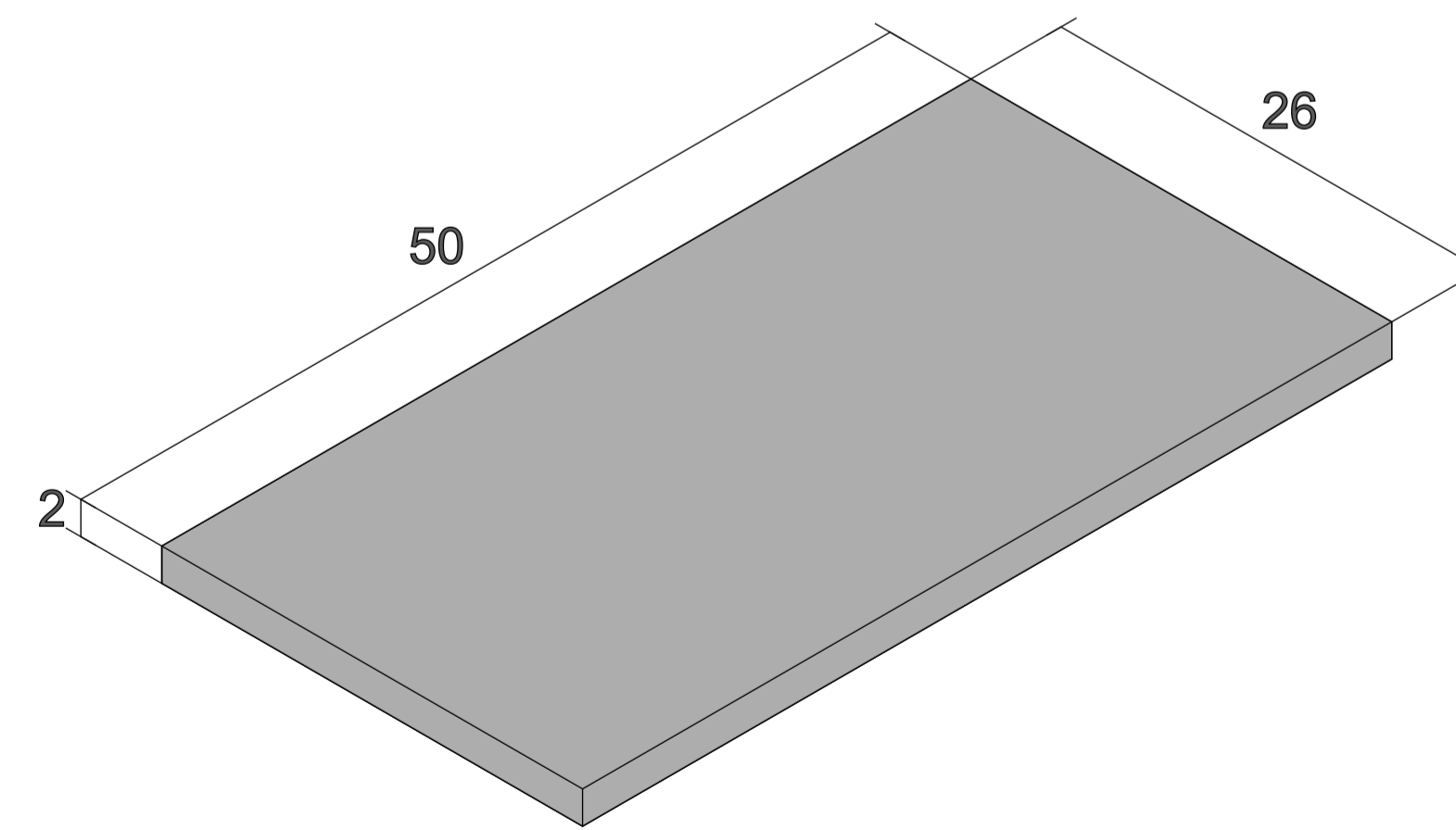
E 1 PEZZO



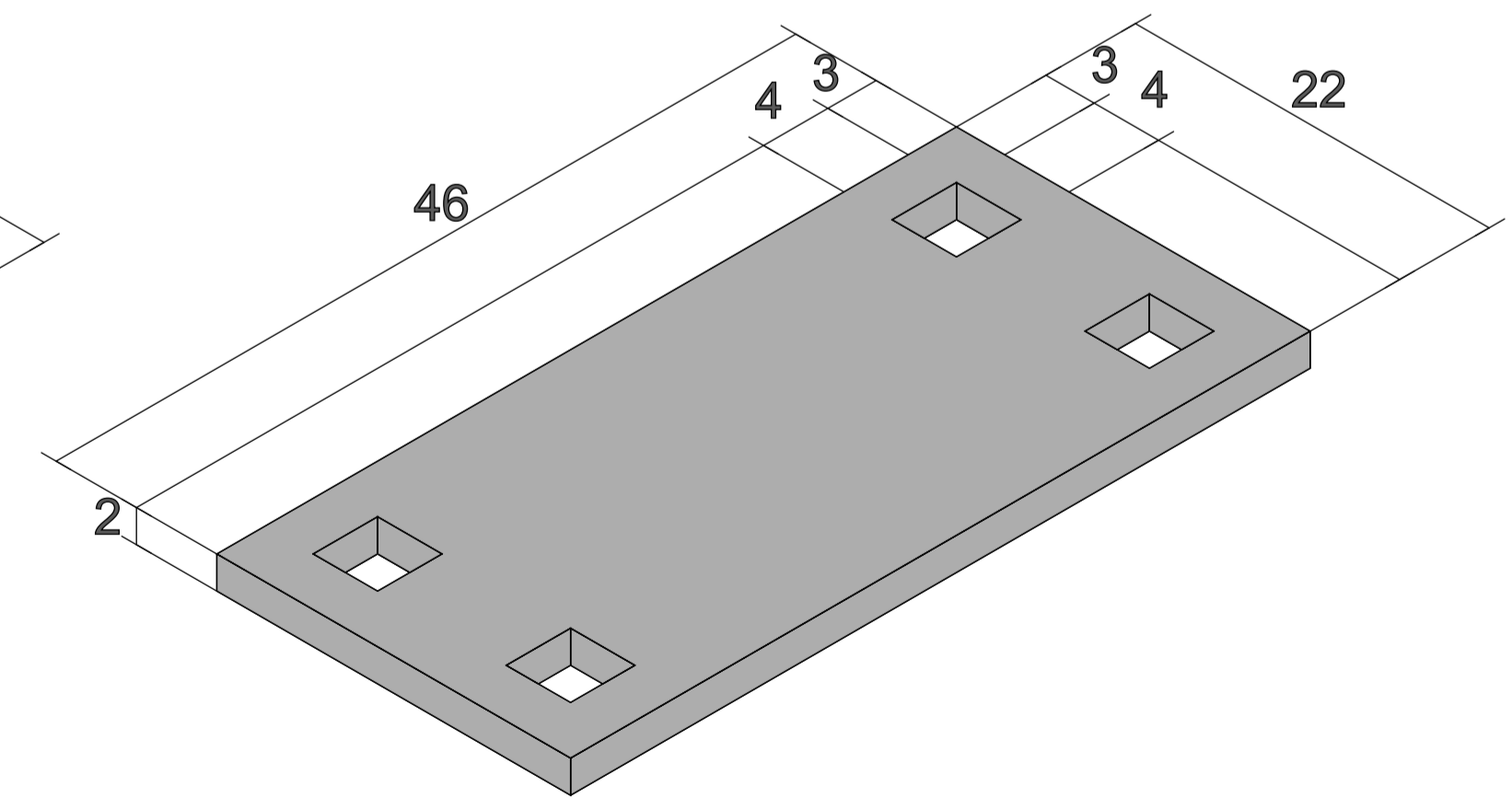
B 1 PEZZO



D 1 PEZZO

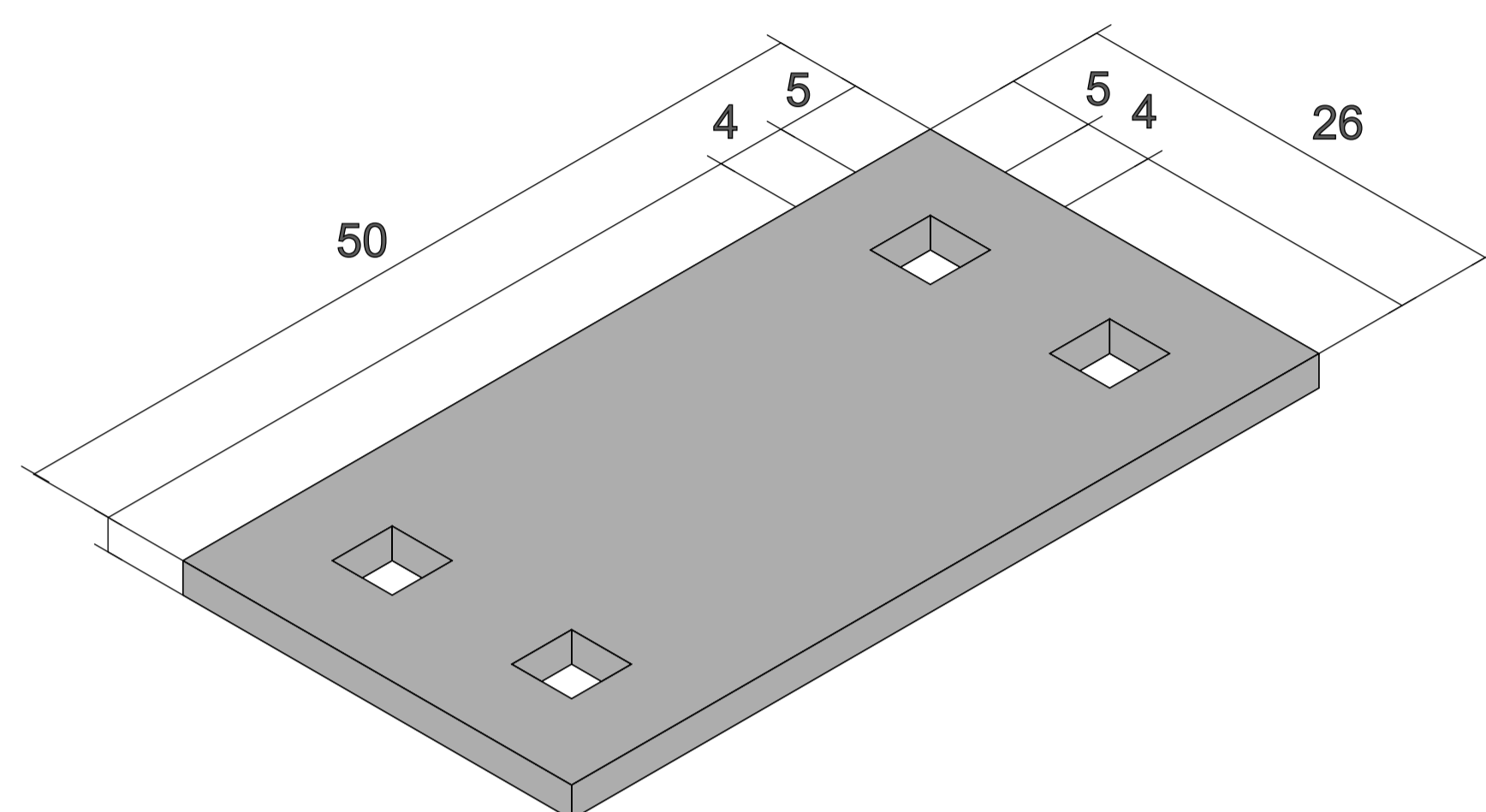


F 3 PEZZI

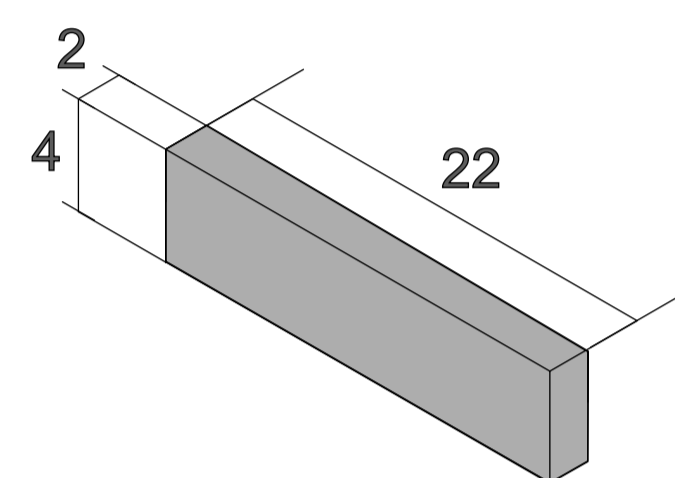


LE MISURE SONO ESPRESSE IN cm.

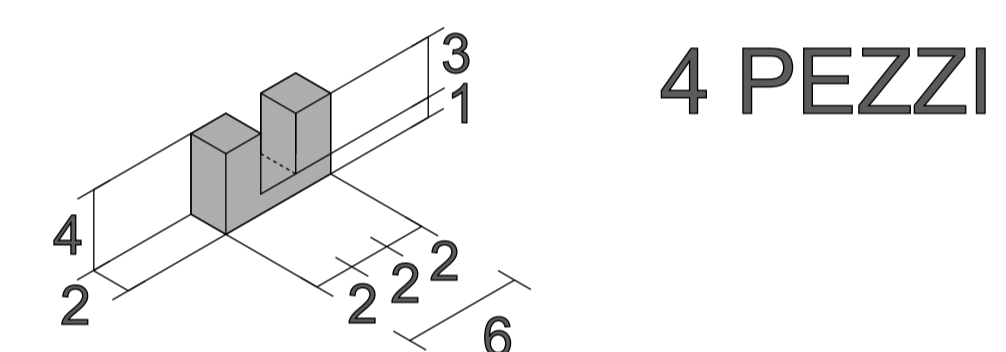
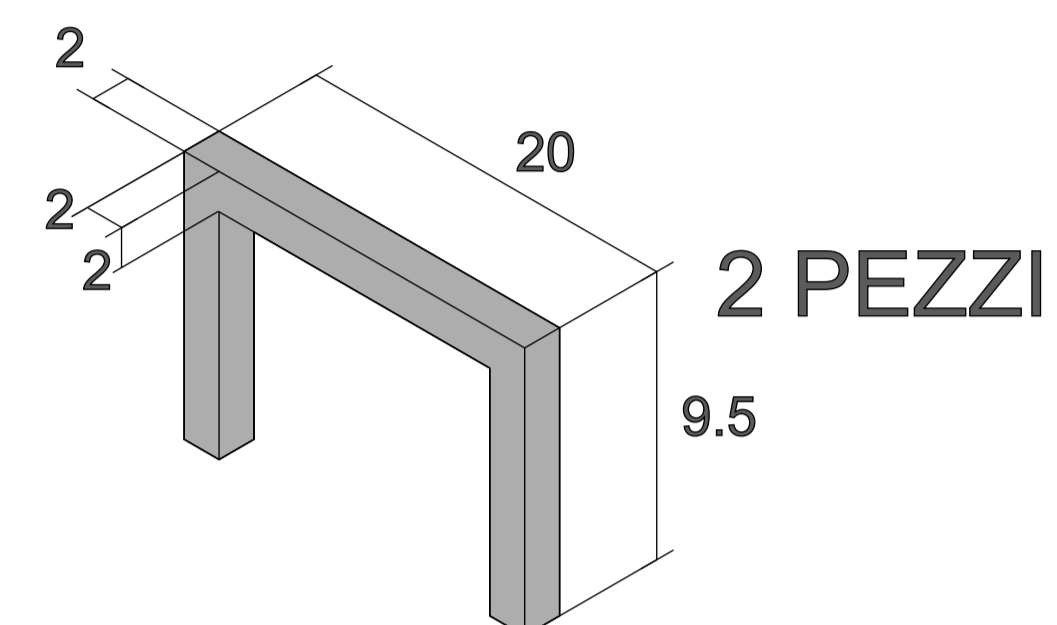
G 1 PEZZO



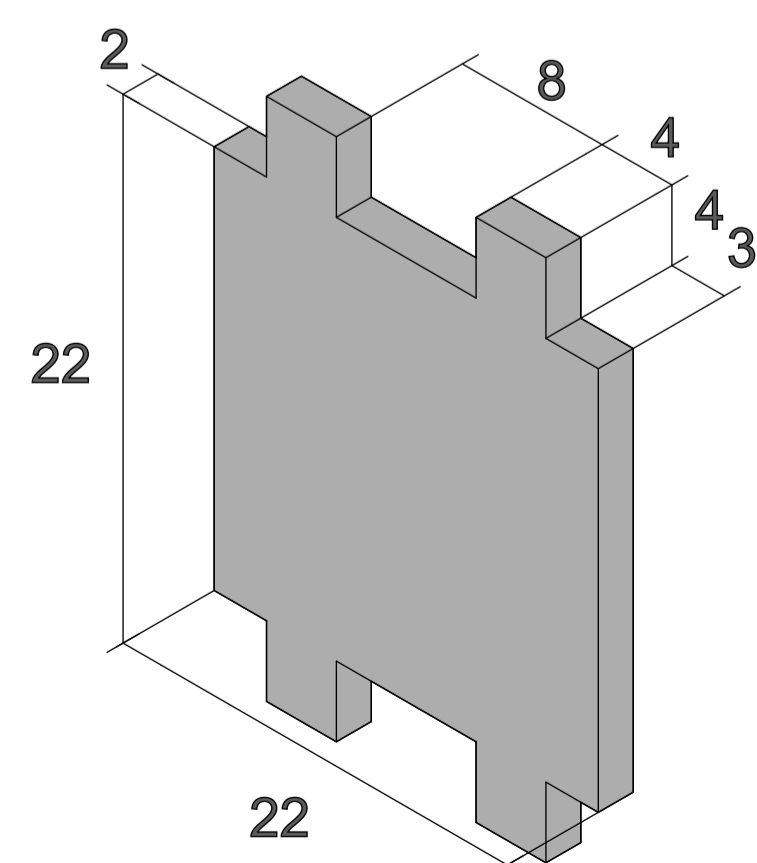
I 8 PEZZI



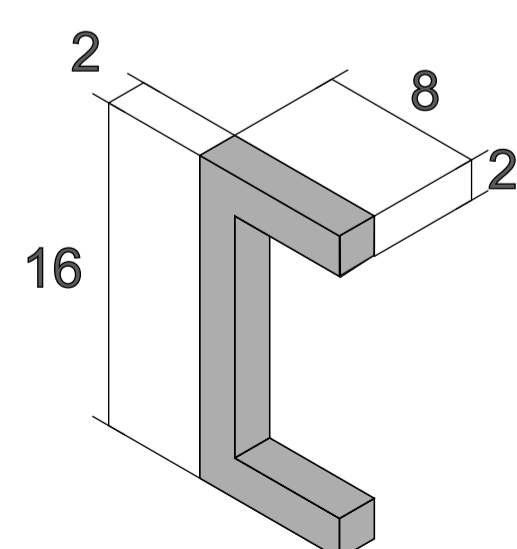
M



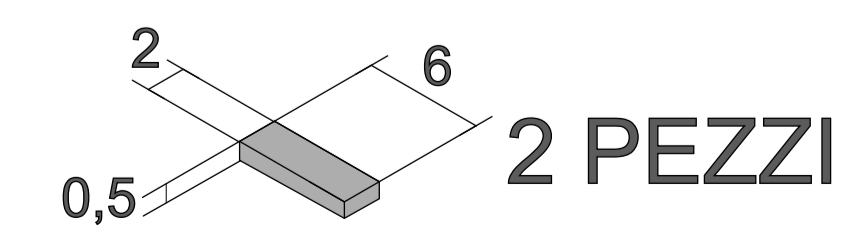
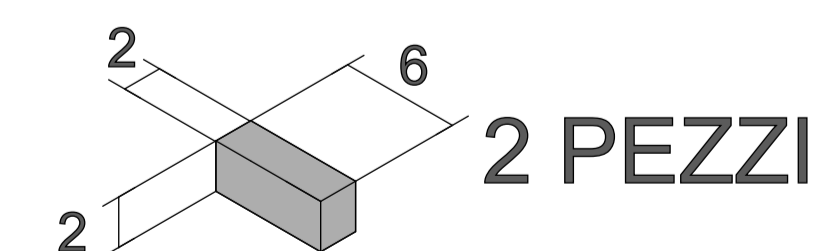
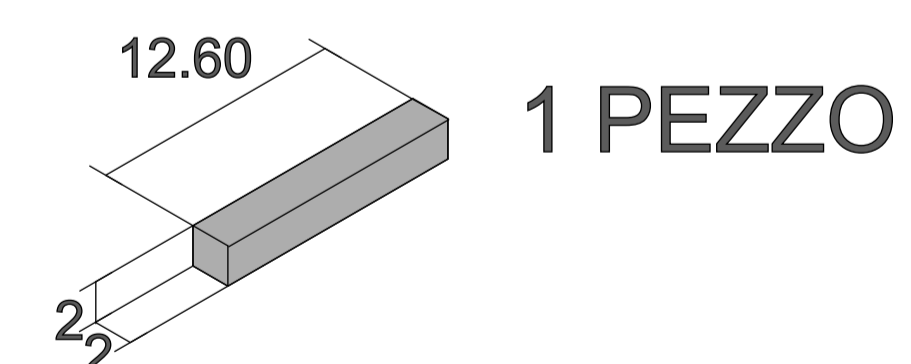
H 4 PEZZI



L 4 PEZZI

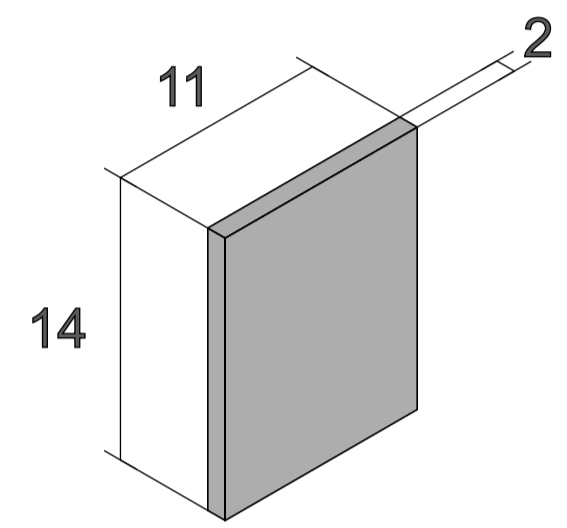


N

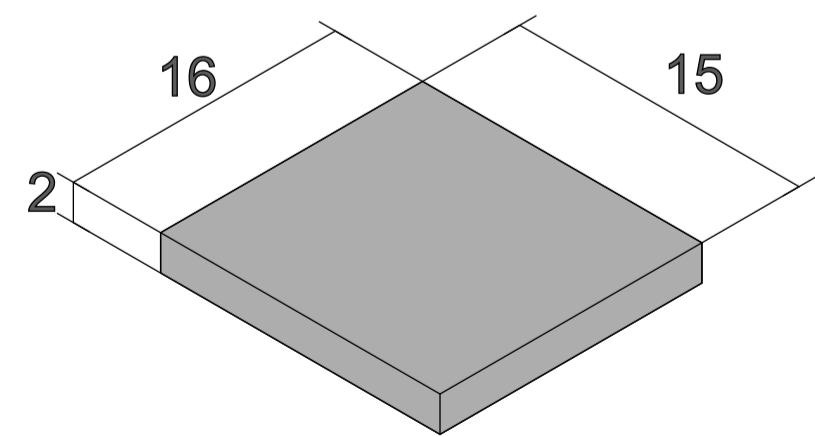


LE MISURE SONO ESPRESSE IN cm.

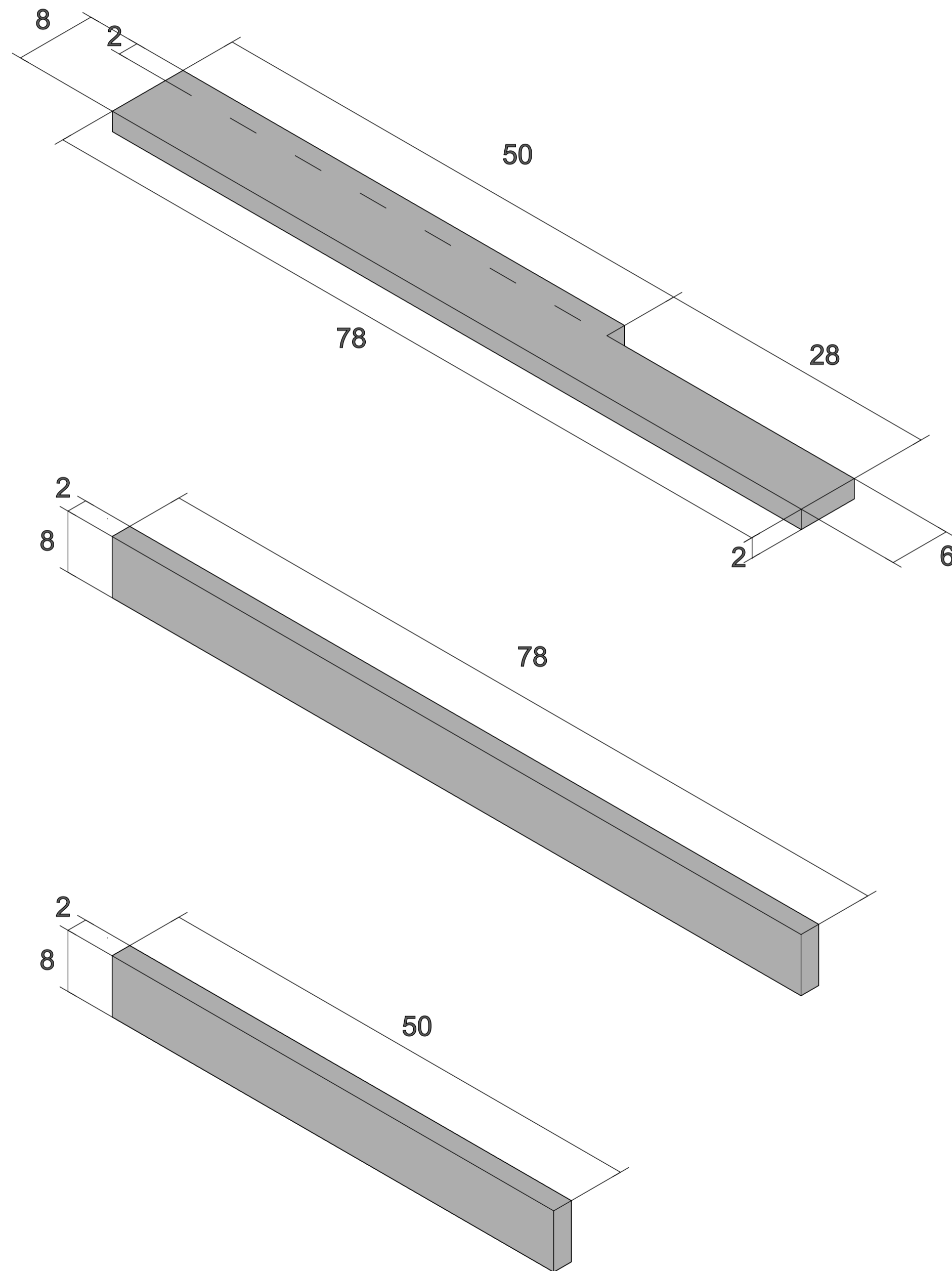
○ O 2 PEZZI



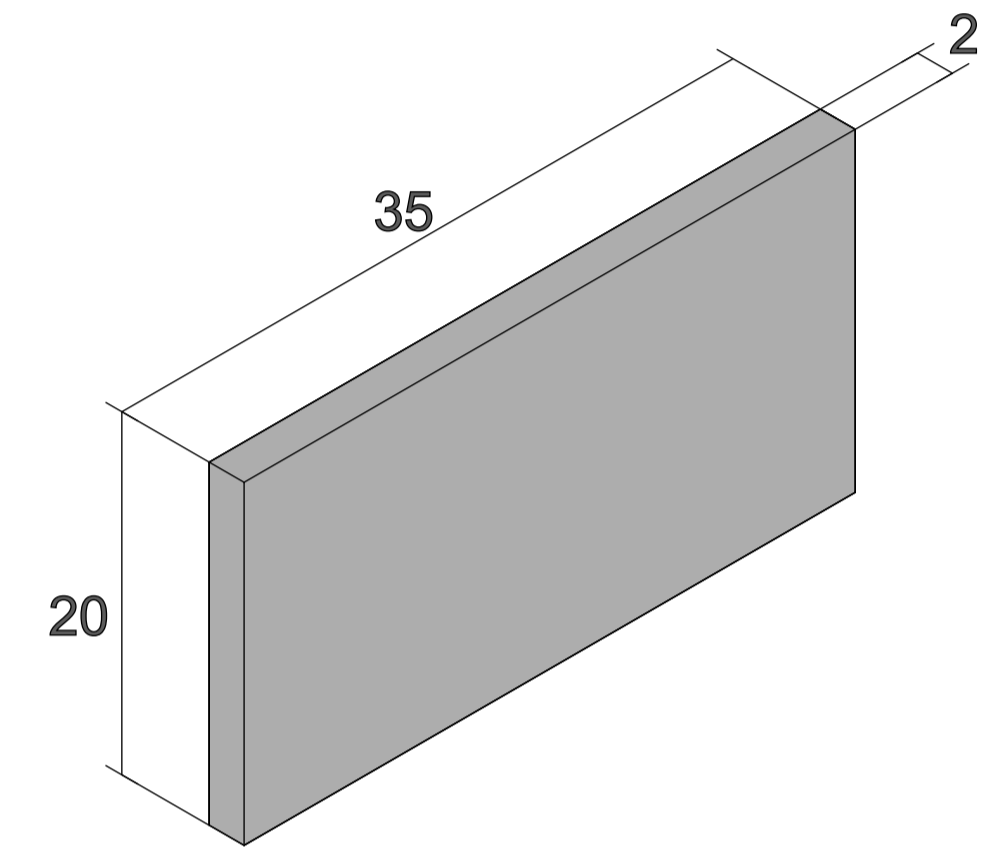
○ P 1 PEZZO



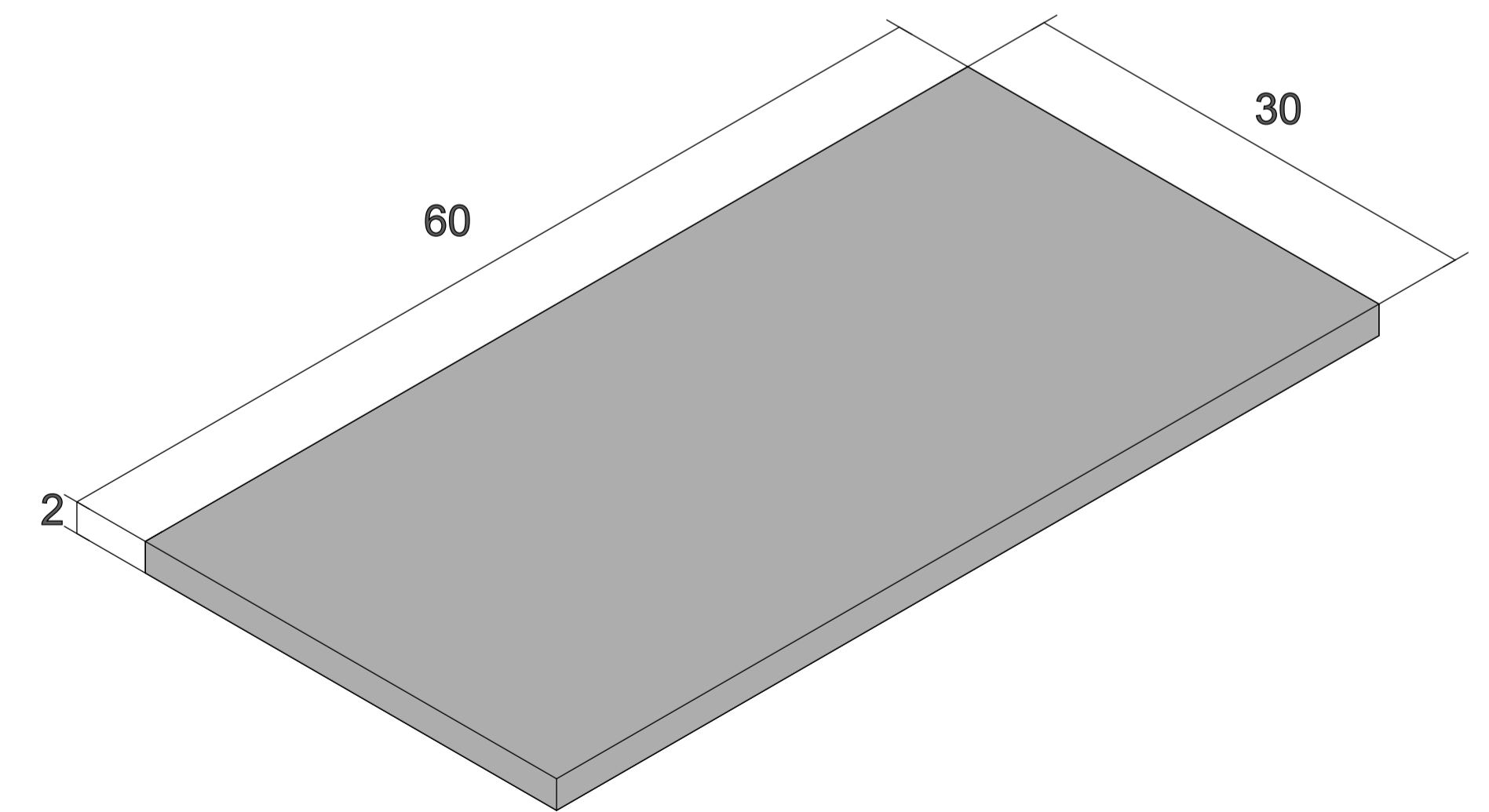
○ Q 1+1+1 PEZZI



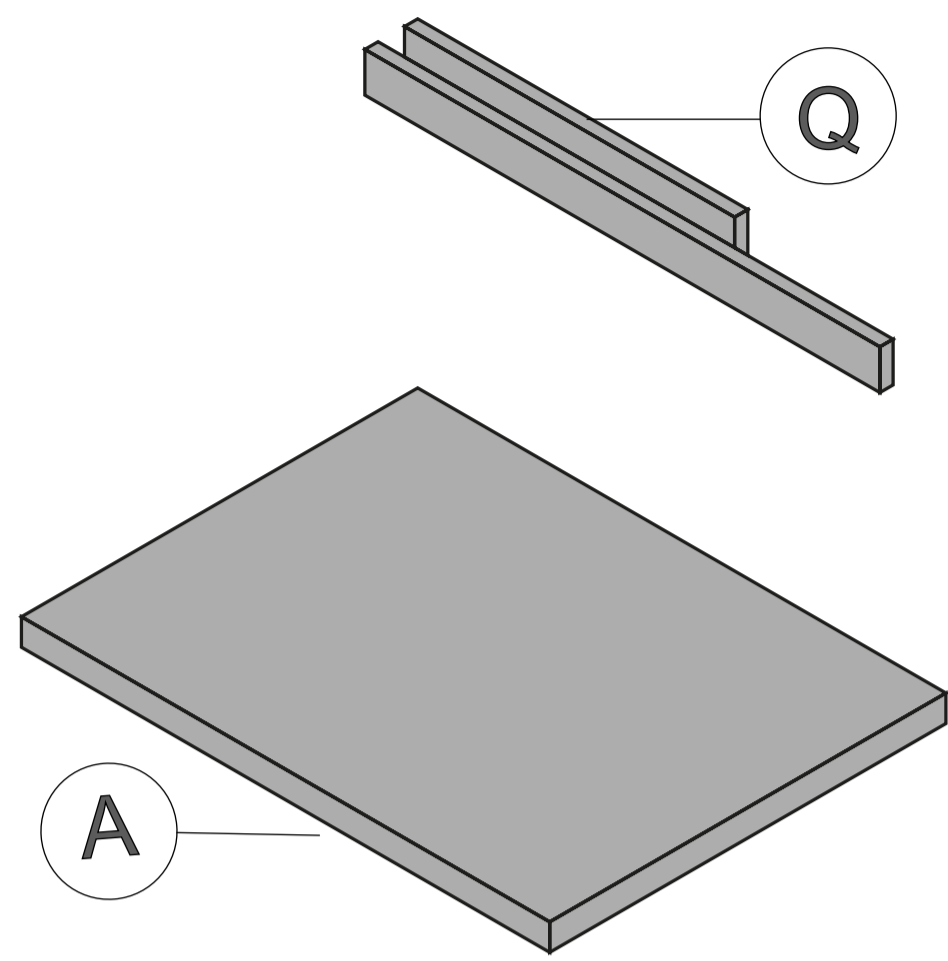
○ R 1 PEZZO



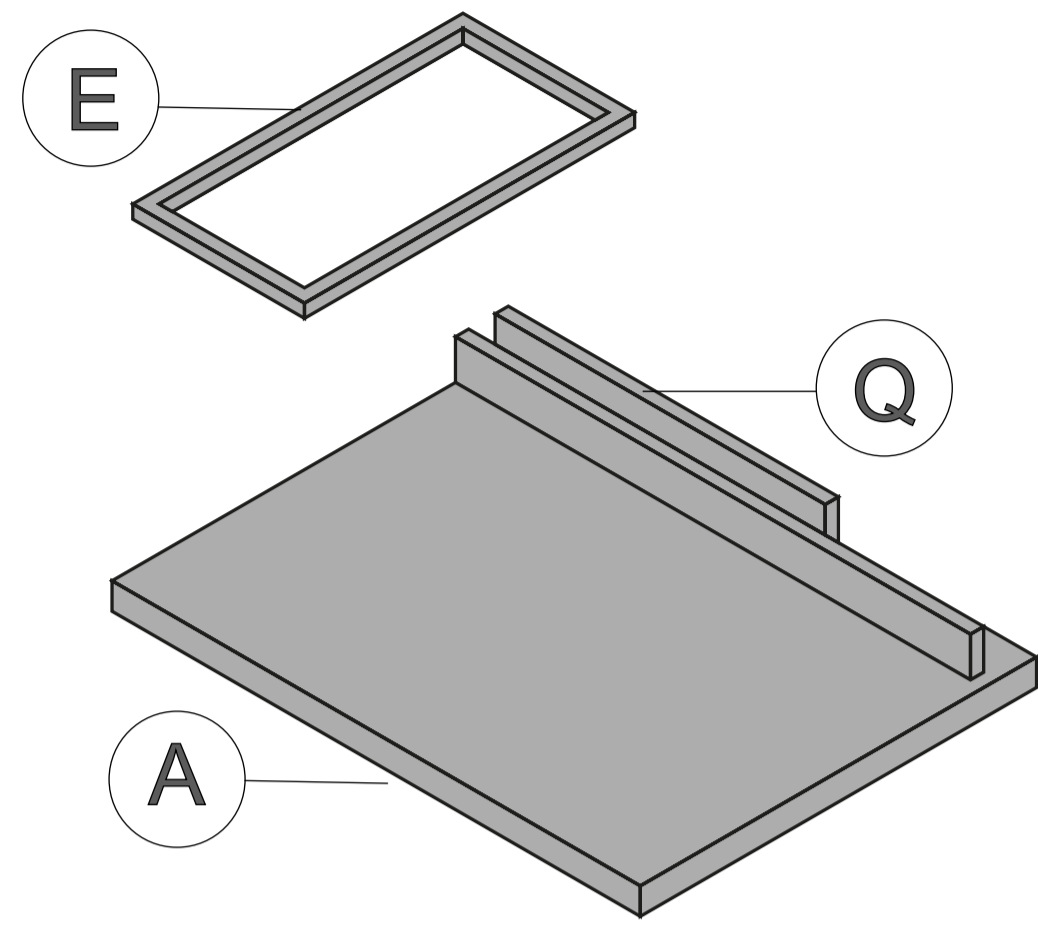
○ S 1 PEZZO



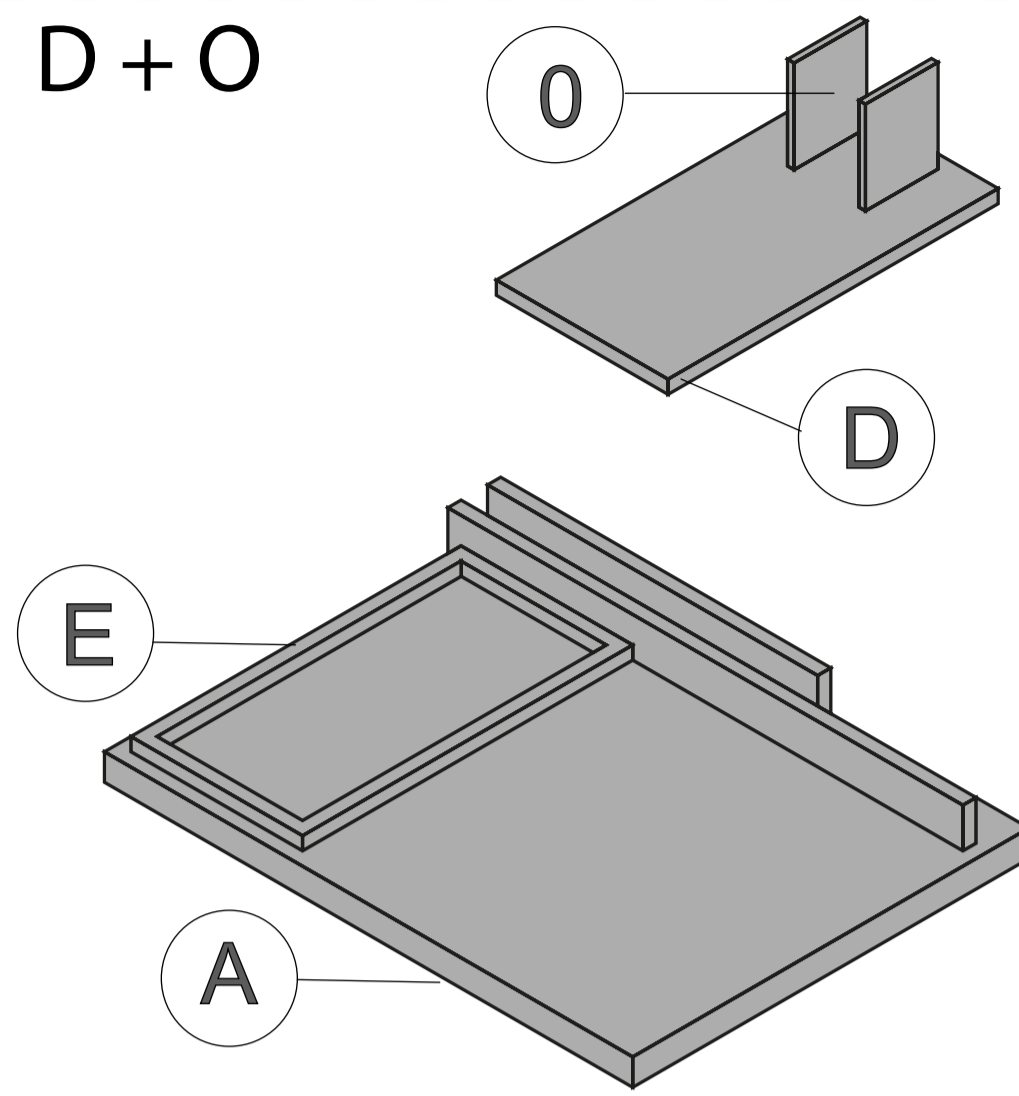
SEQUENZE DI INCOLLAGGIO



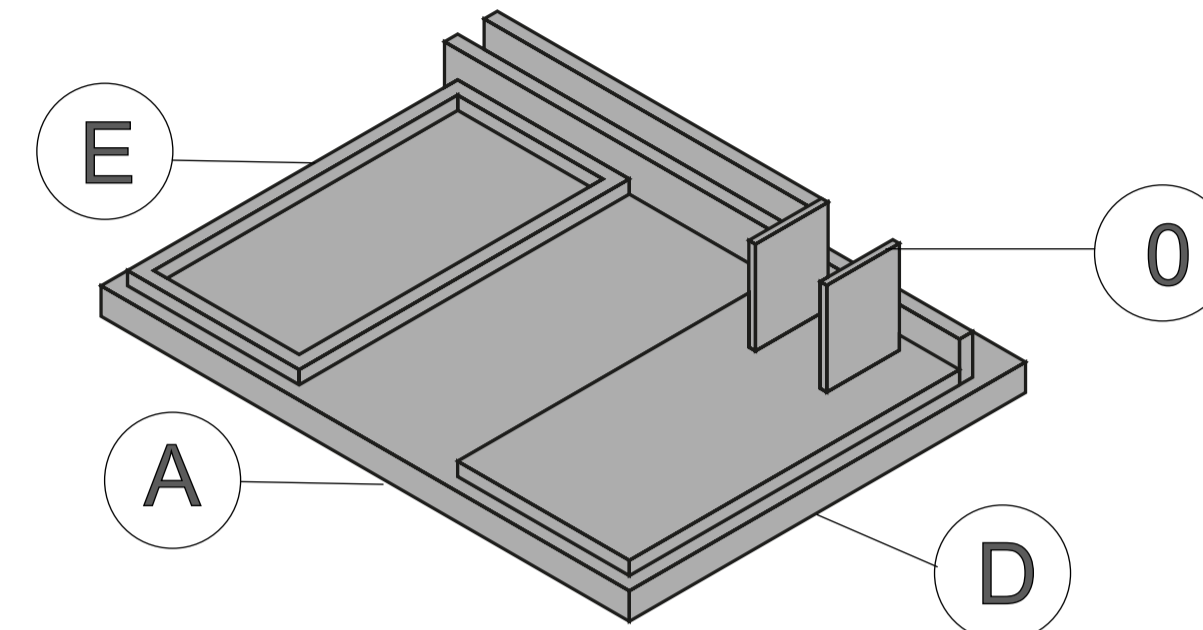
A+Q



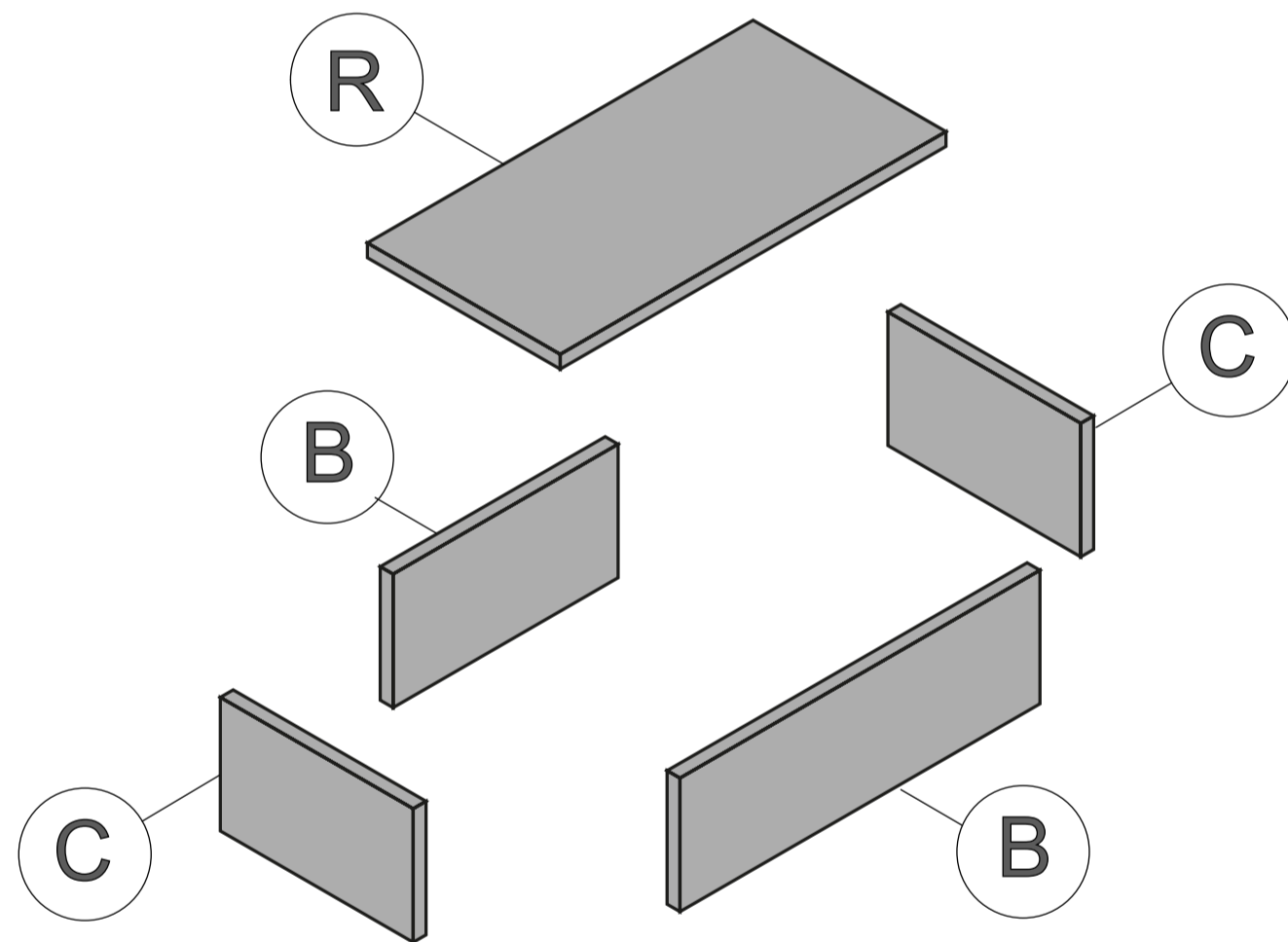
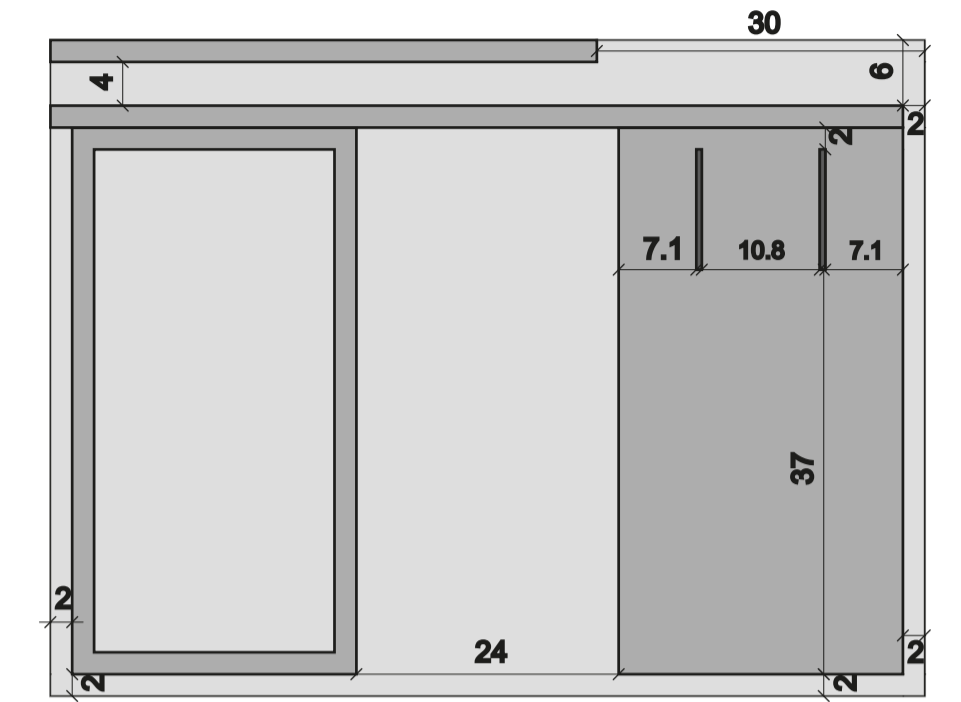
A, Q+E



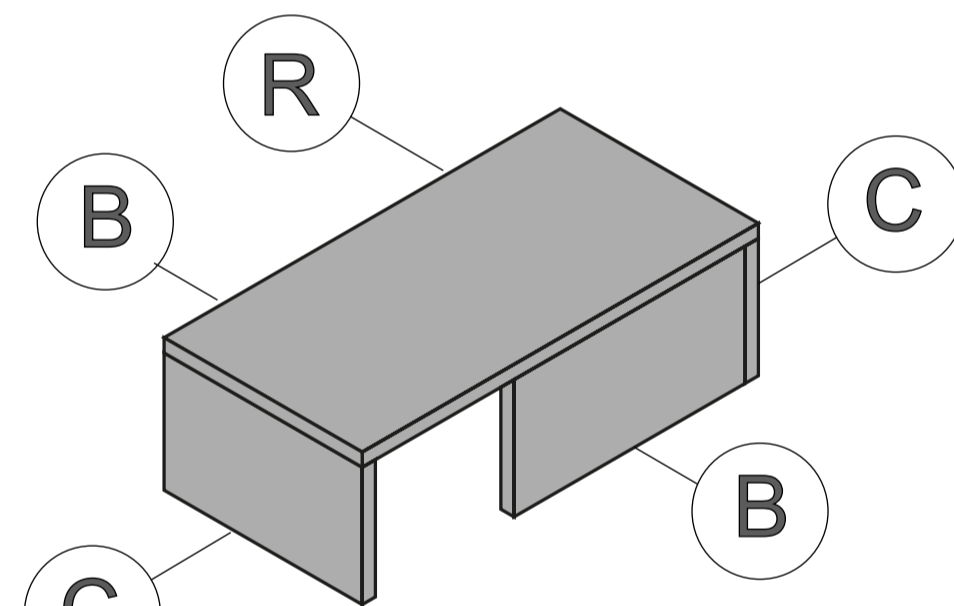
A, Q, E + D, O



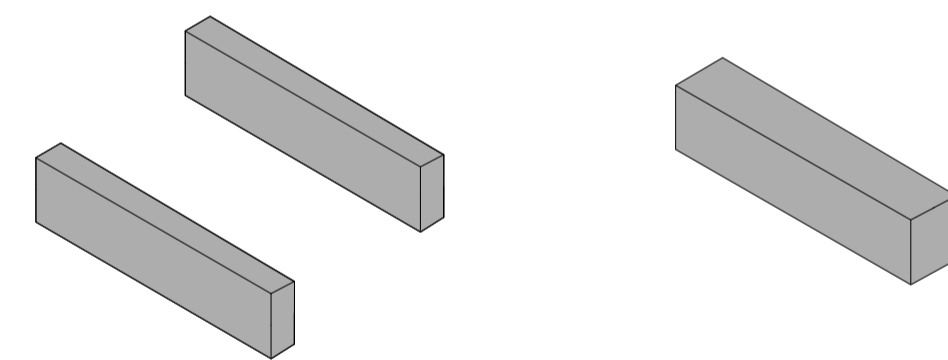
A, Q, E, D, O [x1]



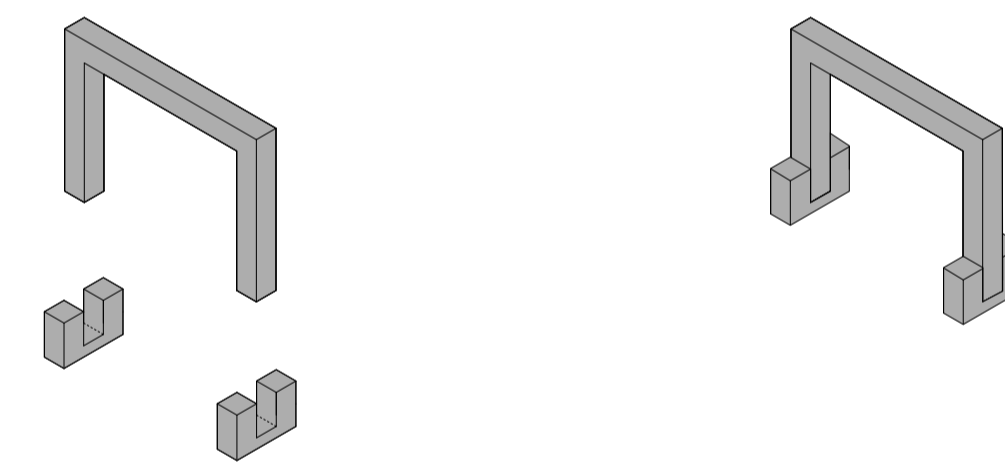
B+B+C+C+R



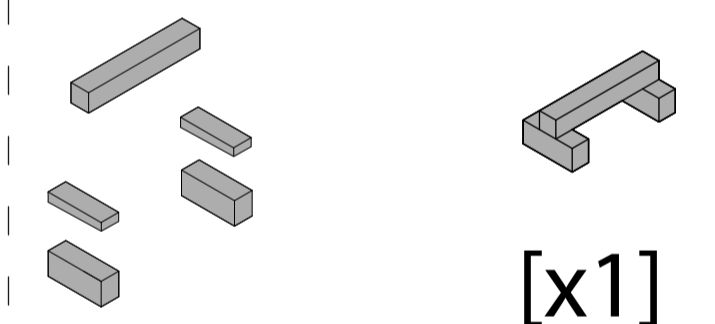
[x1]



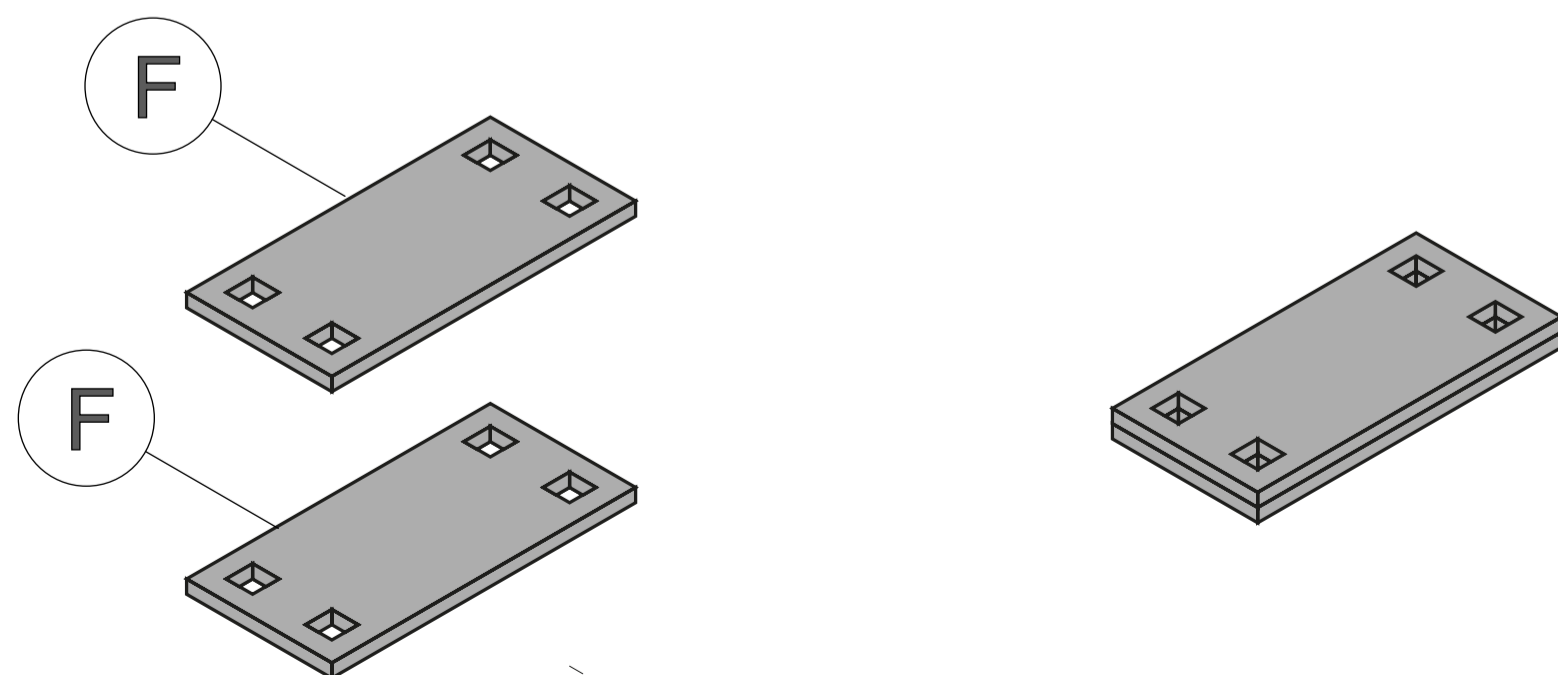
$l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ [x2]



$M = M_1 + M_2 + M_2$ [x2]

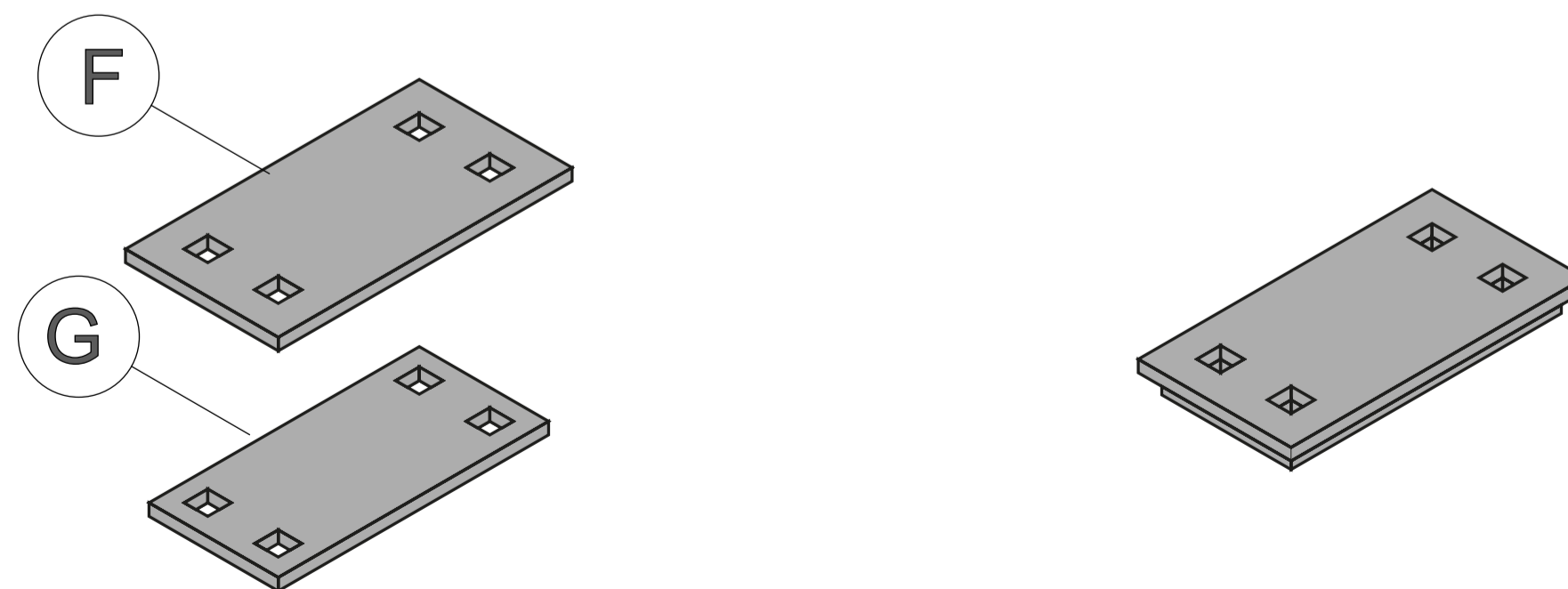


$N = N_1 + N_2 + N_2$ [x1]



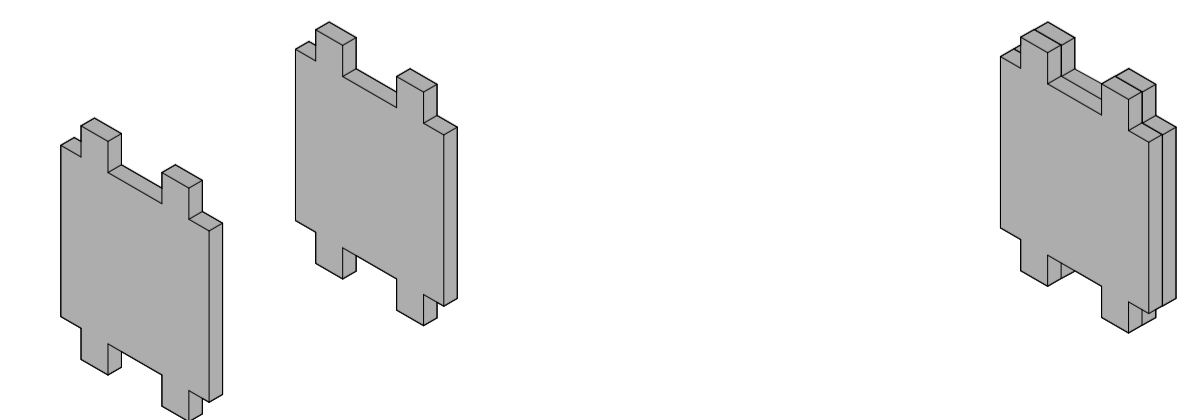
F+F

[x1]



F+G

[x1]



H+H

[x2]

LE MISURE SONO ESPRESSE IN cm.

