

METODOLOGIA



1 Temporary concert hall, L'Aquila, 2009
L'unico progetto italiano dell'architetto Shigeru Ban è il Temporary concert hall dell'Aquila del 2009. Per acquisire più informazioni possibili sul lavoro di Ban per realizzare questa tesi di laurea si è contattato il Prof. dell'Università dell'Aquila Aldo Benedetti, referente italiano di Ban. Oltre a descrivere l'esecuzione dei lavori il Prof. Benedetti ha evidenziato il nome della ditta produttrice dei tubi in cartone utilizzati. La Didor ha accettato quindi di partecipare alla sperimentazione spendendo gratuitamente presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università La Sapienza i paper tube che erano avanzati dal progetto di Ban.



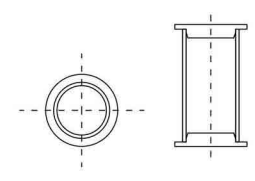
2 I campioni
La prima spedizione ha compreso 9 tubi di diametro 25 cm e 35 cm e altezza 50 cm e 100 cm. In seguito è stata ordinata una seconda spedizione di 5 tubi questa volta realizzati nel 2015. Per regolarizzare il più possibile le deformazioni del materiale durante i test sono state costruite due coppie di tappi in mdf. I campioni sono stati rifilati a mano per rendere la superficie completamente aderente ai tappi. Per determinare la quantità di umidità presente nei campioni, sono stati pesati e lasciati in una stanza ad umidità controllata per due settimane ed in seguito pesati un'altra volta prima del test.



3 Gli strumenti del test a compressione
I test a compressione sono stati eseguiti con la disponibilità del Prof. Ing. Danilo Capecechi e del Tecnico Specializzato Marco Bonaventura. Gli strumenti utilizzati sono stati: una cella di carico per poter misurare le variazioni più infinitesimali di forza peso, un misuratore di deformazioni applicato direttamente alla pressa, una pressa Galdabini, il software Catmach per l'analisi dei dati compressi di tempo-deformazioni-peso, una videocamera per le riprese statiche.

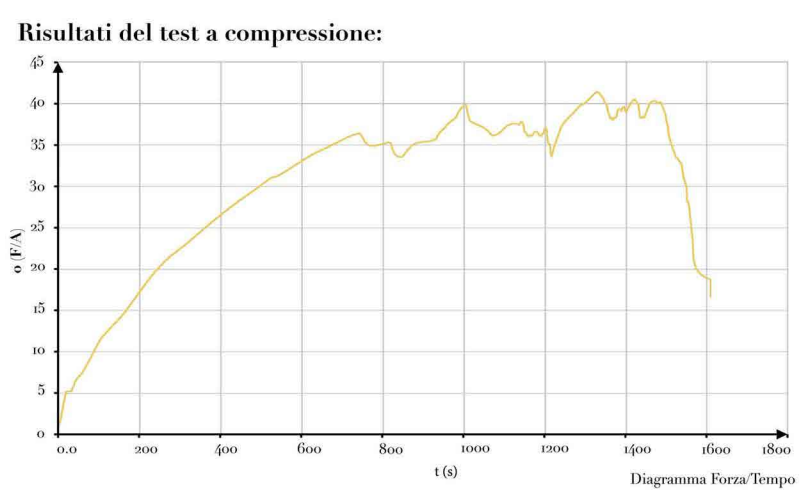
TIPOLOGIA CAMPIONE N°1

BASSO VECCHIO DIAMETRO 25



Specifiche dei campioni:
Il test a compressione sul campione N° 1BV è stato effettuato per primo ed ha consentito di determinare le caratteristiche del materiale attraverso il diagramma forza-tempo. Inizialmente infatti non si è utilizzato il misuratore degli spostamenti.

Campione	Peso arrivo (Kg)	Peso dopo (Kg)	Altezza (cm)	Spessore (cm)
N°1-BV	4,08 Kg	8,42 Kg	50 cm	1,36 cm



$$\text{Area del Paper Tube (A)} \quad A = \frac{\pi}{4} \times (R^2 - r^2)$$

$$\text{Tensione massima (}\sigma \text{ max)} \quad \sigma \text{ max} = \frac{N}{A}$$

$$\text{Forze assiali (N)} \quad N = \frac{A \times \sigma \text{ max}}{3}$$

Formule Area, Tensione massima, Forze assiali

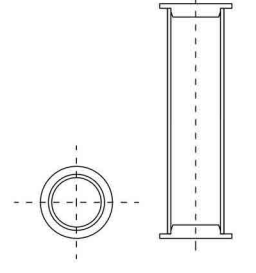
L'andamento curvilineo del diagramma è dovuto all'impostazione di velocità molto bassa del gradiente così da poter evidenziare le più piccole variazioni possibili. I primi centimetri di cemento sono avvenuti superati i 30 kN attraverso sericichiodi dovuti allo scollamento dei fogli, la rottura è poi diventata più evidente formandosi delle bombature sulla giacitura a spirale del cartone. Questo iniziale comportamento a rottura è tipico dei materiali di tipo fragile. Il grafico attraverso un andamento irregolare di sali e scendi mostra come, all'aumentare del carico, a ogni spirale dopo un'iniziale rottura il materiale ritrova un equilibrio con nuova tensione resistente fino all'estremità superiore. Dopo la rottura della spirale superiore si iniziano a creare delle fessurazioni di tipo verticale sulla giacitura diminuendo così considerevolmente la resistenza del materiale. Quest'ultimo comportamento a rottura mostra le capacità elastiche del materiale.

Campione	Area (cmq)	Forza Peso (KgF)	σ max (Kg/cmq)
N°1-BV	52,4	3642	69,50

Tabella del calcolo del σmax

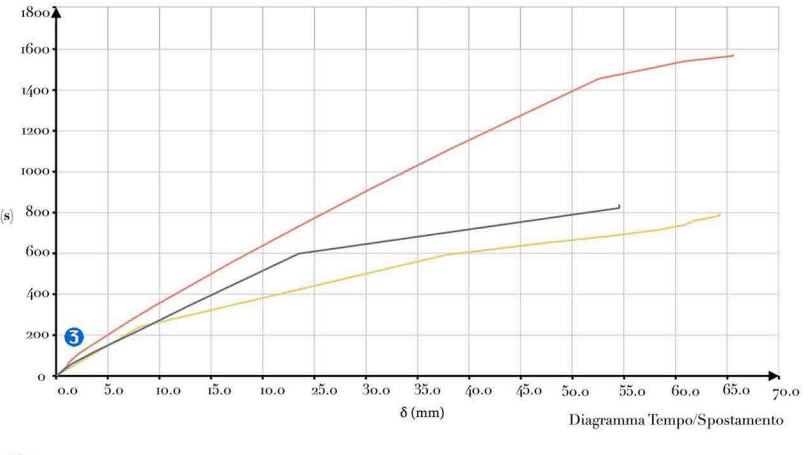
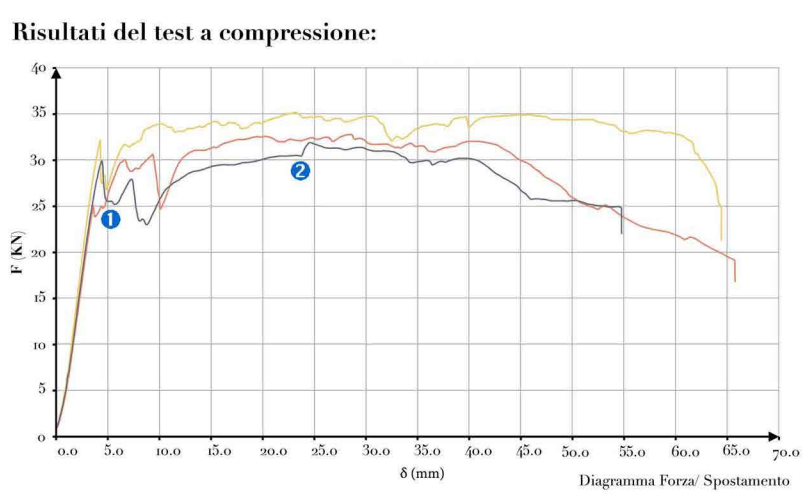
TIPOLOGIA CAMPIONE N°2

ALTO VECCHIO DIAMETRO 25



Specifiche dei campioni:

Campione	Peso arrivo (Kg)	Peso dopo (Kg)	Altezza (cm)	Spessore (cm)
N°1-AV	8,44 Kg	8,42 Kg	100 cm	1,36 cm
N°2-AV	8,38 Kg	8,36 Kg	100 cm	1,37 cm
N°3-AV	8,37 Kg	8,36 Kg	100 cm	1,36 cm



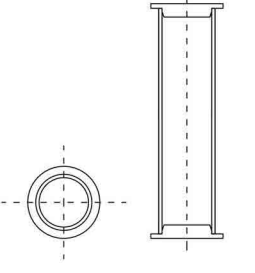
- 1 Il campione 2-AV, è quello che ha mostrato più danni causati dall'umidità ed è stato anche il provino testato più a lungo. La non perfetta aderenza ai tappi e l'eccessiva umidità hanno abbassato la resistenza a compressione sotto i 25 kN.
- 2 La variazione del grafico con una inclinazione più ripida della retta di deformazione è data dall'aumento di gradiente, evidente nel diagramma Tempo/Spostamento.
- 3 Questa piccola variazione del diagramma è dovuta all'assettamento della traversa della pressa sui tappi dei tubi. La traversa infatti pesa 600 Kg.

Campione	Area (cmq)	Forza Peso (KgF)	σ max (Kg/cmq)
N°1-AV	52,1	3213	61,6
N°2-AV	52,3	2960	47,3
N°3-AV	52,1	2991	57,4

Tabella del calcolo del σmax

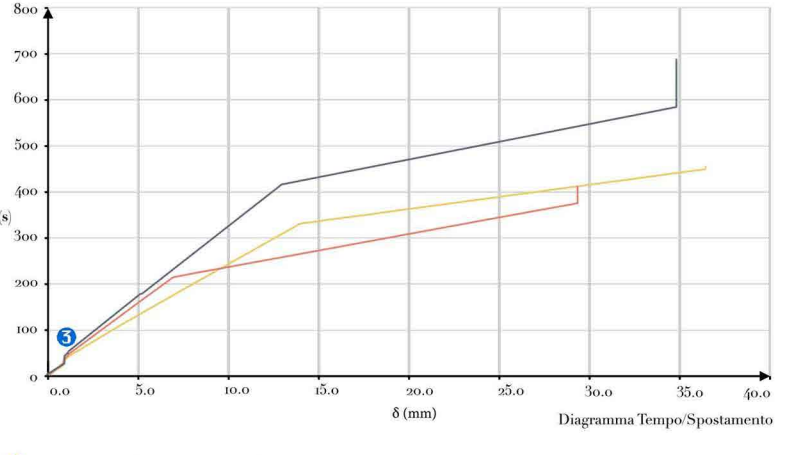
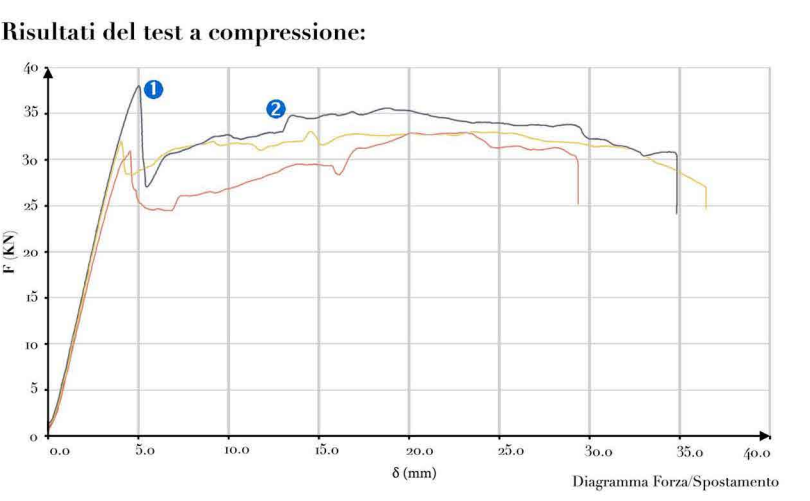
TIPOLOGIA CAMPIONE N°3

ALTO NUOVO DIAMETRO 25



Specifiche dei campioni:

Campione	Peso arrivo (Kg)	Peso dopo (Kg)	Altezza (cm)	Spessore (cm)
N°1-AN	8,54 Kg	8,54 Kg	101 cm	1,35 cm
N°2-AN	8,47 Kg	8,47 Kg	101 cm	1,36 cm
N°3-AN	8,45 Kg	8,45 Kg	101 cm	1,37 cm



- 1 Il campione 3-AN, è quello che ha evidenziato una maggiore resistenza, fino a 38 kN.
- 2 La variazione del grafico con una inclinazione più ripida della retta di deformazione è data dall'aumento di gradiente, evidente nel diagramma Tempo/Spostamento.
- 3 Questa piccola variazione del diagramma è dovuta all'assettamento della traversa della pressa sui tappi dei tubi. La traversa infatti pesa 600 Kg.

Campione	Area (cmq)	Forza Peso (KgF)	σ max (Kg/cmq)
N°1-AN	51,8	3198	61,7
N°2-AN	51,9	3096	59,6
N°3-AN	52,4	3804	72,6

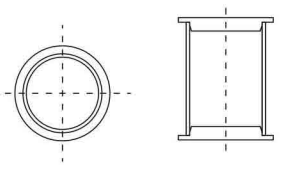
Tabella del calcolo del σmax

SPERIMENTAZIONE PAPER TUBE: DIAMETRO 25 CM

Riferimenti bibliografici: - B. Miyake, I. Luma, L. A. Gould, *Shigeru Ban Paper in Architecture*, Rizzoli International Publication, New York 2009 - M. McQuaid, *Shigeru Ban*, Phaidon Press, New York 2010

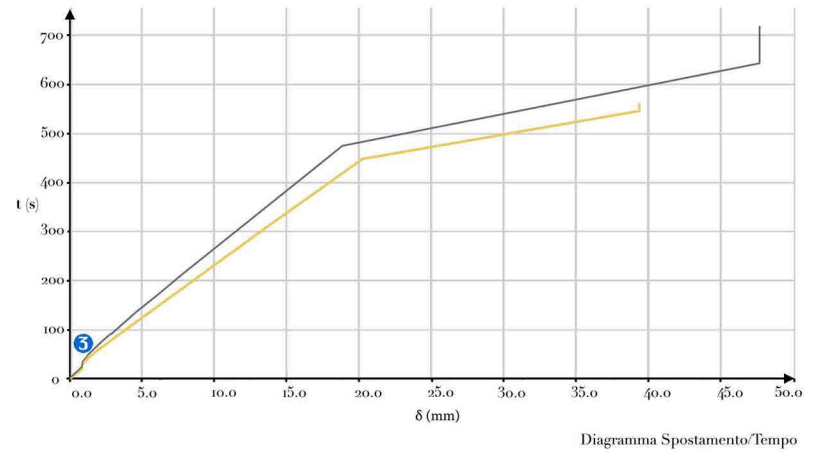
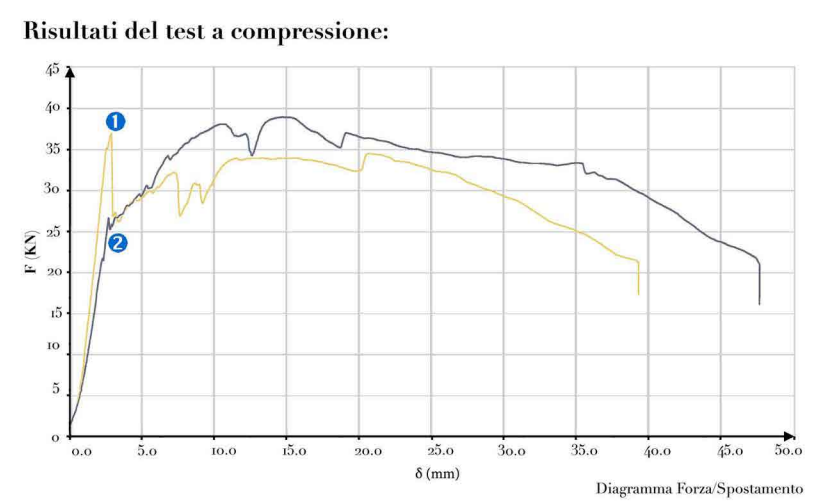
TIPOLOGIA CAMPIONE N°3

BASSO VECCHIO DIAMETRO 35



Specifiche dei campioni:

Campione	Peso arrivo (Kg)	Peso dopo (Kg)	Altezza (cm)	Spessore (cm)
N°4-BV	5,72 Kg	5,70 Kg	50 cm	1,36 cm
N°5-BV	5,79 Kg	5,72 Kg	50 cm	1,36 cm



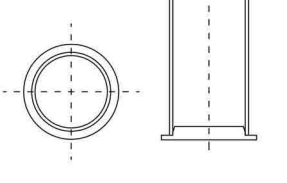
- 1 Il campione 4-BV, ha avuto la prima rottura sotto una forza peso di 3702 KgF. Il grafico mostra un'andamento tipico dei campioni nuovi, dopo la prima rottura il materiale non tiene più il peso raggiunto in precedenza.
- 2 Il campione 5-BV ha avuto la prima rottura dopo 2700 Kg. Il grafico mostra un'andamento a crescere dopo la prima inflessione di carico.
- 3 Questa piccola variazione del diagramma è dovuta all'assettamento della traversa della pressa sui tappi dei tubi. La traversa infatti pesa 600 Kg.

Campione	Area (cmq)	Forza Peso (KgF)	σ max (Kg/cmq)
N°4-BV	74,2	3702	50,1
N°5-BV	73,8	3816	51,7

Tabella del calcolo del σmax

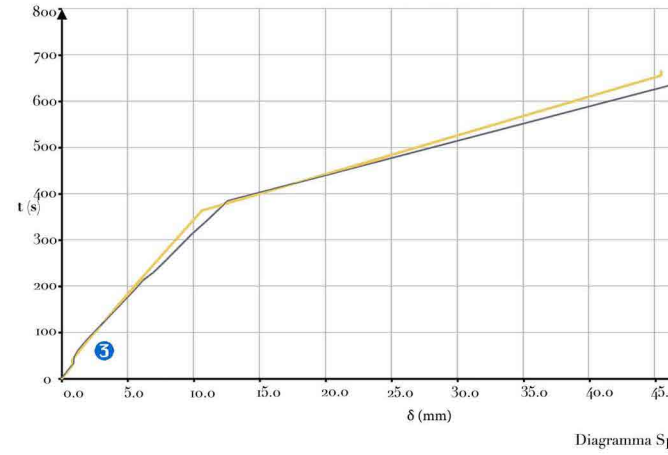
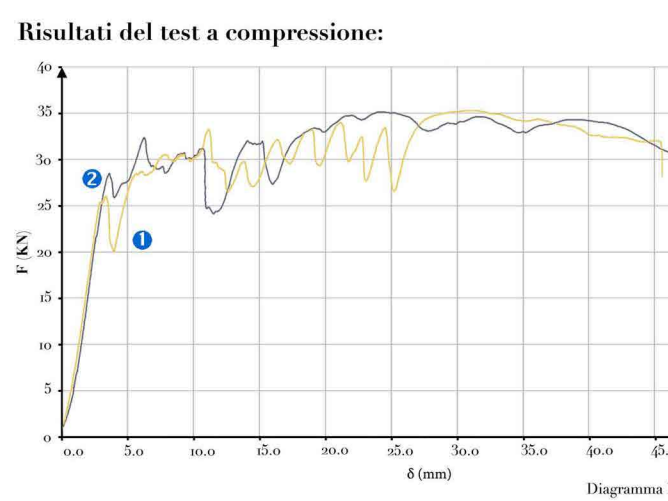
TIPOLOGIA CAMPIONE N°2

ALTO VECCHIO DIAMETRO 35



Specifiche dei campioni:

Campione	Peso arrivo (Kg)	Peso dopo (Kg)	Altezza (cm)	Spessore (cm)
N°1-AV	11,71 Kg	11,64 Kg	100 cm	1,39 cm
N°2-AV	11,75 Kg	11,70 Kg	100 cm	1,39 cm



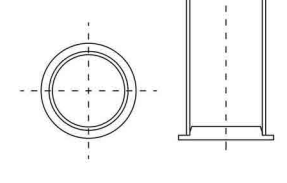
- 1 Il campione 1-AV, ha avuto la prima rottura sotto una forza peso di 2598 KgF. Il grafico mostra un'andamento a crescere dopo la prima rottura.
- 2 Il campione 2-AV, ha avuto la prima rottura sotto una forza peso di 2847 KgF. Il grafico mostra un'andamento a crescere sotto la continua pressione, inoltre sono ben evidenti le fasi di scollamento delle fibre dei vari strati elicoidali.
- 3 Questa piccola variazione del diagramma è dovuta all'assettamento della traversa della pressa sui tappi dei tubi. La traversa infatti pesa 600 Kg.

Campione	Area (cmq)	Forza Peso (KgF)	σ max (Kg/cmq)
N°1-AV	74,9	2598	34,6
N°2-AV	75,2	2847	37,8

Tabella del calcolo del σmax

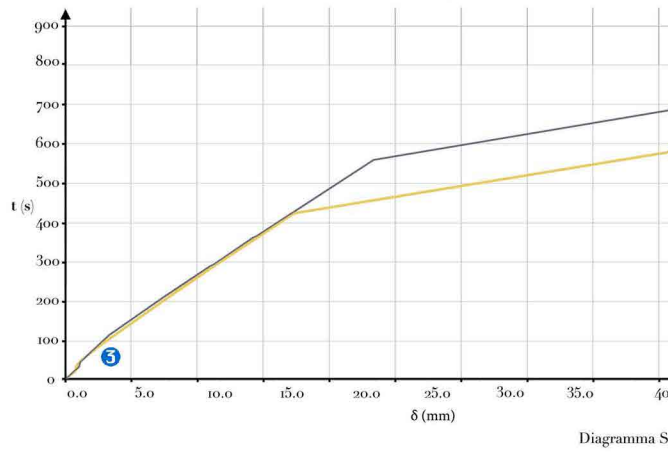
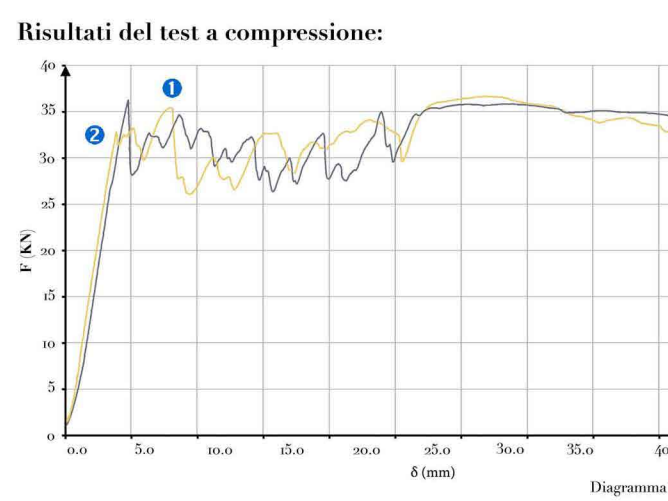
TIPOLOGIA CAMPIONE N°1

ALTO NUOVO DIAMETRO 35



Specifiche dei campioni:

Campione	Peso arrivo (Kg)	Peso dopo (Kg)	Altezza (cm)	Spessore (cm)
N°1-AN	11,89 Kg	11,89 Kg	100 cm	1,39 cm
N°2-AN	11,88 Kg	11,88 Kg	100 cm	1,36 cm



- 1 Il campione 1-AN, ha avuto la prima rottura sotto una forza peso di 3321 KgF. Il grafico mostra un'andamento a crescere dopo la prima rottura, non tipico dei campioni nuovi.
- 2 Il campione 2-AN, ha avuto la prima rottura sotto una forza peso di 3624 KgF. Il grafico mostra una diminuzione di carico subito dopo la prima rottura, inoltre l'alternanza ciclica del grafico evidenzia le fasi di scollamento delle fibre dei vari strati elicoidali.
- 3 Questa piccola variazione del diagramma è dovuta all'assettamento della traversa della pressa sui tappi dei tubi. La traversa infatti pesa 600 Kg.

Campione	Area (cmq)	Forza Peso (KgF)	σ max (Kg/cmq)
N°1-AN	74,9	3321	44,2
N°2-AN	75,2	3624	48,3

Tabella del calcolo del σmax

SPERIMENTAZIONE

CONCLUSIONI



4 Premesse:
Trattandosi di un materiale sperimentale, mai utilizzato in Italia, si è resa necessaria la sottoposizione del Paper Tube a test di resistenza per verificarne i possibili impieghi nel campo delle strutture. Determinazione della resistenza a compressione. La prova di schiacciamento consiste nel posizionare il provino tra i piatti d'acciaio di una pressa aumentando il carico. I test a spostamento controllato di puro sforzo assiale, eseguiti sui campioni, dimostrano il comportamento del Paper Tube a compressione.



5 Risultati dei test di laboratorio:
Si evidenzia una resistenza massima dei tubi di 3000 kg, oltre la quale si verifica la prima rottura. Tale rottura non è anticipata né da deformazioni, né da rumori, e questo è un indice chiaro della fragilità del materiale. La rottura avviene seguendo la tessitura elicoidale delle fasce di cartone di cui sono composti i tubi: la deformazione parte dall'estremità inferiore (più spesso) o da quella superiore. Man mano che la pressa continua a spingere, le varie fasce vengono sottoposte alla medesima e continua pressione, deformandosi una dopo l'altra in maniera ciclica, fino ad arrivare all'ultima fascia e quindi all'accartocciamento dell'intero tubo. Da questo momento si formano fessurazioni verticali in corrispondenza dei giunti inferiori delle fasce, avviene, quindi, una deformazione plastica (anelastica).

6 Conclusioni:
RESISTENZA DEL MATERIALE IN FUNZIONE DELLO SPESORE:
In base alle prove di laboratorio si evidenzia un forte aumento di resistenza del materiale all'aumentare, anche minimo, dello spessore del campione sottoposto a compressione.
CONFRONTO TRA I CAMPIONI DEL 2009 E QUELLI DEL 2014:
L'umidità presente nei campioni più vecchi determina una diminuzione percentuale media del 20% sulla resistenza a compressione del materiale.
PROVE DI LABORATORIO CONDOTTE DA SHIGERU BAN:
Gli esperimenti condotti dall'architetto sui Paper Tube utilizzati per i suoi progetti ci forniscono ulteriori informazioni sul comportamento del materiale:
- la resistenza a trazione è 1/6 di quella a compressione;
- le prove a lungo termine dimostrano che il tubo, sottoposto a compressione alla sua resistenza massima, dopo un anno perde solo il 3% della prestazione.

SPERIMENTAZIONE PAPER TUBE: DIAMETRO 35 CM

Riferimenti bibliografici: - B. Miyake, I. Luma, L. A. Gould, *Shigeru Ban Paper in Architecture*, Rizzoli International Publication, New York 2009 - M. McQuaid, *Shigeru Ban*, Phaidon Press, New York 2010