Beyond Bending

Throughout history, master builders have discovered expressive forms through the constraints of economy, efficiency and elegance. There is much to learn from the architectural and structural principles they developed.

Novel structural design tools that extend traditional graphical methods to three dimensions allow designers to discover a vast range of possible forms in compression. By better understanding the flow of compressive forces in three dimensions, excess steel can be eliminated, natural resources can be conserved, and humble materials like earth and stone can be reimagined for the future.

By combining methods from the past with new technologies and fabrication techniques, this installation advocates for the logic of compression-only forms. It offers possibilities to move beyond the slab, beyond the dome, beyond free-form, and ultimately beyond bending.

Block Research Group, ETH Zurich
Ochsendorf DeJong & Block Engineering
The Escobedo Group

Oltre la Flessione

Nel corso della storia, grazie ai vincoli imposti dall'economia, dall'efficienza e dall'eleganza, si sono andate scoprendo forme espressive innovative. Molto si puó ancora imparare da questi principi architettonici e strutturali.

I nuovi strumenti di progettazione strutturale che applicano i tradizionali metodi grafici alle tre dimensioni consentono ai progettisti di immaginare una vasta gamma di possibili forme che lavorano a compressione. Grazie ad una migliore comprensione delle tensioni interne nelle tre dimensioni, l'uso dell'acciaio può essere ridotto mentre le risorse naturali possono essere ottimizzate e materiali poveri come la terra e la pietra possono essere ripensati per il futuro.

Combinando i principi del passato con le nuove tecnologie e tecniche di fabbricazione, quest'installazione propone la logica delle forme che lavorano solo a compressione ed offre nuove possibilità per progredire oltre il solaio ordito o a piastra, oltre la cupola, oltre la forma libera e, in definitiva, oltre la flessione.

Block Research Group, ETH Zurich
Ochsendorf DeJong & Block Engineering
The Escobedo Group

Beyond the Slab I

An arch in compression with a tension tie makes more efficient use of material than a beam in bending. To create masterpieces in unreinforced masonry, great builders of the past discovered stable geometry in compression. The vaults and floor systems displayed here demonstrate that compression geometry can be used to build with minimal steel and with relatively weak material. These structures can be visually exciting with lower cost, lower weight, and lower environmental impact than conventional concrete slabs.

▲ Ceramic Tile Vault

Builders have constructed thin tile vaults throughout the Mediterranean region for over 600 years. These vaults require minimal support from below during construction, making them economical to build. In this model, the doubly curved masonry shell carries loads efficiently in compression, and the horizontal thrust is resisted by steel tension ties. Stiffening ribs provide the required depth to carry concentrated loads and to ensure that the thin tiles remain in compression. This historical form serves as an inspiration for new designs in compression.

◀ Earthen Vault

The masonry materials of a well-designed compression shell do not require high strength because stresses are low. To design for resource constraints, local soil can be used to create stabilized, unfired earth bricks. The earthen shell displayed here can serve as a low-cost floor system with dramatically lower environmental impact, up to 90% less embodied CO^2 than conventional steel and concrete structures. Local masons can be trained in the production and construction of these systems, providing new economic livelihood as well.

Credits:
Salvador Gomis Aviñó, Salvador Tomás Márquez, Jonathan Dessi-Olive, Camilla Mileto, Fernando Vegas López-Manzanares, Javier Gómez Patrocinio, Benjamin Ibarra Sevilla, Fundación José Soriano Ramos, and John Ochsendorf

Oltre la Soletta di Calcestruzzo I

Un arco ed un tirante usati in combinazione sfruttano i materiali in maniera più efficiente rispetto ad una trave sottoposta a flessione. Grandi costruttori del passato trovarono nella compressione una geometria stabile che diede loro la possibilità di creare capolavori in muratura. Le volte e i solai qui esposti dimostrano che, sfruttando la geometria a compressione, è possibile costruire con materiali relativamente deboli e quasi senza l'uso dell'acciaio. Queste strutture, con un costo, un peso ed un impatto ambientale inferiori rispetto ai convenzionali solai di calcestruzzo, sono in grado di offrire risultati altrettanto interessanti.

▲ Volta in foglio

Da oltre 600 anni si costruiscono volte in foglio in tutta la regione Mediterranea. Questo tipo di volte si realizza quasi senza centine diminuendo notevolmente il costo della costruzione. In questo modello, il doppio guscio di mattoni sopporta in modo efficiente i carichi a compressione, mentre la spinta orizzontale è contrastata dai tiranti in acciaio. Le nervature di irrigidimento forniscono la resistenza necessaria per sopportare i carichi concentrati e per garantire che le sottili tavelle siano soggette solo a compressione. Questa soluzione storica serve ancor'oggi da ispirazione per nuovi progetti.

◀ Volta di Blocchi di Terra Compressa (BTC)

I materiali di una volta ben progettata soggetta a compressione non richiedono un'alta resistenza poiché le tensioni interne sono basse. Inoltre, quando si lavora con risorse ridotte, la terra locale può essere utilizzata per creare mattoni crudi di terra stabilizzata e la manodopera locale può essere formata per la produzione e costruzione di queste strutture, fornendo anche nuovo impulso all'occupazione. La volta di blocchi di terra compressa qui esposta può essere impiegata come sistema di orizzontamento a basso costo con un impatto ambientale notevolmente inferiore rispetto alle convenzionali strutture in calcestruzzo e acciaio (fino al 90% di emissini di CO^2 in meno).

Crediti:
Salvador Gomis Aviñó, Salvador Tomás Márquez, Jonathan Dessi-Olive, Camilla Mileto, Fernando Vegas López-Manzanares, Javier Gómez Patrocinio, Benjamin Ibarra Sevilla, Fundación José Soriano Ramos e John Ochsendorf

Beyond the Slab II

Inspired by historical tile vaults, contemporary fabrication methods move beyond masonry to create new design possibilities for ribbed vaults. Uninhibited by traditional fabrication constraints, novel structural form-finding and optimisation methods can result in more efficient geometry in compression. The compressive vaults thrust outward on the supports, which are stabilized by tension ties. As with their historical predecessors, such vaults demonstrate significant savings in weight and environmental impact compared to conventional concrete slabs.

▲ Concrete Shell Floor

This 2 cm-thick shell in unreinforced concrete follows the structural principles of the historical tile vault. Activating compressive shell action in the vault while externalising tension with ties can result in savings of over 70% of concrete compared to a typical floor slab in bending. The complex geometry requires an expensive, two-sided mould. However, this is cost effective for repeated units and multiple casts. Structural optimisation is combined with innovative concrete casting to create dramatic material savings in construction.

Credits:
David Pigram, Tomás Méndez Echenagucia, Andrew Liew, Nick Krouwel, Tom Van Mele, and Philippe Block

▶ 3D-Printed Floor

New possibilities in 3D printing enable the fabrication of complex structures and components at competitive cost. With well-designed compression shapes that have low stresses, the formal freedom offered by such exciting digital fabrication technologies can be fully exploited. Like Robert Maillart's pioneering three-hinged concrete bridges, this printed floor is discretised to control the compressive force flow for all loading cases. Such prefabricated components are opening new possibilities in the challenge to enclose space.

Credits:
Matthias Rippmann, Ursula Frick, Andrew Liew, Tom Van Mele, and Philippe Block

Oltre la Soletta di Calcestruzzo II

Partendo dalle volte storiche in foglio, grazie ai metodi contemporanei di produzione, è possibile superare l'uso della muratura per creare nuove occasioni progettuali per le volte. Liberati dai vincoli delle tecniche tradizionali, i nuovi metodi di ottimizzazione e ricerca formale possono condurre a geometrie più efficienti. In corrispondenza degli appoggi, le volte a compressione creano spinte verso l'esterno che vengono contrastate da tiranti. Ciononostante, come i loro predecessori storici, queste volte dimostrano una notevole leggerezza e allo stesso tempo un minor impatto ambientale rispetto alle convenzionali solette di calcestruzzo.

▲ Guscio in Calcestruzzo

Questo guscio di 2 cm di spessore di calcestruzzo non armato segue i principi strutturali della volta in foglio storica. Il comportamento a compressione del guscio e il trasferimento delle tensioni sui tiranti può tradursi in un risparmio di oltre il 70% di calcestruzzo usato rispetto ad un normale solaio. La realizzazione di questa complessa geometria richiede una doppia cassaforma che tuttavia, può essere efficiente nel caso di elementi ripetuti. L'ottimizzazione strutturale combinata con l'innovazione del getto di calcestruzzo permette ridurre drasticamente il materiale impiegato nella costruzione.

Crediti:
David Pigram, Tomás Méndez Echenagucia, Andrew Liew, Nick Krouwel, Tom Van Mele e Philippe Block

▶ Solaio stampato in 3D

Le innovazioni nella stampa 3D consentono la fabbricazione di strutture e componenti complessi a costi competitivi. Nel caso di forme ben progettate che lavorano a compressione con basse tensioni, la libertà formale offerta da tali tecnologie di fabbricazione digitali può essere pienamente sfruttata. Come i pionieristici ponti in calcestruzzo a tre cerniere di Robert Maillart, questo solaio stampato viene discretizzato per controllare il flusso delle tensioni in tutte le configurazioni di carico. Tali componenti prefabbricati stanno aprendo nuove possibilità di definizione dello spazio.

Crediti:
Matthias Rippmann, Ursula Frick, Andrew Liew e Philippe Block

Beyond the Dome

Graphic statics is a powerful approach for relating the geometry of a structure to the forces acting in the structure. Master builders have used this simple but powerful design methodology to discover structural form for over a century. Enhanced by computation, novel design approaches allow for geometrical exploration well beyond historical precedents. Even for highly constrained boundary conditions, infinite solutions are possible and new forms are waiting to be discovered.

Form and Force Diagrams

Thrust Network Analysis (TNA) extends graphic statics to 3D for contemporary design. Form and force diagrams provide explicit control over the geometry of a spatial network of compressive forces in equilibrium with a set of vertical loads (*top*). The form diagram (*middle)* defines the directions along which the horizontal thrust in the network can flow, and the lengths of the lines in the force diagram (*bottom*) represent the magnitude of those forces. Each of these solutions starts from a highly constrained problem: a compression-only form supported on a circular base. The form and force diagrams depicted here demonstrate the logical beauty of TNA-based form finding, going well beyond the classical dome.

Credits:
Matthias Rippmann, Robin Oval, Tomás Méndez Echenagucia, Tom Van Mele, and Philippe Block

Oltre la Cupola

La statica grafica rappresenta un metodo efficace per mettere in relazione la geometria di una struttura e le forze che agiscono su di stessa. Per oltre un secolo, i maestri costruttori hanno utilizzato questa metodologia di progettazione, semplice ma potente, per dar forma alle struttue. Potenziati dal calcolo, i nuovi approcci progettuali portano ad una ricerca geometrica che va ben oltre i precedenti storici. Anche nel caso di condizioni fortemente vincolanti, le possibili soluzioni sono infinite e nuove forme attendono solo di essere scoperte.

Diagrammi di Forma e delle Forze

Il Thrust Network Analysis (TNA), come strumento contemporaneo per la progettazione, applica la statica grafica alle tre dimensioni. I diagrammi di forma e delle forze forniscono controllo geometrico su di una rete spaziale di forze di compressione in equilibrio con una serie di carichi verticali (*in alto*). Il diagramma di forma (*al centro*) definisce le direzioni lungo le quali la spinta orizzontale si trasmette attraverso la rete, e le lunghezze delle linee del diagramma delle forze (*in basso*) rappresentano l'entità di tali forze. Ogni possibile soluzione parte da un'ipotesi fortemente vincolata: trovare una forma che lavori solo a compressione e che sia appoggi su una base circolare. I diagrammi di forma e delle forze qui riprodotti mostrano la bellezza logica della ricerca di una forma derivata direttamente dall'applicazione del TNA che vada ben oltre la cupola classica.

Crediti:
Matthias Rippmann, Robin Oval, Tomás Méndez Echenagucia, Tom Van Mele e Philippe Block

Beyond Freeform

Like the spectacular Gothic vaults, the cut stone vault at the centre of this exhibition is stable because of its geometry. This piece is not a romantic attempt to revive the Gothic, but rather a direct critique of freeform architecture. Standing without steel reinforcement, the expressively flowing surface highlights the misconception that complex geometry need go hand-in-hand with inefficient use of material. It demonstrates creative possibilities within very tight design constraints.

The Armadillo Vault

The Armadillo Vault embodies the beauty of compression made possible through geometry. Its shape comes from the same structural and constructional principles as the stone cathedrals of the past, enhanced and extended by computation and digital fabrication. Comprised of 399 individually cut limestone voussoirs, unreinforced and without mortar, the vault spans 16 m with a minimum thickness of only 5 cm. The tension ties equilibrate the form, and its funicular geometry allows it to stand in pure compression.

This sophisticated form emerged from the computational, graphic-statics based design and optimisation methods developed by the team. The engineering of the discrete shell also used innovative computational approaches to assess stability. Each stone is informed by structural logic, by the need for precise fabrication and assembly, by the hard constraints of a historically protected setting, as well as by tight limitations on time, budget, and construction. To simplify the fabrication process and avoid the need to flip the stones during cutting, the voussoirs are planar and smooth on the exterior. Their interior sides are marked by a series of grooves resulting from initial rough cutting. Rather than mill these surfaces away, they remain as an expressive feature, aligned with purpose to serve as visual reminders of the force flow.

After its initial fabrication and assembly in Texas, the vault was disassembled and shipped to Venice, where it was reassembled on site in just two weeks. Like an intricate 3D puzzle, it can be deconstructed and built again at future locations.

The Armadillo Vault represents the close collaboration of engineers, designers, and skilled masons throughout the entire process. It is the culmination of more than 10 years of research in stone structure.

Credits:
Block Research Group, ETH Zurich - Philippe Block, Tom Van Mele, Matthias Rippmann, Edyta Augustynowicz, Cristián Calvo Barentin, Tomás Méndez Echenagucia, Mariana Popescu, Andrew Liew, Anna Maragkoudaki, Ursula Frick

Ochsendorf DeJong & Block - John Ochsendorf, Matthew DeJong, Philippe Block, Anjali Mehrotra

The Escobedo Group - David Escobedo, Matthew Escobedo, Salvador Crisanto, John Curry, Francisco Tovar Yebra, Joyce I-Chin Chen, Adam Bath, Hector Betancourt, Luis Rivera, Antonio Rivera, Carlos Rivera, Carlos Zuniga Rivera, Samuel Rivera, Jairo Rivera, Humberto Rivera, Jesus Rosales, Dario Rivera

Oltre la Forma Libera

Come le spettacolari volte gotiche, la volta in pietra che si trova al centro di quest'installazione deve la sua stabilità alla sua geometria. Questa struttura non è un romantico tentativo di far rivivere il gotico, ma piuttosto una critica diretta all'architettura della forma libera. Reggendosi senza alcun rinforzo in acciaio, questa espressiva superficie continua evidenza l'errore nel mettere in relazione la geometria complessa con l'uso inefficiente dei materiali. Essa dimostra invece le possibilità creative che esistono all'interno di vincoli progettuali molto stretti.

Armadillo

La volta Armadillo incarna la bellezza della compressione materializzata attraverso la geometria. La sua forma si basa sugli stessi principi strutturali e costruttivi delle cattedrali di pietra del passato, modificati e potenziati dal calcolo e dalla produzione digitale. Composta da 399 conci di pietra calcarea tagliati singolarmente, senza rinforzi e senza malta, la volta si estende per 16 m con uno spessore minimo di soli 5 cm. I tiranti mantengono la forma in equilibrio, e la geometria funicolare permette di leggere la pura forza di compressione.

Questa forma sofisticata emerge dall'applicazione dei metodi computazionali di progettazione basati sulla statica grafica e di ottimizzazione sviluppati dal gruppo. Nel metodo di analisi del guscio discretizzato si sono anche usati approcci computazionali innovativi per valutarne la stabilità. Ogni pietra deriva la sua forma dalla logica strutturale, dalla necessità di una fabbricazione e assemblaggio precisi, dai vincoli di un contesto storico protetto, nonché da precise limitazioni relative a tempo, budget, e organizzazione della costruzione. Per semplificare il processo di produzione ed evitare la necessità di capovolgere le pietre durante il taglio, i conci sono piatti e lisci all'esterno mentre le loro facce interne sono caratterizzate da una serie di scanalature risultanti dalla sgrossatura iniziale. Invece di levigare queste superfici, esse vengono mantenute scabre come caratteristica espressiva con l'intenzione di manifestare visivamente il flusso delle forze di compressione.

Dopo la sua produzione iniziale e un primo assemblaggio realizzato in Texas, la volta è stata smontata per essere spedita a Venezia, dove è stata rimontata sul posto in appena due settimane. Come un complesso puzzle 3D, essa può essere smontata e rimontata nel futuro in altri luoghi.

La volta Armadillo, essendo il culmine di oltre 10 anni di ricerca nel campo delle strutture in pietra, rappresenta la stretta collaborazione di ingegneri, designer e muratori qualificati durante l'intero processo progettuale e costruttivo.

Crediti:
Block Research Group, ETH Zurich - Philippe Block, Tom Van Mele, Matthias Rippmann, Edyta Augustynowicz, Cristián Calvo Barentin, Tomás Méndez Echenagucia, Mariana Popescu, Andrew Liew, Anna Maragkoudaki, Ursula Frick

Ochsendorf DeJong & Block - John Ochsendorf, Matthew DeJong, Philippe Block, Anjali Mehrotra

The Escobedo Group - David Escobedo, Matthew Escobedo, Salvador Crisanto, John Curry, Francisco Tovar Yebra, Joyce I-Chin Chen, Adam Bath, Hector Betancourt, Luis Rivera, Antonio Rivera, Carlos Rivera, Carlos Zuniga Rivera, Samuel Rivera, Jairo Rivera, Humberto Rivera, Jesus Rosales, Dario Rivera