

## OGGETTO-CAMPO

Uno studio multi-risoluzione sull'ottimizzazione topologica

## OBJECT-FIELD

The multi-resolution study of topological optimization

Samuel Bernier-Lavigne

### ABSTRACT

Con l'integrazione degli strumenti digitali nella progettazione architettonica, si può osservare una certa ridefinizione della nozione di 'struttura', lontana da schemi noti e generalmente studiati. Seguendo i progressi nei campi della simulazione e dell'ottimizzazione topologica, si esporranno alcuni progetti-chiave studiando il loro livello prestazionale e delineando nella logica formale definita da questo processo il loro limite comune. Si ritiene che una possibile soluzione a questo limite risieda nel cambiamento di scala nel metodo di progettazione, adottando sistemi a multi-risoluzione, in cui ogni granello di materia può adattarsi alle informazioni strutturali presenti alla macro scala. In considerazione di ciò, si propone un progetto di ricerca progettuale che esplora questo salto di scala attraverso quattro oggetti-campo, ossia oggetti che sono formalmente autonomi, ma che tuttavia esprimono il loro campo strutturale interno attraverso una trasposizione a scala microscopica dell'ottimizzazione topologica.

Since the integration of digital tools into architectural design, we have observed a certain reassessment of the notion of 'structure', taking us far from known and usually studied schemes. Following the advancement in simulation and topological optimization, we will expose the key projects, study their level of performance, but also underline a common limit: their formal logic defined by this process. We believe that a solution to this limit lies in a change of scale in the design method, with multi-resolution systems, where each grain of matter can adapt to the structural information present at the macro scale. Thus, we propose a design research project exploring this game of scale through four object-fields, objects which are formally autonomous, but nevertheless express their internal structural field with microscopic translation of topological optimization.

### KEYWORDS

oggetto-campo, multi-risoluzione, ottimizzazione topologica, progettazione algoritmica, fabbricazione digitale

object-field, multi-resolution, topological optimization, algorithmic design, digital fabrication

**Samuel Bernier-Lavigne**, PhD, is a Full Professor at Laval University's School of Architecture in Québec (Canada), and Founder of the FabLab-ÉAUL. He holds a Doctorate in Architecture (theory, design and digital fabrication), in addition to being a recipient of the Henry Adams Medal of Honor (AIA), the RAIC Student Medal. He has notably worked for Studio Cmmnwlth, Gramazio & Kohler (ETH), and UNStudio. E-mail: samuel.bernier-lavigne@arc.ulaval.ca

Prendiamo atto dell'evolversi di alcune nozioni fondamentali dovute allo sviluppo tecnologico. I concetti di materia e materialità, che assolvono in architettura principalmente la funzione strutturale, sono tra quelli che sono destinati a cambiare, sia dal punto di vista formale sia nei loro aspetti di fabbricazione. Come rilevato da Antoine Picon (2018), la materialità dipende dagli utensili, dagli strumenti e dalle macchine che utilizziamo, tutti elementi fondamentali per determinare l'approccio alla scienza, alla filosofia e all'architettura. Adesso questi utensili, questi strumenti e queste macchine sono digitali e ci permettono di esplorare forme e strutture inedite, determinando anche una nuova comprensione dei fenomeni fisici che li caratterizzano. Invece di allontanare l'architettura dal mondo materiale, come molti avevano erroneamente predetto, la tecnologia digitale ha catalizzato una fase di transizione dalle tipologie strutturali, intese come modelli usuali già utilizzati dagli architetti, alle topologie strutturali, nuovi modelli che si sono rivelati improvvisamente più fluidi e complessi dei precedenti.<sup>1</sup>

La libertà di progettazione così riconquistata è favorita da strumenti matematici razionali che sono in grado di creare simulazioni basate sull'unione di informazioni formali, materiali e strutturali. In particolare, i metodi di analisi sugli elementi finiti (FEM) sono in grado di calcolare con precisione la distribuzione dei carichi all'interno di una forma, facilitando il controllo di questi dati durante la fase di progettazione, ma soprattutto, ci consentono di pensare la struttura nel suo complesso, piuttosto che come un insieme separato di elementi. L'ingegnere giapponese Mutsuro Sasaki (2007) svilupperà la teoria della 'morphogenesis of flux structures', dimostrando il suo metodo attraverso la realizzazione di alcuni dei più importanti progetti contemporanei giapponesi, come la struttura autoportante a guscio di calcestruzzo del Teshima Art Museum di Ryue Nishizawa (Vv. Aa., 2017) e il Crematorio Meiso no Mori di Toyo Ito (et alii, 2009), progetto nel quale è possibile notare gli effetti che la distribuzione continua delle forze ha nel determinare la superficie ondulata della copertura con l'obiettivo di renderla stabile e di minimizzare le sollecitazioni strutturali (Fig. 1). Stesso approccio è quello dell'ingegnere Cecil Balmond (2007), le cui 'informal structures' consentono l'esplorazione di nuovi spazi architettonici, come nel caso della Arnhem Station Transfer Hall di UNStudio dove un'unica superficie strutturale complessa è in grado di connettere la copertura, i supporti verticali, le pareti, i collegamenti e gli orizzontamenti tra i diversi livelli.

**Ottimizzazione Topologica** | L'evoluzione del concetto di struttura come 'flusso', databile al primo decennio dell'attuale secolo, ha portato a una nuova lettura della distribuzione delle sollecitazioni strutturali, assumendo queste ultime come fattore capace di generare risultati ancora più prestazionali. Prendendo ispirazione da alcuni processi morfogenetici naturali come le trabecole ossee, è stato messo a punto uno strumento in grado di eliminare gradualmente tutta la materia non strutturale, analizzando iterativamente il flusso di forze interno

alla struttura presa in esame (Bendsøe and Sigmund, 2003)<sup>2</sup>. Tecnicamente, il processo di ottimizzazione topologica inizia con la definizione di un volume o di una superficie da ottimizzare, ossia il suo campo d'azione. Viene quindi suddiviso in elementi discreti con caratteristiche materiali predefinite, su cui viene eseguita un'analisi degli elementi finiti in sequenze cicliche (loop): l'obiettivo è far convergere la distribuzione del materiale in percorsi ottimali (optimal paths) all'interno di un dato dominio, in modo da concentrare la materia solo dove necessario e rimuovere qualsiasi parte non essenziale per la stabilità strutturale dell'insieme (Cazacu and Grama, 2014). È possibile inter-

pretare questo processo come la simulazione digitale di un sistema materico dinamico che cerca di trovare il proprio equilibrio formale a ogni costo, usando alla fine la minore energia possibile per poter esistere.

A primo acchito è evidente una diretta correlazione con il settore della progettazione per la complessità geometrica risultante dall'ottimizzazione topologica, ma anche per i numerosi vincoli di produzione con cui si deve confrontare<sup>3</sup>. Se nel campo dell'industrial design diversi sono i progetti che mirano a ottimizzare la struttura – basti pensare alla Bone Chair di Joris Laarman (2017) oppure ai telai delle automobili – a livello architettonico rari sono i casi in

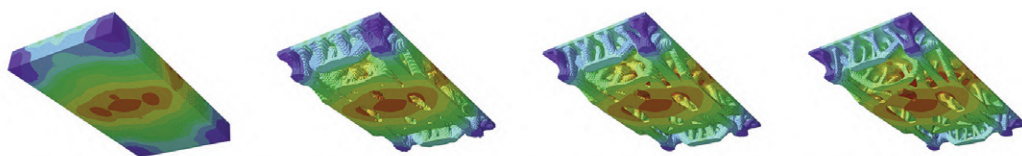


Fig. 1 | Toyo Ito and Mutsuro Sasaki, 'Meiso no Mori Crematorium', Kakamigahara 2006 (credit: L. Smith, 2016).

Fig. 2 | Benjamin Dillenburger, topology optimization for a concrete slab, ETH Zurich 2016 (credit: B. Dillenburger, 2016).

cui tale processo generativo che potrebbe effettivamente determinare importanti cambiamenti sia nella progettazione sia nella costruzione, è stato applicato. Il più noto è il Qatar National Convention Center di Arata Isosaki: il Centro si caratterizza per la presenza di una struttura che, come un albero, emerge dal terreno e si dirama per sostenere la maestosa copertura (Sasaki, 2007). Nonostante le dimensioni dell'edificio, la struttura non rivela praticamente alcun processo di post-ottimizzazione o di razionalizzazione, rendendo la sua costruzione una sfida senza precedenti.

Un altro caso di grande interesse per il mondo della ricerca architettonica è rappresentato dal Topology Optimization for a Concrete Slab, presso il Politecnico di Zurigo, progettato dal Prof. Benjamin Dillenburger e dal suo team. Con l'obiettivo di ridurre il consumo di calcestruzzo nel settore delle costruzioni, partendo da un solaio standard, il team ne ha ottimizzato la topologia, eliminando il 70% della materia non necessaria e massimizzandone al contempo le prestazioni strutturali (Jipa et alii, 2016; Fig. 2). Tuttavia, la complessità geometrica del progetto ha richiesto, per la sua realizzazione, un sistema di casseforme di sabbia stampate in 3D con la tecnologia VoxelJet; con lo stesso sistema, il team ha sviluppato anche il suo ultimo progetto, lo Smart Slab, realizzato durante la costruzione della DFAB House di Zurigo (Aghaei-Meibodi et alii, 2017).

Nonostante il carattere d'innovazione promosso da ciascuno dei progetti descritti e i differenti approcci all'ottimizzazione topologica, è possibile comunque individuarne un limite: i risultati geometrici sono tutti simili. Una spiegazione è rintracciabile nel processo di materializzazione dei flussi alla base di questa procedura algoritmica: se tutto il materiale strutturalmente sottoutilizzato viene eliminato, tutto ciò che rimane è una rete fluida e interconnessa di distribuzione dei carichi, dai punti di applicazione fino ai supporti. Nell'insieme, tutti i progetti rappresentano un'evoluzione di quella 'architettura strutturale' che trova la massima espressione negli anni '50 e '60 con il lavoro di Emmerich, Le Ricolais, Wachsmann e Fuller (Wigley, 2001); a differenza di allora, per facilitare la distribuzione multidirezionale dei carichi, ora i nodi strutturali vengono 'levigati' attraverso operazioni di 'smoothing', seguendo una regola simile alle condizioni del Plateau (Thompson, 2009) e ricordando alcune strutture naturali che molto hanno affascinato questi architetti. Ora, come possiamo aggirare i vincoli formali inerenti l'ottimizzazione topologica, in modo che diventi uno strumento di progettazione aperto, anziché avere come finalità solo ciò che è prodotto da questo processo? Quali potrebbero essere le qualità spaziali, materiali e visive legate all'ottimizzazione topologica, se allargassimo lo spettro della riflessione?

**Progetto** | Il presente contributo illustra un progetto di ricerca che tenta di 'aggirare' i limiti discussi. Per fare ciò, occorre considerare il risultato dell'ottimizzazione topologica come un diagramma capace di guidare, in modo creativo, un progetto concettuale (Teyssot, 2012). Il punto di partenza in questo nuovo campo da

esplorare si basa sul concetto del 'cambio di scala', sia nei processi di progettazione sia di materializzazione. Per ambire a un rinnovamento concettuale, in una prima fase di lavoro occorre considerare il progetto come un tutto, un oggetto, concentrandosi quindi sull'ideazione. L'oggetto è considerato come autonomo e libero da tutti i vincoli abituali, e concepito come spazio finito, come elemento materiale e come 'dispositivo affettivo'; al contempo, la scala ridotta facilita la sua fabbricazione e aiuta a validare rapidamente le qualità dell'oggetto finale. Questo approccio diventa effettivamente interessante quando si confronta l'oggetto isolato con i flussi di forze che lo attraversano, i quali diventano tutto d'un tratto il suo unico campo vettoriale, l'espressione completa del suo 'milieu energetico' (von Uexkull, 2010). Questo approccio fa parte di un più ampio quadro teorico, descritto in dettaglio in un precedente articolo, che traccia l'interazione tra due componenti elementari nella breve storia dell'architettura digitale: l'oggetto e il campo (Bernier-Lavigne, 2020).

**Interazione tra oggetto e campo** | Agli albori dell'architettura digitale, diversi approcci concettuali al progetto hanno portato allo sviluppo di un 'campo energetico' (composto da forze che si attraggono e si respingono, reali o concettuali) con l'obiettivo di ricercare condizioni statiche lontane dal normale equilibrio (ossia lontane dalle pratiche consolidate) attraverso un approccio del tipo bottom-up. Nella maggior parte dei casi, il risultato architettonico è stato meno importante della complessità del suo processo generativo (Teyssot and Bernier-Lavigne, 2011). Possiamo facilmente individuare analogie con l'ottimizzazione topologica, considerando che, nonostante il suo funzionamento e i suoi parametri siano piuttosto definiti, l'esito formale è in qualche modo al di fuori del nostro controllo. Successivamente, con l'ascesa del 'parametrico' – inteso sia come strumento sia come 'architettura parametrica' – i progettisti digitali hanno potuto avere un migliore controllo sul processo, restringendone in una certa misura la gamma di possibilità.

Il risultato di questa prima evoluzione concettuale è il 'campo degli oggetti', concetto basato sul fatto che la moltiplicazione di un componente in grado di adattarsi alle variazioni del campo mediante graduale differenziazione crea una molteplicità di oggetti simili e leggermente diversi. Rispetto a questa visione, la reazione di molti architetti è stata quella di disconnettere l'oggetto dal campo (Gage, 2015) e iniziare a esaminare le sue qualità nascoste (Harman, 2013), quelle che, secondo Micheal Benedikt e Kory Bieg (2018), «[...] do[es] not disclose [...] fully to each other [but] exist regardless of human regards» (Benedikt and Bieg, 2018, p. 8).

Alla luce di tutto ciò, la ricerca di seguito illustrata propone di esplorare un nuovo, e probabilmente definitivo, legame tra l'oggetto e il campo – l'oggetto-campo – poiché sembra che queste due entità abbiano ancora alcune cose da offrirsi l'un l'altro e potrebbero ancora una volta stimolare la riflessione su possibili scenari architettonici. Questo concetto di campo-ogget-

to consente infatti maggiore autonomia formale nella definizione dell'oggetto, sfruttando la complessità e la variabilità del campo, ma questa volta limitandolo all'interno dell'oggetto iniziale al fine di influenzare principalmente la sua materialità. Nel nostro caso il campo sarà composto dalle linee di forza risultanti dall'ottimizzazione topologica dell'oggetto progettato.

**Risoluzione** | Sviluppando ulteriormente il discorso, la connessione tra oggetto e campo può anche essere vista come una relazione tra versioni a diversa risoluzione della stessa entità. Il primo è un elemento a bassa risoluzione, un semplice contenitore debolmente definito; l'altro è un sistema dinamico altamente differenziato che contiene una notevole quantità di informazioni. Questa lettura degli elementi è accentuata dall'ambiente digitale in cui sono creati e, come indica Mario Carpo (2014), dagli strumenti che utilizziamo poiché inevitabilmente gli stessi si riflettono su ciò che produciamo. I modelli digitali con cui lavoriamo hanno una risoluzione al di sotto della nostra soglia di percezione (Young, 2018) – il 'minimum separabile' dell'occhio umano – ma sono ora in grado di gestire una quantità notevole di dati. Di conseguenza, sempre più dati possono essere archiviati in contenitori sempre più piccoli – o in oggetti come in questo caso – rendendo decisamente più interessante affrontare il tema dell'alta risoluzione.

Mentre un progetto a bassa risoluzione resta alla macro o alla mesoscala, a seconda della natura del progetto, l'idea di alta risoluzione ci proietta nella micro o, addirittura, nella nanoscala (Nakamura, 2010). E così ci si ritrova davanti a nuovo territorio da esplorare, in cui possibilità e complessità si moltiplicano, e dove ogni granello di materia, ogni mattone elementare alla scala del micron, diventa improvvisamente accessibile all'architetto (Carpo, 2016). La consueta gerarchia tra le diverse scale del progetto lascia il posto a una metodologia di progettazione più flessibile, in grado di integrare scale variabili e parallele, in cui i minimi dettagli rafforzano il tutto e viceversa. In questa dimensione minima, il confine tra forma e materia diventa sfocato (Beckett and Babu, 2014), sebbene sia importante notare che la transizione da un oggetto digitale al suo equivalente fisico porta inevitabilmente a una riduzione della risoluzione.

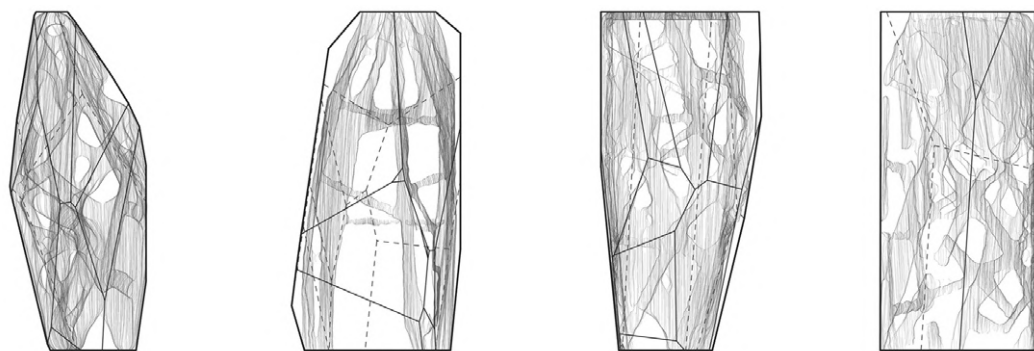
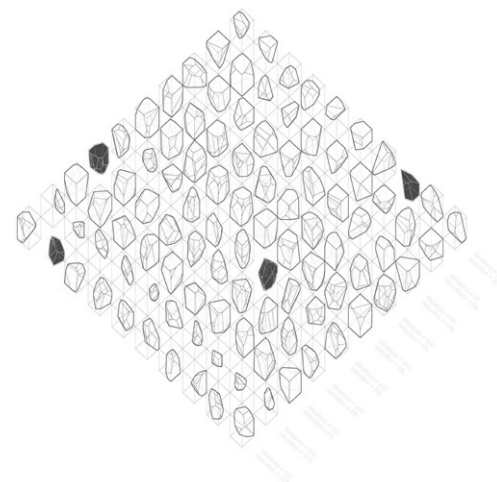
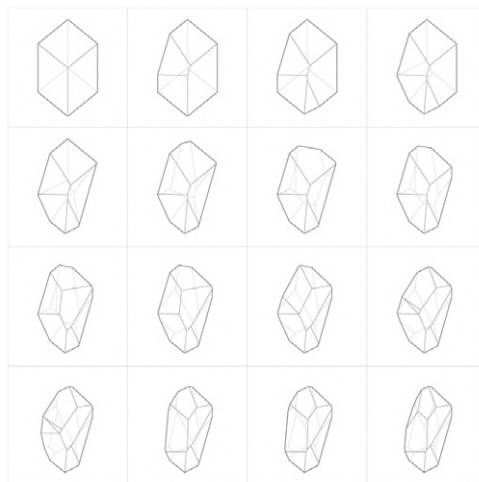
Tutte queste alterazioni nella scala d'intervento influenzano necessariamente il modo in cui analizziamo i progetti. Se, a un primo sguardo, agli aspetti più superficiali delle cose rivelano alcune informazioni, come i contorni facilmente comprensibili dell'oggetto, molto può ancora sfuggire alla nostra comprensione restando a questo livello di osservazione. È necessario decodificare il resto, strato per strato, cambiando pertanto la nostra scala di analisi e modificando l'angolo d'osservazione, per svelare infine il mistero degli altri livelli organizzativi del campo. Ovviamente, l'architettura non è la prima disciplina che affronta gli effetti della risoluzione multipla, come dimostrano le ricerche nel campo della Fisica nel Novecento. I fisici hanno infatti dimostrato che lo stesso fenomeno o oggetto può rivelare due aspetti completa-

mente diversi a seconda della scala di analisi e delle teorie ad esso associate: alla scala medio-grande con la meccanica classica, e alla micro-scala con la meccanica quantistica (Kumar, 2013). Comunque, ciò che è certo è che la validità di questi modelli di analisi è relativa alla scala di applicazione (Bontems, 2008).

Tuttavia, scopriremo che, per poter materializzarsi, il campo utilizzerà diversi sistemi di trasposizione dando corpo al contempo all'oggetto. Questi sistemi potrebbero essere confrontati con un dispositivo di amplificazione, ossia con uno strumento che consente la comunicazione di microelementi con scale di osservazione più grandi (Simondon, 2012). La reale comprensione di questi sistemi dovrà però passare attraverso un'analisi rigorosa: innanzitutto, partendo dalla macroscale, l'insieme dovrà mostrare la direzionalità delle linee di forza; successivamente, passando alla mesoscale, dovrà essere messa in luce la logica di assemblaggio locale, ponendo attenzione a che l'abbondanza di informazioni digitali, all'apparenza disordinate, non provochi una sensazione di straniamento (Young and Young & Ayata, 2015); infine, alla microscala, si potrà passare a osservare in dettaglio i componenti di base che appariranno però frammentati e astratti. Questa logica risponde all'idea di 'ordine di grandezza' del filosofo Gilbert Simondon, che suddivide un problema in diverse realtà mediate dall'osservatore grazie a uno strumento (Hui, 2016), individuato nel nostro caso in un algoritmo che ci permette di realizzare un sistema di traduzione tra le diverse scale.

Pertanto, l'idea non è quella di limitarci a un solo aspetto di queste diverse risoluzioni ignorando le altre, obbligandoci a scegliere tra l'alta o la bassa risoluzione, ma piuttosto di sfruttare l'intero spettro secondo la logica dei frattali. È attraverso queste variazioni di scala, il salto inatteso dal nulla al nulla, in cui realizziamo che qualcosa sta effettivamente accadendo e dunque prestiamo attenzione (Gage and Meredith, 2019). Ciò è esattamente quanto si illustrerà nei quattro 'oggetti-campo' che seguono, dove l'accesso a nuove scale di progettazione potrebbe forse rinnovare la nostra comprensione della realtà architettonica.

**Oggetti-campo** | La ricerca progettuale sull'oggetto-campo mira a esplorare i tratti caratteristici di un processo di ottimizzazione topologica ad alta risoluzione vincolato però in un volume predefinito di risoluzione inferiore. Da qui una riflessione sull'oggetto base, quello che infine ospiterà il campo. Per garantire una certa coerenza nella generazione dell'oggetto base, il suo design parte da un volume di 150 x 150 x 300 mm su cui viene eseguito lo stesso tipo di operazione, ossia una differenza booleana definita da due parametri iniziali e con diverse iterazioni possibili. Tale operazione determina la percentuale massima del volume di ciascuna sottrazione e il numero d'iterazioni da eseguire. Man mano che le operazioni booleane vengono generate casualmente, emergono una serie di monoliti finemente tagliati, con caratteristiche simili sebbene formalmente diversi (Fig. 3). Secondo Marie-Ange Brayer (et alii, 2010), l'aspetto interessante dell'oggetto come monolite



**Fig. 3-5** | Monolithic objects: algorithmic process with random Boolean operations; classification and selection; 3d print of the four selected objects (credits: S. Bernier-Lavigne, 2020).

**Fig. 6** | Structural flow extracted from the topological optimization of the objects (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).

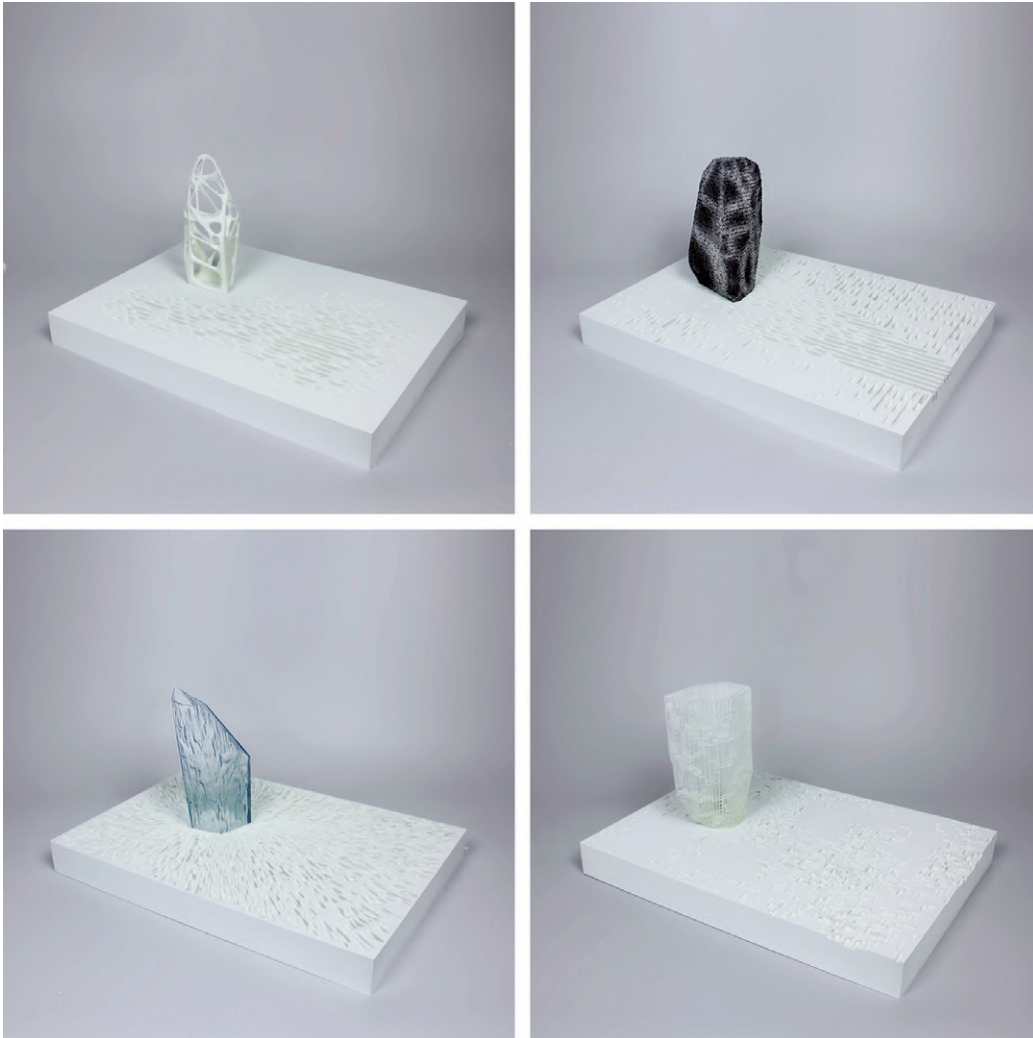


Fig. 7 | The four object-fields (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).

è che ne rinnega i presupposti legati all'estetica e al formalismo ma allo stesso tempo è inteso come uno spazio privilegiato per la sperimentazione architettonica. Quattro di questi oggetti sono stati selezionati in base alle qualità mostrate e al loro potenziale progettuale e sono stati analizzati per l'ottimizzazione topologica (Figg. 4, 5). In sostanza è necessario estrarre i loro campi interni, l'effetto delle forze esterne sul volume fino ai supporti, e comprendere l'influenza che la geometria dell'oggetto ha su questo processo (Fig. 6). Da questo momento in poi vengono sviluppati quattro sistemi ad alta risoluzione per trasformare i monoliti e i loro flussi strutturali in oggetti-campo.

Il primo sistema rappresenta una sorta di introduzione all'intero progetto, materializzando in modo quasi identico il risultato dell'ottimizzazione. Troviamo, naturalmente, come output tipico di questo processo una mesh fluida, che ci fornisce la chiave di volta per la comprensione degli altri tre oggetti-campo. Inoltre, l'output esprime anche la qualità spaziale della mesh che si evolve nel corpo dell'oggetto. In alcuni punti si può percepire ciò che resta dei limiti spigolosi del volume iniziale, mentre in altre zone i contorni sembrano svanire completamente. È possibile notare anche la differente distribuzione del materiale: gli elementi strutturali più vicini alla base si inspessiscono per stabilizzare

gli oggetti-campo, mentre quelli a quota superiore diventano quasi delle semplici linee. Il caratteristico aspetto dell'oggetto ad alta risoluzione si rivela quando si tocca l'oggetto stampato, dove una trama sottile quasi invisibile a occhio nudo, ma percepibile al tatto, rivela l'altro tema progettuale (Figg. 7, 8).

Il secondo oggetto-campo esprime i flussi strutturali come una fonte di informazioni per definire la superficie esterna del monolite. Questa volta, il sistema ad alta risoluzione diventa essenziale nella definizione del progetto, in cui un algoritmo decompone il volume totale in un cluster di voxel da 1 mm, ossia in una sorta di pixel tridimensionali. Quindi, questa raccolta di voxel è informata dai flussi dell'ottimizzazione topologica, estrudendo i voxel secondo le normali del volume iniziale. Ciò permette di irrigidire la struttura dove è necessario, aumentando in queste aree la quantità di materia. Sull'oggetto viene poi generata una topografia pixelata e, per amplificare queste sottili variazioni, vengono assegnate sfumature di grigio ai voxel in base alla loro vicinanza al campo sottostante. Ne consegue un rumore visivo altamente differenziato che sembra quasi casuale se osservato da vicino ma che risulta essere altamente indicativo nel suo insieme. Un processo di stampa 3D composto da polvere di gesso, legante e inchiostro produce l'oggetto, in cui ogni

voxel ottiene la propria colorazione (Figg. 7, 9).

Il terzo oggetto-campo mira a una completa integrazione dei flussi strutturali attraverso la creazione di un monolite trasparente, semplice all'esterno ma estremamente dettagliato all'interno. Poiché l'interno dell'oggetto è vuoto, l'ottimizzazione topologica è intrinsecamente incorporata nel suo involucro, come se queste informazioni si fossero gradualmente dissolte durante il processo di progettazione e poi fossero riapparse durante la sua materializzazione. A questo punto un algoritmo di spostamento dei vertici viene utilizzato per ispessire parti delle pareti interne del monolite, conferendogli una trama che, seguendo la direzione delle forze, risulti finemente increspata ma fluida al tempo stesso. Realizzato attraverso stampa 3D in resina ultra trasparente con strati di 15 micron, questo oggetto-campo appare come un'entità ottenuta attraverso un processo di crescita piuttosto che di fabbricazione, dal quale prende corpo un intenso ma delicato dialogo tra la spigolosità dei bordi del profilo esterno del monolite e la sottile variazione della superficie interna, che porta ad affascinanti effetti ottici se osservati da vicino o attraverso la luce naturale (Figg. 7, 10).

Con il quarto e ultimo oggetto-campo sia i dati formali del monolite iniziale che i flussi strutturali vengono decomposti, in modo da sfumare completamente i confini tra oggetto e campo, attraverso il principio dell'assemblaggio mereologico (Bryant, 2011) di semplici elementi lineari i quali, nonostante misurino solo pochi micron, riescono a sviluppare una stretta relazione con il tutto. La procedura algoritmica divide la forma iniziale in una serie di sottili elementi verticali ed estrae lo strato esterno dell'oggetto; contemporaneamente un ciclo iterativo viene eseguito diverse migliaia di volte per organizzare gradualmente i microelementi orizzontali secondo i dati di ottimizzazione, mentre il tutto lentamente si solidifica. Il risultato mostra un oggetto-campo con un certo livello di elasticità, principalmente nelle sue aree meno stressate strutturalmente. La sua materializzazione in resina traslucida, che restituisce un gioco costante di pieni e vuoti a seconda dell'angolo e della scala di osservazione, diventa in qualche modo immateriale, simile ad alcune formazioni nuvolose oniriche (Damisch, 1972; Figg. 7, 11).

Ognuno di questi quattro oggetti-campo poggia su una base, un pesante blocco che controbilancia idealmente la leggerezza dell'oggetto posto su di esso. Sebbene completamente bianco come fosse un volume astratto, la sua superficie superiore è fresata per esprimere l'intensità del campo che agisce sull'oggetto, reinterpretando, a un'altra risoluzione, il sistema di traduzione utilizzato. D'altra parte, questa nozione di multi-risoluzione ha grandi ripercussioni quando arriva il momento di rappresentare il progetto (Allen and Caspar Pearson, 2016). Abbiamo deliberatamente limitato la nostra indagine ai disegni al tratto al fine di esplorare la flessibilità di questo mezzo e capire se questo sistema di rappresentazione potesse essere utilizzato. Al di là delle tecniche di base, sebbene sempre importanti, per ogni oggetto-campo viene sviluppata una procedura algoritmica, derivante dalle pe-

cularità della sua complessa geometria (Fig. 12).

La sovrapposizione delle 'contour lines' in più direzioni crea una tensione tra la trama di linee e lo 'shader' superficiale nella rappresentazione del primo oggetto-campo. Una tecnica simile viene utilizzata anche nel disegno delle basi. Per il secondo oggetto-campo, ogni voxel viene scomposto verticalmente in un numero variabile di livelli, in base all'intensità del suo colore, al fine di ricreare artificialmente il gradiente. Ancora una volta, la vicinanza con cui analizziamo il disegno ci fa percepire informazioni diverse. Da lontano, si potrebbe facilmente confondere il disegno con un rendering generato da un computer poiché la sovrapposizione di linee le rende indistinte, ma da vicino si riscontra tutta la ricchezza dell'alta risoluzione attraverso la leggibilità di un numero quasi infinito di segmenti verticali (Fig. 13).

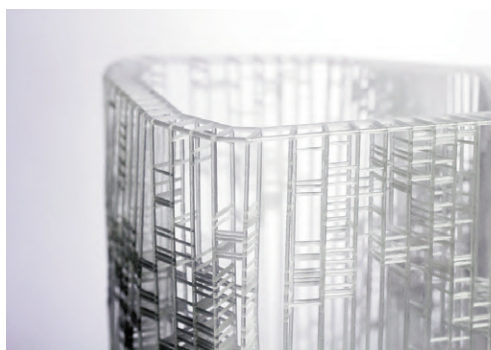
Per il terzo e il quarto oggetto-campo, l'obiettivo è quello di rappresentarne la trasparenza usando solo punti e linee; a tale scopo viene generata una nuvola di punti estremamente densa racchiusa in una serie di linee nette che segnano i contorni esterni dell'oggetto (Figg. 14, 15). Per l'ultimo, giocare con il grado di opacità delle linee mette in evidenza il flusso di forze che abitano l'oggetto. Tutto sommato, l'uso di disegni al tratto e le relative esplorazioni algoritmiche consentono l'espressione libera e specifica per ogni oggetto-campo, catalizzando una certa coerenza nella ricerca progettuale in cui le somiglianze iniziano a dialogare nonostante siano separate da molteplici materialità.

**Conclusioni** | La ricerca presentata dimostra l'importanza di affrontare i problemi di definizione della risoluzione e della scala nella progettazione architettonica e in ambito teorico. Isolando uno degli elementi, ad esempio i flussi strutturali espressi dal processo di ottimizzazione topologica, e sviluppandolo in diversi modi con sistemi ad alta risoluzione, è possibile acquisire una migliore comprensione del loro specifico potenziale attraverso una serie di aspetti certamente non trascurabili: la tattilità del materiale stampato, la rappresentazione grafica tridimensionale del comportamento fisico all'interno dell'oggetto, la tensione generata tra opacità e trasparenza, la sottile dematerializzazione della struttura e, oltre a tutto ciò, l'opportunità di ripensare la rappresentazione del progetto.

Il prossimo passo sarà convertire questo metodo per l'architettura, superando la sperimentazione su casi isolati e considerando tutti i vincoli che entrano nel processo di progettazione. Con l'aumentare della dimensione del progetto, le scale intermedie si moltiplicheranno sicuramente, rendendo necessario allargare la tema scalare micro/meso/macro a ulteriori livelli di scale intermedie. Sarà necessario implementare la multi-risoluzione in modo da creare una vera complessità su scala variabile, attraverso l'eterogeneo intreccio di differenti livelli di informazioni.

---

It is normal to see certain fundamental notions evolve as a result of technological development.

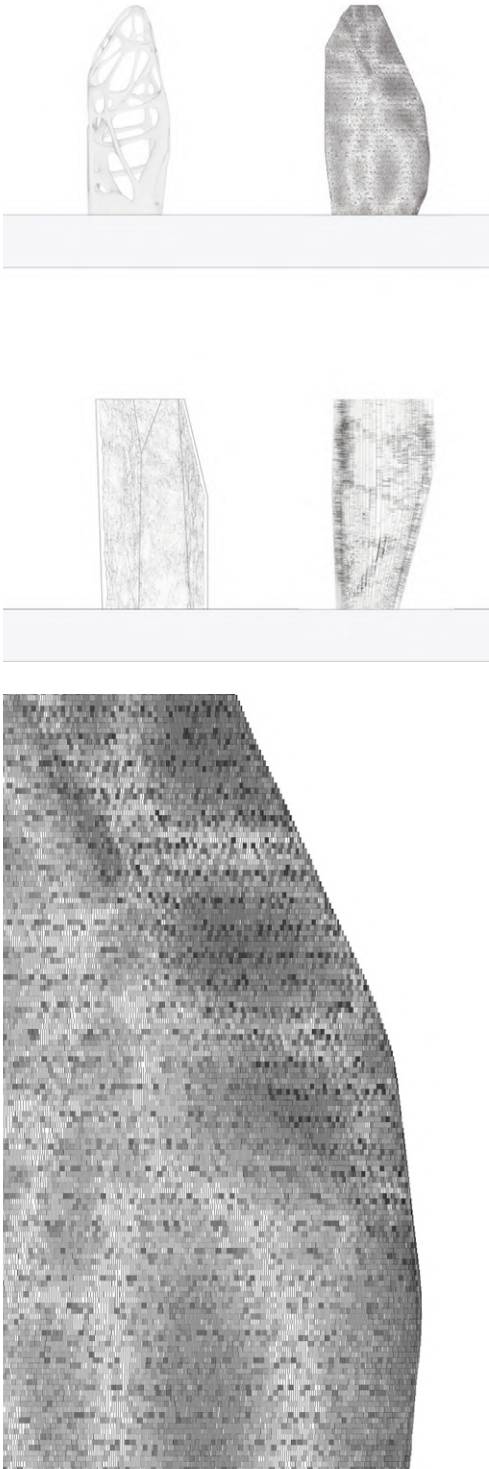


**Fig. 8** | Object-field #1, close-up on the tactile element of the 3d print (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).

**Fig. 9** | Object-field #2, close-up on the visual noise of the voxel system (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).

**Fig. 10** | Object-field #3, close-up on the dialogue between the exterior and interior surfaces (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).

**Fig. 11** | Object-field #4, close-up on the mereological system (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).



**Fig. 12** | The four object-fields, elevation drawings (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).

**Fig. 13** | Object-field #2, close-up high-resolution drawing (credit: S. Bernier-Lavigne, 2020).

Matter and materiality, whose one of the main architectural function is structure, are among those that are bound to change, both in their form and their fabrication. «[...] Materiality depends on our tools, instruments and machines. These are fundamental to our scientific [,] philosophical» and architectural approaches, as Antoine Picon (2018, p. 64) mentions. These tools, instruments and machines are now digital, and this opens up a field of possibilities for the exploration of forms and structures, but it also brings a new understanding of the physical phenomena that inhabit them.

Rather than pushing away architecture from the material world as many have wrongly anticipated, digital technology has catalyzed a transition from structural typologies, the typical models used by architects, to structural topologies which are suddenly more fluid and complex.<sup>1</sup>

Behind this regained freedom in design lies rational mathematical means, which are able to merge formal, material and structural information, through simulation. Thus, finite element analysis methods are able to precisely calculate the load distribution inside a shape, and facilitates the control of this data during the design phase. But more importantly, it leads us to think of structure as a continuous mixture rather than a separate set of blocks. The Japanese engineer Mutsuro Sasaki (2007) will develop the theory of 'morphogenesis of flux structures', demonstrating his method by realizing some of the most important contemporary Nippon's projects, such as the self-supporting concrete shell of the Teshima Art Museum by Ryue Nishizawa (Vv. Aa., 2017) and the Meiso no Mori Crematorium by Toyo Ito (et alii, 2009). We see, in this last project, the effect of continuous distribution of forces in the roof surface that undulates in order to stabilize and minimize its structural stress (Fig. 1). A similar approach with the engineer Cecil Balmond (2007) and his 'informal structures', which allow complex geometries, such as UNStudio's Arnhem Station Transfer Hall, to connect the roof, columns, walls, circulation and floor into a single structural surface, enabling the exploration of new architectural spaces.

**Topological optimization** | From this understanding of structure as flow, mainly developed in the first decade of the 21st century, will emerge a desire to channel the stress distribution in order to generate results of even greater performance. Inspired by certain natural morphogenetic processes like the trabecular bones, a tool will allow this ideal to be achieved by iteratively analyzing the flow of forces and gradually eliminating all non-structural matter (Bendsøe and Sigmund, 2003)<sup>2</sup>. Technically, the topological optimization process starts with the definition of a volume or surface to be optimized; its field of action. It is then subdivided into discrete elements with predefined material characteristics, on which a finite element analysis is performed in loops. The goal is to make the material distribution converge in optimal paths within this domain, and reduce the mass of the structure by removing any material that is not essential to the structural stability of the whole (Czacu and Grama, 2014). One could also interpret this process as the digital simulation of a dynamic material system, which tries to find its formal equilibrium at all costs, while using in the end as little energy as possible to exist.

At first glance, a direct affiliation seems logical with the field of design, due to the geometric complexity resulting from the topological optimization, as well as the fabrication constraints that this creates<sup>3</sup>. We have seen some projects stand out, such as Joris Laarman's Bone Chair (Laarman, 2017) and the explo-

rations of American car companies trying to reduce the weight of their chassis. However, at the scale of architecture, where this generative process could actually signify important changes both in design and construction, there are very few examples of applications. The most well-known is the Qatar National Convention Center from Arata Isozaki, where like a tree, the structure emerges from the ground and branches out to support the gigantic roof at arm's length (Sasaki, 2007). Despite the size of the building, the structure demonstrates virtually no post-optimization differentiation or rationalization, making its construction an unprecedented challenge.

Otherwise, a case of great interest in the architectural research world can be found in the project Topology Optimization for a Concrete Slab at ETH Zurich by Professor Benjamin Dillenburger and his team. Aiming to reduce the consumption of concrete in the construction industry, they use topological optimization to reduce the mass of an initial domain – the standard slab – and manage to eliminate 70% of it, while maximizing its structural performance (Jipa et alii, 2016; Fig. 2). However, the geometric intrication of the project is such that they had to develop a 3d printed formwork system in sand, with the VoxelJet technology, to be able to realize it. This will set the stage for their latest project, the Smart Slab, which was carried out during the construction of the DFAB House in Zurich (Aghaei-Meibodi et alii, 2017).

Despite the innovative aspect of all these projects and their distinct approaches to topological optimization, a certain limit appears to impose itself: their geometric results are all similar. This can be explained by the materialization process of flows, underlying this algorithmic procedure. If all the structurally underutilized material is eliminated, all that remains is the fluid and interconnected network of load distribution from its sources to its supports. It is in fact a more specific and differentiated version of the structural network architecture, at its peak in the 1950s-60s with the work of Emmerich, Le Ricolais, Wachsmann and Fuller (Wigley, 2001). This time, to facilitate the multi-directional distribution of loads, the structural nodes are smoothed, following a similar rule to Plateau's conditions (Thompson, 2009), and reminds us of certain natural structures, an absolute fascination for these architects. From there, how can we get around this formal constraint inherent to this operation, so that it would become an open design tool, rather than imposing its output as a finality? What could eventually be the spatial, material and graphic qualities related to topological optimization, if we broaden the spectrum of reflection?

**Project** | We propose in this paper, a design-research project attempting this circumvention. To do this, we will need to consider the result of the topological optimization as a diagram that would inform, in a creative way, a conceptual project (Teyssot, 2012). Our entry path into this new territory of exploration will follow the idea of the change of scale, both in the de-

sign and the materialization processes. To begin, a first transition leads us to consider the project at the scale of the object, where it becomes a medium to work mainly on the idea, wishing a conceptual renewal. This object is approached here as being autonomous, and freeing itself from all usual constraints. The idea is to focus on the object as a finite space, as a material element, and as an affective machine, in the deleuzian sense of them. Moreover, this small scale will facilitate its fabrication and helps to quickly validate the qualities of a monolithic object. This actually becomes interesting when one confronts this isolated object with the structural flows that run through it, which suddenly become its only force field, the complete expression of its 'energetic milieu' (von Uexkull, 2010). This approach is part of a broader theoretical framework, detailed in a previous paper, which traces the interaction between two elementary constituents in the brief history of digital architecture, namely the object and the field (Bernier-Lavigne, 2020).

**Interaction between object and field** | More often than not in the early days of digital architecture, the conceptual approaches of the project led to the development of an 'energy field' (made up of attractive and repulsive forces, real or conceptual) in which the search for certain states far from the normal equilibrium was targeted, leading to the emergence of bottom-up projects. In the majority of cases, the architectural result was less important than the intricacy of its generative process (Teyssot and Bernier-Lavigne, 2011). A certain parallel is immediately drawn with topological optimization, whereas its operation and parameters are highly regulated, but its formal result is somehow beyond our control. Then came the rise of the parametric – both the tool and the architecture – where the digital designers were trying to obtain better control on the field, by constraining it within a certain range of possibilities.

The result will be the field of objects, since the multiplication of a component capable of adapting itself to variations in the field, by gradual differentiation, creates a multiplicity of objects that are both similar and vaguely different. The reaction of many architects to the transformation of this method into a universal style, was to disconnect the object from the field (Gage, 2015), and start examining its own hidden qualities (Harman, 2013), those that it «[...] do[es] not disclose [...] fully to each other [but] exist regardless of human regards» (Benedikt and Bieg, 2018, p. 8).

In light of all this, we suggest exploring a new, and probably final link between the object and the field – the object-field – since it seems that these two entities still have some things to offer each other, and could once again stimulate reflection on possible architectures. This concept of the object-field thus allows a formal autonomy in the definition of the object, while taking advantage of the complexity and variability of the field, but this time constraining it within the initial object in order to influence mainly its materiality. In our case, the field will be composed of the lines of force resulting from the topological optimization of the designed object.

**Resolution** | As we develop a bit further the thinking, this connection between object and field can also be seen as a relationship between different resolutions of the same entity. One is a low-resolution element, a simple and sparsely defined container, the other is a highly differentiated dynamic system holding an immense amount of information. All this is accentuated by the digital environment in which they are created, and as Mario Carpo (2014) indicates, the tools we use inevitably reflect on the things we produce. The digital models we work with have a resolution below our perception threshold (Young, 2018), the 'minimum separable' of the human eye, and are now able to handle a phenomenal quantity of data. As a result, more and more data can be stored in smaller and smaller containers – or objects in this case – which drastically increases the interest in addressing the theme of high resolution.

While a low-resolution design keeps us in the macro scale, or meso (intermediate scale) depending on the project, the idea of high resolution plunges us into the micro or even nano scales (Nakamura, 2010). Thus, everything is multiplied, the possibilities as well as the complexity, and a new territory of exploration opens up where each grain of matter, each elementary brick on the scale of the micron, suddenly becomes accessible to the architect (Carpo, 2016). The usual hierarchy of scales gives way to a more flexible design methodology, capable of integrating variable and parallel levels, where the smallest details reinforce the whole and vis versa. At this minimal dimension, the boundary between form and matter becomes blurred (Beckett and Babu, 2014), although it is important to note that a transition from a digital object to its physical equivalent invariably leads to a decrease in resolution.

All these alterations in the scale of intervention necessarily influence the way we analyze projects. While a first look at the surface reveals certain information, like the easily understandable outlines of the object, a lot still escapes our grasp at this moment. We must decode the rest, layer by layer, by changing our scale of analysis and modifying our angle of attack, to finally unravel the mystery of the other organizational levels of the field. Obviously, architecture is not the first discipline facing the effects of multiple resolution, as demonstrated by the break in scale that appears in 20th century physics. They learned that the same phenomenon or object can reveal two completely different aspects depending on the scale of analysis and the theories associated with it, whether at the medium or large scale, with classical mechanics, or at the micro scale with quantum mechanics (Kumar, 2013). However, the direct consequence is that the validity of these analysis scheme becomes relative mainly to the scale of application (Bontems, 2008).

Nevertheless, we will discover that, in order to materialize, the field will use different systems of transposition giving body to the object at the same time. These systems could be compared to an amplification device, an instrument that allows the communication of smaller micro-elements at larger scales (Simondon,

2012). Our genuine understanding of these systems will need to pass through a rigorous analysis. First, at the macro scale, the directionality of the lines of force will be globally visible, then will be its local assembly logic at the meso scale, where an abundance of digital information, on the verge of disorder, causes a feeling of estrangement (Young and Young & Ayata, 2015), and finally a precise look at its basic components appearing fragmented and abstract at the micro scale. This echoes the 'order of magnitude' in the work of the philosopher Gilbert Simondon, which «[...] divides the question into different realities as mediated to the observer by the instrument» (Hui, 2016, p. 30), here the algorithm leading to the translation system.

Therefore, the idea is not to restrict ourselves to only one aspect of these resolutions while ignoring the others, so there is no question of choosing between high or low resolution, but rather to exploit the entire spectrum like the fractal logic would allow. It is through these variations in scale, the unexpected jump from all to nothing, where we realize something is actually happening and we pay attention (Gage and Meredith, 2019). This is exactly

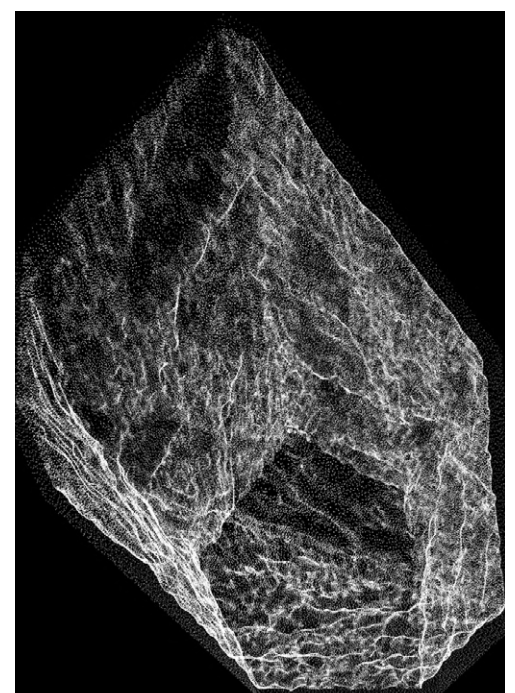
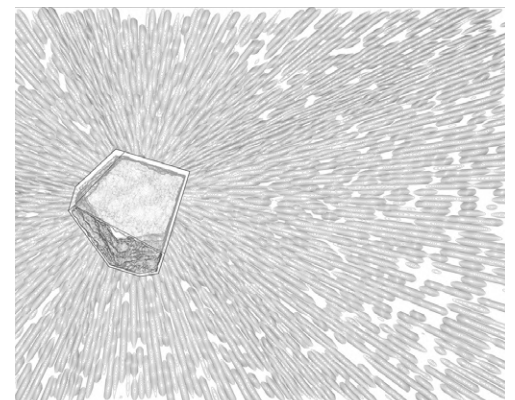


Fig. 14, 15 | Object-field #3: plan and relation to the base; point cloud (credits: S. Bernier-Lavigne, 2020).



what we will pursue in our four object-fields that follows, where access to new scales of design may eventually renew our understanding of architectural reality.

**Object-field** | This design-research project of the object-field aims to explore the high-resolution features related to topological optimization, constrained this time in a predefined volume of a lower resolution. Here begins the reflection on the basic object, the one that will eventually host the field. To ensure consistency in this series, the design starts with a volume of 150 x 150 x 300 mm on which the same Boolean difference operation is executed with many iterations, according to two parameters initially defined. They determine the maximum percentage of the volume of each subtraction, and the number of iterations to be performed. As the positioning of these Boolean operations is randomly generated, a series of finely cut monoliths emerges, with similar characteristics although formally different (Fig. 3).

The interesting aspect of the object as a monolith is that it presents itself as «[...] a refutation of all aesthetic presuppositions as well as of all formalism» but at the same time it is meant to be a «privileged space for architectural experimentation» (Brayer et alii, 2010, p. 7). Four of them are selected, according to the qualities exhibited and their potential to be developed in a project, and are analyzed by means of topological optimization (Fig. 4, 5). It is a matter of extracting their internal fields, the result of the external forces on the volume distributed down to the supports, and understanding the influence of the geometry of the object in this process (Fig. 6). From this point on, four high-resolution systems are developed to transform the monoliths and their structural flows into object-fields.

The first one serves as a kind of introduction to the whole project, materializing close to identical the result of the optimization. We find, of course, this fluid mesh, the typical output of this process, giving the keystone to understand the other three object-fields. Moreover, it also expresses the spatial qualities of this network that evolves into the body of the object. One comes to perceive, according to certain points of view, what remains of the straight limits of the initial volume, while at other times they have completely evaporated. Material gradation is also present; the structural members approaching the base thickens to stabilize the object-field, compared to the more aerial ones that are on the verge of becoming simple lines again. One also discovers the high-resolution aspect when manipulating the printed object, where a fine texture almost invisible to the naked eye, but perceptible to the touch, subtly reveals the other theme of the project (Fig. 7, 8).

The second object-field expresses the structural flows as a source of information defining the outer surface of the monolith. This time, the high-resolution system becomes essential in the definition of the project, where an algorithm will first decompose the total volume into a cluster of 1 mm voxels, which are three-dimensional pixels. Then, this collection of voxels is informed by the flows of the topological opti-

mization, to extrude themselves following the normals of the initial volume. This has the effect of stiffening the structure where it is needed, by increasing the amount of matter in these areas. As a result, a pixelated topography is generated on the object, and to amplify these fine variations, shades of grey are assigned to the voxels according to their proximity to the underlying field. Consequently, it emerges a highly differentiated visual noise that seem almost random when observed closely, but turns out to be highly indicative as a whole. A 3d printing process made of plaster powder, binder and ink is used to materialize the whole, where each voxel gets its own tint from this fabrication method (Fig. 7, 9).

The third object-field aims at a complete integration of the structural flows through a transparent monolith, plain from the outside, but extremely detailed from the inside. Since this one is empty, the topological optimization is immanently embedded in its envelope, as if this information had gradually dissolved during the design process and then reappeared in its materialization. Here, a vertex displacement algorithm is used to thicken parts of the inner walls of the monolith, giving it a texture that is both crackling and fluid, following the direction of the forces. Fabricated with ultra-clear resin 3d print exhibiting the accuracy of 15 microns per layer, this object-field could almost be apprehended as an entity that would have been formed by a growth process rather than manufactured. A strong, though subtle, dialogue is established between the angularity of the sharp edges on the outside of the monolith and the fine variation on the interior surface, leading to fascinating optical effects when observed closely or in interaction with natural light (Fig. 7, 10).

The fourth and final object-field decomposes both the formal data of the initial monolith and the structural flows, to completely blur the boundaries between object and field. This is done through the mereological assembly (Bryant, 2011) of simple linear elements, and although these elements measure only a few microns, they manage to develop a close relationship with the whole. The algorithmic procedure divides the initial shape into a series of thin vertical members, extracting the periphery of the object, and an iterative loop run several thousand times to gradually organizes the horizontal micro-elements according to the optimization data, slowly solidifying the whole. The result shows an object-field with a certain level of elasticity, mainly in his less structurally stressed areas. Its materialization in translucent resin leads us to perceive a constant play of solid opacity and emptiness, depending on the angle and scale of observation. It becomes somehow intangible, similar to some figural and dreamlike cloud formations (Damisch, 1972; Fig. 7, 11).

Each of these four object-fields rests on a base, a heavy block counterbalancing the light weight of the object placed on it. Although completely white as an abstract volume, its upper surface is milled to express the intensity of the field acting in the object, while reinterpreting, at another resolution, the system of

translation. On the other hand, this notion of multi-resolution has great repercussions when the time comes to represent the project (Allen and Caspar Pearson, 2016). We have deliberately restricted our investigation to line drawings in order to explore the flexibility of this medium, to see if it could speak this language. Beyond the basic techniques, although always important, for each object-field an algorithmic procedure is developed, deriving from the peculiarities of its complex geometry (Fig. 12).

The overlay of contour lines following multiple directions create a tension between line drawing and surface shader in the representation of the first object-field. A similar technique is also used in the drawing of the bases. For the second one, each voxel is vertically decomposed into a variable number of lines, based on the intensity its color, in order to artificially recreate the gradient. Once again, the proximity at which we analyze the drawing makes us perceive different information. From afar, one could easily mistake the drawing for a computer-generated rendering, where the accumulation of lines becomes practically opaque, but up close one finds all the richness of high resolution in this quasi-infinite number of vertical segments (Fig. 13).

For the third and fourth object-fields, the goal is to represent their translucency using only points and lines. Thus, the generation of an extremely dense point cloud enclosed in a set of sharp lines marking the outer contours of the object achieves this for one of them (Fig. 14, 15). For the other, playing with the degree of opacity of the lines brings out the flow of forces inhabiting the object. All in all, the use of line drawings and the associated algorithmic explorations allow the free and specific expression of each object-fields, in addition to catalyze coherence throughout the project, where similarities, hitherto kept apart by the multiple materialities, begin to dialogue.

**Conclusions** | This project demonstrates the relevance of addressing issues of resolution and scale in architectural design and theory. By isolating an element, here the structural flows emerging from topological optimization, and developing it in multiple ways with high-resolution systems, allows a better understanding of its specific potential. Many qualities can be withdrawn: the tactility of the printed material, the three-dimensional graphic expression of the physical behavior inside the object, the generation of tension between opacity and transparency, the fine dematerialisation of the structure, and in addition to all this, the opportunity to rethink the representation of the project. The next step will be to convert this method to architecture, leaving aside the utopia of the completely isolated object, and trying to reintegrate all the constraints in this process. As the scope of the project will increase, the intermediate scales will definitely multiply, making it possible to deepen the micro-meso-macro trio and move towards the micro-meso(s)-macro. An exhaustive multi-resolution will then be implemented, creating true complexity on a variable scale, through the heterogeneous entanglement of information layers.

## Acknowledgements

I would like to thank all the collaborators involved in the project: J. Beauchamp, H. Thibaudeau, P. Labelle, A. Marceau and R. Brosseau. This project was made possible by the funding of the Conseil des Arts du Québec and the Fonds de Recherche Société et Culture du Québec.

## Notes

1) A transition was already underway in the pre-digital era with some key projects, including Frederick Kiesler's Endless House (1947-60) and the TWA Flight Center (1955-62) at JFK Airport, by Eero Saarinen, to only name a few.

2) In order to understand the conceptual roots of topological optimization and the influence of morphogenetic processes on the digital design of architectural structures, see these few important texts: Thompson (1917); Bonner (1952); Otto and Rasch (1995); Ball (1999); Bendsøe and Sigmund (2003); Kolarevic (2005); Hwang (2006); Reiser and Umemoto (2006); Museum für Gestaltung Zürich and Sachs (2007); Sasaki (2007); Menges (2012).

3) It is important to note that the optimization process increases the performance of the structures, but does not consider the fabrication constraints. This can therefore end up increasing the production difficulty of these structures.

## References

- Aghaei-Meibodi, M., Bernhard, M., Jipa, A. and Dillenburger, B. (2017), "The Smart Takes from the Strong", in Sheil, B., Menges, A., Glynn, R. and Marilena, S. (eds), *Fabricate Rethinking Design and Construction*, UCL Press, London, pp. 210-217. [Online] Available at: [www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/237103](http://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/237103) [Accessed 11 March 2020].
- Allen, L. and Caspar Pearson, L. (eds) (2016), *Drawing Futures – Speculations in Contemporary Drawing for Art and Architecture*, UCL Press, London. [Online] Available at: [www.uclpress.co.uk/products/83097](http://www.uclpress.co.uk/products/83097) [Accessed 26 March 2020].
- Ball, P. (1999), *The Self-made Tapestry – Pattern Formation in Nature*, Oxford University Press, Oxford.
- Balmond, C. (2007), *Informal*, Prestel, New York.
- Beckett, R. and Babu, S. (2014), "To the Micron: A New Architecture Through High-Resolution Multi-Scalar Design and Manufacturing", in *Architectural Design | Special Issue – High Definition: Zero Tolerance in Design and Production*, vol. 84, issue 1, pp. 112-115. [Online] Available at: [doi.org/10.1002/ad.1709](https://doi.org/10.1002/ad.1709) [Accessed 26 March 2020].
- Bendsøe, M. P. and Sigmund, O. (2003), *Topology Optimization – Theory, Methods, and Applications*, Springer, Switzerland.
- Benedikt, M. and Bieg, K. (eds) (2018), *Center 21 – The Secret Life of Buildings*, Texas Center for American Architecture and Design, Austin.
- Bernier-Lavigne, S. (2020), "Object-field – An adaptive interplay between autonomy and contingency", in Ficca, J., Kulper, A. and La, G. (eds), *ACSA 107th Annual Meeting, Black Box – Articulating architecture's Core in the Post-Digital Era, march 28-30, 2019, Pittsburgh*, ACSA Press, pp. 640-645.
- Bonner, J. T. (1952), *Morphogenesis – An Essay on Development*, Princeton University Press, Princeton.
- Bontems, V. (2008), "Quelques éléments pour une épistémologie des relations d'échelle chez Gilbert Simondon", in *Appareil*, n. 2, pp. 1-14. [Online] Available at: [doi.org/10.4000/appareil.595](https://doi.org/10.4000/appareil.595) [Accessed 30 March 2020].
- Bryant, L. R. (2011), *The Democracy of Objects*, Open Humanities Press, Ann Arbor. [Online] Available at: [www.openhumanitiespress.org/books/titles/the-democracy-of-objects/](http://www.openhumanitiespress.org/books/titles/the-democracy-of-objects/) [Accessed 11 March 2020].
- Brayer, M.-A. et alii (eds) (2010), *Monolithes ou l'architecture en suspens (1950-2010)*, Frac Centre, Orléans.
- Carpo, M. (2016), "Excessive Resolution: From Digital Streamlining to Computational Complexity", in *Architectural Design | Special Issue – Evoking Through Design: Contemporary Moods in Architecture*, vol. 86, issue 6, pp. 78-83. [Online] Available at: [doi.org/10.1002/ad.2114](https://doi.org/10.1002/ad.2114) [Accessed 30 March 2020].
- Carpo, M. (2014), "Breaking the Curve – Big Data and Design", in *Artforum*, vol. 52, n. 6. [Online] Available at: [artforum.com/inprint/issue=201402&id=45013&pagenum=0](http://artforum.com/inprint/issue=201402&id=45013&pagenum=0) [Accessed 11 March 2020].
- Cazacu, R. and Grama, L. (2014), "Overview of Structural Topology Optimization Methods for Plane and Solid Structures", in *Annals of the University of Oreda – Fascicle of Management and Technological Engineering*, vol. XXIII (XIII), issue 3, pp. 17-23. [Online] Available at: [citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.8287&rep=rep1&type=pdf](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.8287&rep=rep1&type=pdf) [Accessed 23 February 2020].
- Damisch, H. (1972), *Théorie du nuage – Pour une histoire de la peinture*, Seuil, Paris.
- Gage, M. F. (2015), "Killing Simplicity – Object-Oriented Philosophy in Architecture", in Vv. Aa., *LOG 33*, Anyone Corporation, New York, pp. 95-106.
- Gage, M. F. and Meredith, M. (2019), *Visiting Lecture / Mark Foster Gage and Michael Meredith in Conversation – Multiple Resolutions*. [Online] Available at: [www.youtube.com/watch?v=Kn8SEXRkcE](https://www.youtube.com/watch?v=Kn8SEXRkcE) [Accessed 21 February 2020].
- Harman, G. (2013), "Objets et Architecture | Objects and Architecture", in Brayer, M. F. and Migayrou, F. (eds), *Naturaliser l'architecture naturalizing Archilab*, Édition HYX, Orléans, pp. 234-243.
- Hui, Y. (2016), *On the Existence of Digital Objects*, University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Hwang, I. (2006), *Verb – Nature* (2006), Actar, Barcelona.
- Ito, T., Buntrock, D., Riken, Y. and Igarashi, T. (2009), *Toyo Ito*, Phaidon, London.
- Jipa, A., Bernhard, M., Aghaei Meibodi, M. and Dillenburger, B. (2016), "3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimized Concrete Slabs", in Bieg, K. (ed.), *2016 TxA Emerging Design + Technology Conference, San Antonio, Texas, November 3-5*, pp. 97-107. [Online] Available at: [www.researchgate.net/publication/327793571\\_3DPrinted\\_StayinPlace\\_Formwork\\_for\\_Topologically\\_Optimized\\_Concrete\\_Slabs](http://www.researchgate.net/publication/327793571_3DPrinted_StayinPlace_Formwork_for_Topologically_Optimized_Concrete_Slabs) [Accessed 26 March 2020].
- Kolarevic, B. (2005), *Performative Architecture – Beyond Instrumentality*, Spon Press, New York.
- Kumar, M. (2013), *Le Grand Roman de la physique quantique – Einstein, Bohr... et le débat sur la nature de la réalité*, Flammarion-Champs Science, Paris.
- Laarman, J. (2017), *Joris Laarman – Lab*, August Editions, New York.
- Menges, A. (2012), "Material Computation – Higher Integration in Morphogenetic Design", in *Architectural Design | Morphogenetic Design*, vol. 82, n. 2, pp. 14-21. Museum für Gestaltung Zürich and Sachs, A. (2007), *Nature Design – From Inspiration to Innovation*, Lars Muller Publishers.
- Nakamura, H. (2010), *Microscopic Desinging Methodology*, Lixil Publishing, Tokyo.
- Otto, F. and Rasch, B. (1995), *Finding Form – Towards an Architecture of the Minimal*, Axel Menges, Berlin.
- Picon, A. (2018), *La matérialité de l'architecture*, Éditions Parenthèses, Marseille.
- Reiser, J. and Umemoto, N. (2006), *Atlas of Novel Tectonics*, Princeton Architectural Press, New York.
- Sasaki, M. (2007), *Morphogenesis of Flux Structure*, AA Publications, London.
- Simondon, G. (2012), *Du Mode d'existence des objets techniques*, Flammarion, Paris.
- Teyssot, G. (2012), "The Diagram as Abstract Machine", in *VIRUS | Revista do nomads*, n. 7, pp. 1-13. [Online] Available at: [www.nomads.usp.br/virus/virus07/secs/invited/virus\\_07\\_invited\\_1\\_en.pdf](http://www.nomads.usp.br/virus/virus07/secs/invited/virus_07_invited_1_en.pdf) [Accessed 15 March 2020].
- Teyssot, G. and Bernier-Lavigne, S. (2011), "Forme et information. Chronique de l'architecture numérique", in Guiheux, A. (ed.), *Action Architecture*, Éditions de la Villette, Paris, pp. 49-87.
- Thompson, D'A. (2009), *Forme et Croissance*, Seuil, Paris.
- Thompson, D. W. (1917), *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge.
- von Uexkull, J. (2010), *Milieu animal et milieu humain*, Rivages, Paris.
- Vv. Aa. (2017), *Teshima Art Museum*, Fukutake Foundation, Naoshima.
- Wigley, M. (2001), "Network Fever", in *Grey Room*, n. 4, pp. 82-122. [Online] Available at: [www.mitpressjournals.org/toc/grey/4](http://www.mitpressjournals.org/toc/grey/4) [Accessed 15 February 2020].
- Young, M. (2018), "Paradigmatic Resolution: The Debased Flower Images of Young & Ayata", in *Paprika!*, vol. 3, issue 10. [Online] Available at: [yalepaprika.com/articles/paradigmatic-resolution-the-debased-flower-images-of-young-ayata](http://yalepaprika.com/articles/paradigmatic-resolution-the-debased-flower-images-of-young-ayata) [Accessed 26 March 2020].
- Young, M. and Young & Ayata (2015), *The Estranged Object*, Graham Foundation, Chicago.