

# RELEASING COMPLEX TECTONICS

Robotic-fabricated adaptive formwork for non-standard architectural objects



*a mamma, babbo e Andrea*

# RELEASING COMPLEX TECTONICS

Robotic-fabricated adaptive formwork for non standard architectural objects

Tesi di Laurea in Architettura e Composizione Architettonica III  
Corso di Ingegneria Edile - Architettura  
Scuola di Ingegneria e Architettura  
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna  
aa 2016 - 2017 | Sessione I

Relatore: Prof. Ing. Alessio Erioli

Correlatori: Arch. Andrea Graziano, Marco Palma, Stefano Paradiso

Lorenzo Selva

# INDICE

|    |                                   |
|----|-----------------------------------|
| 9  | 1   OVERVIEW                      |
| 23 | 2   MESH - TIPO M1                |
| 23 | 2.1 MODELLO DIGITALE              |
| 31 | 2.2 TOOLS                         |
| 37 | 2.3 TEST - SESSIONE I             |
| 45 | 2.4 UPDATE                        |
| 49 | 2.5 TEST - SESSIONE 2             |
| 57 | 3   MESH - TIPO M2                |
| 57 | 3.1 MODELLO DIGITALE              |
| 63 | 3.2 ANALISI ELASTICA / MILLIPEDE  |
| 67 | 3.3 UPDATE I                      |
| 71 | 3.4 TEST - SESSIONE 3             |
| 75 | 3.5 UPDATE II                     |
| 79 | 3.6 TEST - SESSIONE 4             |
| 83 | 4   CONCLUSIONI / SVILUPPI FUTURI |
| 90 | BIBLIOGRAFIA                      |

| 1

# OVERVIEW

## LA NASCITA DEL PROGETTO

*Questa prima sezione presenta: un breve abstract contenente le osservazioni e gli obiettivi che hanno dato vita a Robotic Additive Forms, un'analisi dei primi pionieristici processi di fabbricazione con materiali fluidi, gli esempi di Nervi e di Zaha Hadid Architects, l'introduzione dei robot industriali in architettura ed i suoi effetti, un confronto con i sistemi automatizzati brevettati nell'ultimo decennio, una descrizione approfondita delle specifiche potenzialità del processo sviluppato.*

**Introduzione.** La ricerca in questione si focalizza sulla definizione di un processo di fabbricazione digitale in grado di snellire e facilitare la produzione di oggetti architettonici con geometria non-standard in materiale fluido, con particolare riferimento al calcestruzzo. Lo stesso, come è semplice immaginare, sarà utilizzabile di conseguenza anche per oggetti con geometria prismatica, di seguito non trattati, uniformando la logica costruttiva. L'obiettivo ultimo è quello di esplorare le implicazioni architettoniche e le potenzialità formali che si generano dal rapporto tool / materiale.

I processi oggi utilizzati, infatti, mostrano alcuni aspetti controversi che ne limitano efficienza, convenienza ed applicabilità. Le tradizionali operazioni di cassetta e rinforzo sono estremamente dispendiose in termini di tempo e manodopera, per l'elevata precisione di cui necessitano. Gli oggetti, poi, sono essenzialmente costruiti due volte: la prima con fabbricazione e posa del cassetta dalla forma designata; la seconda con getto e presa del materiale di filling. Si comprende facilmente come ne derivi una sostanziale anti-economicità su più fronti, su tutti lo spreco di materiali ed energia o, nel peggiore dei casi, una tendenza alla ripetizione e/o semplificazione progettuale delle forme. Un approccio alternativo passa inevitabilmente dal superamento di questa logica, arrivando a valutare la possibilità di fondere queste due operazioni. Sono queste le direzioni esplorate nella ricerca oggetto di questa tesi.

"Releasing Complex Tectonics: robotic-fabricated adaptive formwork for non-standard architectural objects" nasce con l'idea di fabbricare roboticamente elementi con integrata la duplice



*Crushed Wall, 2012 - Walter Jack Studio: potenzialità plastiche materiali fluidi*



*Elbphilharmonie, Hamburg, 2006-2016 - Herzog & De Meuron Arch. : complessità delle attuali opere di cantierizzazione*



*Block 45, Queenstown (Singapore), 1950 - SIT*

funzione di cassetta e rinforzo, denominati *leaking formworks*. Un processo additivo, controllato digitalmente, applicabile indistintamente in-situ e in laboratorio, che svincola la morfologia del prodotto finale dal tempo e dalla complessità delle operazioni necessarie alla sua realizzazione.

Il fatto di essere un processo additivo, e quindi duale agli attuali sistemi di fresatura, che procedono per sottrazione, implica l'utilizzo del solo materiale strettamente necessario alla realizzazione del prodotto. Il grado di definizione geometrica dell'elemento è gestito, come detto, digitalmente e consente di replicare con maggiore o minore precisione i volumi progettuali a seconda delle specifiche esigenze. L'utilizzo di un tool come il braccio robotico garantisce un elevato controllo spaziale dell'oggetto estruso e quindi la fedeltà tra modello fisico e modello digitale.

La possibilità di applicare facilmente il processo anche in-situ fornisce vantaggi logistici ed economici relativamente al trasporto dei materiali nonché una maggiore prontezza nell'apportare modifiche e migliorie in corso d'opera alla geometria

di partenza o alla sequenza delle operazioni: la velocità di editing, inoltre, è in entrambi i casi incrementata dall'adozione di software parametrici sia per l'elaborazione del modello digitale che per la programmazione dei comportamenti del robot, di cui è caratteristica fondante.

Per quanto possa sembrare un aspetto marginale e meramente operativo, quest'ultimo principio è fondamentale in quanto assicura malleabilità ed adattabilità all'intero processo costruttivo in relazione a condizioni locali non sempre di facile lettura in fase progettuale. Un protocollo unitario da osservare con attenzione, costituito da rigide operazioni consequenziali definite una ad una nelle loro possibili esplicitazioni, in grado di generare ed assecondare la produzione di elementi architettonici non standard ed altamente customizzabili

**Calcestruzzo: direzioni di ricerca ventesimo secolo.** A causa delle sue enormi potenzialità, il calcestruzzo è sempre stato oggetto costante di ricerca da parte dei progettisti. Nello specifico, i due principali vantaggi insiti in questo



*Ponte sul Basento, Potenza, 1976 - Sergio Musmeci*

materiale sono l'incredibile resa formale data dalla sua plasmabilità e la velocità costruttiva: quest'ultima è stata il vero motore per la sua esponenziale diffusione durante il secolo scorso, complici anche la contingente necessità di ricostruzione post-bellica e la spinta propulsiva all'espansione delle città. Tuttavia, le sperimentazioni riguardanti queste sue due caratteristiche intrinseche hanno mantenuto nella quasi totalità dei casi corsi paralleli, massimizzando l'una a scapito dell'altra e viceversa. Raramente hanno trovato punti di contatto. I frutti più significativi sono stati da un lato la prefabbricazione degli elementi, orientata esclusivamente ad un'ottimizzazione di tempi e costi ma associata ad una progressiva semplificazione delle forme, dall'altro gli oggetti architettonici pionieristici di ingegneri come Isler, Candela e degli italiani Musmeci, Morandi e Nervi.

Le loro opere mostrano una ricerca formale senza eguali anche negli anni a seguire ma, al tempo stesso, risulteranno quasi sempre non sostenibili da un punto di vista economico, precludendone in questo modo una distribuzione su larga scala. L'architetto che più di ogni altro ha provato a conciliare entrambi i vantaggi, cercando un terreno comune di ricerca è il ligure Pier Luigi Nervi. Lo studio della sua attività è stato di grande aiuto per lo sviluppo di questa tesi.

**L'esempio di Pier Luigi Nervi.** Nato a Sondrio nel 1891, mostra sin dalle prime fasi della sua attività un innato interesse verso le potenzialità dei materiali fluidi, cui dedicherà l'intera carriera, lavorando sempre a stretto contatto.

Nello specifico, l'ingegnere ligure è fortemente attratto dalle potenzialità del calcestruzzo, da lui definito "pietra fusa", sia per la sua grandissima plasmabilità che consente di superare le geometrie ortogonali di telai e reticolari, sia perché è possibile manipolare le caratteristiche di resistenza, agendo sulla sua costituzione interna. In questo modo, si possono generare tettoniche fino ad allora inesplorate, potendo appunto ottimizzare il comportamento strutturale mediante locali accorgimenti formali, difficili da realizzare con i materiali da costruzione tradizionali.

Potendo sviluppare per la prima volta superfici con curvature complesse ed elementi con sezioni continuamente variabili, il fulcro della sua ricerca è diventata come detto l'ottimizzazione strutturale, coerentemente con il suo principio guida dell'economia: vuole trovare una corrispondenza sempre maggiore tra la geometria della struttura e la distribuzione degli sforzi, massimizzando la resistenza per forma di oggetti architettonici complessi prima irrealizzabili.

Il cospicuo alleggerimento che ne deriva consente anche un notevole risparmio sui ferri d'armatura. Questo aspetto ha anche risvolti pratici importanti: in Italia era infatti periodo di autarchia, pertanto il ferro era di difficile reperimento. Le fluide tessiture delle sue opere quindi, costituite da forme nel loro insieme semplici ma localmente molto articolate, descrivono con precisione il flusso delle tensioni, che mi mostra plasticamente materializzato.

Tutto ciò si nota facilmente ad esempio nelle ondulazioni e nelle minute nervature che disegnano l'intradosso delle calotte dei due Palazzi dello Sport di Roma. Il comportamento statico delle strutture ed il conseguente andamento delle tensioni era frutto di una combinazione tra intuizione empirica e prove svolte nel laboratorio di Arturo Danusso su modelli in scala.

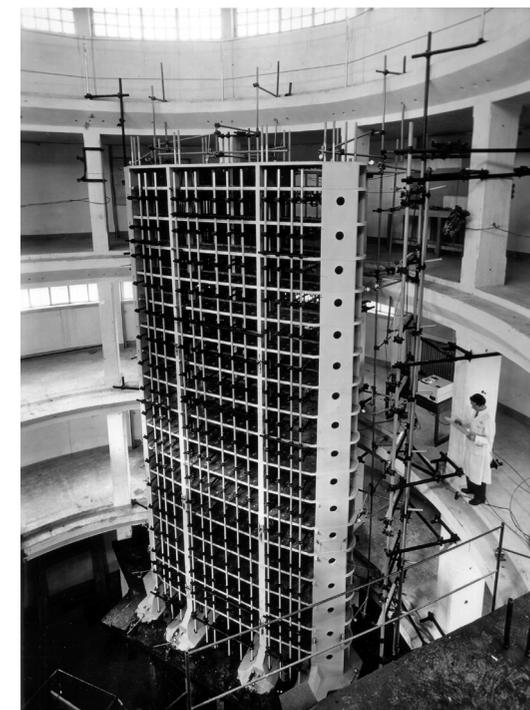
Questo fatto serve a sottolineare come sia sempre stato fondamentale un costante lavoro di test e prototipazione, al fine di indagare le potenzialità e i comportamenti dei nuovi processi. L'apparato di accorgimenti locali da lui progettati con attenzione, danno un surplus di resistenza per forma e sono pertanto fondamentali per evitare i fenomeni di instabilità locale, che nelle superfici sottili resistenti rimangono la questione principale da affrontare.

Lo sviluppo conseguente più coerente è quello di trovare un modo per realizzare a costi accettabili queste forme complesse, ed è in questo punto che diventa un riferimento focale la ricerca di Nervi. Nel corso della sua opera perfeziona e brevetta il cosiddetto "Sistema Nervi", frutto di due scelte fondamentali: prefabbricazione a piè d'opera, utilizzo del ferrocemento. La predisposizione di questo Sistema si è rivelata anche la fortuna imprenditoriale della Nervi e Bartoli. L'impresa di famiglia è stata infatti prima unica detentrica dei brevetti ed in seguito, una volta liberalizzati, comunque l'unica in grado di applicare operativamente quel particolare modo di operare.

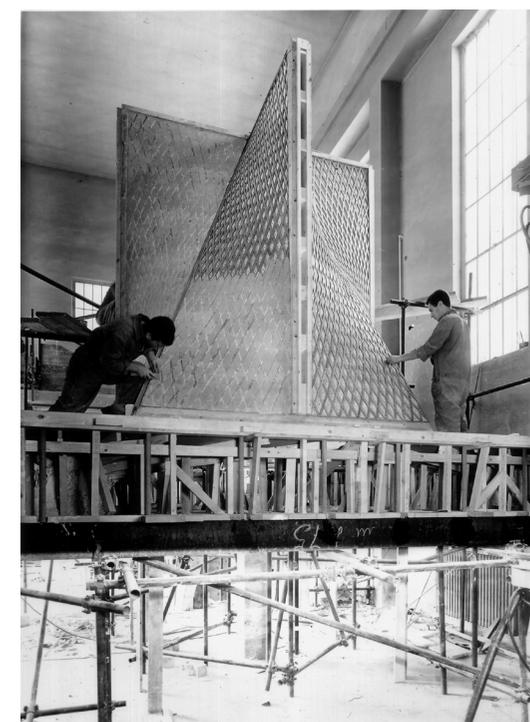
Ciò dimostra come sia sempre imprescindibile l'elaborazione parallela di un metodo di fabbricazione sostenibile dal punto di vista



Prova di carico su modello 1:37,5 Hangar di Orvieto (Nervi) - Pol. Milano, 1935



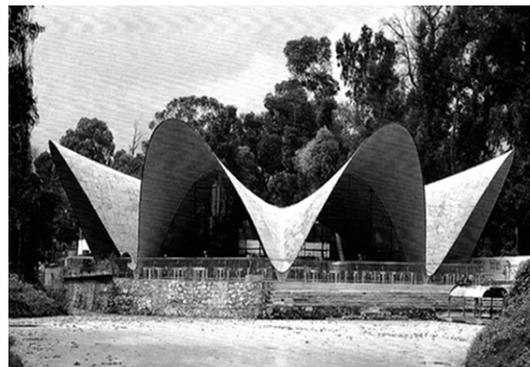
Prova di carico su modello 1:15 Pirelli Tower (Nervi, Ponti) - ISMES, 1955



Prova di carico su modello 1:15 Catt. San Francisco (Nervi) - ISMES, 1964



Pavillon Siles, Ginevra, 1969 - Heinz Isler



Los Manantiales Restaurant, Mexico City, 1958 - Felix Candela



Vista complessiva - Ponte sul Basento, Potenza, 1976 - Sergio Musmeci

operativo ed economico per dare seguito e forma alle ardite sperimentazioni di laboratorio. In questo senso, l'attività di Nervi rimane ad oggi un unicum nel suo settore.

**Prefabbricazione:** utilizzata per la prima volta nel 1940 per la costruzione della seconda delle aviorimesse toscane, ad Orbetello, consente di evitare l'onere di casseforme e centine vero problema in termini di costi, tempi e possibilità formali delle prime opere in c.c.a.. Qui il cantiere viene sdoppiato in due zone: zona in cui si creano le strutture in opera e zona dedicata alla prefabbricazione. Le grandi coperture sono scomposte in piccoli elementi numerati che, una volta messi in opera, necessitano soltanto di leggeri ponteggi per essere sostenuti. Una volta posizionati, getti di cemento ad alta resistenza e saldano i giunti. Una buona prefabbricazione, limita anche il numero di elementi differenti. Nel caso di Releasing Complex Tectonics, come si vedrà, sia la mesh che il filling possono essere prodotti sia in laboratorio che in cantiere a seconda delle esigenze. I giunti di collegamento tra i vari pannelli devono essere necessariamente gettati in-situ.

**Ferrocemento:** variante del c.c.a. in cui si utilizza un'armatura minuta e distribuita che consente di realizzare elementi molto articolati con spessore ridotto fino a 2-3 cm. Nella barca "Giuseppa", ad esempio, la scocca è di 1.5 cm. Nello specifico, vengono predisposti vari strati di reti metalliche molto sottili, su cui in seguito si getta un conglomerato di cemento ad alta resistenza e sabbia. Il materiale che ne deriva è resistente, elastico, duttile, isotropo, praticamente omogeneo, leggero, facilmente sagomabile ed economico.

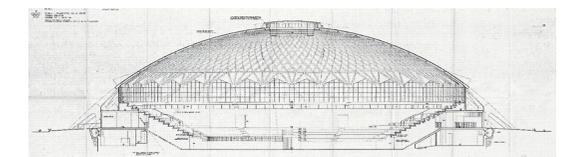
Uno dei brevetti più celebri in cui viene sfruttato è quello n. 445781 del 1949 sui "conci d'onda": facilmente realizzabili con questa tecnica, si sfrutta la resistenza di questi elementi per forma anziché per massa. Un'altra applicazione famosa è quella dei tavelloni romboidali utilizzati nei palazzetti dello sport.

La parte più interessante di questa particolare esplicitazione del c.c.a., che nasce essenzialmente per l'industria navale, è la strategia di armatura: l'armatura diffusa infatti, come detto, fornisce un supporto distribuito al calcestruzzo con l'obiettivo

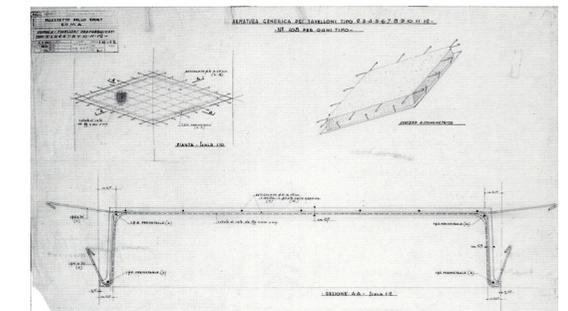
di realizzare un materiale il più possibile omogeneo. La densità delle reti è elevata e costante all'interno del singolo elemento. L'armatura tradizionale al contrario, come noto, fornisce invece un supporto locale laddove sono massime le tensioni di trazione, lasciando al calcestruzzo la quasi totalità dell'onere di resistenza nelle parti restanti. Si tratta, dunque, di un materiale composito. Questo processo costruttivo ha anche il vantaggio di essere costituito in piccola parte da operazioni che richiedono alta specializzazione ed in larga parte da operazioni elementari, per le quali non servono operai qualificati.

La stessa cosa accade per Releasing Complex Tectonics: azionamento, movimento del robot e gestione del processo generativo digitale necessitano di professionisti qualificati, gli

assemblaggi della pannellatura ed il getto dei giunti sono invece operazioni elementari.



Sezione



Sezione - Dettaglio costruttivo dei tavelloni romboidali e del getto dei giunti



Cantiere, panoramica



Palazzetto dello Sport, 1954-1957, Roma - P.L. Nervi: le nervature all'intradosso della copertura riproducono esattamente l'andamento locale delle tensioni



Cantiere, particolare

### **Towards 00's, l'esempio di Zaha Hadid.**

I progressi nel campo della chimica dei materiali hanno reso possibile nell'ultimo decennio la realizzazione di elementi architettonici con geometria complessa anche senza l'utilizzo di barre di armatura. Lo studio di progettazione Zaha Hadid Architects è sempre stato in prima linea relativamente all'adozione di queste tecnologie, avendo collaborato in più di un'occasione con ricercatori impegnati su questo tema. Come noto, infatti, le sue opere mirano ad una fluida transizione tra elementi diversi e ad una natura continua delle forme. Pertanto è stato necessario mettere a punto, caso per caso, specifiche tecniche costruttive che lo consentissero. Questa parte è interessante perché fa capire come la mesh estrusa roboticamente possa rivestire all'occorrenza anche la sola funzione di cassera, nel caso il suo comportamento meccanico sia trascurabile rispetto a quello del filling. Si riportano alcuni esempi.

*MAXXI: Museum of XXI Century Arts. Roma, 1998 - 2009.* In questo edificio è presente una parete alta 12m e lunga 50m, completata in singolo getto, con superficie di altissima qualità. Il materiale utilizzato è denominato CRC (carbon reinforced concrete) ed è costituito da una miscela di calcestruzzo e fibra di carbonio. La stessa tecnologia è stata adottata per realizzare le sinuose lamelle del soffitto che attraversano le suite espositive, consentendo l'ingresso della luce naturale.

*Heydar Aliyev Cultural Center. Baku, 2007 – 2012.* Il cemento fibrorinforzato GRC qui utilizzato può assumere pressoché qualsiasi forma, non necessita di reinforcement ed ha un buon comportamento strutturale abbinando duttilità e



MAXXI, Roma: parete in CRC



MAXXI: lamelle copertura in CRC



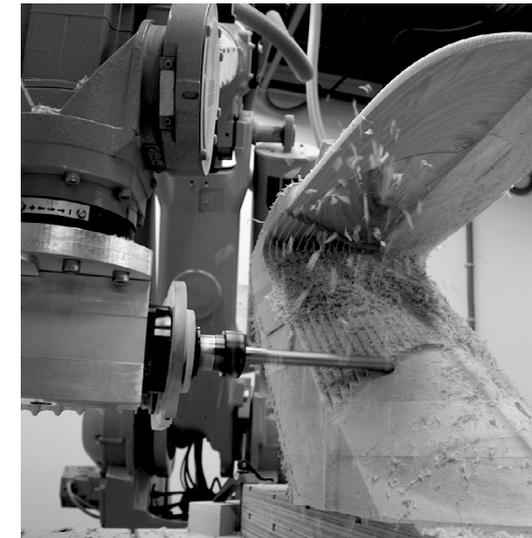
Heydar Aliyev Center, Baku



Phaeno Science Center, Wolfsburg

resistenza. In questo modo si possono realizzare elementi tanto resistenti quanto sottili. Nel caso specifico è stato sviluppato un sistema di estrusione a sandwich: lo strato superiore e quello inferiore hanno fibre a-direzionali e sparse, mentre in quello intermedio le fibre sono condensate in gomitoli che assumono la forma architettonica desiderata.

*Phaeno Science Center, Wolfsburg, 1998 – 2005.* Quest'opera costituisce ad oggi il più grande



Robot w/ milling nozzle



Robot w/ clay extruder, Digifabring, 2015: le due immagini mostrano la versatilità dei robot in architettura, personalizzandone i nozzle. Inoltre, è evidente come i processi additivi possano essere potenzialmente waste-free.

edificio in Europa costruito con cemento auto-compattante SCC (adottato successivamente in larga parte anche al MAXXI). Questo cemento, a differenza di quello tradizionale, non deve essere vibrato in quanto vi sono elementi che ne regolano la viscosità, garantendo la regolare distribuzione degli inerti. In virtù di questo fatto può essere gettato anche dove l'armatura è più fitta, dal momento che non è necessario vibrarlo per eliminare le bolle d'aria, ottenendo così una superficie più raffinata e rendendolo ideale per forme complesse.

**Why now.** L'architettura digitale durante gli anni '90 si è occupata prevalentemente di strategie di design computer-aided ed è stata spesso criticata per avere trascurato le questioni operative relative alla realizzazione dei loro output. La forbice tra quanto è possibile progettare digitalmente e quanto è fisicamente riproducibile si è molto ridotta durante i primi anni 2000, da quando cioè le macchine a controllo numerico CNC si sono via via diffuse, permettendo a designer ed architetti di portare i loro lavori dal mondo virtuale a quello reale. Questi tool offrivano opportunità senza precedenti per la fabbricazione di elementi geometricamente complessi e superfici non-standard.

Tuttavia, la loro operatività era ancora legata a doppio filo a processi per sottrazione e prefabbricazione. Con l'introduzione dei robot industriali nei laboratori di architettura, l'ambito della fabbricazione digitale si è allargato drasticamente.

A differenza della maggior parte delle CNC, come ad esempio le frese, i robot industriali consentono non solo di customizzare singole parti, ma di rivedere l'intera logica del processo di fabbricazione. La versatile, antropomorfa natura dei robot ha spinto studenti di architettura e ricercatori a progettare per queste macchine un'ampia varietà di tool che gli consentano di incollare, piegare, tagliare, riversare, disegnare, forare, avvolgere.

Nonostante si tratti ancora essenzialmente di un nuovo settore di ricerca, una quantità significativa di piccole ma sofisticate strutture è già stata realizzata, evidenziando come primo aspetto la flessibilità dei robot. Mostrando un elevato grado di differenziazione spaziale e strutturale, questi

progetti sperimentali suggeriscono già la possibilità di essere utilizzati anche ad una scala superiore per strutture portanti. Tuttavia, al momento l'applicazione su progetti a scala maggiore è stata esplorata solo vagamente.

### **Robotic vs. Conventional construction.**

Un esempio esplicativo sull'impiego del calcestruzzo armato su larga scala in tempi recenti, è la città di Singapore. Qui oltre l'80% degli edificati consiste in grattacieli, la maggior parte realizzata con sistemi costruttivi a grandi pannelli prefabbricati. Questa tecnologia, guidata da un'economia di scala, diventa vantaggiosa solo se gli stessi elementi vengono ripetuti più e più volte.

Da un punto di vista strutturale, la conseguenza più diretta è un insostenibile sovradimensionamento di molti degli elementi portanti, tutti ugualmente progettati per resistere alla condizione di carico più sfavorevole. La difficoltà nel creare variazioni di questi sistemi poi, non consente un'adeguata differenziazione spaziale e funzionale, finendo per generare in ultima istanza un ugualmente insostenibile ultra-semplificato, monouso e monotono tessuto urbano.

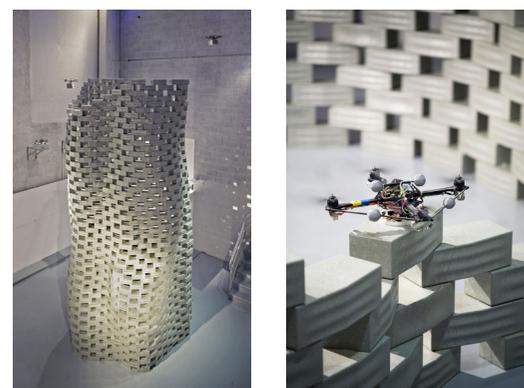
Un salto avanti da questa datata ideologia del *one-size-fits-all* verso un nuovo paradigma costruttivo basato su una fabbricazione tramite robot in-situ e flessibile, può inoltre promuovere una tettonica alternativa che incoraggi variazioni e differenziazioni invece di essere stritolata da semplificazione geometrica, standardizzazione e ripetizione. Le caratteristiche della fabbricazione non-standard, come dimostrato dai numerosi esempi a piccola scala già elaborati, lascia ben pochi dubbi riguardo alle sue potenzialità alla scala architettonica. Questo aspetto è sicuramente uno degli stimoli più grandi alla base di questa tesi. Nonostante, come è facile immaginare, questo passaggio di scala imponga questioni complesse da affrontare.

**Robot vs. Automated systems.** Se i robot a 6 assi, utilizzati già da anni nell'industria manifatturiera, vogliono essere adottati adesso per la costruzione su larga scala, è necessario

riconsiderare i processi materiali conosciuti. La logica costruttiva ed il sistema materiale devono essere studiati per assecondare limiti ed abilità dei robot. Ad esempio, infatti, la dimensione dei robot può costituire sia un vincolo che un vantaggio.

Da un lato la limitata capacità di carico non consente l'impiego di elementi di peso e dimensioni considerevoli, correntemente utilizzati in edilizia. Dall'altro, la taglia ridotta li rende facilmente governabili anche sul sito di costruzione. Di conseguenza, se montati su piattaforme mobili e dotati di sensori, non è utopia pensare a diversi robot che si muovono autonomamente in ambienti con condizioni al contorno complesse come ad esempio i cantieri contemporanei, lavorando in parallelo. Volker Helm, presso il laboratorio di fabbricazione digitale dell'ETH di Zurigo, si sta occupando proprio di questo. Questo approccio concettuale differisce enormemente da quanto possibile ad esempio con frese CNC. In quel caso infatti, è inevitabile effettuare una scelta: scalare in grande i tool oltre le dimensioni dell'impronta dell'edificio come sperimentato in Giappone dalla Obayashi Corporation, oppure suddividere gli elementi costruttivi in parti di dimensioni gestibili direttamente dalle macchine, con conseguenti problemi di segmentazione, trasporto ed organizzazione del cantiere.

Studi recenti relativi a dimensioni, peso e portata hanno portato alla conclusione che al fine di essere efficienti e competitivi, un processo costruttivo basato sui robot industriali debba essere leggero, costituito da piccoli elementi di dimensioni paragonabili e prevedere collaborazione e predisposizione a lavorare in parallelo di diversi robot. Tuttavia, l'aspetto più importante che ne garantisce la sostenibilità e ne giustifica l'utilizzo è la capacità di generare un *value-adding effect*. Esempi di sistemi costruttivi completamente automatizzati, come quello prima citato della Obayashi falliscono proprio su questo punto, enfatizzando semplicemente la sostituzione della manodopera con l'utilizzo di nuove macchine. Nello specifico, quei sistemi non sfruttano il reale potenziale dell'automatizzazione dei processi, sottostimano la complessità del



Dall'alto, da sinistra, Obayashi Corporation Automated Systems: conceptual idea (1985), Big Canopy (1997), Tokyo Sky Tree partly automated (2010)  
ETH Gramazio & Kohler Research: sistemi robotici di fabbricazione individuali e collaborativi, 2010-2016



processo costruttivo e trascurano che in alcuni casi la manodopera non è solo necessaria, ma anche più efficiente. Di conseguenza, è fondamentale veicolare le effettive potenzialità dei robot per lo sviluppo di differenti processi costruttivi, in cui vengono adottati laddove hanno davvero prestazioni migliori di persone e strumenti convenzionali.

**Why fluid materials.** Ad un primo sguardo, il requisito di leggerezza prima elencato può sembrare contraddittorio, dal momento che di norma i materiali utilizzati per realizzare oggetti su grande scala sono tutto tranne che piccoli e leggeri. Tuttavia, questo problema può essere bypassato considerando la possibilità di non processare l'intera massa degli elementi tramite il robot, ma soltanto quella necessaria a definirne con precisione la geometria. In questo modo è superato il vincolo imposto dalla limitata portata di questi strumenti, e contemporaneamente si riescono a massimizzare i benefici derivanti dalla loro agilità. In questo senso, i materiali fluidi si rivelano particolarmente adatti a questo tipo di processo, calcestruzzo in primis, in quanto per la loro natura è possibile separare la pesante massa strutturale dalla leggera cassetta che ne definisce la forma. In altre parole, è possibile scindere massa ed informazione. Immaginando in un futuro prossimo uno scenario di collaborazione tra manodopera, strumenti convenzionali e robot, le tradizionali pompe per il getto del calcestruzzo possono continuare a trasportare e rilasciare la materia strutturale, mentre i robot possono finalmente liberare la sua capacità intrinseca di assumere qualsiasi forma desiderata attraverso leggere casseforme con geometria complessa in alta risoluzione. Come detto più volte in precedenza, attualmente questa sua potenzialità rimane spesso inespressa proprio a causa dei costi proibitivi di casseforme customizzate. Anche le opere pionieristiche del ventesimo secolo si sono inevitabilmente scontrate con questo problema: l'unica eccezione significativa per numero di applicazioni trovate è il Sistema Nervi, in cui le casseforme erano comunque assemblate a mano. Negli ultimi anni, i progressi nella elaborazione e gestione digitale di superfici

complesse da un lato e la possibilità di controllare con precisione il taglio di polistirene dall'altro, ha contribuito a sviluppare una tecnica che combina casseri standard e stampi personalizzati. Questa costituisce, ad oggi, lo stato dell'arte e l'unica possibilità economicamente sostenibile, limitatamente a certe categorie di oggetti e budget.

**No more formworks: approcci nell'ultimo decennio.**

Tuttavia, nell'ultimo decennio, imprese di costruzioni e ricercatori hanno condotto studi approfonditi per eliminare interamente il bisogno di casseri. Nonostante vi siano alcune differenze fra essi, questi approcci condividono generalmente l'idea di stampare direttamente in 3D, layer per layer, materiali fluidi a base cementizia. Se da un lato questi tentativi forniscono buone indicazioni riguardo la possibilità di realizzare superfici complesse interamente waste-free, dall'altro mostrano criticità. Ad esempio, il processo di idratazione del cemento è di difficile controllo, e causa non pochi problemi di adesione tra strati successivi di deposizione. In caso di tempistiche di getto inadeguate, questi non si connettono sufficientemente, trasformando il materiale da isotropo ad anisotropo con conseguente peggioramento del comportamento meccanico. Inoltre, l'interasse tra i layer, grado di risoluzione della superficie e tempo di stampa sono parametri strettamente connessi: pertanto, al fine di avere una superficie liscia e ben approssimata, sarebbe necessario operare con interassi estremamente ridotti, aumentando così esponenzialmente il tempo di produzione degli oggetti. Questi due aspetti sono tutt'ora irrisolti, e costituiscono la ragione per cui questi approcci sono stati momentaneamente lasciati in sospeso.

**Releasing Complex Tectonics.** Partendo da questo background di sperimentazioni, il progetto di ricerca Releasing Complex Tectonics nasce con l'idea di sfruttare per la creazione della cassetta un'interessante tecnologia chiamata *leaking formwork*. Qui il calcestruzzo è gettato all'interno di un cassero ondulato, costituito da pannelli di materiale plastico forati, che consente la realizzazione di pareti a singola curvatura. Il calcestruzzo, nello specifico,

compattandosi fuoriesce dai fori ricoprendo il cassero. Successivamente, le superfici sono levigate a mano risultando così perfettamente lisce. In RCT, invece, il materiale rilasciato è estruso liberamente nello spazio, operazione controllata con precisione dal robot, creando in questo modo mesh tridimensionali che replicano, con l'approssimazione voluta, le superfici di progetto.

Le prove in laboratorio sono state effettuate con polimeri termoplastici: il loro raffreddamento quasi istantaneo e geometricamente stabile garantisce un elevato controllo topologico sui nodi della mesh, rendendo possibile la libera orditura di



Sample 1, 3D Printed Concrete, Skanska + Foster & Partners, 2014



Dettaglio Sample 1



Dettaglio Sample 2, 3D Printed Concrete, Skanska + Foster & Partners, 2014

strutture nello spazio. Il passaggio concettuale da deposizione per layer ad estrusione nello spazio ha numerose implicazioni degne di nota. Laddove la prima rimane generica, limitandosi alla riproduzione o rappresentazione di forme, la seconda diventa specifica per ogni particolare processo costruttivo. Per prima cosa, mentre nel primo caso si rilascia materiale con proprietà invariabili, nel secondo è possibile modulare la densità della mesh sia in relazione alla definizione cercata, sia sulla base delle forze che agiscono staticamente sull'elemento finito e durante la fase di getto. Inoltre, realizzando idonei effettori, è possibile rilasciare materiali con caratteristiche meccaniche non trascurabili rispetto al calcestruzzo. In questo modo, le mesh tridimensionali non rivestiranno più la sola funzione di *leaking formwork*, ma si attiveranno tensionalmente, fornendo un contributo di resistenza paragonabile alle convenzionali barre metalliche. Le mesh inoltre, non solo sono malleabili rispetto alle variazioni locali di stress e curvatura, ma consentono anche l'inserimento di cavità al fine realizzare strutture porose alleggerite. Oltre a questi vantaggi funzionali, infine, differenziare la densità della mesh genera avanzati effetti materiali, ad esempio impedendone il raggiungimento di alcune parti mediante raffittimento o, viceversa, lasciando alcune maglie troppo ampie per trattenerne il filling. Le implicazioni di carattere formale sono specifiche di questo processo, e non possono in alcun modo essere ottenute mediante sistemi di cassetta convenzionali. Le tradizionali costruzioni in materiale fluido rinforzato richiedono, come noto, una lunga sequenza di operazioni: prefabbricazione dei casseri e loro trasporto, organizzazione del cantiere, piegatura e stoccaggio degli elementi di rinforzo, getto e presa del materiale costitutivo, rimozione e lavaggio dei casseri, finiture superficiali. Al contrario, estrudendo direttamente in-situ la mesh di cassetta (eventualmente con la funzione di rinforzo integrata) tramite robot, è possibile condensare molte di queste operazioni in un'unica fase, raggiungendo così una maggiore varietà e complessità di output a fronte di una simultanea semplificazione dell'intero processo. In ottica futura poi, aspetti come la differenziazione programmatica degli edifici, l'economia e la conseguente riduzione di materiale di scarto

da gestire rappresentano esigenze sempre più pressanti; pertanto lo sviluppo di un processo robotico additivo, *waste-free*, *material-efficient* ed idoneo ad un aumento progressivo della variazione architettonica degli oggetti progettati è assolutamente auspicabile anche da questi punti di vista. Infine, è opportuno sottolineare come questo la logica di questo processo possa offrire vantaggi anche alla realizzazione di oggetti semplici con geometria prismatica, agevolando la concentrazione di materiale nelle zone più sollecitate e svuotando, al contrario, le parti meno coinvolte dal punto di vista tensionale.



Leaking formwork: getto del materiale fluido di filling



Leaking formwork: fuoriuscita del materiale dai fori del cassero



Leaking formwork: levigatura superficie esterna

| 2.1

# MESH M1

## MODELLO DIGITALE - DEFINIZIONE SUPERFICI

Questo paragrafo contiene le convenzioni adottate, le ipotesi alla base del progetto e l'analisi approfondita della logica con cui viene modellata la mesh di partenza in relazione alla geometria delle superfici di input.

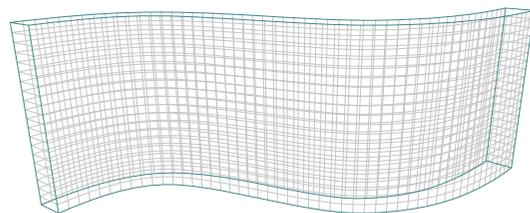
**Superfici di input.** La prima fase del processo consiste nella modellazione digitale di una mesh tridimensionale che riproduca con sufficiente accuratezza la superficie di input.

In questa fase, lo studio verte principalmente sulla ricerca delle logiche generative e delle loro conseguenti esplicazioni geometriche, valutando ad ogni step possibili elementi di criticità rispetto alle cinematiche del robot. Per il momento, nessuna variabile (stress agenti, proprietà materiale estruso, curvatura limite) viene presa in considerazione: il problema è qui esclusivamente di natura geometrica. In altre parole, si vuole sviluppare un "reticolo minimo", all'interno del quale saranno inserite le opportune variazioni locali, frutto di analisi e simulazioni successive.

Il problema è stato affrontato analizzando superfici di complessità crescente. Questa impostazione consente una pianificazione più rapida della logica di costruzione della mesh e della gerarchizzazione dei suoi elementi assieme ad una maggiore chiarezza nella lettura degli output e nell'evidenziazione di eventuali criticità.

### Caso di studio I.

Il primo caso esaminato è un oggetto tridimensionale geometricamente elementare caratterizzato da:



1

. parallelismo facce  $V_{(0)} // V_{(1)}$  

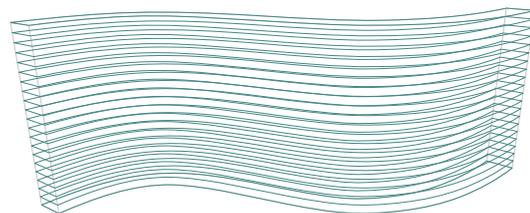
. perfetta verticalità  $k_z = 0$  

. assenza irrigidimenti  $d(V_{(0)} - V_{(1)}) < i_{max, m}$  

Quest'ultima condizione, in verità, rimarrà invariata anche nel caso le due facce si trovino ad una distanza tale da causare una flessione del filamento estruso di collegamento: ciò accade perchè le caratteristiche meccaniche di queste sezioni della mesh, relativamente alla funzione specifica che ricoprono, si modificano in maniera trascurabile in seguito a questa deformazione locale.

La mesh desiderata si ottiene per sovrapposizione di piani orizzontali, tra loro paralleli, adeguatamente connessi. Definita la superficie da riprodurre (fig.1) è dunque necessario determinare queste sezioni: il loro interasse è costante e ragionevolmente piccolo per approssimare efficacemente la curvatura della superficie lungo l'asse verticale (fig.2).

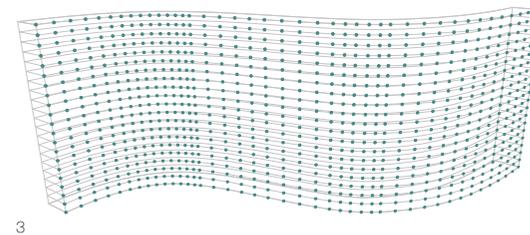
Il loro perimetro è poi suddiviso nello stesso numero di parti, scelta fatta al fine di facilitare i collegamenti trasversali. Fermo restando che il numero totale di punti di suddivisione sia fisso, la loro distribuzione varia sezione per sezione,



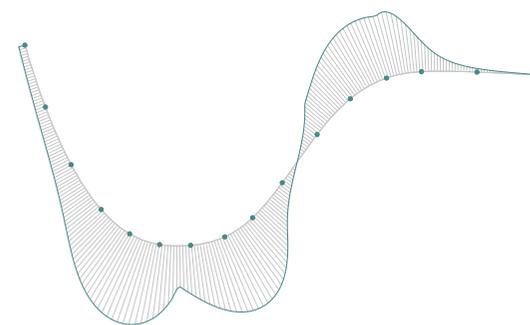
2

adattandosi alla morfologia della superficie (fig.3): la distanza tra due punti consecutivi è inversamente proporzionale alla curvatura locale, e non supera in nessun caso l'interasse massimo stabilito a monte per il materiale adottato (fig.4). Nel caso di oggetti bidimensionali, in cui la profondità massima risulti minore a tale interasse, l'insieme dei punti così trovati contiene già di per sé tutte le informazioni necessarie per la costruzione della mesh.

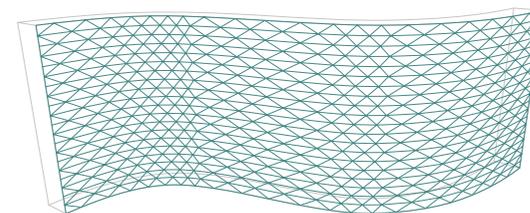
Gli step successivi costituiscono il fulcro dell'algoritmo e consistono nel disegno delle polilinee di collegamento dei punti (fig.6) al fine di creare le unità elementari della struttura reticolare, assecondando al tempo stesso le caratteristiche cinematiche del robot. Nel caso specifico, a titolo di esempio, si è scelto di procedere con la soluzione più flessibile: maglie triangolari e, di conseguenza, unità tetraedriche (fig.7). Qualora invece si scelgano soluzioni di minore complessità, potrebbe rivelarsi necessario definire pattern di deselezione dei punti superflui.



3



4



5

### Caso di studio II.

In questo caso gli oggetti hanno le due facce opposte non più uguali e parallele, ma con geometrie svincolate l'una dall'altra (fig.8).

In altre parole, viene quindi a mancare la prima condizione  $V_{(0)} // V_{(1)}$ . La conseguenza principale riguarda le connessioni trasversali ed il rapporto tra le maglie triangolari delle due pareti. Nel primo caso queste erano sfasate di metà modulo, in modo tale da avere maggiore ammortamento.

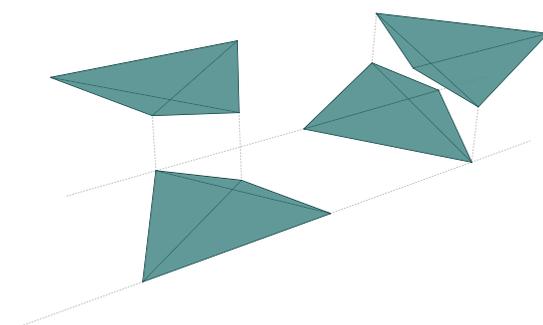
Al fine di ottenere questo effetto, i punti erano selezionati con un pattern del tipo T|TF su  $V_{(0)}$  e T|TF su  $V_{(1)}$  (fig.9). Qui invece, entrambe le pareti hanno lo stesso pattern del tipo T|TF principalmente per facilitarne le connessioni trasversali.

Poiché infatti la densità dei punti sulle curve è individuata in relazione alla curvatura locale, dal momento che queste possono avere geometrie differenti non è più garantita l'equidistanza tra punti con la stessa posizione. Aggiungere un ulteriore sfasamento, con la differenziazione dei pattern di selezione, sarebbe quindi controproducente.

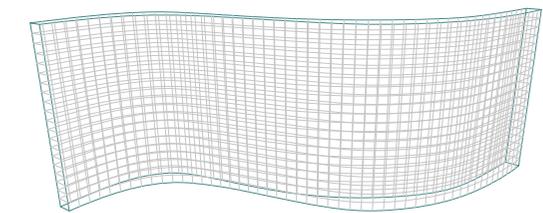
La scelta di unificarli, come si può notare in fig.10, crea infatti maglie trasversali molto più regolari.



6



7



8

### Caso di studio III.

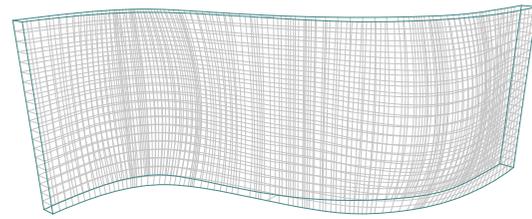
Gli oggetti qui trattati presentano una complessità ancora maggiore e costituiscono il target di questa ricerca. In aggiunta alle caratteristiche del caso II, dispongono anche di curvatura variabile lungo l'asse z. In altre parole, viene meno anche la seconda condizione  $k_z = 0$ .

Se prima la suddivisione dell'oggetto verticale lungo l'asse z aveva come unico vincolo quello di impedire la fuoriuscita di un eventuale materiale di filling, con le sezioni orizzontali in fig.2 tra loro identiche, adesso deve essere tale da garantire una accurata riproduzione della geometria di input.

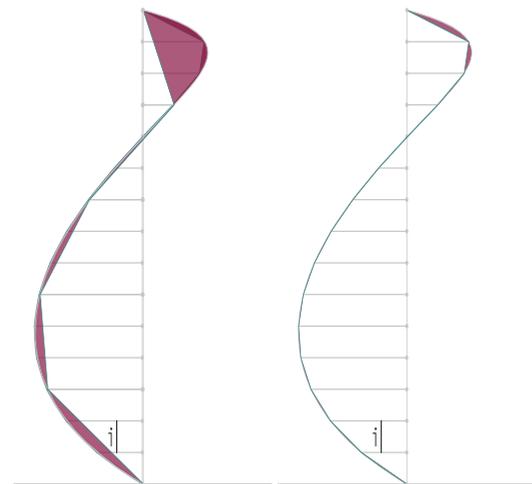
Per questa ragione è opportuno scegliere un interasse adeguatamente ridotto ma comunque non inferiore al minimo consentito dalle caratteristiche del materiale.

È opportuno specificare che in questa fase i ragionamenti sono di carattere prettamente qualitativo, e che la determinazione analitica degli intervalli entro cui possono oscillare gli interassi è rimandata alle successive fasi di lavoro a contatto col tool.

Per il momento, ponendosi come obiettivo finale la realizzazione di elementi divisori in materiale composito con altezze comprese tra 1.2 e 3.5m, sono stati considerati interassi compresi tra 15 e

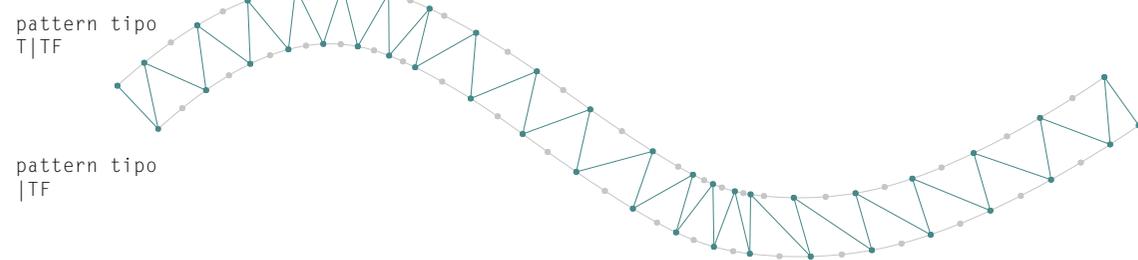


11

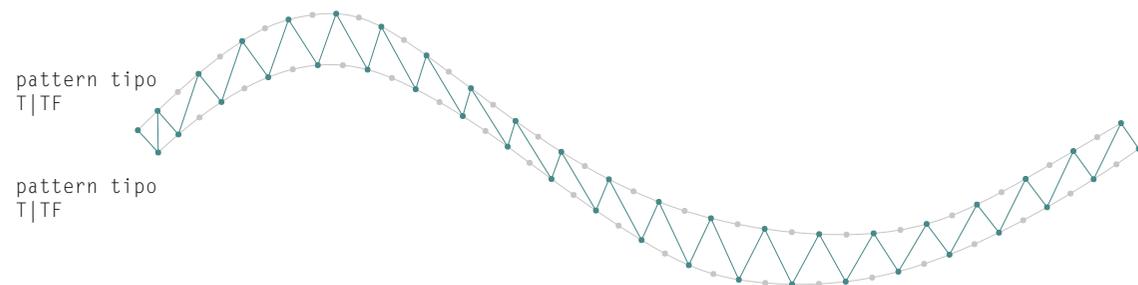


12

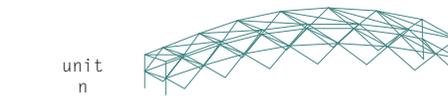
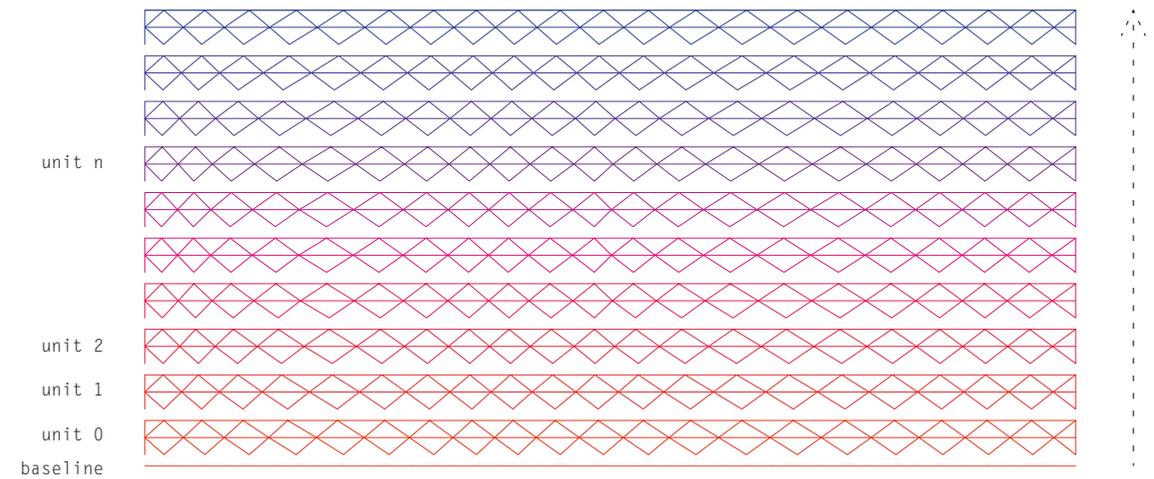
60mm. La scelta dell'interasse viene fatta sulla base della situazione più sfavorevole, in termini di curvatura, presente sulle due superfici di parete (fig.12).



9



10



13

### Organizzazione interna - Sequenza di fabbricazione.

In virtù della potenziale complessità geometrica che si può sviluppare negli oggetti precedentemente classificati, è opportuno definire un principio di organizzazione interna, che possa regolarne e facilitarne anche l'estrusione in un secondo momento. Nello specifico, queste mesh si ottengono dalla sovrapposizione di una serie di elementi (n), identicamente realizzati, ciascuno dei quali è costituito da due layer, tra loro duali (n.0, n.1), che generano un ordine completo di maglie triangolari. Il primo di questi si appoggia sull'impronta a terra dell'oggetto.

Le regole cui rispondono sono le seguenti:

- . ogni layer è scomponibile in 3 polilinee continue, due di parete (n.0.0, n.0.1 per il primo layer / n.1.0, n.1.1 per il secondo) ed una che funge da collegamento trasversale tra esse (n.0.2 / n.1.2)

- . ciascuna polilinea segue un percorso che considera l'impossibilità del robot di estrudere



layer n.1



layer n.0



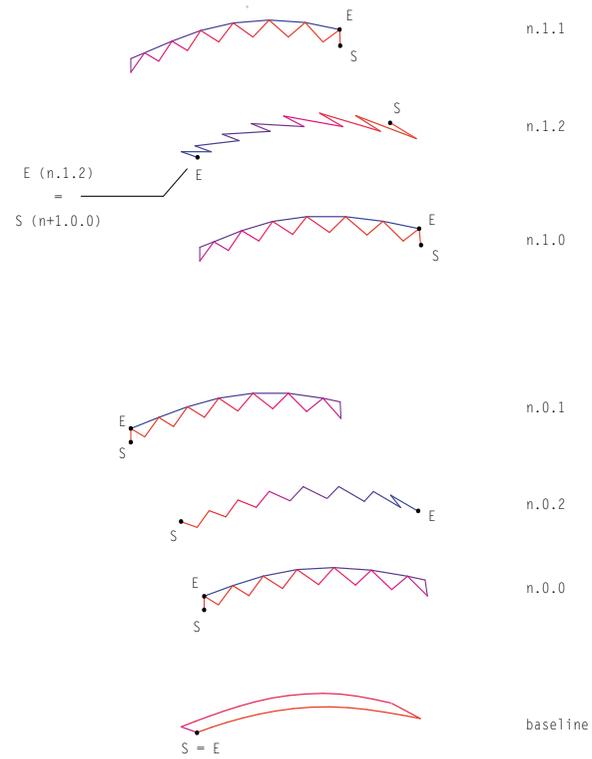
baseline

segmenti perfettamente verticali dall'altro verso il basso

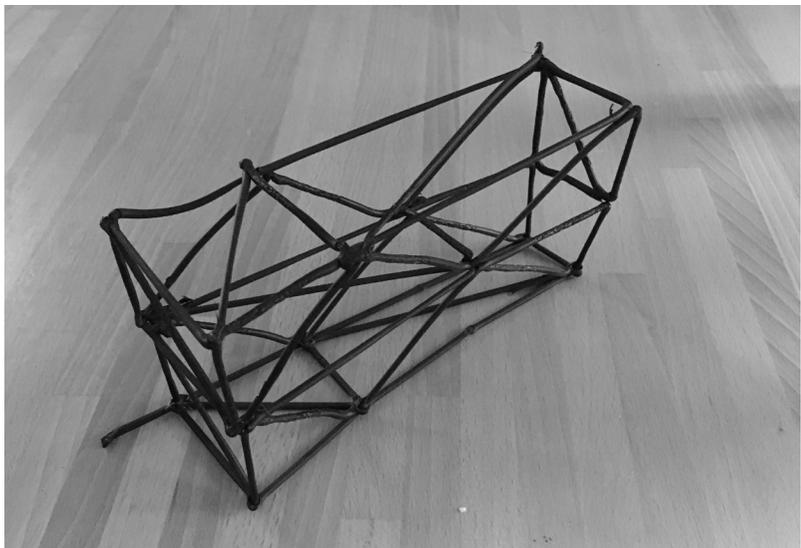
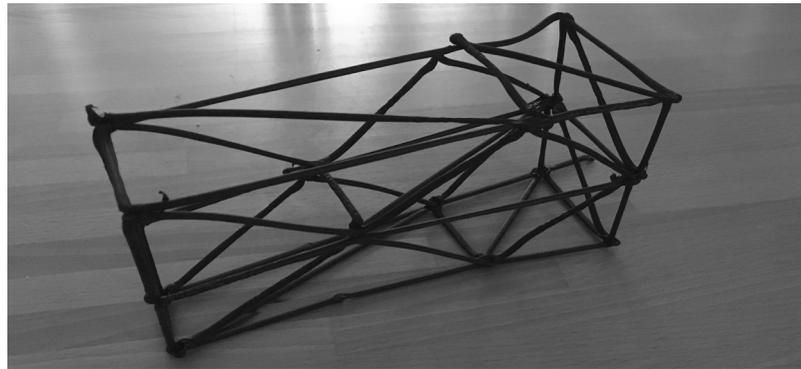
- . la sequenza secondo cui vengono estruse le polilinee è stata pensata con l'obiettivo di ridurre al massimo gli spostamenti senza rilascio di filamento. In ogni elemento ce ne sono 2, uno per layer, tra n.0.0 e n.0.1 e tra n.1.0 e n.1.1

- . in ogni layer, i componenti sul piano verticale del tipo n.-.0 sono realizzati prima di quelli del tipo n.-.1 perché in questo modo l'ingombro del nozzle non interferisce con la corretta deposizione del materiale

Gli ingombri e le caratteristiche tecniche di robot e materiali utilizzati saranno descritti nel paragrafo successivo.



14a

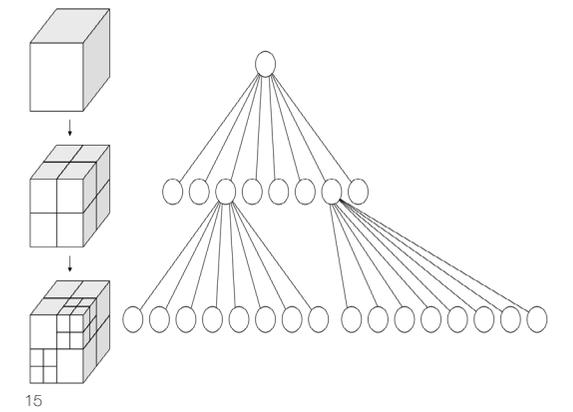


14b

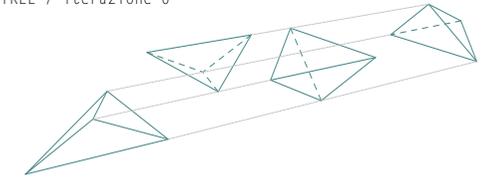
### Adeguamenti locali - Octree.

All'interno del processo in oggetto è stato ad ogni modo implementato un sistema di raffittimento locale, in grado di dialogare e rispondere a particolari condizioni di curvatura e/o sollecitazione. Essendo la mesh costituita da unità elementari tetraedriche, il modello di riferimento utilizzato è quello degli octree. Un octree è una struttura dati ad albero non bilanciata nella quale tutti i nodi interni hanno esattamente otto nodi figli (fig.15). Gli octree sono spesso usati per partizionare uno spazio tridimensionale suddividendolo ricorsivamente in otto cubi. In base a questa analogia, i tetraedri rappresentano i singoli nodi di partenza della struttura ad albero e, ciascuno di essi sviluppa ad ogni iterazione quattro tetraedri figli. L'aumento di densità locale, e quindi il numero di iterazioni del sistema, è sempre proporzionale ai dati di input, pur senza oltrepassare mai i limiti geometrici imposti da tool e materiale (fig.16). In questo senso, l'insieme dei tetraedri di

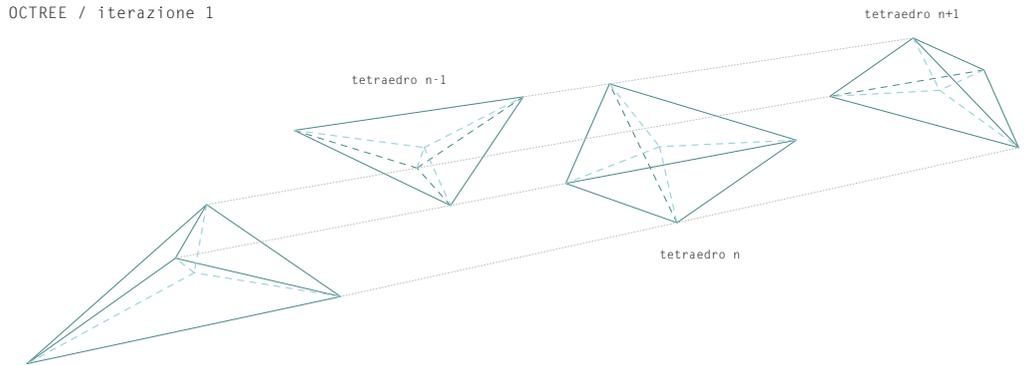
partenza si configura come una sorta di "mesh minima", all'interno della quale si creano effetti di differenziazione in base agli specifici campi vettoriali considerati (ad es. curvatura, sollecitazione).



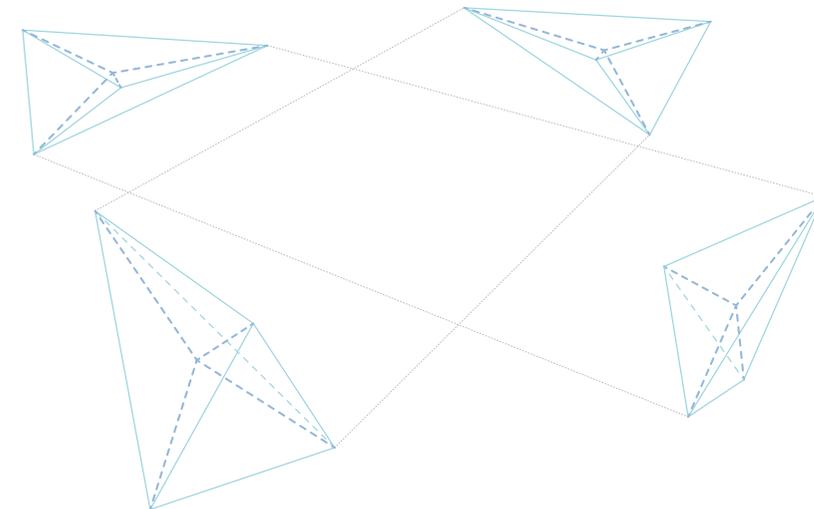
OCTREE / iterazione 0



OCTREE / iterazione 1



OCTREE / iterazione 2 . tetraedro n



16

| 2.2

# TOOLS

## ROBOT - MATERIALI UTILIZZATI

Questo paragrafo descrive le caratteristiche del robot e del suo estrusore utilizzato per i test, il suo rapporto con il modello digitale, il materiale di estrusione scelto per la realizzazione della mesh e le sue proprietà.

**Physical vs. Digital.** Come anticipato nei paragrafi precedenti, una parte fondamentale di questa ricerca è stato il continuo lavoro di test e prototipazione, mediante robot, al fine di indagare le caratteristiche intrinseche al metodo di fabbricazione sviluppato, mantenendo e perfezionando di volta in volta la coerenza tra forma e processo.

In seguito ad ogni sessione di test, infatti, la geometria della mesh e la sua logica realizzativa sono stati sistematicamente rimodellati in base ai feedback provenienti da tool e materiale.

In questo senso, il modello digitale è largamente influenzato dalle risposte specifiche date dai mezzi fisici di produzione, non interamente settabili a priori, e viene implementato di conseguenza.

I test, svolti presso il laboratorio digifabTURInG di Torino, sono stati realizzati con la seguente strumentazione.

**Braccio robotico Comau NJ 60.** Al fine di integrare la tecnica di fabbricazione nel processo di progettazione è necessario conoscere a fondo le tecnologie con le quali si realizzerà poi l'oggetto architettonico. Il braccio robotico in dotazione al digifabTURInG è il modello NJ 60 prodotto da Comau (fig.1).

Questo robot, costituito da 6 assi, in virtù del peso ridotto (645kg) consente un ottimo controllo della traiettoria, spostamenti veloci e quindi tempi di ciclo relativamente brevi. Ha un carico massimo al polso, ossia in corrispondenza della sua parte terminale, di 60kg ed uno sbracciamento



1a



1b



1c

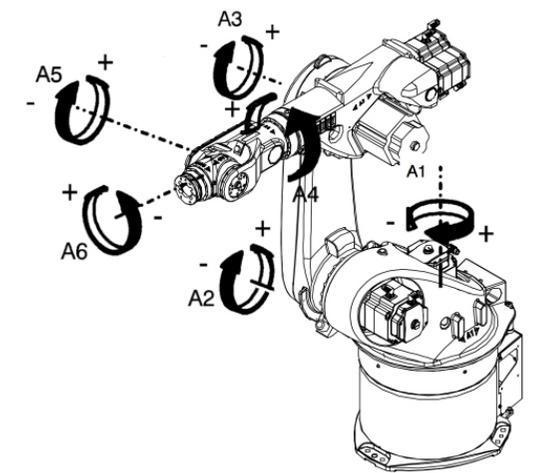
massimo orizzontale di di 2285mm: questo parametro ovviamente vincola di conseguenza le caratteristiche dimensionali degli oggetti da realizzare e le loro eventuali suddivisioni (fig.2).

Questo valore risulta già più che soddisfacente per i prototipi necessari, anche lavorando alla scala architettonica. Ad ogni modo, sarebbe comunque ipotizzabile costruire aldilà di questo limite, sia mediante l'utilizzo di più robot in parallelo, sia garantendo capacità di spostamento al singolo robot, ad esempio facendolo scorrere su binari.

Questa tipologia di robot, ampiamenti diffusa nei settori meccanici, si sta ora rapidamente diffondendo anche in campo architettonico, grazie soprattutto a numerose sperimentazioni svolte soprattutto in ambito accademico e nei settori di ricerca più avanzati (ETH, Bartlett School of Architecture).

Per meglio capirne il funzionamento bisogna iniziare dai parametri principali sui quali si può agire. I gradi di libertà (e quindi gli input necessari per comandarlo) sono le sei rotazioni attraverso le quali si individua non solo una posizione univoca nello spazio, ma anche l'orientamento con cui lo si vuole raggiungere (il punto esatto viene quindi individuato attraverso una terna di assi, e quindi un piano XY più la normale Z).

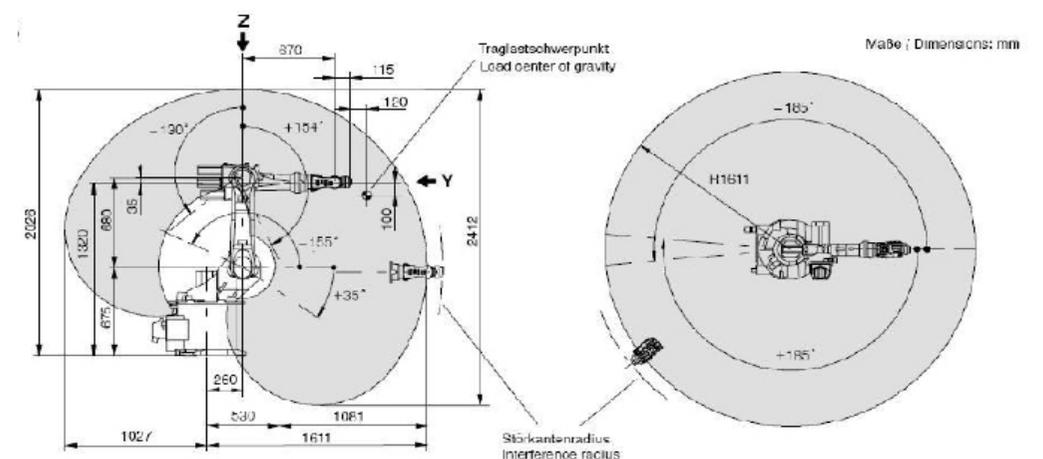
Il fulcro del funzionamento di questo robot è essenzialmente legato al linguaggio attraverso il quale si comunica con esso (gCode). Per dire al terminale di spostarsi nel generico punto A è



3

quindi necessario individuare il piano corretto rappresentante il punto stesso e l'orientamento con cui lo si vuole raggiungere dopodichè, attraverso algoritmi di cinematica inversa è possibile ricavare le sei rotazioni che indicano univocamente al robot il punto e l'orientamento con cui raggiungerlo.

L'individuazione dei piani (e dei punti) necessari per trovare gli angoli è uno dei punti fondamentali per il corretto utilizzo del macchinario. In questa fase bisogna infatti prestare attenzione ad evitare criticità (meglio definite come singolarità), ovvero serie di punti che non descrivono univocamente un percorso. Ad esempio la presenza di tre punti allineati è una singolarità, perchè in quel caso attraverso gli algoritmi di cinematica inversa si ricavano più possibilità di movimento tra quei punti. In fig.3 sono rappresentate le sei rotazioni (gradi di libertà) che è necessario comunicare al robot per indicare il punto in cui spostarsi. Si può notare come il funzionamento sia ispirato a quello del



2



4

braccio umano; due angoli alla base (A1 e A2), come nella spalla, un angolo (A3) nel nodo equivalente al gomito e tre nella parte terminale (A4, A5 ed A6) paragonabile al polso.

**Estrusore.** Avendo pensato per la fabbricazione all'utilizzo della tecnologia Fusion Deposition Modeling è diventata necessaria una accurata fase di ricerca e di studio sull'effettore da utilizzare.

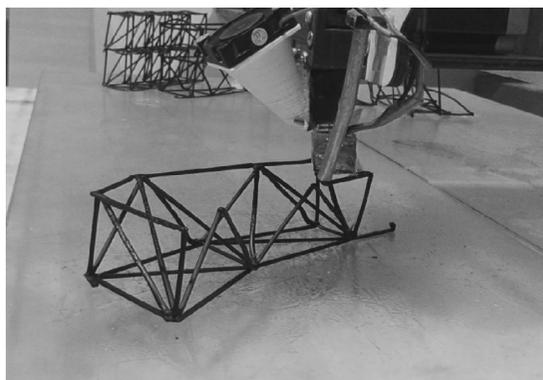
La FDM, molto diffusa nel campo della prototipazione rapida, prevede due variazioni di stato per il materiale: da solido a viscoso (attraverso il riscaldamento) e poi di nuovo a solido (attraverso il raffreddamento forzato o per contatto con l'aria). E' una tecnologia molto dispendiosa perchè prevede il riscaldamento del materiale ad alte temperature per permetterne la fusione. L'effettore è un elemento fondamentale all'interno del processo perchè la sua forma e le sue capacità estrusive possono incidere in maniera estremamente rilevante sul risultato finale.

Quello adottato, interamente customizzato, è a filo con nozzle di diametro pari a 2.85 mm. Rispetto ad un estrusore a pellet, il controllo tramite gCode e l'elettronica risultano notevolmente più semplici, mentre ci sono meno possibilità di variazione in termini di spessore del materiale estruso. Tuttavia si è privilegiato il primo aspetto al fine di avere protocolli più snelli per il suo funzionamento. Avere una maggiore facilità di

stampa è infatti un vantaggio impagabile: significa avere più modelli fisici di studio per il processo e quindi una maggiore accuratezza nella sua definizione. Nella sua realizzazione si è cercato di creare il minimo ingombro possibile in prossimità dell'ugello, fissando tutti gli apparati di controllo e di alimentazione nella parte superiore dell'estrusore. Il sistema di raffreddamento è qui presente in una sua prima versione (successivamente si vedrà, sarà perfezionato) ed è costituito da un singolo tubicino metallico sul lato dx del nozzle, se guardato frontalmente: il secondo tubicino, in plastica ed estremamente flessibile, è già predisposto ma non ancora operativo. Il controllo delle temperature è affidato ad una scheda Arduino (fig.4-8).

**Materiali utilizzati.** I materiali valutati e poi adottati sono tutti di natura polimerica. Questo per la loro elevata facilità di estrusione, dovuta essenzialmente alla loro bassa capacità termica ed al loro rapido raffreddamento. Fabbricare un estrusore per materiali con elevate prestazioni dal punto di vista meccanico (ad esempio acciaio, titanio, fibre di carbonio), sarebbe stato infatti incompatibile con questa ricerca sia per le tempistiche sia dal punto di vista economico.

In virtù di queste considerazioni, la scelta è stata limitata essenzialmente a PLA ed ABS. Sono entrambi polimeri di natura termoplastica, ovvero polimeri formati da catene per lo più lineari, non



5



6



7

legate le une alle altre, quindi non reticolate. Per questo, rispondono ad un aumento di temperatura con una diminuzione di viscosità e quindi con una maggiore propensione alla formatura. Entro certi limiti, il *ciclo riscaldamento-flusso-raffreddamento* può essere ripetuto più volte in quanto la transizione tra lo stato plastico e quello vetroso è di carattere fisico e non chimico, quindi reversibile. Questo aspetto è importante perchè fa capire che il polimero se lavorato allo stato di transizione vetroso mantiene le proprietà meccaniche originarie una volta indurito, mentre se lavorato allo stato fuso si ha decadimento comunque limitato. Nello specifico, l'acrilonitrile-butadiene-stirene o ABS è una miscela di più polimeri: gomma butadienica, acrilonitrile e stirene. L'idea di creare delle miscele nasce dall'esigenza di migliorare le proprietà dei singoli componenti. Dotato di grande leggerezza, paragonabile al PLA (1.0-1.4g/cm<sup>3</sup>), i vantaggi rispetto a quest'ultimo sono dati dal suo comportamento meccanico e dalla buona propensione a lavorare ad alte temperature, come avviene in fase d'estrusione (220-250°C). Inoltre ha un coefficiente di attrito inferiore che lo rende più facilmente estraibile.

Dal punto di vista meccanico presenta un comportamento tenace: si snerva per scorrimento in presenza di sforzi dell'ordine di 40-45 MPa e l'allungamento a rottura può arrivare fino al 34%. Il PLA ha invece un comportamento fragile: a parità di carico di snervamento, ha un allungamento a rottura nell'ordine del 5%.

Per quanto riguarda il comportamento ad alte temperature, come detto, l'ABS è più affidabile del PLA in quanto ha una temperatura di transizione vetroso pari a 105°C mentre quella del PLA è pari a 60°C. Di conseguenza, durante l'estrusione il PLA perde più rapidamente la propria integrità strutturale cominciando a incurvarsi e deformarsi, specialmente se sottoposto a carico.

Il vantaggio del PLA di fondere a temperatura più bassa invece non è rilevante in quanto l'estrusore utilizzato, la cui camera è riscaldata tramite termocoppia, è stato sviluppato per raggiungere in condizioni ordinarie temperature anche superiori

a 250°C. L'ABS, di contro, è invece più soggetto a ritiro a raffreddamento avvenuto: tuttavia, con alcuni semplici accorgimenti, è possibile arginare questo problema.

Relativamente al rapporto con l'ambiente circostante è opportuno sottolineare che resiste ad acqua, soluzioni saline acquose, acidi diluiti, soluzioni alcaline, idrocarburi saturi, benzina, oli minerali, grassi animali e vegetali, e presenta una buona resistenza all'invecchiamento.

Dal punto di vista estetico il PLA presenta sicuramente qualità migliori, presentando una superficie più omogenea e meno opaca. Ad ogni modo, entrambi i materiali una volta raffreddati possono essere trattati con sabbiatura e/o vapori di acetone al fine di ottenere superfici meno stratificate e più lucenti.

In base a queste considerazioni, pur trattandosi di due materiali entrambi adatti alla prototipazione rapida, è stato scelto l'ABS. Nello specifico, ABS tipo Form Futura Premium, con diametro del filamento in ingresso pari a 2.85mm.

## 2.3

# TEST SS.1

## PRIMA SESSIONE TEST SU M1

*Questo paragrafo descrive le condizioni iniziali della mesh sottoposta ai test, le problematiche emerse durante il loro svolgimento, gli accorgimenti adottati step-by-step per correggerle e le caratteristiche del modello digitale uscente.*

### SESSIONE 1 | TEST I

#### INPUT

##### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

La mesh utilizzata per questo test è stata modellata secondo le istruzioni riportate nel caso III del paragrafo 2.1 e visibili graficamente nelle sue fig.13-14. Le proprietà sono le seguenti.

HG1 direzione delle curve e loro ordine di estrusione studiati per avere massima continuità nel rilascio di materiale, riducendo al minimo il numero di spostamenti senza deposito. Nello specifico, in ciascuna elemento (coppia di layer) ne sono presenti 2, tra n.0.0 e n.0.1 e tra n.1.0 e n.1.1.

HG2 la mesh, anche nel caso di maggiore complessità, è sempre scomponibile in coppie di layer la cui logica di fabbricazione è ricorsiva: cambia la geometria ma ordine e numero di componenti sono gli stessi (fig.12, par.2.1)

HG3 l'orientamento del sample sul piano di lavoro non è arbitrario ma strettamente legato alle caratteristiche del robot ed alla geometria dell'estrusore. Premettendo che ciascun layer è composto da 3 polilinee di cui 2 prevedono spostamenti sul piano verticale YZ ed 1 sul piano orizzontale XY, si specifica che:

a. le polilinee sul piano orizzontale e (Z costante) non risentono degli ingombri in prossimità dell'ugello e possono essere sviluppate indistintamente in direzione  $Y_+$ / $Y_-$ .

b. tra le 2 polilinee sul piano verticale YZ deve essere realizzata prima quella meno distante al robot (X minore) e successivamente quella più distante (X maggiore), per evitare interferenze con la ventola conica di raffreddamento visibile in fig.3 par.2.2

c. entrambe le polilinee su YZ devono essere estruse obbligatoriamente in direzione  $Y_+$ , e quindi da sx verso dx guardando frontalmente il robot, per evitare interferenze con il tubo metallico del sistema di raffreddamento visibile in fig.4 par.2.2.

Questa condizione ha precedenza rispetto alla caratteristica 1: pertanto è preferibile avere uno spostamento in più senza rilascio di materiale rispetto ad avere curve sul piano verticale estruse in direzione  $Y_-$ .

HG4 la mesh di tipo M1 è pensata per essere una struttura isostatica ed è quindi costituita da un insieme di sole maglie triangolari

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 gli spostamenti senza rilascio di materiale sono assegnati al robot mediante la condizione: se  $d(p_{n-1} - p_n) > L_{max}$  allora  $F_{ext}=0$ , dove  $p_n$  indica il punto n-esimo della sequenza assegnata al robot,  $L_{max}$  il segmento più lungo tra tutte le polilinee,  $F_{ext}$  il parametro relativo al fattore di estrusione. Questo è possibile in virtù del fatto che entrambi gli spostamenti in questione sono tra un'estremità e l'altra della mesh

HR2 delay = 5s al termine di tutti i move up e move down al fine di facilitare la solidificazione del materiale ed evitare il trascinarsi del segmento precedente

HR3 delay planar = 0s

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è stato scelto isolando dall'intera mesh l'elemento n-esimo con le condizioni più sfavorevoli in termini di curvatura  $K_z$  e  $K_y$ . Un sample in grado di racchiudere in sé tutte le complessità che si possono riscontrare nella fabbricazione dell'oggetto madre. Successivamente, le modifiche e le migliorie qui definite saranno applicate a tutte le altre unità con le medesime criticità.

## OUTPUT

P1 la problematica principale riguarda l'estrusione di due aste diagonali consecutive, ossia quando ad un move down fa seguito un move up non perfettamente verticale: queste aste, infatti, anzichè formare i triangoli di facciata della mesh, si "stendono" e flettendosi creano un arco. Nello specifico, in prossimità del vertice, il materiale che viene rilasciato trascina con sé quello in fase di solidificazione impedendo la costruzione dell'angolo e creando appunto l'arco ribassato di cui sopra (fig.nn). In questo modo si ha uno spostamento del nodo rispetto alla posizione fissata nel modello digitale.

La mancata formazione del nodo, come in questo caso, o anche soltanto la sua semplice traslazione, hanno conseguenze talmente invasive da rendere nella maggior parte dei casi impossibile proseguire la fabbricazione (foto,nn). La solidità del nodo infatti, oltre che essere fondamentale per il comportamento statico della reticolare di partenza, è fondamentale perchè, formandosi piccole aggregazioni di materiale, possono essere assorbite quelle piccole imperfezioni geometriche di estrusione che inevitabilmente si creano. Nel caso in cui il nodo non dovesse formarsi, diventa quindi impossibile per il robot ritrovarlo ed ancorarsi nei passaggi successivi, causando il collasso dell'oggetto.

Ricerca un metodo efficace per mantenerne fissa la posizione anche nelle porzioni di mesh con aste i cui oggetti e le cui inclinazioni sono elevate rispetto alla verticale, sarà il fulcro di questa prima sessione di test.

L'inclinazione incide in maniera considerevole dal momento che, al suo aumentare, aumenta anche il contributo al ribaltamento della forza peso delle singole aste. Non a caso, i vertici delle aste perfettamente verticali alle estremità dei singoli layer sono sostanzialmente immobili (fig. nn). A parità di inclinazione, entra poi in gioco la lunghezza delle aste. Per definire con maggiore precisione le relazioni tra questi parametri e capire di conseguenza come adeguare il modello digitale a questo comportamento materiale, come sample

del test successivo è stato adottato un benchmark formato da maglie triangolari con luci ed angoli alla base di valore variabile.

I parametri su cui si è intervenuto sono: interassi  $i_x$ ,  $i_y$  tra le aste, tempi di delay al fine di avere maglie più compatte e nodi più saldi prima dei move down. Tuttavia, diminuendo l'interasse (fig. nn,  $i_x/2$   $i_y/2$ ) il problema rimane irrisolto in quanto alla problematica precedente si aggiunge il fatto che i nodi siano troppo densi per gli ingombri dell'estrusore, che ne sposta altri a sua volta.

P2 la seconda problematica è data dall'eccessiva lunghezza dei traversi planari (fig.nn). Il materiale depositato non solidifica abbastanza velocemente per supportare quelle distanze. Di conseguenza, si il traverso si flette, non chiude il nodo e si trascina.

P3 con l'attuale geometria di input non è stato trovato un metodo efficace per realizzare il layer 1 in direzione  $Y_+$  come previsto nella condizione HG3.c.

P4 la quarta problematica è data dal fatto che, al fine di limitare al massimo gli spostamenti senza deposizione (per tempo e qualità di stampa) e rispettare la condizione n legata alla geometria del robot, risulta impossibile chiudere tutte le diagonali di parete nella sezione trasversale. Nello specifico, vengono depositate a layer alterni facendo perdere l'isostaticità alla reticolare di partenza che diventa, così, leggermente labile (fig.nn).

## SESSIONE 1 | TEST II

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

HG1 Al fine di risolvere la problematica principale emersa nel TEST I, si è scelto di creare un apposito benchmark in cui composto dalla successione di più triangoli con angoli altezza costante ed angoli alla base di ampiezza crescente, con intervalli regolari. In questo modo è possibile capire qual'è il valore critico di ampiezza oltre il quale si manifesta il comportamento indesiderato e vederne l'evoluzione al variare delle condizioni. Nello specifico gli angoli valutati sono compresi tra i 35° e i 65° e l'altezza è di 40mm.

HG2 Aggiunta di tratto orizzontale di lunghezza pari ad 1cm prima di ogni move down. Questo accorgimento è stato pensato per evitare il trascinarsi del nodo in concomitanza con la partenza della diagonale verso il basso. In questo modo, infatti, dopo il delay in sommità, l'estrusore si sposta prima dal nodo e solo successivamente, senza ulteriore delay, inizia la sua discesa verso il punto successivo. Il fatto di non avere delay dopo il tratto orizzontale fa sì che questo sia ancora perfettamente fluido e si allinei perfettamente al tratto successivo. La parte di materiale in esubero viene poi assorbita nel nodo inferiore successivo durante il suo delay, offrendo un surplus di resistenza allo stesso.

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 delay = 7.5s dopo i move up e mode down. In precedenza il valore era di 5s. Il suo aumento si è reso necessario per avere materiale ad un maggiore grado di solidificazione e quindi con minore deformabilità durante l'estrusione del tratto successivo

HR2 delay planar = 0s

### SAMPLE

Il sample utilizzato è un benchmark contenente triangoli con stessa altezza pari a 40 mm ed angoli alla base di ampiezza progressiva, da 35° a 65° ad intervalli regolari di 5°. Sarà estruso lungo l'asse  $Y_+$  come tutti gli elementi sul piano verticale delle mesh studiate.

### OUTPUT

L'analisi svolta sul benchmark ha evidenziato che: P1 per angoli alla base  $\Phi < 45^\circ$  il problema relativo alla flessione dei segmenti e conseguente creazione dell'arco è ancora piuttosto accentuato. Nello specifico, gli abbassamenti sono nell'ordine di.

P2 per angoli alla base  $\Phi > 45^\circ$  si ha una traslazione lungo y del nodo rispetto alla posizione prevista nel modello digitale. Questo significa che aumentando l'ampiezza dell'angolo alla base si riduce la criticità dell'elemento, come era ipotizzabile, ma che il suo raffreddamento non è ancora ottimale al momento della partenza del move down. Nello specifico, per segmenti di  $L = 94\text{mm}$  si ha una traslazione totale, del valore di 1mcm mentre per segmenti di  $L = 57\text{mm}$  è di 7mm

Non essendo possibile ridurre la temperatura di uscita di materiale (si creerebbero problemi di adesione tra gli elementi), sono state improntate alcune modifiche sia alla geometria locale del sample al fine di bloccare ulteriormente la posizione dei suoi nodi, sia ai parametri di lavoro del robot per assecondare meglio le proprietà fisiche del materiale estruso.

## SESSIONE 1 | TEST III

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

HG1 inserimento di triangoli, sul piano XY, con il vertice coincidente con il punto di arrivo dei move up. Questi triangoli hanno  $b=8\text{mm}$  ed  $h=4\text{mm}$  e vengono realizzati dal robot in seguito al delay con lo scopo di deporre ulteriore materiale sul nodo evitando il suo trascinarsi. Viste le dimensioni ridotte e lo spessore del materiale in uscita, nel passaggio da modello digitale a quello fisico la loro forma si tradurrà in un semplice ispessimento del nodo e, di conseguenza, non causeranno cambiamenti apprezzabili rispetto alla geometria desiderata. In un primo momento erano stati pensati dei quadrati in grado di avvolgere l'intero nodo, e non solo una sua metà, ma sono bastate pochissime prove per osservare che in quel modo l'accumulo di materiale era eccessivo (5 punti aggiuntivi vs i 3 attuali). Queste geometrie ausiliarie non vengono applicate invece in seguito ai move down poiché in quel caso è ancora presente un esubero di materiale estruso in grado di aiutare la stabilità del nodo, come spiegato negli input del TEST II.

HG2 la lunghezza massima del tratto orizzontale aggiuntivo è ridotta da 10mm a 6 mm per attenuare la P2 - TEST II, mantenendo la funzione di spostamento rispetto al nodo. In particolare, è stato notato come la lunghezza realmente necessaria di questo tratto sia legata all'inclinazione dell'asta di move down: all'aumentare dell'angolo alla base, e quindi per aste più verticali, sono necessari tratti orizzontali più lunghi (maggiore spostamento dal nodo) e viceversa. Questa differenziazione è stata implementata e questi sono i valori di massimo e minimo:  $\Phi = 65^\circ \Delta X = 6\text{mm}$ ,  $\Phi = 35^\circ \Delta X = 3\text{mm}$ . I valori intermedi si determinano per interpolazione lineare.

Sintetizzando, i triangoli sono aggiunti per stabilizzare il nodo e quindi la precisione dell'asta di arrivo, il tratto orizzontale per evitare l'effetto trascinarsi ed avere un'asta di partenza rettilinea.

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 delay= 10s dopo i move up e mode down. Un ulteriore aumento si è reso necessario in seguito alle difficoltà ancora presenti nel raffreddamento dei nodi.

HR2 riduzione della velocità del braccio da  $n=3$  a  $n=2$  per favorire il raffreddamento. Questo parametro è legato tramite proporzionalità inversa al parametro  $F_{\text{ext}}$  introdotto in HR1 - TEST I, che dovrà essere quindi incrementato a  $F_{\text{ext}} = 0.135$  (in precedenza  $F_{\text{ext}} = 1$ ).

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è analogo a quello del TEST II, con inserite le geometrie ausiliarie descritte negli INPUT di TEST III.

### OUTPUT

Il modello fisico realizzato risponde con efficacia ai requisiti desiderati. La problematica legata alla flessione delle aste inclinate è qui molto contenuta, così come il problema di traslazione dei nodi. Il sample evidenzia una completa planarità sul piano YZ, come mostrato in fig. nn, e le maglie triangolari, al variare della loro "apertura", mantengono una definizione costante. Il passaggio successivo è verificare la risposta del sample originario (TEST I) all'applicazione degli accorgimenti sia geometrici che legati ai behaviours del robot qui sviluppati.

## SESSIONE 1 | TEST IV

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

Questo test ha la funzione di verificare che gli accorgimenti sviluppati sul benchmark nei test precedenti risultino efficaci anche una volta applicati al sample estratto dalla mesh originaria. Sulla base di quanto emerso nel corso dell'intera sessione, il modello digitale finale avrà le seguenti caratteristiche geometriche.

HG1 aggiunta di triangoli con  $b = 8\text{mm}$  ed  $h = 4\text{mm}$  con vertice coincidente col punto finale di ogni move up al fine di creare accumulo di materiale sul nodo e stabilizzarlo di conseguenza.

HG2 inserimento del tratto orizzontale, prima di ogni move down, di lunghezza proporzionale all'inclinazione dell'asta in questione ( $\Delta X = 3 - 6\text{mm}$ ). Questo tratto ha sempre la direzione dell'asta successiva di move down proiettata in pianta sul piano XY.

HG3 sopraelevazione dei punti che individuano i traversi orizzontali di  $\Delta Z = 1.5\text{mm}$  ad eccezione dello starting point del primo traverso, che deve necessariamente partire dal punto finale dell'asta precedente per non creare una discontinuità nel deposito di materiale. Questo accorgimento è stato sviluppato per dare la possibilità ai traversi di "appoggiarsi" sopra ai nodi precedentemente individuati, facilitando l'adesione ad essi. Senza questa modifica, infatti, il punto finale dei traversi si appoggierebbe alla superficie laterale del nodo con il rischio di spostarlo verso l'esterno ed anche l'ancoraggio risulterebbe molto più difficoltoso, col rischio concreto che non avvenga e si inneschi il trascinarsi del tratto precedente.

HG4 aggiunta di un segmento iniziale ausiliario, con lo scopo di avere una deposizione continua già in corrispondenza del primo nodo effettivo del sample.

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 delay = 10s dopo i move up e mode down

HR2 delay planar = 1.2s per facilitare l'adesione ai nodi anche durante la realizzazione dei tratti orizzontali.

HR3  $T = 237^\circ\text{C}$  per avere un filamento in uscita leggermente più fluido rendendo più semplice il suo ancoraggio. In precedenza  $T = 235^\circ\text{C}$ : è importante dosare con molta accortezza questo parametro in quanto le caratteristiche fisiche del materiale variano con estrema rapidità.

HR2 velocità del braccio confermata a  $n=2$  ed  $F_{\text{ext}} = 0.135$ , come da ultimo test.

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è analogo a quello relativo al TEST I ma con alcuni interassi scalati. Nello specifico, è stata raddoppiata l'altezza  $i_z$  ora pari a  $i_z = 40\text{mm}$ , in quanto delineatosi come parametro non critico, mentre è stata ridotta di 1/3 la dimensione trasversale massima  $i_x$ , passata da 90mm a 60mm per facilitare la realizzazione dei traversi orizzontali. All'interno di questa mesh sono poi stati implementati tutti gli accorgimenti HG1-HG4 prima descritti. foto

## OUTPUT

Il modello fisico realizzato risponde con efficacia ai requisiti desiderati. I risultati ed i miglioramenti ottenuti sul benchmark sono rimasti sostanzialmente immutati anche una volta applicati al sample estratto dalla mesh di partenza. Di conseguenza, tutti gli accorgimenti qui sviluppati saranno ora resi operativi sull'intera mesh, adeguando il processo che ne determina la generazione.

P1 Un aspetto tuttavia irrisolto riguarda l'ordine interno della mesh e la sequenza con cui ne vengono estruse le singole parti: è necessario trovare un metodo efficace per estrarre le sezioni verticali dei layer 1 in direzione  $Y_+$ , anche eventualmente modificando il principio di generazione della mesh.

P2 Osservando il modello finito, nonostante la geometria sia completamente coerente con quella del modello digitale, si è reso necessario studiare una strategia per rafforzare la tenuta trasversale del sample. Allo stato attuale, l'unico contributo è fornito dai traversi orizzontali di irrigidimento. Con l'aggiunta di nuovi elementi, si attenuerebbe anche la tendenza a traslare verso l'esterno dei nodi con forti aggetti in attesa delle connessioni successive.

## SESSIONE 1 | CONCLUSIONI

Il modello in uscita da questa prima sessione di test ha le seguenti caratteristiche.

- . baseline con segmento iniziale ausiliario, da qui classificata come elem. 0 della mesh, il cui end point coincide con lo starting della prima asta dell'elem. 1 e depositata in senso antiorario (il senso di deposizione sarebbe comunque arbitrario trattandosi di aste sul piano orizzontale XY).

- . n elementi sovrapposti con logica di estrusione ricorsiva, ciascuno costituito da due distinti layer con geometria duale

- . elementi sul piano verticale estrusi con ordine e direzione tali da ridurre al massimo le interferenze con l'ingombro dell'estrusore e dei suoi componenti.

Nello specifico: estrusione in direzione  $Y_+$  per la presenza del tubo di raffreddamento metallico e dalla polilinea più lontana a quella più vicina al braccio e quindi in direzione  $X_+$  (la ventola di questa sessione di test sarà sostituita con una di dimensioni inferiori e spostata più in alto, pertanto l'ingombro maggiore diventerà la componente metallica sul retro dell'ugello). A parità di layer, la parete estrusa per prima sarà indicata con (0), la seconda con (1). Come è evidenziato in P1, in questo caso è ancora da determinare una configurazione che consenta di estrarre anche il layer 1 in direzione  $Y_+$ : questo sarà uno dei temi cardine nel lavoro di aggiornamento del processo di generazione della mesh fatto in seguito a questa prima sessione di test.

- . traversi di irrigidimento sul piano XY, e quindi esenti da vincoli legati all'ingombro dell'estrusore, realizzati in direzione  $Y_+$  sul layer 0 e  $Y_-$  sul layer 1.

- . aggiunta, eventuale, di ulteriori elementi di irrigidimento trasversale al fine di stabilizzare ulteriormente i nodi ed aumentare la rigidità delle celle elementari della mesh.

- . elementi geometrici ausiliari locali descritti dettagliatamente in HG1, HG2 con lo scopo di aiutare la formazione di nodi stabili e di evitare effetti di trascinarsi delle aste (triangoli post move up, tratto orizzontale ante move down)

- . gcode definito in modo che non vi sia rilascio di materiale (parametro E=0) in tutti gli spostamenti  $\Delta L > L_{max}$ , dove  $L_{max}$  indica l'asta più lunga della mesh. Questa semplice condizione è conseguente al fatto che tutti i movimenti senza deposizione necessari sono da un estremo all'altro dell'oggetto.

# 2.4

# UPDATE M1

## AGGIORNAMENTO MESH M1 POST SS.1

*Questo paragrafo descrive come è stata adeguata la mesh di tipo M1 in relazione agli output della sessione 1 di test e quindi le caratteristiche del suo nuovo processo di generazione. La mesh uscente sarà l'input della sessione 2.*

**Obiettivi.** In seguito ad un primo contatto col robot, come si è visto, è emerso che vi è uno scarto importante tra quanto progettato nel modello digitale e la sua traduzione del modello fisico. Queste differenze sono riconducibili ad una molteplicità di fattori difficili da pre-determinare: comportamenti del materiale, condizioni ambientali del laboratorio, caratteristiche intrinseche del braccio e delle sue cinematiche, geometria e funzionamento dell'estrusore, impatto del sistema raffreddamento. Proseguire nell'elaborazione e nell'affinamento della mesh senza studiare con precisione quanto accade nel processo reale di fabbricazione, sarebbe quindi un approccio fortemente limitato che, con ogni probabilità, devierebbe in maniera crescente dai comportamenti effettivi. Di conseguenza, la ricerca in questione è stata condotta confrontando costantemente processo digitale e reale, modellandoli in base ai feedback che si scambiano reciprocamente.

La mesh qui sviluppata ha la necessità di:

a. incorporare nel proprio processo generativo gli accorgimenti messi a punto durante la prima sessione di test

b. definire una logica di organizzazione interna in grado di superare l'unico aspetto rimasto davvero irrisolto, ossia la direzione di deposizione delle pareti verticali del layer 1 di ciascun elemento

c. prevedere al suo interno l'inserimento di una nuova categoria di elementi in grado di fornire un contributo supplementare a quello dei traversi orizzontali, nella loro funzione di irrigidimento

**Update geometria.** Nel percorso evolutivo della geometria di partenza, le modifiche più vincolanti

sono senza dubbio quelle riguardanti i singoli elementi costituenti: in questo caso, si è reso necessario prima di tutto l'inserimento, in ciascun layer, di un sistema di diagonali di irrigidimento.

Queste diagonali collegano la sommità dei triangoli della parete (0) ai vertici bassi dei triangoli sulla parete opposta (1): in questo modo si predilige l'estrusione in direzione X come evidenziato nelle conclusioni della sessione di test precedente. Trattandosi di aste poste sul piano verticale, devono essere predisposti anche su di esse tutti gli accorgimenti locali prima definiti. Queste diagonali hanno il compito fondamentale di migliorare il collegamento tra le due pareti verticali e di fissare ulteriormente la posizione dei vertici alti delle aste in attesa della deposizione degli strati orizzontali. Come si vedrà, il loro inserimento rende tuttavia necessario un profondo ripensamento dell'ordine interno della mesh.

Un'altra modifica effettuata riguarda la composizione delle strisce verticali di ciascun layer, con i triangoli di parete. Fino ad ora, in direzione Y erano suddivise in un numero dispari di campi, ed i punti evidenziati mediante pattern del tipo nel layer 0 e pattern del tipo nel layer 1: il risultato era una sequenza di n triangoli interi ed un triangolo dimezzato ad una delle estremità. Adesso invece, sono suddivise in un numero pari di campi, ed i punti evidenziati mediante pattern di selezione simmetrici del tipo T|TF...|T e T|FT...|T nel layer 0 e pattern del tipo T|FT...|T e T|TF...|T nel layer 1: le strisce sono quindi composte da n triangoli interi nella fascia centrale e triangoli dimezzati alle estremità. Nonostante possa sembrare una modifica marginale e fine a se stessa, questo cambiamento agevola in maniera considerevole la logica di organizzazione interna della geometria e consente, come si vedrà,

di assecondare anche nel layer 1, e quindi per tutta la durata del processo di fabbricazione, i vincoli di direzione imposti dalla geometria dell'estrusore. In questo modo si risolve il problema TEST IV - P1 e si limitano le interferenze.

**Update logica.** La logica della prima famiglia di mesh necessita di un importante lavoro di aggiornamento, con lo scopo di superare gli aspetti irrisolti della sessione 1 (TEST I - P4 e soprattutto TEST IV - P1) ed incorporare gli elementi geometrici definiti nel punto precedente.

Pur rimanendo fissa la suddivisione in baseline + n pacchetti verticali, varia la composizione dei singoli layer che li compongono. Nello specifico, il layer 0 è costituito da:

- . polilinea 0
- . polilinea 1, che individua le maglie triangolari sulla prima parete estrusa
- . polilinea 2, costituita dalle diagonali di irrigidimento definite nel punto precedente di questo paragrafo
- . polilinea 3, che individua le maglie triangolari sulla seconda parete estrusa e la collega alla prima
- . polilinea 4, che individua la baseline del layer successivo collegando tutte le sommità delle aste depositate fino a questo momento
- . polilinea 5, che individua i traversi orizzontali di irrigidimento sul piano XY

Il layer 1 ha una sequenza molto simile. Si differenzia soltanto per la posizione della polilinea 0: anziché essere la prima, qui viene inserita tra le precedenti polilinee 3 e 4. Ricapitolando, quindi, il layer 1 è costituito da:

- . polilinea 0, maglie triangolari sulla prima parete
- . polilinea 1, diagonali di irrigidimento
- . polilinea 2, maglie triangolari sulla seconda parete
- . polilinea 3
- . polilinea 4, baseline del layer successivo
- . polilinea 5, traversi orizzontali di irrigidimento

Gli spostamenti senza rilascio di materiale sono 2: tra le polilinee 0 e 1 nel layer 0, tra le polilinee 2 e 3 nel layer 1. Il punto finale del layer 1 coincide col punto iniziale del layer 0 dell'elemento successivo.

Tutte le polilinee sul piano verticale condividono la medesima direzione di estrusione, soddisfacendo quanto richiesto nel TEST IV-P1. Le pareti trasversali sono costituite unicamente da maglie triangolari, non più solamente a piani alterni come accadeva nella prima famiglia di mesh. Anche il requisito TEST I-P4 può quindi considerarsi soddisfatto.

### **Adeguamento ad output SESSIONE 1.**

O1 L'inserimento del tratto orizzontale prima di ogni move down è stato implementato mediante una definizione che, in presenza di  $\Delta Z < 0$ , aggiunge uno spostamento orizzontale iniziale di lunghezza proporzionale all'inclinazione dell'asta successiva. La direzione è determinata proiettando il vettore del move down sul piano XY: nessun'altra direzione è ammessa, in quanto durante il processo di fabbricazione questo segmento deve "stendersi" allineandosi perfettamente a quello successivo.

O2 La costruzione dei triangoli sui nodi finali dei move up è stata anch'essa estesa all'intera mesh. Tuttavia, vista la complessità crescente della definizione che regola l'intero processo, durante la prossima sessione di test di proveranno a raggiungere risultati equivalenti lavorando sui parametri di retraction e compensation dell'estrusore. Questo passaggio consentirebbe un sostanziale alleggerimento del codice e riduzione dei tempi di fabbricazione.

O3 Gli spostamenti senza rilascio di materiale sono stati implementati nel modo seguente al fine di evitare collisioni con le parti già realizzate. Una volta terminata l'ultima asta della polilinea prima del distacco, si hanno nell'ordine:

. spostamento  $\Delta Z > i_z$ , con  $i_z = h$  layer, per collocare l'ugello ad una quota di sicurezza rispetto al modello già fabbricato

. spostamento sul piano XY fino alla verticale dello starting point della polilinea successiva, nel caso non sia previsto un tratto di "sfogo" prima della ripresa (in caso contrario fino alla verticale del

punto iniziale di questo tratto ausiliario)

. spostamento verticale  $\Delta Z < 0$  per posizionarsi sul punto desiderato.

**Ordine definizione.** Il modo in cui viene sviluppato il modello digitale attraverso la definizione è il seguente:

. FASE I: generazione geometria desiderata ipotizzando condizioni ideali di fabbricazione. Input: brep / polisuperficie. Output: liste ordinate di punti in cui i rami individuano l'elemento n-esimo su cui si sta lavorando, i branch di livello I il singolo layer (0-1), i branch di livello II le polilinee del singolo layer (0-5).

. FASE II: design degli accorgimenti locali descritti con rilascio ed inserimento nelle liste ordinate dei punti necessari per la loro realizzazione

. FASE III: design degli spostamenti senza rilascio ed inserimento dei nuovi punti trovati

. FASE IV: definizione di tutti i robot behaviours non convenzionali (ad es.  $E=0$  se  $\Delta L > L_{max}$ )

# 2.5

# TEST SS.2

## SECONDA SESSIONE TEST SU M1

*Questo paragrafo descrive le condizioni iniziali della mesh sottoposta ai test, le problematiche emerse durante il loro svolgimento, gli accorgimenti adottati step-by-step per correggerle e le caratteristiche del modello digitale uscente.*

**Finalità.** Questa seconda sessione di test sulla mesh di tipo M1 è stata svolta con lo scopo di verificare l'effettivo funzionamento delle modifiche apportate secondo quanto descritto nel paragrafo 2.4 ed indagare la possibilità di snellire ulteriormente il processo senza pregiudicare la qualità del risultato finale. Il tutto, nella logica del continuo scambio di feedback tra modello digitale e risposta di tool e materiale.

### SESSIONE 2 | TEST I

Il primo test di questa sessione ha come obiettivo l'introduzione nel processo dei parametri compensation e retraction, che regolano il funzionamento dell'estrusore e fino ad ora, per semplicità, non sono stati presi in considerazione. Questi parametri hanno potenzialità molto interessanti per questo caso di studio in quanto consentono di agire sul senso di rotazione del pignone in specifici momenti del processo di fabbricazione, impedendo la fuoriuscita del materiale o anticipandola. Oltre ad essere particolarmente utili in modelli con numerose discontinuità, sfruttando adeguatamente queste proprietà è possibile anche creare appositamente accumuli o vuoti di materiale, ove desiderato. Entrambe le casistiche appena citate si possono facilmente riscontrare nei modelli di riferimento fin qui considerati: come visto in precedenza, infatti, sono presenti in ogni layer spostamenti del tipo end-to-end senza rilascio di filamento. Accumuli controllati di materiale, invece, possono essere applicati volontariamente ai nodi al posto di elementi geometrici ausiliari, come ad esempio i triangoli in sommità alle aste di move up.

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

La mesh utilizzata per questo test ha le caratteristiche geometriche di quella utilizzata nel SESSIONE 1 | TEST IV, in quanto, come detto, l'obiettivo principe è capire come sostituire in un modello funzionante l'utilizzo di retraction e compensation alla costruzione di accorgimenti locali. Al momento, non è la priorità testare l'applicazione degli improvements definiti nel paragrafo 2.4, in quanto si correrebbe il rischio di confondere gli output delle due risposte. Le uniche differenze sono le seguenti:

HG1 eliminazione dei triangoli in sommità ai move up

HG2 aggiunta costruzione, descritta al punto O3 del paragrafo 2.4, per la realizzazione di spostamenti senza rilascio di materiale, nella modalità che prevede l'estrusione di un tratto di "sfogo", qui di lunghezza pari a 15mm.

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 compensation = 1.3, questo parametro è un indice dell'abbassamento del filamento nell'istante in cui questa istruzione viene impartita al robot. Questo parametro è applicato a tutti i nodi della mesh in cui è previsto un delay, ad eccezione dei delay planar (move up, move down, spostamenti a vuoto)

HR2 retraction = -1, questo parametro è un indice della portata del ritiro del filamento nell'istante in cui questa istruzione viene impartita al robot. Questo parametro, nel caso esaminato, anticipa sempre il comportamento di compensation.

Di conseguenza, nel caso la compensation faccia seguito ad una retraction, la sua funzione è semplicemente quella di garantire una completa funzionalità alla ripresa dell'estrusione, nel caso invece fosse un'istruzione isolata servirà a creare un accumulo di materiale, ad es. nei nodi. Nel caso si strutture continue, i valori di compensation e retraction sono strettamente legati in quanto la quantità di cui viene ritratto il filo per evitare accumuli, deve coincidere con il suo abbassamento al momento della ripresa. In realtà, il valore di compensation è sempre fissato in misura leggermente superiore a quello di retraction in quanto ad ogni ripartenza è preferibile avere materiale in eccesso piuttosto che in difetto.

I restanti parametri coincidono con quelli fissati nella sezione ROBOT BEHAVIOURS della SESSIONE 1 | TEST IV.

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è anch'esso analogo a quello della SESSIONE 1 | TEST IV con:

$$i_z = 40\text{mm} \quad i_x = 60\text{mm} \quad i_{y,\text{max}} = 120\text{mm}$$

In aggiunta a questa mesh è stato implementato l'accorgimento HG2 prima descritto.

### OUTPUT

Il modello fisico prodotto risulta estremamente deformato rispetto a quello realizzato durante la SESSIONE 1 | TEST IV. Questo aspetto dimostra l'estrema sensibilità del braccio e del materiale nei confronti dei parametri che ne governano il funzionamento e fa capire l'accortezza necessaria nella loro gestione: è stato infatti sufficiente modificare due condizioni per stravolgere completamente il risultato finale.

L'analisi del sample ha evidenziato principalmente due tipi di problematiche.

P1 la prima problematica riguarda i comportamenti di retraction e compensation nei nodi interni alla struttura: la retraction è eccessiva ed in quanto tale taglia il filamento anziché frenarne semplicemente la quantità in esubero. La compensation è anch'essa eccessiva in quanto l'accumulo di materiale sul punto finale dei move up è tale da schiacciare il nodo e deve pertanto essere ridotta.

P2 la seconda problematica riguarda invece gli spostamenti a vuoto. Nello specifico, l'estrusore continua a rilasciare materiale anche oltre il segnale di stop ed inizia invece tardivamente il tratto di "sfogo" prima della ripresa. Questo significa che l'estrusore durante la realizzazione della mesh viaggia sempre con un esubero di materiale in camera. Anche in questo caso, quindi, si rende necessario un resettaggio dei parametri di compensation e retraction.

## SESSIONE 2 | TEST II

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

La mesh qui studiata ha caratteristiche geometriche analoghe a quella utilizzata nel test precedente

#### ROBOT BEHAVIOURS

In base alle problematiche P1 e P2 emerse in seguito al TEST I di questa sessione, è risultato evidente come i valori di compensation e retraction utilizzati in precedenza fossero eccessivi. Di conseguenza sono stati ridotti entrambi, in modo proporzionale, in quanto come detto legati da relazione diretta.

HR1 compensation = 0.5

HR2 retraction = -0.4

I nodi cui si applicano sono invece lasciati invariati. I restanti parametri coincidono con quelli fissati nella sezione ROBOT BEHAVIOURS della SESSIONE 1 | TEST IV.

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è anch'esso analogo a quello del caso precedente.

( $i_z = 40\text{mm}$   $i_x = 60\text{mm}$   $i_{y,\text{max}} = 120\text{mm}$ )

## OUTPUT | CONCLUSIONI

Il modello fisico realizzato risponde con efficacia ai requisiti desiderati. In seguito alla riduzione dei valori di retraction e compensation sono stati eseguiti correttamente sia gli spostamenti a vuoto sia i nodi interni alla mesh, eliminando quella quantità di materiale in esubero prima sempre presente all'interno della camera dell'estrusore.

Il modello digitale uscente risulta molto più leggero dal punto di vista dello sforzo computazionale richiesto, in quanto gli elementi geometrici prima generati per ogni nodo sulla base di condizioni locali sono stati sostituiti da due behaviours universali, e quindi applicabili indistintamente in ciascuno di essi.

Queste economie possono apparire poco significative se relative a sample elementari, ma non va dimenticato che sono pensate per l'effettiva scala dei modelli studiati, in cui la complessità ed il numero dei componenti aumentano esponenzialmente. Semplificare e rendere più fluido il processo eliminandone i comportamenti locali e le loro casistiche, a parità di risultato finale, è una ricerca nella ricerca che è stata portata avanti in modo continuativo durante tutto questo percorso, (anche se qui, per chiari motivi, ne vengono riportati solo i passaggi più rilevanti).

Si osserva, infine, come la qualità di stampa risulti decisamente maggiore in seguito all'applicazione di compensation e retraction al posto degli accorgimenti precedenti. Il filamento in uscita, infatti, è molto più omogeneo dal momento che si evitano le lunghe soste con rilascio di materiale sui nodi, che aggiungono impurità al filo e ne ostacolano la ripartenza, portando talvolta a cambiamenti di sezione dello stesso.

## SESSIONE 2 | TEST III

Questo test si pone l'obiettivo di verificare come si traducono nel modello fisico le modifiche apportate a quello digitale secondo quanto descritto nel paragrafo 2.4. Nello specifico, queste modifiche riguardano sia l'introduzione di una nuova categoria di elementi, le diagonali di irrigidimento, sia la riorganizzazione interna dell'intera mesh e la conseguente nuova sequenza di estrusione delle sue parti.

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

La mesh utilizzata per questo test incorpora tutte le caratteristiche definite nel paragrafo 2.4, aggiornate in relazione ai risultati degli studi sui parametri di compensation e retraction condotti nei primi due test di questa sessione. Le modifiche e/o integrazioni più significative rispetto ai casi di studio già analizzati sono le seguenti.

HG1 presenza delle diagonali di irrigidimento che collegano la sommità dei triangoli della parete (0) ai vertici bassi dei triangoli sulla parete opposta (1), rispettivamente parete più lontana e più vicina al braccio in seguito alle modifiche apportate alla componentistica dell'estrusore (spostamento ventola)

HG2 le pareti sul piano verticale, contenenti il design delle maglie triangolari, suddivise in un numero pari di campi anziché dispari ed estruse in direzione  $X_z$ , sia nel layer 0 che nel layer 1 di ogni elemento n-esimo

HG3 2 spostamenti senza rilascio di materiale per ogni elemento, uno per layer. Nello specifico tra le polilinee 0 e 1 nel layer 0, tra le polilinee 2 e 3 nel layer 1

HG4 eliminazione dei triangoli costruiti attorno al punto finale di ogni move up, divenuti superflui in seguito alla regolazione dei parametri di compensation e retraction

HG5 tratti orizzontali prima di ogni move down di lunghezza pari a 15mm in corrispondenza delle sezioni trasversali di bordo (aste con inclinazione maggiore) e pari a 10mm sulle strisce verticali

contenenti le maglie triangolari di parete (aste con inclinazione minore)

HG6 implementazione della costruzione, descritta al punto O3 del paragrafo 2.4, per la realizzazione di spostamenti senza rilascio di materiale, nella modalità che prevede l'estrusione di un tratto di "sfogo", qui di lunghezza pari a 15mm.

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 compensation = 0.5 (vedi TEST II)

HR2 retraction = -0.4 (vedi TEST II)

HR3 gcode definito in modo che  $E=0$  in tutti gli spostamenti in cui  $\Delta L > L_{\text{max}}$

I restanti parametri coincidono con quelli fissati nella sezione ROBOT BEHAVIOURS della SESSIONE 1 | TEST IV.

#### SAMPLE

Il sample in oggetto è stato scelto isolando dall'intera mesh l'elemento n-esimo con le condizioni più sfavorevoli in termini di curvatura  $K_z$  e  $K_y$ . Un sample quindi in grado di racchiudere in sé tutte le criticità che si possono riscontrare nella fabbricazione dell'oggetto madre. Nello specifico, le sue dimensioni sono:

$i_z = 40\text{mm}$   $i_x = 60\text{mm}$   $i_{y,\text{max}} = 80\text{mm}$

La sua posizione sul piano di lavoro è ruotata di  $10^\circ$  in senso orario rispetto all'asse Y con lo scopo di trovare l'ubicazione ottimale in termini di interferenze. Questa necessità è dovuta all'introduzione dei diagonali di irrigidimento, anch'essi a rischio collisioni.

Si sottolinea che i sample adottati da qui in avanti in questa sessione hanno caratteristiche geometriche differenti da quelli utilizzati finora, in virtù del fatto che è mutata la scomposizione delle generatrici orizzontali della mesh (HG2)

## OUTPUT

P1 La problematica emersa durante questo test è essenzialmente una e si tratta dell'ancoraggio dei traversi orizzontali di irrigidimento ai nodi precedentemente estrusi. Nonostante la sopraelevazione di queste aste (ad eccezione dello starting point della prima di esse), infatti, si è verificata, la mancata adesione di una di queste con conseguente trascinamento del tratto già estruso, seppure come caso isolato. Un accorgimento studiato al fine di risolvere questo problema ricorrente è un leggero spostamento dei punti-guida di queste aste verso l'esterno della mesh. Il modulo di questo vettore è 3mm, la direzione quella della normale alla curva in quel punto. In questo modo i nodi dovrebbero essere maggiormente avvolti dalla polilinea che racchiude le diagonali, facilitandone l'adesione.

Tuttavia, è opportuno specificare che questa problematica può essere anche frutto delle condizioni ambientali in cui è stato svolto il test: la bassa temperatura presente in laboratorio (7°C) accelera il raffreddamento del materiale appena estruso ed il suo conseguente ritiro, cui l'ABS è molto soggetto. Per questo motivo, nel momento in cui l'estrusore ripassa sui nodi per collegarvi nuovi aste trova materiale in fase avanzata di solidificazione cui è più difficile aderire: questa problematica influisce maggiormente nei casi più difficili di collegamento, come quello sopra citato. Pertanto, non è da escludere che l'accorgimento qui previsto, possa in realtà rivelarsi superfluo.

## SESSIONE 2 / TEST IV

Questo test si pone l'obiettivo di verificare l'efficacia dell'accorgimento descritto al punto P1 del TEST III

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

HG1 spostamento dei vertici intermedi della polilinea che racchiude i traversi orizzontali di irrigidimento verso l'esterno della mesh. I vettori spostamento in questione hanno modulo pari a 3mm e direzione coincidente con la normale alla curva in quel punto.

Le altre caratteristiche geometriche sono analoghe alla mesh utilizzata nel test precedente

#### ROBOT BEHAVIOURS

I parametri di questa sezione sono analoghi a quelli utilizzati nel test precedente.

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è anch'esso analogo a quello del caso precedente.

( $i_z = 40\text{mm}$   $i_x = 60\text{mm}$   $i_{y,\text{max}} = 80\text{mm}$ )

### OUTPUT

Il modello fisico realizzato risponde con efficacia ai requisiti richiesti e non presenta problematiche apprezzabili.

L'applicazione dell'accorgimento prima descritto è sufficiente ad evitare la mancata adesione dei traversi.

Il modello digitale definito nel paragrafo 2.4 è quindi ora a tutti gli effetti traducibile nell'oggetto fisico desiderato.

## SESSIONE 2 / TEST V

Questo test si pone l'obiettivo di verificare l'efficacia di quanto definito fino a qui su sample costituiti da molte più maglie ma di minore complessità, frutto dello stesso processo generativo. Nello specifico, è stata isolata una porzione di mesh la cui baseline ha curvatura molto ridotta e tende a restringersi. In questo senso svolge praticamente la funzione di un benchmark, in quanto è possibile osservare come varia la qualità dell'estrusione in relazione alla dimensione delle maglie. Anche la curvatura in direzione verticale non è significativa.

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

HG1 lunghezza tratti orizzontali ante move down 8mm

Tutte le altre caratteristiche geometriche sono analoghe a quelle del sample del test precedente, così come la logica generativa.

#### ROBOT BEHAVIOURS

I parametri sono stati leggermente modificati rispetto al caso precedente per capire se ci sono margini per ridurli a fronte di geometrie di input meno complesse.

HR1 delay= 8s (in precedenza 10s)

HR2 delay planar= 1s (in precedenza 1.2s)

HR3  $F_{\text{ext}} = 0.125$  (in precedenza 0,135)

Compensation e retraction sono invece rispettivamente pari a 0.5 e -0.4 e quindi analoghe ai test precedenti.

#### SAMPLE

Il sample ha le seguenti caratteristiche dimensionali:

$L_y = 400\text{mm}$   $i_{y,\text{max}} = 80\text{mm}$

$i_{x,\text{max}} = 70\text{mm}$   $i_{x,\text{min}} = 35\text{mm}$

$i_z = 40\text{mm}$

Come spiegato nell'introduzione di questo test, la curvatura in direzione Y e Z è molto ridotta. Per questo motivo le possibilità di collisione sono particolarmente remote ed il sample è posto parallelamente all'asse Y.

### OUTPUT / CONCLUSIONI

Il modello fisico realizzato risponde con efficacia ai requisiti richiesti e non presenta problematiche apprezzabili.

Questo fatto dimostra che in caso di oggetti meno complessi sarebbe possibile ridurre i parametri legati ai robot behaviours con conseguente diminuzione dei tempi di realizzazione: esiste quindi una proporzionalità diretta tra curvatura delle superfici da riprodurre e tempo necessario per la produzione del modello fisico. Questo aspetto non è da sottovalutare, perché da un lato conferma il fatto di aver lavorato fino ad ora testando effettivamente le condizioni più critiche e che i parametri fissati per quel caso specifico, comunque realizzabile, sono tutti strettamente necessari. Dall'altro emerge che è possibile modulare le proprietà di lavoro del robot in relazione alle caratteristiche locali degli oggetti, con conseguente risparmio di tempo ed ottimizzazione dell'intero processo.

| 3.1

# MESH M2

## MODELLO DIGITALE - DEFINIZIONE SUPERFICI

*Questo paragrafo contiene le convenzioni adottate, le ipotesi alla base del progetto e l'analisi approfondita della logica con cui viene modellata la mesh di partenza in relazione alla geometria delle superfici di input.*

**Overview.** I risultati dei test della SESSIONE 2 hanno evidenziato, nell'ordine, una relazione di proporzionalità diretta sia tra la semplificazione computazionale del modello digitale e la qualità di stampa, sia tra la complessità geometrica della mesh di input ed i tempi di realizzazione. Queste considerazioni hanno spinto, in maniera decisiva, a valutare un ripensamento dell'intero processo generativo della mesh, al fine di modulare il processo di fabbricazione esclusivamente sulle proprietà ed i comportamenti del tool e del materiale osservati.

Nello specifico, gli elementi della mesh più time-demanding e complessi da progettare per una sicura fabbricazione sono senza dubbio le diagonali di parete (lati verticali delle maglie triangolari) ed i traversi orizzontali di irrigidimento: il fatto che questi ultimi non si appoggino mai su quanto già estruso, se non puntualmente, e cambino costantemente direzione ne rende piuttosto complicato l'ancoraggio, creando invasivi effetti di trascinamento. Soltanto mediante la sopraelevazione e lo spostamento verso l'esterno della mesh dei suoi punti intermedi si è raggiunto un buon livello di affidabilità. per quanto riguarda le diagonali di parete invece, come si è visto, si sono rese necessarie strutture ausiliarie come il tratto orizzontale prima dei move down, ed il delay nei vertici in sommità varia tra gli 8s ed i 10s in relazione all'complessità della mesh. Valori ad ogni modo elevati. Il processo generativo della mesh e la sua geometria definiti in questo capitolo nascono dalla volontà di superare questi due comportamenti.

I campi di ricerca hanno riguardato quindi come realizzare una mesh senza elementi diagonali di

parete e con connessioni trasversali orizzontali ripensate, in grado di ricoprire con uguale efficacia le due funzioni di leaking-formwork e reinforcement descritte nel capitolo 1.

La mesh definitiva avrà di conseguenza maglie di forma quadrangolare e traversi che, nel loro sviluppo, si appoggiano ad ogni cambio di parete e per un tratto di lunghezza variabile tramite slider, sulle aste verticali già depositate. In questo modo, offrono un contributo aggiuntivo di resistenza anche sul piano delle superfici bidimensionali che collegano.

In virtù di queste modifiche il braccio e l'estrusore dovranno lavorare sempre e solo su aste con minime inclinazioni (quelle sul piano verticale, non essendo più inclinate in direzione Y risentiranno solo della curvatura della mesh lungo Z, di per sé molto minore e comunque facilmente assecondabile riducendo l'interasse  $i_y$ ) ed aste sul piano XY (non suscettibili di collisioni né di flessione e conseguente arrotondamento dei vertici).

Infine è opportuno sottolineare come la mesh qui generata non sarà più una reticolare isostatica. La perdita di questa caratteristica è inevitabile per ottenere i vanatggi appena descritti. Tuttavia, il processo generativo qui definito studia e colloca gli elementi primitivi della mesh ed i suoi raffittimenti nelle posizioni ideali per assorbire gli sforzi di trazione agenti sulla superficie di input, punto critico del comportamento meccanico della maggior parte dei materiali fluidi di filling. Queste informazioni sono state implementate nel processo in seguito all'effettuazione di un'analisi elastica dell'oggetto finale costituito da mesh + filling, come si vedrà nel corso di questo capitolo.

### **Caso di studio I - Mesh minima**

Dal punto di vista geometrico, il primo caso di studio affrontato è analogo al caso più complesso affrontato in precedenza per la mesh di tipo M1, descritto nel Caso di studio III, paragrafo 2.1. Come accennato però, alla mesh minima definita in questo paragrafo, verranno in seguito aggiunti raffittimenti locali in corrispondenza dei punti maggiormente soggetti a sforzi di trazione, sulla base dei risultati di un'analisi elastica. Il requisito richiesto in questa prima fase di ricerca è di natura prettamente geometrica e consiste nell'accurata riproduzione della superficie di input. Nello specifico, la brep da riprodurre è costituita da due pareti bidimensionali con curvatura libera sia nel piano XY che nel piano XZ, opportunamente collegate tra loro in direzione trasversale.

La mesh desiderata si ottiene per sovrapposizione di piani orizzontali, tra loro paralleli, adeguatamente connessi. In primo luogo è dunque necessario determinare queste sezioni: il loro interasse è costante e ragionevolmente piccolo per approssimare efficacemente la curvatura della superficie lungo l'asse verticale. Per il momento, ponendosi come obiettivo finale la realizzazione di elementi divisorii in materiale composito con altezze comprese tra 1.2 e 3.5m, sono stati considerati interassi compresi tra 15 e 60mm. Il loro perimetro è poi suddiviso nello stesso numero di parti, scelta fatta al fine di facilitare i collegamenti trasversali.

Fermo restando che il numero totale di punti di suddivisione sia fisso, la loro distribuzione varia sezione per sezione, adattandosi alla morfologia della superficie: la distanza tra due punti consecutivi è inversamente proporzionale alla curvatura locale, e non supera in nessun caso l'interasse massimo stabilito a monte per il materiale adottato. L'insieme dei punti così trovati contiene già di per sé tutte le informazioni necessarie per la costruzione della mesh minima richiesta.

Gli step successivi costituiscono il fulcro dell'algoritmo e consistono nel disegno delle polilinee di collegamento dei punti al fine di creare le maglie quadrangolari della struttura, assecondando al meglio le caratteristiche cinematiche del robot.

Le strisce verticali di cui sono composte le pareti, a differenza di quanto accadeva nella mesh M1, possono essere suddivise indistintamente in un numero pari o dispari di campi. I pattern di selezione dei punti che individuano tutti quelli strettamente necessari all'estrusione della mesh risultano, coerentemente con la logica con cui è stato pensato questo nuovo processo M2, enormemente semplificati. In precedenza infatti, c'era la necessità di differenziarli layer per layer al fine di avere i pattern triangolari di parete. In questo caso, invece, poiché i montanti delle maglie quadrangolari sono tutti allineati in direzione verticale per facilitare la trasmissione a terra dei carichi, i pattern selettivi sono identici tra loro. Nello specifico, i pattern saranno superflui nel caso in cui l'accuratezza richiesta coincida con l'interasse  $i_y$  delle maglie e di tipo TF..]T nel caso in cui si opti per un'accuratezza doppia: in quest'ultimo caso, le basi inferiori e superiori delle maglie saranno costituite da due tratti anziché uno.

### **Singole parti costituenti.**

In virtù della potenziale complessità geometrica che può scaturire da questi oggetti, è opportuno definire un principio di organizzazione interna, che possa, come detto, assecondarne nel migliore dei modi la fabbricazione. Nello specifico, queste mesh si ottengono da una baseline a quota  $Z=0$  (impronta a terra dell'oggetto) cui sono sovrapposti una serie di elementi (n), identicamente realizzati, ciascuno dei quali è composto da 4 layer, duali a due a due (n.0-n.2, n.1-n.3).

Ogni layer è suddiviso nei seguenti elementi costitutivi:

.layer 0 - 3 polilinee.

n.0.0 individua i montanti delle maglie sulla parete (0) estrusa per prima

n.0.1 individua i montanti delle maglie sulla parete (1) estrusa per ultima

n.0.2 individua i traversi orizzontali di irrigidimento realizzati come descritto in seguito

numero spostamenti senza deposizione: 1, tra n.0.0 e n.0.1

.layer 1 - 2 polilinee.

n.1.0 completa i montanti iniziati da n.0.0 e n.0.1

n.1.1 individua la baseline del layer n.2

numero spostamenti senza deposizione: 1, tra n.1.0 e n.1.1

.layer 2 - 3 polilinee.

n.2.0 individua i montanti delle maglie sulla parete (0) estrusa per prima (duale a n.0.0, dove li hanno altezza dimezzata qui hanno altezza normale e viceversa)

n.2.1 individua i montanti delle maglie sulla parete (1) estrusa per ultima (duale a n.0.1, dove li hanno altezza dimezzata qui hanno altezza normale e viceversa)

n.2.2 individua i traversi orizzontali di irrigidimento (duali a n.0.2)

numero spostamenti senza deposizione: 2, tra n.2.0 e n.2.1 e tra n.2.1 e n.2.2

.layer 3 - 2 polilinee.

n.3.0 completa i montanti iniziati da n.2.0 e n.2.1

n.3.1 individua la baseline dell'elemento n+1

numero spostamenti senza deposizione: 1, tra n.3.0 e n.3.1

Ogni gruppo di 4 layer contiene due moduli completi di maglie quadrangolari di altezza pari al valore fissato  $i_z$ , ciascuno dei quali è diviso in due da un layer di irrigidimento, rispettivamente n.0 e n.2. Questi due layer hanno la costruzione più elaborata e contengono, come si è visto, il completamento dei montanti iniziati nei layer sottostanti e le polilinee orizzontali di collegamento tra le due pareti. Le polilinee sono costituite dall'alternanza di tratti poggianti sui montanti di parete già estrusi e tratti trasversali. Come detto, sono duali, e quindi nei tratti in cui la polilinea di n.0 sta sulla parete (0) quella di n.2 sta su (1) e viceversa. Questa configurazione garantisce un contributo aggiuntivo di resistenza alle superfici equivalente ed al tempo stesso aumenta l'ammorsamento della mesh: come si può notare in fig. Infatti, in virtù di questa logica compositiva i tratti trasversali di irrigidimento risultano essere sempre incrociati tra loro, layer per layer.

La densità delle aste trasversali e quindi la frequenza con cui avvengono i cambi di parete è un parametro facilmente regolabile dal pannello di controllo tramite slider fig, confermando quindi anche in questo caso l'adattabilità della mesh alle caratteristiche locali, che siano tensionali o geometriche.

In relazione a questo parametro vengono creati appositi pattern di selezione dei montanti verticali, in quanto devono essere individuate e separate, layer per layer, le aste da estrarre con altezza  $h_1 = i_z$  e quelle da realizzare invece con altezza  $h_2 = i_z/2$  poichè fungano da supporto per i layer intermedi di irrigidimento. Questo è forse uno dei passaggi più delicati dell'intero processo e la sua definizione ha richiesto non poche energie.

Infine, è opportuno sottolineare che la suddivisione dei traversi orizzontali è sempre fatta a partire dalla mezziera della superficie di input: in questo modo si hanno irrigidimenti simmetrici sia nel caso che il numero di cambi di parete sia pari, sia che sia dispari. Questo accorgimento, oltre a contribuire all'anisotropicità della mesh, ne preserva anche le qualità estetiche, come visibile in fig.

### **Organizzazione interna - Sequenza di fabbricazione.**

Anche in questo caso le singole aste componenti la mesh sono state ordinate con lo scopo di assecondare al meglio le caratteristiche del braccio e del materiale impiegato durante la sua fabbricazione. La sua organizzazione interna si fonda sulle seguenti logiche:

. ciascuna polilinea segue un percorso che considera l'impossibilità del robot di estrarre segmenti perfettamente verticali dall'altro verso il basso

. la sequenza secondo cui vengono estruse le polilinee è stata pensata con l'obiettivo di ridurre al massimo gli spostamenti senza rilascio di filamento. In ogni elemento ce ne sono 5: uno per layer, ad eccezione del layer n.2 che ne presenta due. Questi comportamenti locali sono implementati con la tecnica messa a punto per la mesh M1

. in ogni layer, sono realizzate prima le aste verticali appartenenti alla parete (0), più lontana al robot, e solo successivamente quelle appartenenti alla parete (1), più vicina. In questo modo l'ingombro del nozzle non interferisce con la corretta deposizione del materiale.

. il verso di deposizione delle baseline n.1.1 e n.3.1 è completamente arbitrario. Nello specifico è stato scelto il verso antiorario già utilizzato nei test precedenti.

. i montanti delle maglie quadrangolari di ciascun layer sono estrusi lungo la direzione  $Y_+$  per minimizzare le possibilità di collisione con l'impianto di raffreddamento ed averlo al tempo stesso più vicino, aumentandone così l'efficacia (nei test effettuati sulla mesh di tipo M1 quest'aspetto era stato di difficile risoluzione).

| 3.2

# MILLIPEDE

## ANALISI ELASTICA

Questo paragrafo contiene le premesse, le analisi preliminari, l'esecuzione e la lettura degli output dell'analisi elastica applicata alla mesh M2 utilizzando il software Millipede.

**Overview.** Come affermato nel primo paragrafo di questo capitolo, uno degli obiettivi di questa fase della ricerca è quello di sottoporre la mesh ad un campo di forze e verificarne la risposta, con lo scopo di automatizzare l'adeguamento della sua geometria agli output generatisi. Come strumento per la predisposizione e l'esecuzione dell'analisi elastica è stato scelto Millipede.

Questo software, infatti, è un plug-in di grasshopper, il programma adottato per lo sviluppo dell'intero modello digitale: di conseguenza, è possibile integrare questa parte nella definizione preservando l'unitarietà del processo. Inoltre, in questo modo tutti i risultati numerici e grafici dell'analisi effettuata sono immediatamente disponibili, pronti per essere riutilizzati per perfezionare localmente la mesh ove necessario.

Nel caso in esame, è stata svolta un'analisi elastica 3D sulla brep di input descritta nel paragrafo 3.1, costituita da due superfici complesse accoppiate di geometria arbitraria, opportunamente collegate, e poste ad una distanza tale da poter esser considerate nel loro insieme un oggetto bidimensionale.

Le analisi elastiche sui volumi partono sempre dalla sua discretizzazione, qui definita voxelizzazione: l'intero volume viene suddiviso in un insieme di cubetti adiacenti la cui dimensione è a discrezione del progettista. Tutti i cubetti il cui centro ricade all'interno del volume di input vengono mantenuti, gli altri eliminati. In presenza di geometrie complesse, è opportuno quindi operare una discretizzazione piuttosto fine, al fine di avere un modello senza perdita di informazioni.

Ovviamente, ad un aumento del numero di

voxel corrisponde di norma un maggiore onere computazionale: tuttavia, è possibile lanciare un'analisi definitiva con elevato grado di definizione e salvarne poi gli output, internalizzandoli in appositi componenti. In questo modo non si appesantisce il processo e si hanno i risultati sempre a disposizione. Nel caso specifico, anche per facilitare alcune operazioni che verranno spiegate nel dettaglio in seguito, si è optato per avere voxel il cui lato è sempre un sottomultiplo dell'interasse  $i_z$  tra layer consecutivi, a prescindere dal grado di definizione adottato.

Infine, è opportuno sottolineare, come prima di procedere con l'analisi elastica 3D, ne sia stata verificata l'attendibilità attraverso il confronto dei suoi risultati con quelli derivanti dal caso monodimensionale, su schemi statici semplificati.

La parte di ricerca affrontata in questo paragrafo è fondamentale ed è stata affrontata con due obiettivi distinti: da un lato capire l'adattabilità del processo in risposta a campi vettoriali tridimensionali ed automatizzarla, dall'altro mantenere aperta anche la possibilità di impiegare gli oggetti qui sviluppati per fini strutturali e non solo come partizioni e/o elementi accessori. Poiché, in base alle considerazioni fatte nel paragrafo 2.2, al momento il materiale più performante per questa ricerca è l'ABS, con caratteristiche meccaniche ovviamente trascurabili rispetto all'acciaio ed alle tensioni che si generano durante il getto e la presa del calcestruzzo, risultando verosimilmente incompatibile con esso, è evidente come l'intento di questa analisi sia soprattutto qualitativo. In tal senso, è di fondamentale importanza definire in modo esaustivo un processo integrato che metta in relazione due materiali, capire dove e soprattutto

come intervenire per migliorarne le prestazioni a trazione, rendere compatibili queste trasformazioni con la mesh minima di partenza, preservarne la versatilità e l'adattabilità: questi sono i veri focus della ricerca, prima ancora della determinazione della quantità esatta di rinforzo necessario in kN od altre grandezze simili, che in questa fase risulterebbero, purtroppo, giocoforza aleatorie.

**Analisi dei carichi.** Uno dei passaggi obbligati per l'esecuzione dell'analisi elastica è ovviamente l'analisi dei carichi agenti sull'oggetto completo (mesh+filling) in determinate condizioni di carico. I primi dati da fissare a tal fine sono quindi: materiali impiegati, possibile destinazione dell'oggetto, fatte salve le considerazioni precedenti.

Per quanto riguarda la sua composizione materiale, l'oggetto ipotizzato è costituito, in base alle possibilità attuali, da mesh in ABS e filling in calcestruzzo.

Entrambi i contributi sono considerati distribuiti su tutto il volume dell'oggetto, e vengono applicati di conseguenza.

$$q_{sw,cls} = 24.5 \text{ kN/m}^3$$

$$q_{sw,ABS} = (L_{tot,mesh} \cdot A_{sez} \cdot p_{ABS}) / V_{mesh} = 0.167 \text{ kN/m}^3$$

Visto che, come ipotizzabile, il contributo della mesh è trascurabile rispetto a quello del calcestruzzo, il suo peso viene considerato come semplice incremento di quello del calcestruzzo, in misura pari all'1%.

Per quanto riguarda la destinazione d'uso, l'oggetto di input è considerato come elemento portante da esterno (pensilina, rifugio), ed è pertanto soggetto ai carichi di neve e vento.

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_t \cdot C_e \cdot C_t = 1.2 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{dove } q_{sk} = 1.5 \text{ kN/m}^2, \mu_t = 0.8, C_e = C_t = 1$$

$$p_w = q_b \cdot C_e \cdot C_p \cdot C_o = 0.576 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{dove } q_b = 0.4 \text{ kN/m}^2, C_e = 1.8, C_p = 0.8, C_o = 1$$

Come si può notare anche dalle unità di misura, i pesi propri sono applicati come forze di volume mentre i carichi di neve e vento come forze di superficie. L'unico vincolo presente è l'incastro lungo tutta la sua impronta a terra.

**Analisi elastica.** Definite le caratteristiche geometriche del volume di input, le condizioni di vincolo, i carichi agenti, prima di lanciare l'analisi resta solo da determinare il suo grado di accuratezza, e quindi le dimensioni dei voxel. In questo caso, si è optato per voxel con lato pari ad 1/2 dell'interasse verticale di 30mm e quindi pari a 15mm. Voxel di quest'ordine di grandezza garantiscono un elevato grado di precisione.

**Output.** Nonostante l'analisi elastica tridimensionale di Millipede restituisca moltissimi risultati sia grafici che numerici, quelli che interessano in questa ricerca sono essenzialmente tre: stress lines, piani principali di tensione, tensioni principali di ciascun voxel.

Le stress lines sono le curve generate dall'unione delle tangenti alle direzioni principali di tensione: sono di tre tipi, rispettivamente relative a prima, seconda e terza tensione principale.

I piani principali di tensione di ciascun voxel sono costituiti da tre vettori che indicano rispettivamente le normali alle giaciture della prima, seconda e terza tensione principale.

Le tensioni principali di ciascun voxel sono costituite da tre numeri che indicano rispettivamente il valore della prima, seconda e terza tensione principale. Numeri negativi indicano tensioni di compressione e quindi entranti nella giacitura corrispondente. Numeri positivi indicano tensioni di trazione e quindi uscenti dalla giacitura corrispondente.

In base alle convenzioni stabilite da questo software quindi, i segni + e - non indicano se le tensioni sono concordi o discordi all'asse corrispondente della terna principale, ma semplicemente la loro tipologia.

# | 3.3

# UPDATE M2

## AGGIORNAMENTO MESH M2 POST A.E.

*Questo paragrafo descrive le modalità con cui gli output dell'analisi elastica realizzata con Millipede vengono assorbiti all'interno del processo generativo della mesh M2.*

### **Gestione output - Adeguamento mesh.**

Come riportato nell'introduzione di questo paragrafo, la brep di input può essere considerata come un corpo bidimensionale. Di conseguenza, gli elementi della mesh minima che è necessario adeguare in relazione ai risultati dell'analisi elastica sono quelli di parete: montanti per sforzi verticali, baseline ed irrigidimenti orizzontali per gli sforzi agenti sul piano XY.

La maggior parte dei materiali di filling ha un ottimo comportamento a compressione ed una limitata resistenza a trazione: il reinforcement, quindi, deve necessariamente intercettare questo tipo di sforzi. Per prima cosa, infatti, vengono separate dalle terne contenenti i valori delle tensioni principali dei voxel, ed evidenziate, le sole tensioni di trazione. In ciascun voxel, possono esservi indifferentemente da zero a tre tensioni principali di trazione: il loro numero dipende solo ed esclusivamente dalla posizione del voxel e da carichi e vincoli presenti.

In seguito, al fine di preparare al meglio i risultati ottenuti per gli step successivi, si realizzano in sequenza queste operazioni:

. selezione del centro di ogni singolo voxel

. spostamento sul piano XY di ogni terna di tensioni, dal centro del voxel al punto più vicino della parete più vicina. Il punto di arrivo è trovato come proiezione del centro sulla superficie lungo la normale ad essa sul piano di riferimento. Questa operazione è considerata accettabile con buona approssimazione sia per la natura bidimensionale dell'oggetto di input che per l'elevato grado di definizione della voxelizzazione, che garantisce la presenza di centri sufficientemente vicini alla superficie.

. si determinano i sistemi di riferimento locali nei punti appena trovati: un asse verticale z, un asse diretto secondo la tg alla superficie in quel punto sul piano XY, un asse diretto secondo la normale

. si proiettano, mediante prodotto scalare, le tre tensioni principali lungo la direzione della terna locale considerata in quel passaggio.

Si veda ora nel dettaglio come vengono integrati questi risultati nel processo sviluppato.

### **Caso I - Sforzi verticali**

Gli input di questa parte di definizione sono un numero n di vettori dove n rappresenta il numero di voxel con sforzi di trazione diversi da 0 nella direzione considerata, in questo caso Z.

Ogni vettore ha:

. punto di applicazione coincidente con la proiezione del centro del voxel sulla superficie

. direzione uguale a quella considerata

. modulo uguale alla sommatoria dei contributi di trazione presenti, variabili da 1 a 3

Dopo aver assegnato un valore pari a 0 a tutti i voxel senza sforzi di trazione (questa condizione è a favore di sicurezza in quanto potrebbero esservi sforzi negativi di compressione che compensano, anche solo parzialmente, quelli positivi) si effettua quanto segue:

. si determinano il numero di voxel totali afferenti ad ogni maglia quadrangolare di parete

. si calcola il valore medio degli sforzi di trazione in quella cella, sempre ragionevolmente piccola per evitare che vengano stemperati eventuali valori di picco

. si confronta il valore ottenuto in ogni singola cella con un valore limite (per semplicità qui è stato scelto il valore medio tra tutte le maglie, ma potrebbe essere ad esempio la tensione di snervamento del materiale) eliminando quelle con valori inferiori, che non necessitano di rinforzi

. evidenziando le sole rimaste, si calcola il rapporto tra il valore medio della singola maglia ed il valore di riferimento scelto, approssimando per eccesso all'unità successiva

. si confronta il valore così ottenuto con il numero massimo di suddivisioni aggiuntive ammissibili, dato dal rapporto tra  $i_y$  e  $i_{y,min}$ , dipendente dalle caratteristiche dell'estrusore e del materiale (in questo caso pari ad 8mm)

. si riducono tutti i valori superiori al massimo

ammmissibile a quella cifra mentre restano inalterati i valori inferiori

. si verifica se i montanti aggiuntivi intersecano o meno gli irrigidimenti per capire se la loro costruzione deve essere spezzata in due momenti distinti come accade in quei casi

. si inseriscono i punti necessari alla realizzazione di questi montanti aggiuntivi all'interno delle liste ordinate

L'output di questa parte di definizione è quindi il numero di montanti che deve essere aggiunto ad ogni singola cella. I loro estremi rientrano a tutti gli effetti nei punti di suddivisione delle baseline inferiori e superiori.

## Caso II - Sforzi tangenti

Gli input di questa parte di definizione sono un numero  $n$  di vettori dove  $n$  rappresenta il numero di voxel con sforzi di trazione diversi da 0 nella direzione considerata, in questo caso quella della tangente sul piano XY alla curva di parete, nel nuovo punto di applicazione delle tensioni. Ogni vettore ha:

- . punto di applicazione coincidente con la proiezione del centro del voxel sulla superficie

- . direzione uguale a quella considerata

- . modulo uguale alla sommatoria dei contributi di trazione presenti, variabili da 1 a 3

Dopo aver assegnato un valore pari a 0 a tutti i voxel senza sforzi di trazione (questa condizione è a favore di sicurezza in quanto potrebbero esservi sforzi negativi di compressione che compensano, anche solo parzialmente, quelli positivi) si effettua quanto segue:

- . si riuniscono in un unico ramo tutti i voxel che si trovano alla stessa quota Z, anche se appartenenti a pareti diverse. La numerazione dei rami cresce dal basso verso l'alto

- . si determina il valore medio delle tensioni di trazione su ogni singola riga di voxel (le righe coincidono coi rami della struttura)

- . calcolo del rapporto tra  $i_z$  e  $L_{\text{voxel}}$ , dove  $i_z$  rappresenta la distanza tra due layer consecutivi, considerando quindi anche gli irrigidimenti, e  $L_{\text{voxel}}$  indica invece la lunghezza del lato dei voxel. Questo rapporto serve per determinare il numero di righe di voxel afferenti ad ogni layer della mesh minima. Come già spiegato nel paragrafo precedente,  $L_{\text{voxel}}$  è sempre fissato come sottomultiplo di  $i_z$

- . si calcola il valore medio degli sforzi di trazione tra tutti i voxel afferenti allo stesso layer

- . si confronta il valore ottenuto in ogni singolo layer con un valore limite (per semplicità qui è stato scelto il valore medio tra tutti i layer, ma potrebbe essere ad esempio la tensione di snervamento del

materiale) eliminando quelli con valori inferiori, che non necessitano di rinforzi

- . evidenziando i soli rimasti, si calcola il rapporto tra il valore medio del singolo layer ed il valore di riferimento scelto, approssimando per eccesso all'unità successiva

- . si confronta il valore così ottenuto con il numero massimo di suddivisioni verticali aggiuntive ammissibili, dato dal rapporto tra  $i_z$  e  $i_{z,\text{min}}$ , dipendente dalle caratteristiche dell'estrusore e del materiale (in questo caso pari ad 8mm)

- . si riducono tutti i valori superiori al massimo ammissibile a quella cifra mentre restano inalterati i valori inferiori

- . si assegnano valori pari ad 1 a tutti i rami che contengono i layer precedentemente esclusi

- . si suddividono i singoli tratti in cui è stato scomposto il segmento che fissa le quote dei cutting planes iniziali della mesh (a distanza costante) per i valori ottenuti

L'output di questa parte di definizione sono quindi le sezioni orizzontali che devono essere aggiunte a quelle iniziali per rinforzare le fasce dell'oggetto maggiormente soggette a trazione.

A questo punto sarebbe necessario aggiornare il peso della mesh in base agli elementi aggiunti innescando un meccanismo iterativo, ma come emerso dall'analisi dei carichi il suo contributo è trascurabile rispetto a quello del filling scelto. Pertanto, è possibile prendere per validi i risultati di questa prima iterazione senza modificare ulteriormente la mesh.

# 3.4

# TEST SS.3

## PRIMA SESSIONE TEST SU M2

*Questo paragrafo descrive le condizioni iniziali della mesh sottoposta ai test, le problematiche emerse durante il loro svolgimento, gli accorgimenti adottati step-by-step per correggerle e le caratteristiche del modello digitale uscente.*

### SESSIONE 3 | TEST I

In questa sessione viene testata per la prima volta la mesh con processo generativo di tipo M2. La transizione da M1 a M2 è avvenuta essenzialmente con l'obiettivo di aumentare la coerenza e la compatibilità tra il modello digitale ed i comportamenti del tool e del materiale osservati. Sono stati eliminati gli elementi che avevano evidenziato maggiori problematiche in fase di estrusione per avere una fabbricazione più fluida e veloce, e definita una strategia alternativa che abbia come output un modello fisico con prestazioni aumentate. Il modello qui testato, di conseguenza, non ha più le aste inclinate sul piano YZ (lati delle maglie triangolari) e le polilinee di collegamento trasversale sono state ripensate in modo che appoggino ad ogni cambio di parete su più montanti delle maglie quadrangolari, facilitandone così l'ancoraggio. A fronte di queste modifiche, aumenta il numero di cicli start/stop per l'estrusore, necessari tra ogni montante e quello successivo. Il fulcro della sessione in oggetto è quindi la messa a punto di questo sistema: il braccio deve interrompere l'estrusione sul punto finale di ogni move up tagliando il filamento e riprenderla sul punto iniziale del move up successivo. I parametri che consentono di gestire questo behaviour sono retraction e compensation, già descritti nel paragrafo 2.5.

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

La mesh utilizzata per questo test è stata modellata secondo le istruzioni riportate nel paragrafo 3.1 e visibili graficamente nelle sue fig. Le proprietà sono le seguenti.

HG1 direzione delle curve e loro ordine di estrusione studiati per avere massima continuità nel rilascio di materiale, riducendo al minimo il numero di spostamenti senza deposito. Nello specifico, in ciascuna elemento, costituito da 4 layer, ne sono presenti 5

HG2 la mesh, anche nel caso di maggiore complessità, è sempre scomponibile in moduli di 4 layer la cui logica di fabbricazione è ricorsiva: cambia la geometria ma ordine e numero di componenti sono gli stessi (fig., par.3.1)

HG3 l'orientamento del sample sul piano di lavoro non è arbitrario ma strettamente legato alle caratteristiche del robot ed alla geometria dell'estrusore: parete (0) più lontana dal braccio e parete (1) più vicina, montanti sempre ordinati in direzione  $Y_+$

HG4 per favorire il distacco del filamento in sommità ai montanti, è stato implementato uno spostamento aggiuntivo senza rilascio in direzione verticale Z, di lunghezza costante pari a 10mm e da compiere dopo il delay.

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 delay = 7s (precedentemente 10s)

HR2 delay planar = 2s (precedentemente 1s)

Essendo presenti in quantità paragonabili, questi nuovi settaggi dei delay dovrebbero garantire una riduzione complessiva dei tempi di fabbricazione dell'ordine del 20%. Rispetto alla sessione 2 è stato infatti potenziato il sistema di raffreddamento, adesso costituito da due tubi in plastica simmetrici rispetto al nozzle e completamente operativi. Grazie ad un raffreddamento più efficiente è stato possibile ridurre i tempi di delay: l'unica eventualità cui bisogna prestare attenzione è che l'eccessivo flusso di aria deformi il materiale appena depositato. Tuttavia, avere un sistema simmetrico aiuta anche in questo senso. I tubi in plastica, rispetto all'ottone, sono più funzionali in quanto estremamente più flessibili in caso di collisioni.

HR3 gcode modificato in modo tale che per qualsiasi move down sia abbia  $E=0$ , dove E è il parametro che indica la quantità di materiale estrusa per realizzare ogni singolo tratto ed è legato al prodotto tra  $F_{ext}$  e la sua lunghezza.

HR4 gcode modificato in modo tale che per qualsiasi move up di lunghezza pari al segmento definito in HG4 si abbia  $E=0$

HR5 retraction = -2 in quanto come si è visto durante la sessione 2 si tende sempre ad avere un eccesso di materiale in camera

HR6 compensation = 1.2

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è stato scelto isolando dall'intera mesh la porzione ritenuta più significativa in termini di curvatura. Le sue dimensioni sono le seguenti:

$i_z = 30\text{mm}$  (distanza tra layer successivi, irrigidimenti inclusi)

$i_x = 60\text{mm}$   $i_y = 40\text{mm}$

L'interasse  $i_z$  pari a 30 mm è il massimo ammissibile con l'estrusore attualmente utilizzato a meno di importanti limitazioni su  $i_y$ , in quanto significa che vi saranno i montanti non attraversati da irrigidimenti di altezza pari a 60mm. La parte terminale dell'estrusore, costituita da camera e nozzle, ha un'altezza pari a 62mm. Pertanto, utilizzando interassi maggiori si incorrerebbe nello schiacciamento dei montanti ad opera del carter contenente il motore e le altre componenti. Quest'oggetto è situato sopra la camera ed ha un ingombro molto maggiore. L'unico modo per evitare quest'eventualità è, come detto, lavorare su  $i_y$ , garantendo una distanza minima tra i montanti sempre superiore a 60mm, ossia metà della larghezza del carter (120mm). Nel caso studiato, si è preferito avere maglie più ridotte per favorire il contenimento di un eventuale materiale di filling e lavorare quindi con interassi  $i_z < 31\text{mm}$ .

### OUTPUT

P1 la problematica principale riguarda il mancato distacco del filo sulla sommità dei montanti. Seppure con sezione molto ridotta, è infatti visibile il percorso fatto dal braccio per passare da un montante a quello successivo.

P2 il restart è leggermente differito, in quanto la base del montante successivo non ha la sezione piena del filamento desiderata, che diventa tale solo in seguito.

Come ipotizzato nelle premesse di questa sessione, i parametri da calibrare sono principalmente retraction (P1) e compensation (P2). Lavorare su di essi è ad ogni modo decisamente più snello, dal punto di vista computazionale, che prevedere localmente elementi geometrici ausiliari. Si tratta di due valori che definiscono comportamenti del robot del tutto convenzionali.

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

HG1 Al fine di risolvere la problematica principale emersa nel TEST I, è stata definita la seguente sequenza di operazioni da svolgere in corrispondenza del punto finale dei move up: completamento estrusione del tratto verticale / prima retraction di valore -2 / delay= 7s come da HR1 TEST I / seconda retraction di valore -2 / spostamento ausiliario planare di lunghezza pari a 10mm senza deposito (eliminata quindi la componente  $\Delta Z$ ) / move down per verso lo starting point del montante successivo anch'esso senza deposito. Di conseguenza è stato eliminato anche il delay al termine del tratto ausiliario.

Le restanti specifiche HG1-HG3 del TEST I sono rimaste immutate.

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 retraction = -2 come nel TEST I ma prevista in due momenti distinti come descritto in HG1

HR1 compensation = 1.6, incrementata per risolvere P2

I restanti parametri del TEST I sono rimasti immutati ad eccezione di HR4 ora impostato non più per move up ma per move planar con le stesse caratteristiche, come spiegato in HG1

#### SAMPLE

Il sample utilizzato è analogo a quello del caso precedente ed è costituito da un modulo completo di 4 layer dove:

$$i_z = 30\text{mm} \quad i_x = 60\text{mm} \quad i_y = 40\text{mm}$$

### OUTPUT

P1 In seguito alla modifica del comportamento del robot al termine dei move up, descritta in HG1, il problema relativo all'estrusione e visibilità del segmento ausiliario in quota è stato quasi completamente risolto. Come si può notare dalle foto, infatti, la costruzione a forma trapezoidale fin qui utilizzata per agevolare i move down non è più riscontrabile. Tuttavia, è ancora possibile notare l'asta diagonale, seppure abbia sezione molto ridotta: questo significa che è ancora presente materiale in eccesso nella camera dell'estrusione durante il processo e la problematica non può dirsi completamente risolta.

Il deposito dello starting point del montante successivo è stato invece corretto e l'asta presenta sezione omogenea lungo tutto il suo corso (P2 - TEST I).

P2 foto Poiché l'estrusione del primo layer di montanti è stata ritenuta soddisfacente, a differenza di quanto avvenuto nel test I, si è deciso di non interrompere la fabbricazione del sample per osservare il comportamento delle polilinee orizzontali di irrigidimento. Il fatto di non avere diagonali solide di parete rende il vertice alto dei montanti più suscettibile di spostamenti, specie dove la curvatura prevista dalla mesh in direzione Z è tale da inclinarli sensibilmente. La conseguenza è che il layer orizzontale di connessione tra le pareti non trova la posizione di alcuni dei vertici su cui deve ancorarsi, causando il trascinarsi della propria parte già estrusa. Gli strati orizzontali previsti devono sempre fungere da solide baseline per i montanti dei layer successivi: quando ciò non accade, come in questo caso, risulta impossibile procedere nella fabbricazione.

P3 Un'altra problematica emersa è relativa alla flessione dei singoli tratti a sbalzo che collegano trasversalmente le due pareti. Pur lavorando con interassi paragonabili a quelli adottati nella mesh di tipo M1, infatti, questi tratti tendono ad avere lunghezze sensibilmente maggiori, dal momento che le connessioni avvengono in diagonale e non più in direzione perpendicolare alle pareti. Di conseguenza, tendono ad avere un andamento meno rettilineo ed una sezione meno omogenea.

# 3.5

# UPDATE M2

## AGGIORNAMENTO MESH M2 POST SS.3

*Questo paragrafo descrive come è stata adeguata la mesh di tipo M2 in relazione agli output della sessione 3 di test e quindi le caratteristiche del suo nuovo processo di generazione. La mesh uscente sarà l'input della sessione 4.*

**Obiettivi.** Proseguendo nell'ottica di modulare continuamente il modello digitale sulla base dei feedback forniti dal processo materiale di fabbricazione, è necessario adeguare la mesh in relazione agli output del TEST II. L'obiettivo di questo passaggio è definire un modello digitale in grado di superare le problematiche P2 e P3 emerse nel test precedente e sistematizzare i comportamenti locali presenti nel gcode che gestisce i behaviours dei tool.

### **Adeguamento agli output.**

O1. Al fine di risolvere la problematica P2 è stato deciso di modificare la posizione dei vertici intermedi delle polilinee orizzontali di irrigidimento n.0.2 e n.2.2, fin qui coincidenti con gli end points dei montanti già estrusi. Il TEST II ha evidenziato che i casi più critici si verificano all'aumentare dell'oggetto dei montanti: nello specifico, se la concavità del sample è rivolta in direzione  $X_+$ , le aste sono inclinate verso il robot. Di conseguenza, i punti della parete (0), più lontana, si spostano verso l'interno della mesh e quelli su (1), più vicina, verso l'esterno. E viceversa. L'obiettivo è quello di creare polilinee che "avvolgano" i nodi che si formano sui vertici in questione, opponendosi al loro spostamento e riportandoli nella posizione. Per fare ciò, è necessario che vi passino leggermente all'esterno: pertanto, i punti della polilinea sulla parete (1) vengono spostati in direzione della normale alla curva in quel punto di una quantità pari a 3mm (comunque regolabile tramite slider), mentre la posizione dei punti su (0) viene lasciata immutata poichè già leggermente esterna al vertice dei montanti in virtù del loro spostamento indesiderato. Nel caso di curvatura in direzione opposta, la definizione opera in maniera perfettamente speculare a quella appena

descritta.

O2. Al fine di risolvere la problematica P3, invece, è stato inserito un punto intermedio, con delay associato, a tutti i move planar superiori ad un certo valore. Per semplicità è stato considerato l'interasse  $j_y$  in modo che non siano intaccati i tratti orizzontali sulle pareti ma solo quelli diagonali: anche questo valore, tuttavia è regolabile tramite slider.

### **Accorgimenti locali.**

I comportamenti locali da implementare sono i seguenti:

L1 Tratti di spostamento senza rilascio da un estremo all'altro della mesh (lunghi). Vengono realizzati dopo essere stati traslati verso l'alto di una quantità superiore alla lunghezza massima dei montanti (60mm), per evitare collisioni. Non vi è il segmento di "sfogo" prima della ripresa come per M1 in quanto nel corso dei test successivi è stato perfezionato il meccanismo di start & stop.

L2 Tratti di spostamento senza rilascio di materiale tra n.2.1 e n.2.2 (corti). Questi tratti sono gli unici, tra i 5 presenti, a non collegare le estremità della mesh. Tuttavia hanno una particolarità che consente di isolarli dal resto delle aste: il tratto successivo è identico a loro ma ha verso opposto. Una volta selezionati, il loro starting point viene alzato di una quantità regolabile, attualmente pari a 3.5mm.

Creandosi una differenza di quota negativa tra starting point ed end point, si configurano come move down. Questa proprietà è fondamentale, come si vedrà, al fine di semplificare drasticamente il gcode.

L3 Altezza di tutti i montanti ridotta di 1mm per garantire il passaggio sopra di essi delle polilinee orizzontali, migliorandone conseguentemente l'adesione.

L4 Tratti orizzontali per il distacco del filamento prima di ogni move down, costituiti da due componenti: una in direzione della curvatura locale ed una in direzione Z, della medesima lunghezza. Il loro modulo è un valore fisso, qui scelto pari a 15mm ma comunque regolabile tramite slider. Anche in questo caso il segmento è traslato verso il basso di una quantità pari ad 1mm, dal momento che il suo starting point deve coincidere con l'end point del montante sottostante.

### **Update logica.**

La logica definita nel paragrafo 3.1 di questo capitolo è confermata nella sua totalità in quanto studiata già per assecondare nel migliore dei modi le cinematiche del robot e le caratteristiche dimensionali dei suoi componenti al polso. Questa mesh infatti, rispetto a quella di tipo M1, è stata definita dopo l'esecuzione di due sessioni di test. Di conseguenza, queste informazioni erano già note. Gli spostamenti senza rilascio di materiale sono sempre 5 e sono tra: n.0.0 - n.0.1 / n.1.0 - n.1.1 / n.2.0 - n.2.1 / n.2.1 - n.2.2 / n.3.0 - n.3.1.

### **Update gcode.**

Le uniche condizioni da implementare nel gcode in base a quanto appena descritto sono:

. E = 0 per tutti i move up di lunghezza pari a 60mm (L1) e 15mm (L4)

. E = 0 per tutti i move down

### **Ordine definizione.**

Il modo in cui viene sviluppato il modello digitale attraverso la definizione è il seguente:

. FASE I: generazione mesh minima desiderata ipotizzando condizioni ideali di fabbricazione. Input: brep / polisuperficie. Output: liste ordinate di punti in cui i rami individuano l'elemento n-esimo su cui si sta lavorando, i branch di livello I il singolo layer di riferimento (0-3), i branch di livello II le polilinee del singolo layer (0-2).

. FASE II: esecuzione analisi elastica, lettura dei suoi output e generazione degli elementi geometrici aggiuntivi

. FASE III: integrazione degli elementi geometrici appena determinati nelle liste ordinate di punti definite nella fase I

. FASE IV: design degli accorgimenti locali descritti L1-L4

. FASE V: inserimento dei punti necessari per l'estruzione degli accorgimenti locali nelle liste ordinate definite nella fase III

. FASE VI: definizione di tutti i robot behaviours non convenzionali (ad es. E=0 in caso di move down)

| 3.6

# TEST SS.4

## SECONDA SESSIONE TEST SU M2

*Questo paragrafo descrive le condizioni iniziali della mesh sottoposta ai test, le problematiche emerse durante il loro svolgimento, gli accorgimenti adottati step-by-step per correggerle e le caratteristiche del modello digitale definitivo.*

**Finalità.** Questa seconda sessione di test sulla mesh di tipo M2 può considerarsi suddivisa in due distinti momenti: il primo, relativo al TEST I, ha l'obiettivo di verificare l'effettivo funzionamento delle modifiche integrate secondo le modalità descritte nel paragrafo 3.5, perfezionandole qualora fosse necessario. Il secondo, invece, costituisce il fulcro di questa ricerca, ed ha come obiettivo la fabbricazione di un prototipo di dimensioni significative, vicine alla scala architettonica.

### SESSIONE 4 | TEST I

Il primo test di questa sessione ha quindi come obiettivo la fabbricazione di un sample perfettamente funzionante e privo di criticità del prototipo finale.

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

Il modello digitale qui adottato è la sintesi dell'intero processo generativo ed ha come specifiche tutte quelle predisposte in seguito alla sessione 3 di test (O1-O2, L1-L4).

#### ROBOT BEHAVIOURS

HR1 compensation = 1.85 (precedentemente 1.3)

HR2 retraction = -1.5 (precedentemente -1)

Il parametro di compensation è stato aumentato al fine di facilitare lo svuotamento della camera dell'estrusore ad ogni ripresa di deposizione. In questo modo, si dovrebbe ottenere una maggiore qualità del filamento stampato, che rimane meno tempo in camera soggetto ad alte temperature. Dal momento che il valore di compensation è strettamente legato a quello di retraction al fine di avere un corretto comportamento di start & stop, anche quest'ultimo è stato incrementato di conseguenza.

#### SAMPLE

Il sample utilizzato, in preparazione dello step successivo, è costituito dal modulo di base del prototipo definitivo. Le sue dimensioni sono:

$i_z = 15\text{mm}$   $i_x = 65\text{mm}$   $i_{y,\text{max}} = 30\text{mm}$

Il valore di  $i_z$  così ridotto è conseguenza del fatto che dall'analisi elastica risultano tensioni di trazione non trascurabili nella parte basamentale del prototipo. In risposta, vengono predisposti raffittimenti con interasse verticale dimezzato rispetto alle zone in sicurezza.

### OUTPUT

Il modello fisico realizzato risponde con efficacia agli obiettivi preposti. Nello specifico, tuttavia, è necessario registrare come le diagonali siano in realtà ancora estruse, seppure con una sezione più che dimezzata rispetto agli altri elementi (1mm). Dal momento però che non interferiscono in alcun modo con la fluidità del processo, poichè sono stati eliminati tutti gli accorgimenti ausiliari per la loro estrusione, è stata valutata l'ipotesi di mantenerle e rimuoverle eventualmente in un secondo momento, ad estrusione conclusa. In questo modo, infatti, si ottiene contributo di supporto addizionale alla verticalità dei montanti ed alla tenuta dei nodi senza alcun aggravio dal punto di vista computazionale e della fabbricazione. Il filamento estruso è invece più omogeneo rispetto alla sessione 3 aumentando così la qualità finale della stampa e confermando le considerazioni fatte in coda ad HR1 e HR2.

I nodi, in virtù dei valori dei parametri scelti e degli accorgimenti locali eseguiti presentano un accumulo di materiale sufficiente per garantire un sicuro ancoraggio a tutte le aste che vi afferiscono. Il test successivo è stato pertanto svolto sul prototipo definitivo.

### SESSIONE 4 | TEST II

Il secondo ed ultimo test di questa sessione ha come obiettivo la fabbricazione del prototipo definitivo, di dimensioni significative e per la prima volta vicine alla scala architettonica.

La buona riuscita di questo test prova l'applicabilità delle strategie fin qui verificate solo sui singoli moduli anche su larga scala, supportando così l'idea alla base di questa ricerca di fabbricare oggetti complessi mediante la loro scomposizione in unità elementari con uguale logica generativa.

### INPUT

#### SPECIFICHE GEOMETRIA MESH

Il modello digitale qui adottato è analogo al test precedente. Le sole grandezze ad essere modificate sono le sue dimensioni.

#### ROBOT BEHAVIOURS

I parametri di questa sezione sono analoghi a quelli adottati nel test precedente.

#### SAMPLE

Il sample utilizzato in questo test è costituito dal prototipo definitivo.

Dimensioni del bounding box:

$L_x = 330\text{mm}$   $L_y = 420$   $L_z = 1200\text{mm}$

Interassi nelle tre direzioni:

$i_z = 15\text{-}30\text{mm}$   $i_x = 65\text{mm}$   $i_y = 10\text{-}30\text{mm}$

Il prototipo è stato suddiviso per motivi legati ai tempi di produzione in 3 pannelli sovrapponibili, ciascuno con altezza  $h = 400\text{mm}$ . Le dimensioni variabili delle maglie quadrangolari sono il risultato dell'analisi elastica simulata sul modello digitale prima della sua fabbricazione.

### OUTPUT

Il modello fisico realizzato risponde con efficacia agli obiettivi preposti. Il processo così definito risulta essere pienamente affidabile, dal momento che la problematica principale legata alla posizione dei nodi non ha evidenziato particolari criticità, anche salendo di quota. Sono stati ritrovati autonomamente dal braccio più del 95% dei punti anche a fronte di aggetti e curvature importanti: questo dimostra sia l'efficienza degli elementi di irrigidimento e di supporto progettati, sia un comportamento del materiale migliore di quanto ci si attendesse, in quanto gli spostamenti dovuti al suo ritiro si sono rivelati trascurabili ai fini della fabbricazione. Quest'ultimo aspetto è fondamentale per gli sviluppi futuri di questa ricerca: garantisce la possibilità di scomporre la geometria di partenza in più parti, anche realizzabili in parallelo da più robot, e di ri-assemblarle in un secondo momento.

Le riduzioni locali di interasse dovute agli elementi aggiuntivi di rinforzo non hanno evidenziato criticità.

| 4.1

# CONCLUSIONI

## E DIREZIONI FUTURE DI RICERCA

*In questo capitolo, sono riportate le considerazioni conclusive su questo percorso di ricerca: obiettivi raggiunti, obiettivi mancati e le conseguenti direzioni in cui puntare per possibili sviluppi futuri.*

**Obiettivi raggiunti.** Il risultato dell'ultimo test effettuato può essere considerato un punto di arrivo per questa ricerca dal momento che rappresenta un ciclo di lavoro completo del processo progettato, dallo sviluppo dell'algoritmo generativo alla fabbricazione dell'oggetto architettonico con le proprietà desiderate. Come spiegato dal titolo di questa tesi, l'obiettivo principale della ricerca era la definizione di un sistema integrato di operazioni, che, una volta operativo, permettesse in primo luogo di facilitare la riproduzione di superfici complesse, in secondo di utilizzare il prodotto finale per la creazione di oggetti architettonici in scala 1:1. Le proprietà più importanti da conferire erano:

. adattabilità geometrica: una volta messo a punto l'algoritmo generativo, renderlo operativo per più categorie possibili di superfici. In questo senso, si vuole automatizzare un processo in cui:

. nel modello digitale l'unico input è la volumetria appartenente alle categorie di cui sopra (di qui l'importanza della loro ampiezza) che si vuole riprodurre, e l'output è il modello tridimensionale, sottoforma di mesh, realizzabile nella sua totalità dai sistemi di produzione scelti per il successivo step di fabbricazione dell'oggetto fisico. Da sottolineare come l'output non sia univoco, ma settabile in maniera elementare anche da personale non altamente specializzato, per essere calibrato sullo specifico caso di studio. Questo è possibile perchè i valori limite degli intervalli entro cui si possono regolare i parametri sono stati studiati precedentemente. Un eventuale utente esterno si muoverebbe quindi in sicurezza. Alcuni di questi sono mostrati in figura.

. il modello digitale uscente è l'input per il sistema di fabbricazione scelto, che deve lavorare in

autonomia e garantire la precisione topologica richiesta durante la riproduzione dell'oggetto

. adattabilità a sollecitazioni esterne: il processo generativo del modello digitale deve prevedere la possibilità di modificare localmente la geometria della mesh in risposta a determinate condizioni ambientali (campi vettoriali)

. coerenza con i sistemi di produzione: la conoscenza approfondita dei behaviours del sistema di produzione scelto deve essere il focus della ricerca. Per questo motivo, lo sviluppo di un processo integrato come quello in oggetto non può prescindere da una costante attività di test. Il modello digitale deve essere progettato in base ai feedback inviati dal tool, in modo da produrre geometrie di output il più possibile compatibili e coerenti con esso, massimizzandone le potenzialità.

. accuracy: il prodotto finale di questo processo deve essere un oggetto la cui geometria, se confrontata con le superfici di input del modello digitale, evidenzia il livello di precisione topologica fissato dal progettista. Non necessariamente questa deve essere presente anche nel modello digitale uscente dalla prima fase del processo: lo studio del rapporto tra modello digitale e sistema di produzione può infatti rendere necessarie "distorsioni" geometriche che sono, in questo senso, assolutamente ammissibili. L'unica cosa che conta, come detto, è il prodotto finale.

. affidabilità: visti gli attuali tempi di produzione e le dimensioni degli oggetti che si vogliono costruire, il processo deve dimostrarsi affidabile. Il risultato di un test svolto su un sample significativo della

mesh, che racchiuda in sé le principali criticità, deve essere indicativo circa la buona riuscita o meno del prodotto finale. In questo senso è fondamentale che la geometria della mesh abbia al suo interno strutture ricorsive.

. autonomia: il sistema di produzione scelto deve poter lavorare, nella sua totalità o quasi, in autonomia.

Analizzando approfonditamente il processo qui sviluppato ora che, in seguito alla fabbricazione del prototipo, può ritenersi completo, si osserva che:

. adattabilità geometrica. La mesh di tipo M1 e quella di tipo M2 accettano come input superfici accoppiate a distanza variabile, con geometrie svincolate e curvatura lungo le due direzioni. Polisuperfici più articolate possono essere realizzate se adeguatamente scomposte. Tutti i casi di minore complessità sono comunque ammessi.

. automatizzazione. L'algoritmo generativo definitivo prevede come unico input la volumetria dell'oggetto che si vuole riprodurre, restituendo come output l'insieme delle traiettorie che deve percorrere il robot ed i behaviours relativi ad ogni singolo tratto

. editabilità modello digitale. La quasi totalità delle caratteristiche geometriche della mesh uscente dal modello digitale sono settabili mediante semplici slider. I valori limite determinati.

. adattabilità a sollecitazioni esterne. La definizione prevede la possibilità di sottoporre la volumetria di input a campi vettoriali ed ha integrati il design degli elementi aggiuntivi necessari ed il loro inserimento nelle liste ordinate

. coerenza con i sistemi di produzione. L'intensa attività di test svolta ha consentito di progettare la geometria della mesh uscente dal modello digitale e tutti i suoi accorgimenti locali in relazione ai behaviours del braccio e dell'estrusore. Questa attenzione ha alleggerito l'onere computazionale e snellito progressivamente il processo di fabbricazione, a fronte di sample con complessità crescente.

. accuracy. Utilizzando un filamento con diametro pari a 3mm, è stato fissato come requisito il livello di precisione massimo ottenibile dal tool in queste condizioni. Il braccio robotico, infatti, ha un'accuracy pari a 0.1mm, che però decade in base a quanto sopra. Durante la fabbricazione del prototipo finale, il braccio ha trovato autonomamente circa il 95% dei nodi totali della mesh. Inoltre, assemblando una coppia di pannelli realizzati a distanza di 3 settimane, è stata rilevata la perfetta congruenza delle due superfici di contatto. Questi due fatti evidenziano anche un ottimo comportamento del materiale rispetto alle variazioni termiche.

. affidabilità / autonomia. La fabbricazione del prototipo finale è stata realizzata immediatamente dopo la buona riuscita del test sul modulo di maggiore complessità della mesh. Il braccio ha ritrovato autonomamente circa il 95% dei nodi.

Da queste osservazioni emerge che il processo sviluppato, in relazione al tool ed al materiale adottato, risponde con efficacia ai requisiti fissati in partenza.

### **Obiettivi mancati.**

La prosecuzione naturale della ricerca, adesso che sono state fissate le caratteristiche geometriche della mesh e gli intervalli entro cui possono variare i parametri che la definiscono, sarebbe stato indagare il rapporto tra questa ed il materiale di filling. Il primo step cercare materiali allo stato fluido con caratteristiche meccaniche (modulo di elasticità) compatibili con quelle del filamento, il secondo determinare la dimensione ideale delle maglie perchè si inneschi il meccanismo di leaking, una volta che il materiale è stato introdotto nella mesh.

Questa, varia inevitabilmente a seconda delle proprietà fisiche del materiale scelto.

Nel caso specifico di mesh in ABS 3mm, non potendo per ovi motivi immaginare e testare un suo riempimento in calcestruzzo, i materiali di filling ipotizzati sono stati schiuma poliuretanica e gel. Test di riempimento non sono mai stati fatti, dal momento che si è preferito concludere prima la parte relativa alla definizione del processo, per avere dati certi su cui impostare questa seconda fase di ricerca. Tuttavia, sono stati osservati i rispettivi comportamenti di solidificazione ed è emerso che:

. il gel a fronte di una maggiore plasmabilità è più difficile da compartimentare, in virtù del suo stato quasi liquido, ed ha tempi più lunghi di presa

. la schiuma poliuretanica è più semplice da compartimentare in virtù della presa quasi istantanea ma ha minore plasmabilità

Ad ogni modo, come detto, questo studio è ancora allo stadio embrionale e meriterebbe di essere trattato più approfonditamente.

Un altro aspetto che non è stato approfondito è quello relativo all'esplicitazione progettuale di questa ricerca, per lo stesso motivo del caso precedente: si è deciso di concentrare tutte le energie sullo sviluppo, il completamento e l'affidabilità del processo, prima di procedere con gli step successivi. Sicuramente, non lo nascondo, quest'ultima considerazione è frutto anche dell'impostazione mentale del sottoscritto, talvolta frenante. Ad ogni modo, il sistema di produzione

prima descritto si può prestare facilmente a logiche di prefabbricazione, anche in-situ, dal momento che, come dimostrato nell'ultimo test, l'oggetto finale può essere suddiviso in più componenti fabbricate separatamente ed assemblate successivamente. In base a questa possibilità, alcune applicazioni interessanti per i prodotti ultimi di questo processo, sono gli oggetti architettonici non-standard da esterno, come ad esempio rifugi, pensiline, padiglioni temporanei.

### **Direzioni future di ricerca.**

Il processo sviluppato, ora ultimato, apre il campo a numerose ulteriori direzioni di ricerca. I tre filoni principali riguardano: tool, filling e geometria.

Tool: senza dubbio questa direzione, a fronte della necessità di competenze altamente specializzate, è quella con maggiori potenzialità. Continuando a lavorare con ABS, il primo step sarebbe costruire un effetto in grado di estrarre filamenti di spessore maggiore. Le conseguenze più immediate: aste più stabili, interassi maggiori, riduzione numero elementi, riduzione sensibile tempi di fabbricazione. Passando poi ad un'alimentazione a pellet anzichè a bobina: processo di estrusione potenzialmente ininterrotto, diametro ugello non vincolante, possibilità di realizzare mesh con complessi effetti cromatici. Progettare e settare un estrusore per materiali con caratteristiche meccaniche non trascurabili rispetto al calcestruzzo, ad esempio acciaio o fibra di carbonio, o comunque in grado di contenerne la spinta, sarebbe estremamente time-demanding ma consentirebbe di iniziare la ricerca su come realizzare elementi non-standard, portanti, alla scala architettonica.

Filling: anche in questo caso il campo di ricerca è molto ampio e costituisce la naturale prosecuzione del processo appena definito. Studiare le relazioni tra materiali di riempimento e dimensione delle relative maglie della mesh sarebbe il primo step. Un'altra possibilità da esplorare è quella di realizzare mesh e filling in parallelo, layer per layer, e non in modo sequenziale.

Geometria: studiare come implementare il processo nel caso di polisuperfici ancora più articolate, evitandone la scomposizione. Ad esempio, volumetrie con cavità all'interno.

Come si può notare, quindi, le possibilità evolutive di questa ricerca sono molto ampie e meritano di essere approfondite.



# BIBLIOGRAFIA

## MADE BY ROBOTS - ARCHITECTURAL DESIGN n.229

Fabio Gramazio, Matthias Kohler

2014

## MOBILE ROBOTIC FABRICATION ON CONSTRUCTION SITE

Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Selen Ercan, Volker Helm

2012

## ATLAS OF NOVEL TECTONICS

Reiser + Umemoto, Princeton Architectural Press

2006

## ARCHITECTURE AND THE VIRTUAL: TOWARDS A NEW MATERIALITY

Antoine Picon, Princeton Architectural Press

2011

## NERVI VAULTED ARCHITECTURES. TOWARDS NEW STRUCTURES

Pasqualino Solomita

2015

## PIER LUIGI NERVI. ARCHITETTURA COME SFIDA

Tullia Iori, Sergio Poretti

2010

## RASSEGNA DI ARCHITETTURA ED URBANISTICA n.137/138

Tullia Iori, Sergio Poretti. Università La Sapienza, Roma

2012

## Ringraziamenti

A mamma, babbo ed Andrea. Siete il mio bene più grande.

A zio Claudio, esempio di vita. Sei stato un terzo genitore per me.

A zio Mimmo e zia Elodia, per l'affetto che non mi fate mai mancare.

Ai nonni, che non ci sono più: i vostri valori li terrò sempre stretti.

Ad Alessio, per il supporto, la comprensione e gli insegnamenti. Ma soprattutto per avermi guidato anche nei momenti più difficili con stimoli costanti ed idee brillanti. Grazie davvero.

Ad Andrea, Marco e Stefano la competenza e per tutto il tempo e le energie che mi avete dedicato. Non sarò mai in pari con voi.

A Luca, per i preziosi consigli e la grande disponibilità.

A Marco Verde per avermi da subito responsabilizzato ed avvicinato, con il tuo entusiasmo, ai territori di questa ricerca.

A Pilo, Paolo, Berto, Cox, Bando, Caccio, Fox, Mezzo e Teo, gli amici di una vita.

Al fantastico gruppo C&C, Conta, Ollo e Busca. Come farei senza di voi? Vi voglio bene.

A Santo e Cito: è stato un piacere condividere con voi questo percorso.

A Jules, persona fantastica.

Lore

