

CREARE LEGAMI DIGITALI CON I MATERIALI DI TERRA Il T-Stool

FORMING DIGITAL KINSHIPS WITH EARTHEN MATERIALS The T-Stool

Rhett Russo

ABSTRACT

Il contributo descrive le modalità di concettualizzazione di un processo ceramico finalizzato a creare un nuovo legame tra la ceramica e i suoi stampi attraverso le tecnologie digitali, le cui interazioni sono tentacolari. La sperimentazione su uno sgabello, illustrata dal paper, mira a valorizzare la forza vitale della materia nel processo di design: la fabbricazione del T-Stool, frutto di una collaborazione interdisciplinare, è ottenuta con lo sviluppo di una nuova tecnica di pressatura del gres che impiega uno stampo composto da due parti, in gomma siliconica e in resina epossidica. Il T-Stool è stato realizzato grazie all'impiego di un gemello digitale come fonte di dati per valutare le deformazioni del materiale impiegato e per implementare l'uso di strumenti personalizzati.

This paper aims to address how the ceramic process has been conceptualized to develop a new kinship between ceramic and its counterparts through digital technology. The interface between ceramic materials and digital fabrication, outlined here initiates a new collaboration between the real and the digital, whose interactions are tentacular. The design framework aims to rigorously leverage the vibrancy of matter in the design process. The methodology chronicles the fabrication of the T-Stool, as part of interdisciplinary collaboration, to develop a novel press-molding technique for stoneware that uses a two-part, silicone rubber and epoxy mold. The T-Stool was executed in stoneware through the use of a digital twin as a data source for material speculation, to track transformations in the clay, and to implement the use of custom tools.

KEYWORDS

ceramica, struttura e design, gemello digitale, stampaggio a pressa, stampi in gomma siliconica

ceramics, structure as design, digital twin, press-molding, silicone rubber molds

Rhett Russo is the Undergraduate Chair in Architecture and an Assistant Professor in the School of Architecture, at Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), Troy NY (USA). He is the recipient of several project residencies at the European Ceramic Work Center and a recipient of the Young Architects Award from the Architectural League of New York. E-mail: russor4@rpi.edu

Per secoli l'argilla, in virtù della malleabilità e della lavorabilità che la contraddistinguono, ha rappresentato un prezioso mezzo per preservare la storia e la cultura attraverso le diverse forme espressive dell'architettura e del design. L'imperativo ecologico di trovare alternative al cemento, che siano anche a basse emissioni di carbonio, spinge oggi verso soluzioni all'avanguardia che sfruttano la lavorabilità dei materiali di terra attraverso l'impiego di tecnologie innovative; ad esempio le ceramiche sono resistenti, impermeabili e non infiammabili e trovano un'ampia gamma di applicazioni in architettura (come rivestimento di tetti e pareti, pavimenti, schermature e dispositivi vari) e in ambito paesaggistico poiché l'argilla è una risorsa largamente disponibile in tutto il mondo che può essere lavorata e impiegata vicino al luogo di provenienza, riducendo al minimo l'impatto ambientale del trasporto. Il suo fine vita prevede il riutilizzo, il riciclaggio o lo smaltimento in discarica; alcuni elementi ceramici impiegano fino al 70% di rifiuti post-consumo (Bechthold, Kane and King, 2015) poiché la ceramica di scarto o rifiuto può essere macinata e riutilizzata come grog, un aggregato ceramico che viene aggiunto all'argilla per aumentarne la resistenza alla trazione. Il 'costo' energetico per la produzione di ceramica e terracotta è inferiore a quello necessario per metalli, cemento e vetro, così come la quantità di anidride carbonica generata per tonnellata di prodotto è inferiore a quella del vetro e del cemento (Carty, 2019); di contro, la ceramica è un materiale pesante e fragile, con una resistenza alla compressione maggiore della resistenza alla trazione, che si restringe durante l'essiccazione e la cottura, e per la cui produzione può essere necessaria molta manodopera.

Le recenti innovazioni della fabbricazione e dei forni digitali consentono di realizzare elementi ceramici personalizzati, anche in grandi quantità, e trasformano il tradizionale processo di produzione della ceramica – caratterizzato da estrusioni assiali, angoli di sforno uniformi o elementi piani – in un processo nuovo nel quale gli elementi non sono più condizionati né dalle curvature convesse o concave di stampi rigidi né dalla manipolazione dell'argilla sul tornio. La progettazione digitale per la produzione di elementi in ceramica ha permesso l'impiego di nuove e più complesse geometrie di stampi ibridi – ad esempio in gomma siliconica per lo stampaggio a pressa – dei quali grandi disegni o sottosquadri sono parte integrante. All'interno di una prassi che consente l'impiego di tecniche manuali e digitali, quelle artigianali tendono a caratterizzarsi per una maggiore variabilità del prodotto rispetto a quelli industriali di produzione di massa, che invece permettono una rigorosa uniformità della riproduzione e del controllo di qualità.

Anche gli architetti stanno sviluppando nuove modalità, con processi di progettazione partecipata che coinvolgono la comunità, per combinare tecnologie digitali con tecniche e materiali di costruzione locali, e tra queste proprio quelle che impiegano l'argilla¹, soprattutto per le sue note proprietà termoigrometriche. Recentemente il sistema di stampa 3D Tecla è stato utilizzato per realizzare una casa interamente in argilla, il cui impiego è prevalentemente relegato alla co-

struzione di alloggi in condizioni di emergenza²: combinando le proprietà termodinamiche della terra cruda con le peculiarità produttive della stampa 3D è ora possibile realizzare in loco bio-costruzioni di grande dimensione e senza la necessità di casseforme. L'ultimo decennio ha visto nascere nuove opportunità anche per la produzione di oggetti personalizzati grazie alla stampa ceramica 3D e all'estrusione CNC, metodi di produzione che comunque presentano criticità in termini di ridotta capacità di adesione del materiale e necessità di resine per la polimerizzazione.

Un caso studio per la ceramica digitalmente assistita

Il T-Stool trova origine nel regno fisico come superficie complessa e prende il nome dal suo profilo trasversale che richiama una 'T' incurvata³, una forma che a prima vista ha suscitato qualche perplessità, indipendentemente dallo spazio fisico o virtuale in cui ha trovato collocazione. Per la progettazione dello sgabello in ambiente digitale sono stati adottati nuovi metodi di modellazione (Russo and Mueller-Russo, 2012; Fig. 1) finalizzati a superare le criticità legate alla produzione in ceramica di un'opera di grandi dimensioni con 102 cm di lunghezza, 60 cm di altezza e 79 cm di larghezza (Fig. 2). Il T-Stool è stato realizzato nell'ambito di una ricerca condotta presso l'European Ceramic Workcentre (EKWC) che ha riunito un team di esperti in architettura, design digitale e design industriale per definire il miglior processo di produzione possibile, lo stampo più adeguato, la miscela di argilla da impiegare e le modalità di stampaggio, di cottura e di smaltatura. La collaborazione ha reso possibile la convergenza tra le differenti istanze avanzate dai diversi specialisti, grazie anche alla possibilità di stampare lo sgabello in 3D e in più esemplari; la maggiore specializzazione ha riguardato il design dello stampo perché poteva condizionare, facilitandole, tutte le altre fasi di lavorazione, compreso quella finale di finitura.

Il design finale è la risposta a una serie di quesiti sulla possibilità di realizzare lo sgabello in ceramica come un sottile guscio privo di supporti interni, sul modo migliore di costruire uno stampo leggero per una ceramica con curvature non convenzionali e sui potenziali vantaggi offerti dall'introduzione nel processo ceramico di un gemello digitale. Come sfruttare, quindi, questo nuovo affine – 'oddkin' – che ha in sé la vivacità materiale e la curvatura naturale dei fogli sintetici, l'assenza di peso della tecnologia digitale e la plasticità dell'argilla?⁴ Ancora di più rispetto al suo gemello, il T-Stool è tentacolare nella propria capacità di aggregare competenze diverse, frutto – per prendere in prestito la frase di Haraway (2016) – di uno 'staying with the trouble' tra integrità strutturale, proprietà dell'argilla e immaterialità della rappresentazione digitale.

È opportuno sottolineare che nel progetto del T-Stool si è cercato di mantenere un certo livello di ambiguità tra reale e digitale e di svincolare questo 'oddkin' dal suo elemento dominante, impedendo così alla tecnologia di governare l'estetica del prodotto cosa che accade con la stampa 3D, che tende a dominare il know how ceramico, la storia, l'artigianato e l'abilità manuale in nome dell'efficienza. Per dirlo in maniera più semplice, la doppia natura digitale/reale

del T-Stool ha permesso di modificare la percezione di ciò che è possibile, portando l'argilla a comportarsi in modi che sono tradizionalmente considerati impossibili o troppo rischiosi da perseguire.

Alla luce delle superiori premesse il contributo illustra metodologia, strumenti e processo impiegati, durante il biennio di ricerca (2012-13) condotta l'EKWC, nella progettazione di stampi in gomma siliconica per la pressatura. Nel 2020⁵ è stato prodotto un digital twin aggregate (DTA; Grieves, 2019) mettendo a punto una serie di nuovi dettagli durante la realizzazione del T-Stool (Figg. 3, 4). Il contributo, infine, presenta un quadro che concettualizza i collegamenti e le interazioni tra i quattro poli del processo ceramico (impasto di argilla, formatura, smaltatura e cottura) e i sensori attraverso cui la tecnologia digitale entra in questi domini (Fig. 5); questa quadruplicata struttura consiste in due 'dualismi sovrapposti': da un lato, argilla e formatura, dall'altro, con cottura e smaltatura.⁶

Il processo ceramico

Il processo ceramico è composto da cinque fasi: l'impasto di argilla, la formatura, l'essiccazione, la cottura e la smaltatura⁷. È importante sottolineare che durante il processo di produzione della ceramica l'argilla rilascia umidità con una velocità che può essere sospesa o accelerata a seconda delle necessità e dell'oggetto da produrre; nel caso del T-Stool l'essiccazione è stata governata dalle particolari caratteristiche dello stampo progettato. La definizione di ceramica varia a seconda della disciplina ma, ai fini del presente contributo, la ceramica è definibile come «[...] made out of minerals with a varying composition and dubious purity being exposed long enough to a (non-measurable) treatment of heat in order to let unknown reactions take place, whereby heterogeneous compounds are formed» (Reijnders and European Ceramic Work Centre 2005, p. 17). Rispetto poi alle caratteristiche della ceramica, Bechthold, Kane e King (2015, p. 12) evidenziano come essa abbia alcune proprietà simili alla pietra ma sia più facile da modellare e lavorare poiché richiede un minore sforzo.

Sulla base di queste premesse, è possibile identificare due ambiti distinti d'interazione con l'argilla attraverso 'canali' di tipo intensivo (composizione mineralogica, purezza, umidità, morbidezza, ecc.) ed estensivo (lavorazione, modellatura, calore, prodotti, ecc.)⁸. L'uso dei termini 'dubious', 'non-measurable' e 'unknown reactions' fanno riferimento a una disciplina speculativa in cui l'incertezza è un invito alla formulazione di ipotesi e sperimentazioni per 'standardizzare l'aspettativa ed eliminare il rischio'⁹. Posto che la prima peculiarità di un modello digitale è la capacità di produrre un numero di copie illimitate di se stesso, la seconda caratteristica è individuabile nella possibilità di fare verifiche preliminari delle ipotesi progettuali, offrendo quella che Fisher (2005) definisce una 'illusione di certezza'. Un ceramista è consapevole che produrre due opere ceramiche identiche rappresenta un'aspettativa irragionevole anche in relazione alla eterogeneità mineralogica del materiale e alla imprevedibilità degli effetti della 'cottura'; il fascino della ceramica e dei suoi smalti è proprio nella loro imprevedibilità poi-

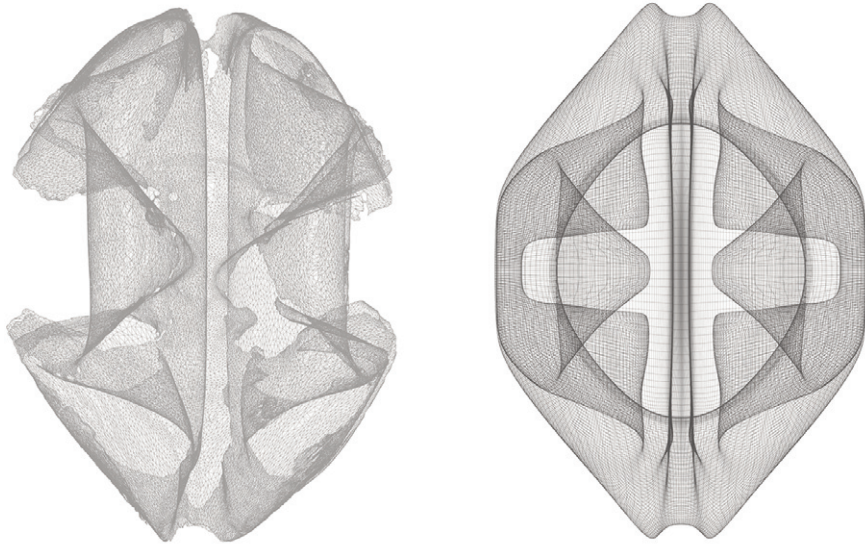


Fig. 1 | A digital scan of the original plaster cast (2008), approximately 20 cm l. x 12 cm h. x 14 cm w., and the final 3d mesh for the T-Stool (2012); the analog model was formed by casting plaster inside of a folded, two- dimensional surface resembling a disc; A detail showing the relative size of the ceramic stool.

Fig. 2 | T-Stool, Press molded stoneware, 102 cm l. x 60 cm h. x 79 cm w. Series of 3. Platina luster, 1-3; Matte white glaze, 3-3; Pink crackle glaze, 2-3 (credit: Sundaymorning@ekwc, 2013).



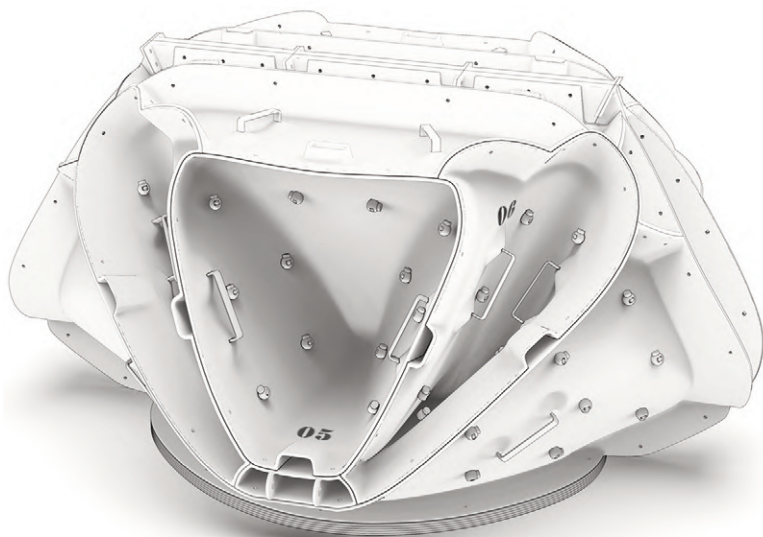


Fig. 3 | T-Stool, Digital Twin Aggregate (DTA), bringing together all of the details designed during the development of the press-mold; the external epoxy mother-mold, 5 mm thick, provides anchorage for an internal rubber mold, 3 mm thick (2020).



Fig. 4 | T-Stool, Digital Twin Aggregate (DTA), the epoxy mother-mold is removed from the top to bottom to provide support during the drying process; the rubber, makes it possible to demold around any undercuts during the demolding process (2020).

ché un unico stampo può generare diversi prodotti 'affini' ma non identici.

La composizione della miscela di argilla | L'individuazione della più adeguata composizione della miscela di argilla in relazione alla tipologia di manufatto da realizzare rappresenta una parte importante del processo, che influisce sulla resistenza del materiale, sulla sua lavorabilità e sull'aspetto finale della smaltatura. Se per ottenere uno smalto liscio è necessario prevedere aggregati di caolino quanto più piccoli possibile in modo che non siano visibili sulla superficie, affinché l'impasto di argilla possa essere lavorato adeguatamente è necessario che la miscela abbia una corretta proporzione di argille piccole, medie e grossolane. Pertanto i componenti di impasto di argilla da formare con la pressatura devono essere ben proporzionati in relazione alle dimensioni dell'oggetto, alla finitura, al colore desiderato e alla sua lavorabilità, senza trascurare che opere più grandi richiedono una maggiore percentuale di argilla grossolana.

Per il T-Stool è creata una miscela di 80-100 chili di argilla per sgabello, composto dal 46% di argilla fine di gres, 26% di argilla naturale di gres, argilla cinese riciclata (aggregato o grog) nella percentuale del 16% naturale e 12% media, 0,5% di pasta di carta riciclata (cellulosa) e 0,3% di fibre di lino. La procedura prevede che i componenti siano amalgamati in un miscelatore industriale e, dopo essere stati estrusi, siano impastati a mano per rimuovere l'aria e laminati per formare lastre uniformi. In previsione di uno

spessore finale della parete laterale di 7-10 mm e di un ritiro del materiale del 10-12% durante la fase di cottura, l'argilla è stata preparata in lastre da 400 x 400 mm con 16 mm di spessore – poi avvolte nella plastica e messe da parte in una stanza umida (Fig. 6) – che si riduce a 13 mm dopo la pressatura. Affinché l'argilla mantenga la sua plasticità per la modellazione, la pressatura viene fatta in un'unica sessione con un carico di 80-100 kg per circa 20 ore, mentre durante la fase di essiccazione deve potersi contrarre ed espandere, senza tuttavia creparsi.

La cellulosa rende l'impasto di argilla appiccicoso ma fornisce un supporto a cui l'argilla fine può aderire migliorandone la resistenza alla trazione. Al fine di contrastare i differenziali di tensione che derivano da una essiccazione e da un restringimento non uniformi, si utilizzano le fibre di lino poiché, come la cellulosa, bruciano durante la cottura (Bechthold, Kane and King, 2015).

Sebbene il T-Stool sia stato progettato per non modificare la sua forma durante la cottura non era possibile prevedere la modalità di deformazione dello sgabello nel forno, a causa della sua morfologia con più curvature; per comprendere l'incidenza della deformazione, lo sgabello è stato cotto a temperature diverse, unica metodologia ritenuta applicabile. È stato così possibile determinare una temperatura di cottura a 1.060 °C alla quale le deformazioni sull'asse verticale erano contenute entro 1 cm, sufficiente per non prendere in considerazione temperature inferiori; tuttavia questa temperatura è troppo bassa per la vetrificazione¹⁰, rendendo necessario

una seconda cottura per lo smalto e una terza (1.280 °C) per la finitura.

Analisi ad elementi finiti della ceramica: simulazioni digitali vs know-how consolidato | La possibilità di eseguire un'analisi simulativa realistica con il metodo degli elementi finiti ha incontrato scetticismo nel gruppo di lavoro: mentre da una prospettiva ingegneristica, infatti, non risultava chiaro come mettere in relazione l'analisi dello sgabello con un tipo equivalente di test di mobili senza fare un'approssimazione, per i ceramisti – che hanno anni di conoscenza consolidata nel valutare lo spessore di grandi oggetti – era difficile immaginare come un'analisi potesse prevedere in maniera adeguata il comportamento della ceramica, senza definire la composizione dell'impasto di argilla, formarla e cuocerla. In entrambi i casi, il T-Stool non poteva essere completamente definito a monte con certezza da nessuna delle due parti, e risultava pertanto parte integrante della ricerca di design trovare una soluzione.

La prototipazione del T-Stool assieme al gemello digitale si è fondata su diversi approcci dello studio delle proprietà strutturali poiché sono differenti le ragioni per cui è difficile condurre un'analisi agli elementi finiti della ceramica. In primo luogo, ogni impasto di argilla ha specifiche proprietà e, per garantire che le proprietà siano adeguate al manufatto, è necessario realizzare un certo numero di provini per simulare adeguatamente il comportamento del materiale a flessione, tensione e compressione. In secon-

do luogo, il T-Stool è molto differente da un modello consolidato di seduta, ad esempio una sedia, e questo significa che i carichi standard di progettazione delle sedute prodotti dalla simulazione potrebbero essere alquanto approssimativi. Infine, le tensioni determinate dalle fasi di produzione possono essere più significative di quelle legate alla forma, circostanza divenuta evidente solo nel processo di essiccazione e cottura del T-Stool. Durante il processo ceramico l'argilla è soggetta ad almeno quattro diversi tipi di tensione, ovvero alla deformazione quando è bagnata, al restringimento in fase di essiccazione, alla deformazione plastica dovuta al raggiungimento di temperature elevate e infine al peso proprio, tutte tensioni che variano a seconda delle dimensioni dell'oggetto e della composizione dell'impasto ma che si presentano anche con gradi di intensità differenti nelle diverse fasi del processo. Per queste ragioni, i test sullo sgabello hanno evidenziato uno stato di stress aggiuntivo che l'analisi a elementi finiti non è stata in grado di considerare, poiché l'argilla è passata allo stato di 'leather-hard' sotto lo stress del suo stesso peso.

Prima di avviare la ricerca presso l'EKWC non si conosceva lo spessore ideale della parete esterna del T-Stool. È stata condotta quindi un'analisi preliminare agli elementi finiti impiegando

un modello CAD costituito da un'unica mesh senza spessore per identificare le aree di stress elevato (Fig. 7) dovute a un carico verticale che simulasse il peso di un utente¹¹. Per l'analisi e l'approssimazione del carico¹² è stato usato il test d'impatto di un sedile della Business and Institutional Furniture Manufacturers Association (BIFMA) che prevede l'utilizzo di un sacchetto di 136 kg e 40,6 cm di diametro lasciato cadere da un'altezza di 15 cm. Poiché a causa delle limitazioni del software non è stato possibile fare un'analisi dinamica dell'impatto, allo sgabello è stato applicato un carico statico di 1.360 kg stimato come equivalente del carico dinamico¹³: in un primo test le deformazioni rilevate nei due prototipi con spessore di parete di 2 cm e 2,54 cm¹⁴ sono state rispettivamente 0,3 mm e 0,18 mm.

Anche se a causa della natura approssimata del carico applicato e delle proprietà del materiale non era possibile mappare con precisione la reale entità e distribuzione delle sollecitazioni, i risultati del test sono stati utilizzati per individuare i punti in cui le tensioni erano più elevate, informazione questa che sarebbe tornata utile nella fase di pressatura dell'argilla nello stampo; i piccoli sottosquadri e i cantilever alla base dello sgabello sono risultati i punti sottoposti alle sollecitazioni maggiori, punti che comunque non rendevano necessarie modifiche significative della forma dello sgabello progettato. La fase successiva dello studio ha previsto un incontro con i consulenti tecnici dell'EKWC i quali, sulla base di alcune caratteristiche del prodotto – livello di levigatezza della superficie, tipo di finitura dello smalto, lavorabilità dell'argilla e dimensione e forma del positivo (Fig. 8) – hanno ipotizzato uno spessore medio finale delle pareti esterne, dopo la cottura, di 1 cm.

L'elevato grado di curvatura interna degli sgabelli ha richiesto un'attenta verifica dello spessore dell'argilla dopo la pressatura per accertarne l'uniformità in ogni parte dello stampo, ciò al fine di mitigare le tensioni differenziali che potevano generare lesioni durante la fase di essiccazione. Nel primo prototipo realizzato sono state rilevate, vicino alle estremità a sbalzo e sotto la sezione centrale della base, due serie di piccole lesioni di circa 3 cm di lunghezza che sono state imputate al processo di essiccazione: le lesioni si trovavano leggermente al di sotto delle zone in cui l'analisi a elementi finiti indicava una tensione elevata, dove cioè l'argilla era in tensione per il peso proprio dello sgabello, che esercitava una forza dall'alto. Per contrastare questo fenomeno durante la fase di essiccazione sono stati previsti dei supporti da fornace (controforme in argilla ottenute dal modello digitale), posizionati all'interno dello sgabello per consentirgli di sopportare la cottura fino a 1.280 °C senza crollare.

Formatura: stampi in gomma siliconica composita per lo stampaggio a pressione della ceramica

Per spiegare le innovazioni introdotte durante il processo di realizzazione dello stampo è necessario illustrare le criticità affrontate dal gruppo di lavoro. Realizzare il T-Stool usando i tradizionali stampi in gesso risultava proibitivo a causa delle dimensioni dell'oggetto poiché, se il gesso è ideale per assorbire l'umidità dall'argilla è anche un materiale con un certo peso specifico che necessita di giorni per indurir-

si. La seconda limitazione deriva dalla forma stessa del T-Stool: mentre la maggior parte degli oggetti funzionali in ceramica sono progettati con forme concave o convesse per rimuovere facilmente lo stampo senza danneggiare l'argilla¹⁵, il T-Stool è una superficie con una forma complessa che alterna curvature concave e convesse, producendo sottosquadri che impediscono la rimozione di uno stampo composto da due o quattro parti. Per ovviare al problema, è stato realizzato uno stampo composito con due componenti: uno strato esterno rigido costituito da una pasta epossidica leggera in due parti, rinforzata con fibre (5 mm di spessore), e uno strato interno flessibile di gomma siliconica blu (3 mm di spessore). Lo strato epossidico rigido, color oliva, comunemente chiamato 'master-mold' poiché mantiene il silicone in posizione, agisce come substrato rigido contro cui pressare l'argilla. La forma dello sgabello ha richiesto che lo stampo in gomma siliconica fosse costituito da diciotto parti composite, o nove parti per metà (Fig. 9), mentre le parti esterne in resina epossidica fossero posate in opera sul posto, ad eccezione dei pezzi centrali più piatti che sono stati prefabbricati in stampi di plastica, usando i profili estratti dal gemello digitale.

Per ancorare saldamente lo stampo in silicone e quello epossidico¹⁶ è stato impiegato un sistema di corde (gialle e arancioni) dotate di blocchi a sfera (Fig. 10). Quando si procede con la rimozione dello sgabello dallo stampo è possibile piegare e staccare lo strato di silicone per rimuoverlo dall'argilla senza dover fare affidamento sui precisi angoli di estrazione che si rendono necessari nel caso degli stampi in gesso. Tuttavia, l'utilizzo di stampi in gomma siliconica per la ceramica ha anche un risvolto negativo: a differenza del gesso, gli stampi in silicone non assorbono acqua e pertanto sono necessari calore e ventilazione aggiuntivi per permettere all'argilla di raggiungere la consistenza desiderata.

Prima del 2012 all'EKWC erano stati testati stampi in gesso, ma erano aperti e per oggetti più piccoli, molto diversi dal T-Stool che presenta una forma molto complessa¹⁷. Grazie al fatto che la gomma siliconica si può applicare a pennello o sversare, è stato sviluppato un metodo affidabile per ottenere uno spessore uniforme, modellando prima uno strato di 3 mm di argilla sulla superficie del positivo e poi stendendo la pasta epossidica in modo da formare uno strato di 5 mm sopra l'argilla. A seguito di indurimento dell'epossidica, è possibile procedere con la rimozione di entrambi gli strati, rimettendo al suo posto l'epossidica e lasciando una cavità di 3 mm per sversare il silicone liquido (Fig. 11). Si tratta di un metodo vantaggioso poiché permette di modellare il silicone con spessore superiore ai 3 mm nei bordi dello sgabello dove è utile nella fase di rimozione dello stampo.

Vi sono una serie di aspetti da considerare nella progettazione di uno stampo composito; è infatti opportuno: 1) progettare nel minor numero possibile di pezzi; 2) renderlo ermetico nelle sue giunture; 3) minimizzarne il peso massimizzando la sua resistenza; 4) fare in modo che l'argilla possa essere pressata dall'interno dello stampo, e quindi ritirarsi dallo stampo piuttosto che restringersi su di esso (Fig. 12); 5) lavorare e applicare l'epossidica con ancoraggi e prese in

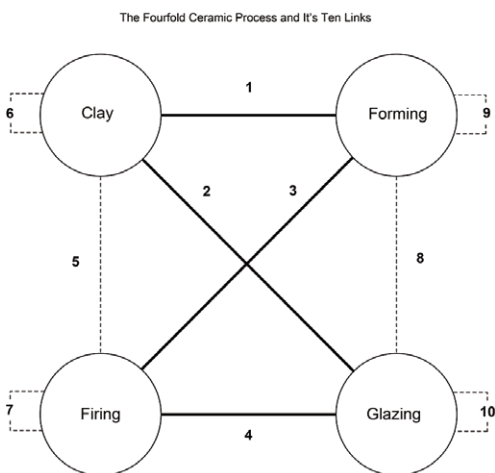


Fig. 5 | The Fourfold Ceramic Process and its Ten Links. This world is modeled after Graham Harman's fourfold structure 'The Ten Possible Links' in The Quadruple Object.

Fig. 6 | T-Stool, the clay is rolled into slabs and prepped for pressing. Flax fibers are added to the clay recipe to increase the tensile strength of the clay as it dries, while the cellulose pulp allows the clay particles to pack tightly (credits: Sundaymorning@ekwc; photo by author, 2013).

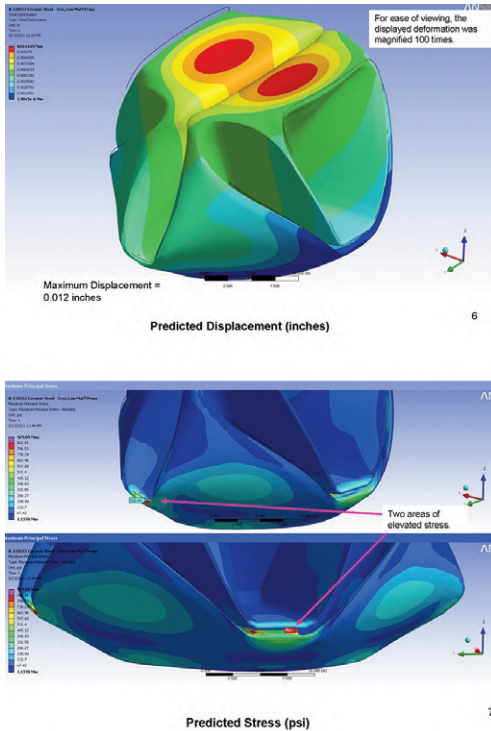


Fig. 7 | T-Stool, preliminary Finite Element Analysis: predicted displacement of the ceramic, and the predicted stress (psi), of the ceramic, based upon a 2 cm sidewall (credit: A. Deskevich, 2012).

Fig. 8 | T-Stool, Computer Numerically Controlled (CNC) milled urethane foam positive used to produce the rubber press mold (2012); T-Stool, pressing in the clay on the interior of half of the rubber mold: the corners are first filled in with clay 'sausages'; then slabs are laid in and blended into the neighboring slabs to produce a uniform layer of clay (credits: Sunday-morning@ekwc; photo by author, 2012).



modo che la si possa rimuovere facilmente (Fig. 13); 6) progettare per lo smontaggio in modo tale che possa sostenere l'argilla fino alla rimozione delle ultime parti. In questo senso, il digitale svolge diversi ruoli importanti, permettendo il trasferimento di informazioni dal modello allo stampo (Fig. 14): il gemello fornisce infatti misure e tracciamento di curvature impossibili da rilevare all'occhio umano, in particolare di quelle concave della superficie dello sgabello, nascoste alla vista. Per il T-Stool, al fine di semplificare il calcolo degli angoli di imbutitura, sono state realizzate delle maschere dai file digitali utili a verificare l'eventuale contatto tra le parti dello stampo e l'argilla in fase di ritiro. Il gemello digitale è tornato utile anche per calcolare la distribuzione della cavità dello stampo nello spazio, in modo che la camera dello stampo fosse completamente riempita e non si formassero sacche d'aria.

Il gemello digitale è tornato utile anche per 'automatizzare' alcune procedure di produzione, ad esempio rendere naturale l'azione ripetitiva di sversamento del silicone liquido o gestire la forza dell'operatore durante lo smontaggio dello stampo, contribuendo così a definire una prassi che renda la produzione dell'oggetto efficiente e la sua esecuzione più 'comoda'. Citando Canguilhem (1992), May (2017, p. 23) traccia una connessione tra l'automazione e il corpo umano «The electrical automation of post orthography is in no way 'thoughtless'. It simply reformats acts of thinking, displacing them to different arenas. Automation has never been a simple matter of passing labor from humans to machines; it has always involved the enmeshment of consciousness and gestural habituation within processes that are internal neither to the organic nor to the machinic but instead reside within both cate-

gories simultaneously. It has always relied on deeply practical 'theories of organic extension,' best understood through a 'biological philosophy of technique'».

Per favorire l'evaporazione dell'argilla pressata nello stampo è stata messa a punto una procedura che prevedeva il riscaldamento dello stampo con un sistema di serpentine flessibili (Fig. 15) e una ventilazione forzata (tramite un semplice ventilatore) della parte superiore ancora non sigillata ma coperta con della plastica per far condensare il vapore acqueo e smaltire l'acqua superficiale ogni sei ore. In fase di essiccazione, l'argilla restringeva il proprio volume approssimativamente del 6-8% mantenendo, senza lesionarsi, l'aderenza allo stampo in silicone (Fig. 12). Dopo 72-80 ore, lo stampo era pronto per essere capovolto e rimosso, ma, prima di procedere con questa operazione, le cavità dell'argilla è stata riempita con perline di polistirolo – una nuova metodologia sviluppata all'EKWC – per evitare che il vaso di argilla si deformasse e si afflosciasse sotto la forza del suo stesso peso.

Il progetto dello stampo ha quindi rappresentato qualcosa di più della semplice realizzazione di uno strumento – è diventato il mezzo, il 'canale delle cose' attraverso cui sono transitate tutte le informazioni, l'esperienza, il modello digitale e l'argilla. Keller Easterling (2021, p. 10), nelle sue riflessioni sul 'medium design' e su ciò che chiama i 'protocolli di interazione', scrive che «[...] the intent of designing interplay is not to fix positions but to initiate interactivity – to disrupt loops and boundaries». Per l'argilla, lo stampo è una forza dirompente e innaturale, un apparato di protocolli che interrompono e mettono in pausa l'inerzia dell'argilla in modo da plasmarla, senza che subisca danni, nella forma del T-Stool. Easter-

ling (2021, p. 12) lo descrive al meglio: «Medium design, like pool, is 'indeterminate in order to be practical'».

Lo stampo è un artefatto nato dalla convergenza di istanze differenti che riescono a trovare soluzioni ai problemi di adesione, collasso, ritiro e umidità che emergono nel corso del processo¹⁸; per contrastare queste 'forze' sono stati utilizzati dei controagenti esterni, ovvero oggetti quali un mattarello, la plastilina di cera d'api, una pellicola adesiva per mascheratura, una piastra vibrante, l'olio di girasole, ma anche bastoncini assortiti e stuzzicadenti, un nastro, delle spugne, presse per fogli di plastica porosa, un ventilatore elettrico, alcune bobine per il riscaldamento degli acquari, perline di polistirolo, un foglio di compensato forato, un'aspirapolvere, sabbia da forno, mobili da forno per argilla (progettati usando il gemello), cinghie a cricchetto, un'altalena da stampo sospesa da un muletto, borse di vino gonfiabili, teli di plastica e piastre elettriche.

In Vibrant Matter, Bennett (2010, p. 34) afferma che un assemblaggio deve la sua capacità alla vitalità delle materialità che lo costituiscono, alla 'forza associativa' o 'Shi' che secondo Jullien (Bennett, 2010, p. 35) aiuta a mettere in luce il potenziale che trova origine non nell'iniziativa umana ma nella disposizione stessa delle cose; lo 'Shi' di un assemblaggio è cangiante, «[...] it is the mood or style of an open whole in which both the membership changes over time and the members themselves undergo internal alteration». Secondo Easterling (2021, p. 27), «It would be impractical to say that you know everything about the shifting banks and shoals of a river, but you might 'know how' to navigate this changing fluvial landscape»; è all'interno

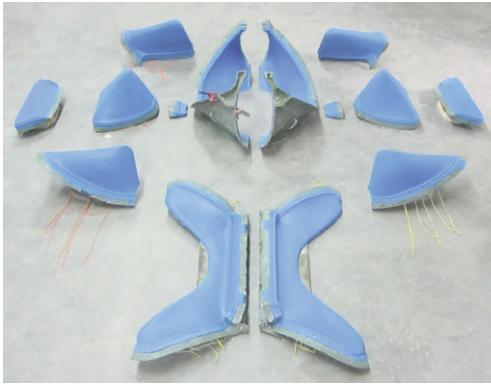


Fig. 9 | T-Stool, the composite epoxy and rubber mold for press molding (credits: Sundaymorning@ekwc; photo by author, 2012).

dell'argomento di Gilbert Ryle 'contro la divisione cartesiana mente-corpo' che Easterling colloca il significato del sapere come know how.¹⁹

Conclusioni: il processo ceramico ed i suoi dieci collegamenti | I quattro poli del processo ceramico (la composizione dell'impasto, la formatura, la cottura e la smaltatura, considerando il processo di essiccazione come parte del processo di formatura) sono stati rappresentati nel diagramma di Figura 5 che mostra il vettore lungo il quale l'argilla passa da umida a secca e da argilla a ceramica in un processo irreversibile. Prendendo in considerazione il T-Stool, è possibile valutare la sua 'techne' – ossia la sua creazione – in base alle interazioni tra i quattro poli, ciascuno dei quali può essere riconfigurato in base alle necessità. Per esempio, l'argilla è un composto contenente silice, fibre organiche e aggregati, tutti elementi funzionali a formare legami all'interno del processo di essiccazione, ma il cui dosaggio ne condiziona la coesione, la lavorabilità e la resistenza alla trazione.

La concettualizzazione del processo prevede che il progetto interagisca con soli tre dei quattro poli ma contemporaneamente: lavorare su un polo della triade produce effetti sugli altri due, con vantaggi per la progettazione del gemello digitale del quale è più facile immaginare una ottimizzazione se si sostituisce il quarto polo con una rappresentazione virtuale al fine di testare scenari diversi. All'esterno dei poli e dei rispettivi collegamenti vi è una costellazione di oggetti e strumenti che interagiscono con il processo ceramico per minimizzare il rischio attraverso una varietà di canali digitali, manuali, fisici, chimici e termodinamici, intermediari in grado di sintonizzare, regolare o interrompere l'inerzia dell'intero assemblaggio, tutte condizioni uniche per un processo ceramico che può essere alterato attraverso la presenza del digitale. In sintesi, il gemello digitale 'comprime' in un minor numero operazioni manuali, fasi del processo e strumenti, fornendo al contempo maggiore precisione e superando i limiti tecnici della stampaggio a pressa di gusci ceramici per oggetti cavi, normalmente considerati troppo difficili da realizzare con le tecniche tradizionali.

Il T-Stool in silicone rappresenta quindi una innovazione delle tecniche tradizionali di produzione di oggetti in ceramica sebbene applicazioni simili siano riscontrabili nel settore delle co-

struzioni per la modellazione di elementi in calcestruzzo e piani di lavoro. Il successo del T-Stool dimostra che è possibile realizzare curvature complesse con lo stampaggio a pressa della ceramica e la fabbricazione digitale, senza dover ricorrere a una produzione industriale su larga scala; inoltre l'oggetto prodotto ha consentito di verificare che le curvature delle superfici hanno impedito quella deformazione del manufatto che solitamente si verifica durante la cottura di un vaso cavo in gres: il T-Stool, infatti, si è compresso solamente di 1 cm durante la cottura a 1.060 °C, meno del 2% della sua altezza totale, mantenendo le qualità tattili ed estetiche previste in progetto. Il caso del T-Stool dimostra che per alcune applicazioni, grazie alla sua minore impronta di carbonio, la ceramica può costituire una valida alternativa al cemento, lasciando spazio a possibili nuovi campi applicativi e sperimentazioni con altri materiali di terra: espressione di una 'ceramica digitale', esso si colloca tra il regno tecnico e la conoscenza consolidata, sapiente mix tra desiderio di evolvere il linguaggio della ceramica e dei materiali di terra e di sfruttare le potenzialità analitiche e formali della tecnologia digitale.

For centuries the malleability of clay and its impressionability have made it a valuable medium for preserving history, and culture through the iconographic and utilitarian features of architecture and design. The ecological imperative to find low carbon alternatives to concrete is driving innovations that leverage the formability of earthen materials using state-of-the-art technologies. Ceramics, for example, are durable, waterproof and non-flammable, and include a wide range of architectural applications (such as cladding systems, roofs, walls, floors, screens, fixtures) and landscaping applications, since clay is a resource that is available worldwide and can be processed and used close to where it is sourced, thus minimizing its transportation footprint. The end of life for ceramics includes reuse, recycling, or landfill, with some ceramic elements employing up to 70% post-consumer waste (Bechthold, Kane and King, 2015). Discarded ceramic can be ground up and reused as grog, a ceramic aggregate that is added to clay bodies to increase their tensile strength. The energy 'cost' associated with producing ceramic and terra cotta is lower than that associated with metals, cement and glass, and the amount of carbon dioxide generated per ton of product is less than glass or cement (Carty, 2019). On the other hand, ceramic is a heavy and brittle material, which performs better in compression than in tension, shrinks during drying and firing, and requires labor-intensive production.

Advancements in digital fabrication and digital kilns are now making it possible to develop specific applications that include the design of custom ceramic elements, also in large quantities, therefore transforming the traditional production method – focused on axial extrusions, uniform draft angles, or flat tiles – into a new process where elements are no longer governed by the convex or concave curvatures associated with the draft angles of rigid molds or by spinning clay on a wheel. Digital design and produc-

tion of ceramic elements have expanded to include other relevant forms of hybrid mold making that include the use of silicone rubber molds for press-molding where large draws or undercuts are integral to the part. In this hybrid application of manual and digital techniques, craft-based methods tend to be more accommodating of variability than industrial forms of mass production that rely on strict uniformity, repetition and quality control.

Architects are also developing new ways to combine digital technology with local materials and construction techniques, and among these are those which employ clay, especially due to its thermohygroscopic properties¹. Recently, the TECLA 3d printing system was used to print a house entirely from earthen materials paving the way for raw earth to become a viable resource for constructing emergency housing²: the thermodynamic properties of earthen materials combined with the productive peculiarities of 3D printing allow for the creation of full scale, on-site bio-constructions, without the need for formwork. By introducing earthen models as a tool for participatory design, raw earth is a medium that allows architects and communities to participate in the design of the built environment through a shared kinship with mud-based construction techniques. The last decade has ushered in new opportunities for on-demand manufacturing including 3d ceramic printing and CNC extrusion, formats which however present new challenges, such as reduced bond strength and the addition of resins for curing.

A Case Study for Digitally Assisted Ceramics

| The T-Stool originated in the physical realm as a folded surface model, and it is named after its unique cross-sectional profile that resembles a folded 'T'³, a design that was inherently perplexing, regardless of the space or medium that it resided in. Novel digital surfacing methods were adopted to realize the stool in the digital environment and to produce it in ceramic (Russo and Mueller-Russo, 2012; Fig. 1), also in view of the difficulties presented by the size of the object, measuring 102 cm l. x 60 cm h. x 79 cm w. (Fig. 2). The T-Stool was made during a research residency at the European Ceramic Work Centre (EKWC), by bringing together a team from architecture, digital design, and industrial design, to work with experts in mold making, clay bodies, press-molding, firing, and glazing. The collaboration allowed for decisions in one realm of the processes to incorporate the needs of the other specialists down the line, and this was facilitated by the ability to 3d print and share replicas of the stool. The specialization was most evident in the design of the mold as it facilitated all of the other phases of work including its staging during the ceramic process.

Many questions initiated the design research. Could the stool be achieved in ceramic as a pure shell – without any internal supports – and if so how thick would the sidewall need to be? What is the best way to construct a lightweight press-mold, for ceramic, given the curvature of the surface? What does the introduction of a digital twin afford during the ceramic process? What is to make of this new 'oddkin' that has inherited the material vibrancy and natural curvature of

synthetic sheets, the weightlessness of digital technology, and the plasticity of clay?⁴ More than the twin, the T-Stool is tentacular; in its capacity to consolidate expertise, and it was achieved, to borrow Haraway's phrase, by 'staying with the trouble', that arises between the structural integrity of the surface, the clay's properties, and the weightless realm of digital representation (Haraway, 2016).

It should be stated that what is sought in the design of the T-Stool is to not allow the technology to govern the aesthetic of the work the way 3D printing can, as this tends to colonize ceramic know-how, history, craft, and skill, for the sake of efficiency. Instead the intent was to maintain a level of ambiguity between the presence of the real and the digital, and to unparent this 'oddkin' from its master in order to push the clay into a formation that it could only achieve in commune with the digital. More simply, this disposition between the digital and the real changes the perception of what is possible by pushing the clay to perform in ways that are traditionally considered impossible or too risky to pursue.

In view of the above considerations, this paper will discuss in detail the mediums and tests that were conducted to answer these questions, as well as the methodologies that were developed to design the silicone rubber molds for press-molding over the course of two research residencies at the EKWC in 2012-13. To consolidate the various phases of the mold research a digital twin aggregate (DTA) was produced from the project archives in 2020⁵ (Grieves, 2019). In this case, the aggregate is an archive that consolidates the digital model with all of the previously unknown mold details that were developed during the making of the T-Stool (Fig. 3, 4). The paper will conclude with a framework that identifies the linkages and the interactions between the four poles of the ceramic process: the clay, the forming, the ceramic, the firing and the feelers through which digital technology enters these domains (Fig. 5). This fourfold structure consists of two 'overlapping dualisms': clay and forming with firing and glazing.⁶

The Ceramic Process | The ceramic process includes five parts; the clay body, forming, drying, firing, and glazing⁷. It is important to add that the process unfolds with respect to the transformation of the clay, and its ability to release moisture over time with a speed that can be suspended or accelerated depending on need and on the nature of the object to produce; for the T-Stool, the drying was mediated through the design of the mold. The definition of ceramic varies depending upon the discipline, but for the purpose of this discussion, it is defined as «Ceramics: made out of minerals with a varying composition and dubious purity being exposed long enough to a (non-measurable) treatment of heat in order to let unknown reactions take place, whereby heterogeneous compounds are formed» (Reijnders and European Ceramic Work Center 2005, p. 17). Additionally, we are reminded that «This man-made material – ceramic – had properties similar to stone, but was easier to shape and work while soft compared to the tremendous effort of chiseling and shaping stone» (Bechthold, Kane and King, 2015, p. 12).

These definitions identify two distinct realms for interacting with the clay, through channels that are intensive to it, (minerals, purity, moisture, softness, etc.) and channels that are extensive to it (work, shaping, heat, man-made, etc.)⁸. The use of the terms, 'dubious', 'non-measurable, and 'unknown reactions' belong to a speculative discipline where the uncertainty beckons for recipes, samples, and test bars to 'standardize expecta-

tion and eliminate risk'⁹. If the first order of the digital is its capability to transfer unlimited copies of itself, its second role in the process is something that it shares with the recipe, and that is its ability to offer the illusion of certainty (Fisher, 2005). A ceramicist knows that making two identical ceramic objects is not only an unreasonable expectation but is also counter to the 'treatment of heat' and the 'heterogeneous compounds'

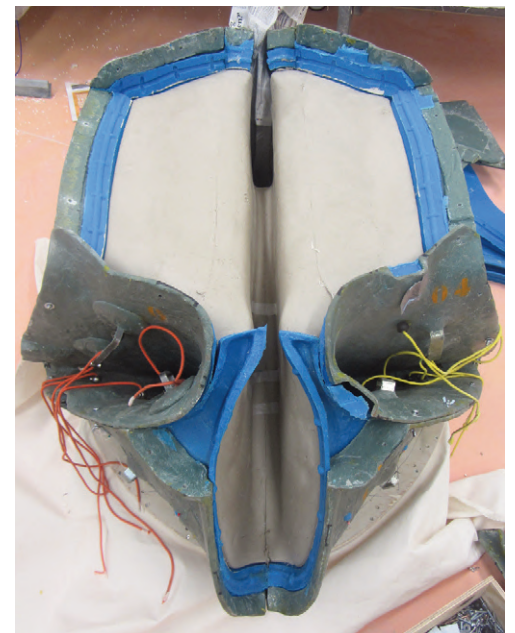
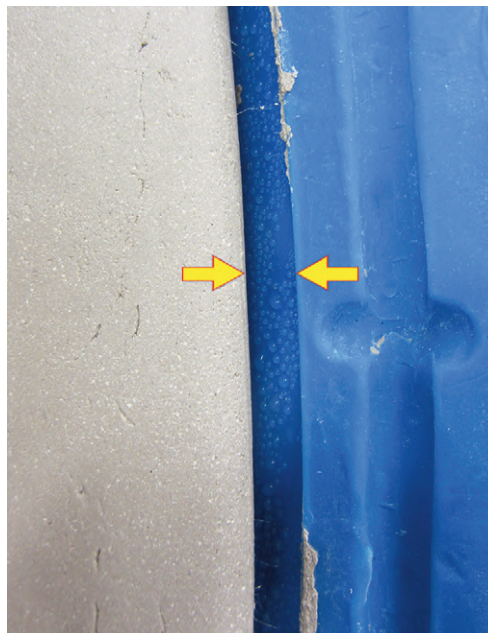
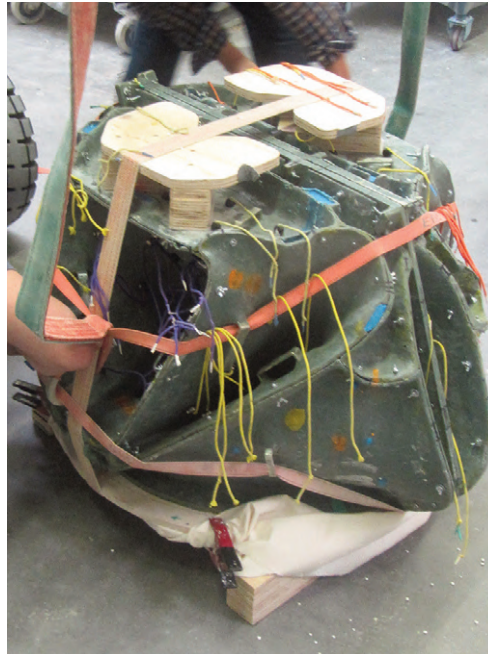


Fig. 10 | T-Stool, the epoxy (olive color) mother-mold provides anchorage for rigging and handles for demolding; the mold is flipped into the upright position by suspending it in the stirrups; the yellow ball cords are used to secure the rubber against the mother-mold (credits: Sundaymorning@ekwc; photo by author, 2013).

Fig. 11 | To protect the surface of the positive thin plastic sheet is used; the 3 mm cavity for the rubber mold is modeled in clay, and then the epoxy for the mother-mold is applied; the clay is removed leaving a cavity for the rubber to be poured into; this method of modeling the rubber cavity produces a more uniform result than brushing on the rubber; the flange for the mold part is visible in yellow (credits: Sundaymorning@ekwc; photo by author, 2013).

Fig. 12 | T-Stool, a detail of the rubber mold after the clay has begun to shrink 3-4 mm between the arrows over several days; moisture collects on the rubber surfaces and must be evaporated from the mold in order for the clay to reach the leather-hard state (credits: Sundaymorning@ekwc; photo by author, 2013).

Fig. 13 | T-Stool, the central portion of the mold has been removed; ball cords provide a means to release the rubber jacket from the epoxy mother-mold; as the mold is removed any visible seams or divots in the surface are removed manually (credits: Sundaymorning@ekwc; photo by author, 2013).

Digital Interfaces Within the Ceramic Process

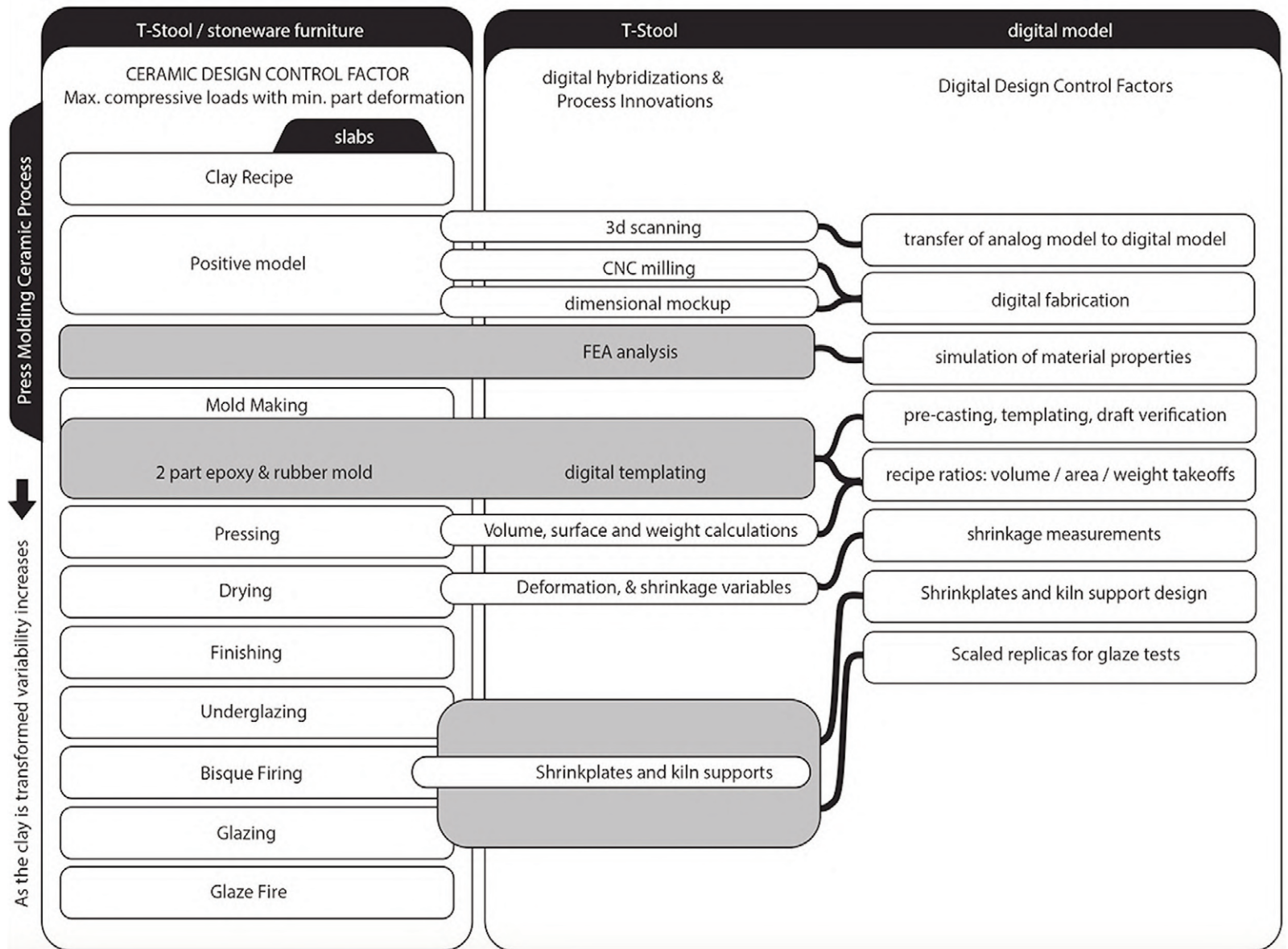


Fig. 14 | The press molding processes for the T-Stool: touchpoints indicate where the digital model is linked to the ceramic process; areas in grey indicate where the digital twin has led to innovations in the ceramic process.

that initiate individuation. The allure of ceramics and their glazes is their intractability, and while there may be one parent there are naturally many kin (Fig. 2).

The Clay Body Recipe | Matching the appropriate clay body to the work is an important part of the process that affects its strength, workability, and the final appearance of the glaze. However, to achieve a smooth glaze, it is necessary to keep the china clay aggregate as small as possible so that they are not visible on the surface. A good clay body needs to pack well, and therefore it needs to be a proper mix of small, medium, and coarse clays. A clay body for press-molding is a unique substance that is proportioned according to the size, finish, color, and strength of the work, with larger work requiring courser clay.

For the T-Stool the recipe consists of 80-100 kilos of clay per stool, with the following ingredients: 46% fine stoneware clay, 26% course

stoneware clay, recycled china clay (aggregate or grog), 16% course grade, 12% medium grade, 0.5% recycled paper pulp (cellulose) and 0.3% flax fibers. The ingredients are combined in an industrial mixer, extruded, and kneaded by hand to remove the air, and rolled into uniform slabs. In anticipation of a final sidewall thickness of 7-10 mm after firing, and 13 mm, when pressed, the clay was prepared in slabs 16 mm thick x 400 mm x 400 mm, that were wrapped in plastic and set aside in a wet room (Fig. 6). This variation in thickness accounted for the compaction of the clay as it was pressed into the mold and the shrinkage of the ceramic by 10-12% during the firing. For the purposes of pressing, the clay needs to be fine and at its most plastic state- not 'short' or stiff, and this requires that the work be pressed in one session (80-100 kg), lasting about 20 hours, whereas during the drying phase, the clay needs to be able to contract and stretch, but not crack. The cellulose makes the clay body sticky while providing a network for the

fine clay to adhere to, thereby improving the tensile strength of the clay. To combat the larger stress differentials that come with uneven drying and shrinkage, flax fibers are used to increase the 'green strength' of the clay during the drying phase, and like the cellulose, they combust during the firing (Bechthold, Kane and King, 2015).

While the T-Stool was designed not to lose its shape during firing, it was not possible to fully anticipate the deformation of the stool due to its folded morphology; to understand and observe the impact of deformation, the only possible procedure was to fire it at different temperatures. It was determined that a low bisque fire of 1,060 °C was a safe temperature that would minimize the deformation within 1 cm on the vertical axis, not relevant enough to warrant a lower temperature. This temperature, however, is too low for vitrification¹⁰ and therefore a second glaze fire, and a third luster fire (1,280 °C) were required for the platina finish.

Finite Element Analysis of Ceramic: Digital Simulations vs. Tacit Know How

| The ability to perform a conclusive finite element analysis (FEA) encountered skepticism from both sides: from an engineering perspective it was unclear how to relate the analysis of the stool to an equivalent type of furniture test without making an approximation, and for the ceramicists, who have years of tacit knowledge sizing up the thickness of large works, it was difficult to imagine how an analysis could adequately predict how the ceramic would behave without first establishing the clay body, forming it, and then firing it. In both cases, the T-Stool could not be fully reduced with certainty from either side, and finding a way through the impasse was integral to the design research.

Prototyping the T-Stool in conjunction with the digital twin included different approaches to study its structural properties, since there are several reasons why conducting a finite element analysis of ceramic is difficult. Firstly, each clay recipe has its own properties and, in order to ensure that the properties are correct, several stoneware clay test bars are required to adequately simulate the material in bending, tension, and compression. Secondly, the T-Stool does not conform to a formalized model of seating, like a chair, and this means that standard seating design loads could only be approximated when conducting a simulation. Finally, the production stress can be more significant than the design loads, and this only became evident in the process of drying and firing the T-Stool. The clay is subject to at least four different types of stress in the ceramic process: deformation when it is wet, shrinkage when it dries, plastic deformation when it reaches a high temperature, and finally, a concentrated design load. Depending upon the size of the work and the clay recipe, different works are vulnerable to different degrees of stress at different times in the process. For these reasons, the fired ceramic tests of the stool exposed additional stress that the analysis was unable to account for as the clay transitioned to the leather-hard state under the stress of its own weight.

Before the start of the residency, it was unclear how thick the ceramic sidewall of the T-Stool would need to be. For the purposes of comparison, a preliminary finite element analysis was performed on the mesh to identify the areas of elevated stress (Fig. 7). The CAD model was a single mesh with no thickness- the thickness was provided by the finite elements. According to the report, «The purpose of these analyses was to examine the stresses in the part as a result of a vertical load, simulating a user's weight»¹¹. For the purpose of this analysis, the Business and Institutional Furniture Manufacturers Association (BIFMA) seat impact test was used to approximate the load¹². «This test consists of a 136 kg bag, 40.6 cm in diameter, dropped from 15 cm above the seat. Due to software limitations, a dynamic impact analysis could not be simulated; therefore, an estimated static load of 1,360 kg. was applied to the stool. This value represents an estimated static equivalent force and was therefore applied to the model for these analyses»¹³. «For an initial comparison, two different wall thicknesses were in-

vestigated in order to compare the deformation; [...] 2 cm and 2.54 cm»¹⁴. The maximum displacements of the 2 cm and 2.54 cm models were 0.3 mm and 0.18 mm, respectively.

Although an exact prediction of the stresses and part performance was not possible due to the estimation of the applied load and the material properties, the results of these analyses were used for comparison purposes and to better anticipate where the stress is elevated, having a sense of where the problematic areas resided was useful when pressing the clay into the mold. The analysis did identify that the small undercuts and cantilevers at the base of the stool were under the largest stresses, but no significant change to the form of the stool was required prior to its fabrication. After discussions with the technical advisors at the EKWC, several other considerations had to be taken into account: the level of smoothness of the surface, the type of glaze finish, the workability of the clay, and the size and shape of the positive (Fig. 8). Given these considerations, and the experience of the experts involved, it was decided to target a final average wall thickness of 1 cm, after firing.

Due to the nature of the stool's high degree of internal curvature, the thickness of the clay was surveyed after it was pressed into the mold to verify that the corners and all of the faces received the same thickness of clay throughout the mold, an important step in mitigating differential stress and limiting cracks from occurring during the drying phase. With the first full prototype of the stool in clay, two sets of small cracks, roughly 3 cm in length, emerged near the can-

tilevered ends and underneath the center section of the base during the drying phase. It was determined that these were the result of the drying process and not a consequence of the wall thickness. While the cracks were very close to where the FEA analysis indicated elevated stress, both sets of cracks were below these regions, where the clay was in tension due to the weight of the stool exerting force from above. To combat this, subsequent refinements were made by placing kiln furniture, a type of clay counter form made using measurements obtained from the digital model, within the base of the stool to provide additional support while it dried, and to allow the stool to be fired up to 1,280 °C without settling.

Forming: Composite Silicone Rubber Molds for Press-Molding Ceramic

| In order to explain the innovations that were made during the mold-making process it is necessary to understand the nature of challenges that the team faced. Realizing the T-Stool using traditional plaster molds was prohibitive due to the size of the object, since, while plaster is ideal for wicking away the moisture from the clay, it is also heavy and takes days to cure. The second limitation stems from the form of the T-Stool itself: while most functional ceramic objects are designed so that they are either concave or convex, allowing the mold to be easily removed without damaging the clay¹⁵, the T-Stool is a folded surface, and its curvature alternates between convex and concave, thus producing undercuts that prevent the mold from being removed in hemi-

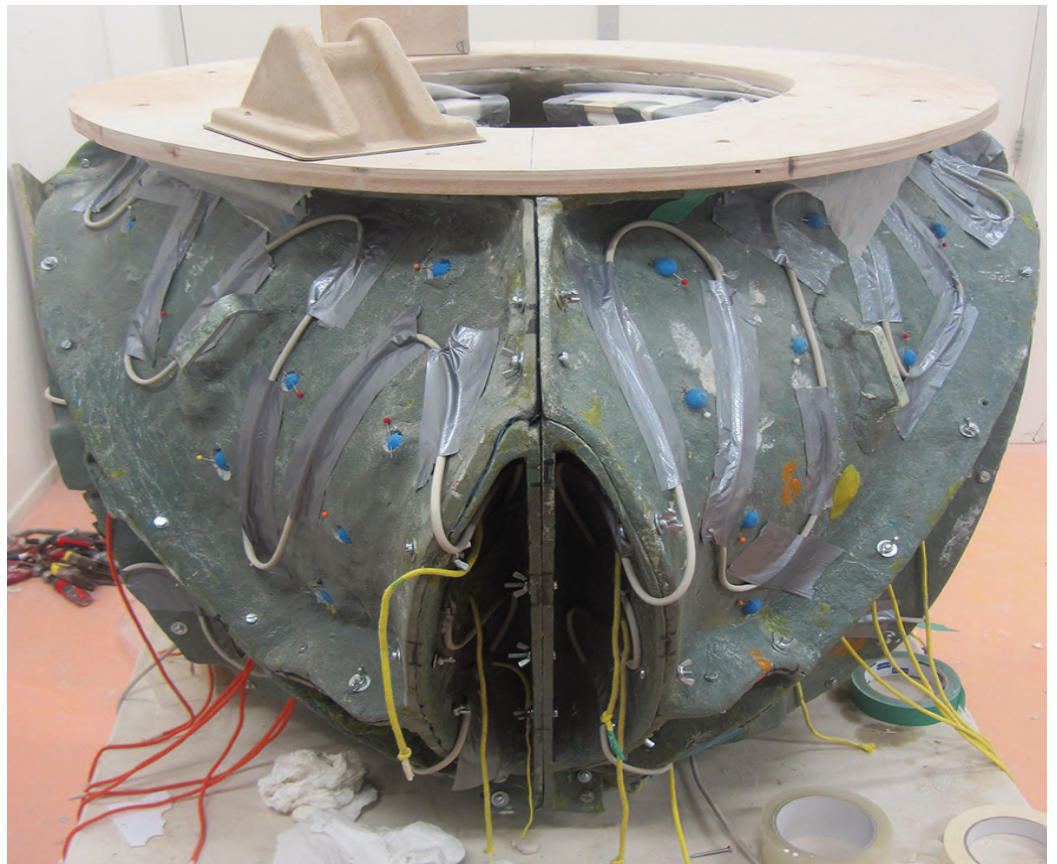


Fig. 15 | T-Stool, once the two halves of the mold are joined the epoxy is temporarily outfitted with electric heating coils to accelerate the drying of the clay until it reaches the leather-hard state (credits: Sundaymorning@ekwc; photo by author, 2013).

spheres or quarters. The solution was to make a composite, silicone rubber press-mold, consisting of two components: a rigid outer layer consisting of a two-part, fiber reinforced, lightweight epoxy-paste (5 mm thick), and a pliable inner layer of blue silicone rubber (3 mm thick). The rigid, olive-colored, epoxy layer is commonly referred to as the 'master-mold' since it holds the silicone in place, and acts as a rigid substrate to press the clay against. Based upon the stool's curvature the mold required eighteen composite parts, or nine parts per half (Fig. 9). The exterior epoxy parts were cast in place while the flatter centerpieces were precast in plastic molds using profiles that were extracted from the digital twin.

To hold the silicone and epoxy assembly together, a system of pull cords (yellow and orange) was cast into the silicone, outfitted with ball-style cord locks to anchor the silicone mold firmly against the epoxy mold¹⁶ (Fig. 10). When the stool is demolded, the inner layer of silicone can be peeled or folded away from the clay without relying on the precise draw angles that are necessary when removing plaster molds. However, there is a downside to using silicone rubber molds for ceramics: unlike plaster, silicone molds do not absorb water, and for this reason, additional heat and ventilation are required so the clay can reach the leather-hard state. While rubber press-molds had been tested at the EKWC on smaller objects prior to 2012, they were mostly on open molds, and they had not been implemented on an object like the T-Stool, which has deep draws and a complex form¹⁷. Since the liquid silicone rubber can be applied by brush or poured, a reliable method was developed to pour the silicone to a consistent thickness, by first modeling a 3 mm layer of clay on the surface of the positive, and then laying up the epoxy paste in a 5 mm layer on top of the clay. After the epoxy was cured, both layers were removed, and the epoxy was put back in place leaving a 3 mm cavity to pour the liquid silicone (Fig. 11). This method is advantageous because it allows for the silicone to be modeled thicker than 3 mm around the nosings of the stool, where a stiffer edge is desirable for demolding.

There are several concerns when making a composite, press-mold: 1) to design the mold in as few pieces as possible; 2) to make it airtight at its seams; 3) to minimize the weight of the mold while maximizing its strength; 4) to make it so that the clay can be pressed from the inside of the mold, and therefore shrink away from the mold rather than shrink onto it (Fig. 12); 5) to machine and embed the epoxy with anchorages and handles so that it can be met with force where needed (Fig 13); and 6) to design it for disassembly in such a way, that it can support the clay until the last parts are removed. To these ends, the digital performs several important roles by allowing for information to be transferred from the model to the mold (Fig. 14): in fact, the twin provides measurements and tracking of the curvature that the human eye cannot detect, specifically when locating the precise angle of the part-lines and on the concave portions of the stool's surface that are hidden from view. To help calculate the draw angles, jigs were made from the digital files to verify if the mold parts would come

in contact with the clay as they were withdrawn. To avoid air pockets in the silicone mold, the twin was used to calculate the reorientation of the mold cavity in space so that the mold chamber would be completely filled.

The twin is also used to automate certain procedures, for example aligning repetitive tasks with the ergonomics of bodily gestures, especially when pouring the liquid silicone, or efficiently leveraging the physical force of the operator during the demolding process, a critical pathway for developing a way to execute labor 'comfortably'. In quoting Canguilhem (1992), May (2017, p. 23) draws a connection between signalization and the body: «The electrical automation of post orthography is in no way 'thoughtless'. It simply reformats acts of thinking, displacing them to different arenas. Automation has never been a simple matter of passing labor from humans to machines; it has always involved the enmeshment of consciousness and gestural habituation within processes that are internal neither to the organic nor to the machinic but instead reside within both categories simultaneously. It has always relied on deeply practical 'theories of organic extension,' best understood through a 'biological philosophy of technique'».

After the mold was pressed with clay, a system was developed to assist evaporation, by heating the mold and incubating the clay through a system of flexible heating coils (Fig. 15), and applying forced ventilation (through a simple fan) over the open mold, not yet sealed but only tented with plastic to collect the water vapor, and remove condensation every six hours. During the drying phase, clay also shrinks roughly six to eight percent, and the silicone provided enough cushion for the clay to move inside the mold without suffering any damage (Fig. 12). After 72-80 hours the mold was ready to be flipped upright and demolded; prior to this, the clay cavity was filled with Styrofoam beads, a novel tactic that had been developed at the EKWC, to prevent the clay vessel from deforming and sagging under the force of its own weight.

The design of the mold involved more than just making a tool: it became the medium, the 'thingly channel' through which, all of the information, the expertise, the digital model, and the clay traveled through. In writing about 'medium design' and what she calls the 'protocols of interplay,' Keller Easterling (2021, p. 10) writes: «[...] the intent of designing interplay is not to fix positions but to initiate interactivity – to disrupt loops and boundaries». For the clay, the mold is a disruptive, and unnatural force: an apparatus of protocols that disrupt, and pause the clay's inertia so that it comes to rest without harm in the form of the T-Stool. Easterling (2021, p. 12) describes it best: «Medium design, like pool, is 'indeterminate in order to be practical'».

The mold is an apparatus that arises from all of the individual interests, differentiating itself thanks to the interaction and the ability to tune, however, representing an ideal medium by virtue of the ability to solve the problems of adhesion, deflection, shrinkage, and moisture that emerge during the process¹⁸. These forces were combated using a number of external counteragents, a laundry list of dissonant objects, which were deployed sequentially; rolling pin, Beeswax Plas-

ticine, clay, adhesive masking film, an exercise vibration plate, sunflower oil, assorted sticks, toothpicks, Magic Tape, sponges, porous plastic sheet presses (culled from the twin), an electric fan, aquarium heating coils, a horde of Styrofoam beads, plywood with a hole, a vacuum cleaner, kiln sand, clay kiln furniture (designed using the twin), ratchet ties, a mold swing suspended by forklift, inflatable wine bladders, plastic sheeting, and electric hotplates.

In *Vibrant Matter*, Bennett (2010, p. 34) pinpoints the unique agency of an assemblage, «[...] An assemblage owes its agentic capacity to the vitality of the materialities that constitute it. Something like this congregational agency is called 'Shi'». Quoting Jullien (Bennett, 2010, p. 35), «[...] 'Shi' helps to illuminate something that is usually difficult to capture in discourse: namely the kind of potential that originates, not in human initiative but instead results from the very disposition of things; [Bennett adds that] the 'shi' of an assemblage is vibratory; it is the mood or style of an open whole in which both the membership changes over time and the members themselves undergo internal alteration». Similarly, it is within this disposition of things that one finds latent potential, «It would be impractical to say that you know everything about the shifting banks and shoals of a river, but you might 'know how' to navigate this changing fluvial landscape» (Easterling, 2021, p. 27). It is within Gilbert Ryle's argument 'against the Cartesian mind-body split' that Easterling situates the significance of know-how.¹⁹

Conclusion: The Ceramic Process and Its Ten Links |

The four poles of the ceramic process (the clay, the forming, the firing and the glazing, with the drying belonging to the forming process) have been represented in Figure 5 showing the vector along which the clay changes from wet to dry and from clay to ceramic in an irreversible process. When considering the T-Stool, it is possible to assess its 'techné' – coming into being – according to the interactions between the four poles, where each pole can be reconfigured according to necessity. For example, clay is a compound object containing silica, organic fibers and aggregates, functional elements enabling the formation of bonds during the drying process, whose dosage can affect adhesion, workability, or increase tensile strength.

Design also occurs through the interplay of multiple poles where the linkages comprise three poles, or triads, at the same time; working on one pole of the triad has an effect on the other two, with advantages in the design of the digital twin, making it easier to optimize by considering to momentarily shut off one of the four poles, replacing it with a virtual representation to test different scenarios. External to the poles and their linkages is a constellation of objects that act as intermediaries, which are able to tune, regulate or disrupt the inertia of the entire assemblage, minimizing risk through a variety of digital, manual, physical, chemical, and thermodynamic channels. These are contemporary capabilities that are unique to a ceramic process that can be altered through the presence of the digital. The digital twin provides compactness, and the capability to compress the work of many hands,

processes and tools, into fewer operations while providing greater precision, making it possible to expand the technical limits of press-molding hollow ceramic shells, normally considered too difficult to achieve using traditional mold-making techniques.

The T-Stool represents an advancement of traditional ceramic mold-making techniques using silicone molds, although similar applications are being used in the construction industry to mold concrete elements and countertops. The success of the T-Stool demonstrates that ce-

ramic press-molding is a viable means to achieve the high degrees of curvature that are associated with digital fabrication without the need for full-scale industrial manufacturing; furthermore, the production of the stool provided an opportunity to study the benefits of folded surfaces as a means to resist the deformation that occurs during the firing of a hollow stoneware vessel. The T-Stool compressed 1 cm during the bisque firing at 1,060 °C, amounting to less than 2 percent of its overall height maintaining the designed tactile, and aesthetic qualities. The T-Stool demonstrates

that, for certain applications and thanks to the smaller carbon footprint, ceramic can be a viable alternative to cement, with the potential to expand the research to include other applications and experimentation with different earthen materials: a case study for 'digital ceramics' that resides between the technical realm and tacit know-how, combining the desire to evolve and synthesize the language of ceramics and earthen materials, with the analytical and formal capacities of digital technology.

Acknowledgements

Realizing the T-Stool involved the collaboration and support of many people: Design, K. Mueller-Russo; Ceramic Assistant, D. Sinbert; CNC production, J. Wu; Positive, Y. Uyar; Analysis, A. Deskevich. A special thanks to R. Tjan, Director Sundaymorning@ekwc and all of the staff, thank you for your encouragement and expertise: firing and staging, P. Oltheten; mold making, M. Crooijmans and P. Pompei; glazing: M. Peijnenburg, and the generous support of the Pratt Institute Faculty Development Fund.

Notes

1) For more information on the K. K. Modi University Campus (2017) see the webpage: anna-heringer.com/projects/kkmodi-university-campus/ [Accessed 05 November 2021].

2) For more information on Tecla House (2021) see the webpage: dezeen.com/2021/04/23/mario-cucinella-architects-wasp-3d-printed-housing/ [Accessed 05 November 2021].

3) The T-shaped profile provides stiffness. The potter George Ohr developed a formal syntax for manipulating the folded structure of symmetrical ceramic vessels. Ellison (2006, p.105) characterizes Ohr's approach, calling it Structure as Design.

4) Haraway (2016) describes 'oddkin' as kin that are beyond god, genealogy, and biogenetic family troubles, 'to whom one is actually responsible'. While Haraway situates her argument for making kin with the critters of the world, I believe her ideas have as much significance for the loss of species as they do for sustaining the evolution of the ceramic process.

5) According to Grieves (2019, p. 5), the concept of the Digital Twin was initiated at NASA in 2010: «The Digital Twin Instance (DTI) is the Digital Twin of each individual produced artifact [...]. Digital Twin Aggregates (DTAs) are the aggregation or composite of all the DTIs».

6) According to Graham Harman (2011, p. 80) fourfold structures may be applied to anything: «[...] the degree of success depends primarily on two criteria. Criterion number one: how well chosen are the two axes of division? [...] Criterion number two: does a given fourfold system provide a useful account of how the four poles interrelate?».

7) While the process typically follows this order, there are techniques that reuse broken ceramic. Trecandís is a type of Catalan technique that reuses broken pottery for aesthetic effect (Bechthold, Kane and King, 2015), while the Japanese art of Kintsugi, 'to patch with gold', is a process of mending broken ceramic using gold powder mixed with lacquer (Iten, 2008). For a standard definition of the ceramic process see: Reijnders and European Ceramic Work Center, 2005.

8) The speculative realist and novelist, Tristan Garcia (2014, p. 13) describes the intensive and extensive more eloquently as the 'thingly channel of being': «A thing is nothing other than the difference between 'that which is

in the thing' and 'that in which the thing is'». It is from Garcia that I have adopted the use of the term 'channel' to convey the interactions between the intensive world of the clay and the extensive world of its tooling.

9) Joel Fisher (2005, p. 9) refutes the idea that «[...] ceramicists are unduly interested in technique». According to Fisher, Anton Reijnders and European Ceramic Work Center (2005, p. 9) once said that «Temperature and recipe [...] is not true technique». Fisher concludes that a recipe's illusion is that it eliminates risk.

10) The temperature at which the clay particles begin to fuse. A fully vitrified ceramic becomes waterproof (Reijnders and European Ceramic Work Center, 2005).

11) Deskevich, A. (2011), *Ceramic Stool, Preliminary Finite Element Analysis*, unpublished internal report, p. 2.

12) Obtaining BIFMA certification was not the intended outcome of this test. The 'General Purpose Office Chairs Test', BIFMA X 5.1-2017, published by The Business and Institutional Furniture Manufacturers Association (BIFMA) was used as a guide to approximate a uniform load for the analysis. More information at the webpage: bifma.org/page/standardsoverview [Accessed 30 September 2021].

13) Deskevich (2011), p. 2.

14) Ibid, p. 2.

15) Press molds consist of two varieties; Hump and hollow molds. «[...] A hollow mold resembles a basin or dished indentation while a hump or drape mold resembles a giant mushroom. A hollow mold shapes the outside of the form, while a hump mold shapes the inside» (Sentance, 2004, p. 56).

16) Initially we used a method of casting raised keys in the rubber and placing place pins through the keys where they protrude through the epoxy. While this method sufficed, the rubber cannot be tensioned like it can with the ball cords.

17) The method of using a rubber mold is mentioned here, concluding, «Moulds made of (silicone) rubber or polyester do not absorb water at all» (Reijnders and European Ceramic Work Center, 2005, p. 122). This prohibits the clay from reaching the plastic-leather-hard state so that the mold can be safely removed.

18) It is beyond the scope of this paper, but there is a similarity here between a tool and a medium. It mirrors Tristan Garcia's Ontology (2014), between the object in solitude and a form out in the world.

19) In describing knowing-how, Easterling (2021, p. 27) cites Ryle's The Concept of Mind (1949), and Easterling's Extrastate-craft – The Power of Infrastructure Space (2014). Easterling writes: «Disposition is a latent agency or immanent potential – a property or propensity within a context that unfolds over time and in the absence of a reifying event or an executive mental order».

References

Bechthold, M., Kane, A. and King, N. (2015), *Ceramic Material Systems – In Architecture and Interior Design*, Birkhäuser, Basel.

Bennett, J. (2010), *Vibrant Matter – A Political Ecology of Things*, Duke University Press, Durham (US).

Canguilhem, G. (1992), "Machine and Organism", in Crary, J. and Kwinter, S. (eds), *Incorporations*, Zone Books, New York.

Carty, W. M. (2019), *Energy in Terra Cotta – The Balance Between Heat Storage and Strength*, lecture in Architectural Ceramic Assemblies Workshop, August 12, 2019. [Online] Available at: archceramicworkshop.com/lectures/ [Accessed 05 November 2021].

Easterling, K. (2021), *Medium Design – Knowing How to Work on the World*, Verso, London.

Fisher, J. (2005), "Making the Link – Persuasion and Permanence", in Reijnders, A. and European Ceramic Work Center (eds), *The Ceramic Process – A Manual and Source of Inspiration for Ceramic Art and Design*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, pp. 7-9.

Garcia, T. (2014), *Form and Object – A Treatise on Things*, Edinburgh University Press, Edinburgh.

Gorter, H. (2005), "Material method and process", in Reijnders, A. and European Ceramic Work Center (eds), *The Ceramic Process – A Manual and Source of Inspiration for Ceramic Art and Design*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, pp. 17-21.

Grieves, M. W. (2019), "Virtually Intelligent Product Systems – Digital and Physical Twins", in Flumerfelt, S., Schwartz, K. G., Mavris, D. and Briceno, S. (eds), *Complex Systems Engineering – Theory and Practice*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston (US), pp. 175-200. [Online] Available at: doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200 [Accessed 26 October 2021].

Haraway, D. J. (2016), *Staying with the Trouble – Making Kin in the Chthulucene*, Duke University Press, Durham (US).

Harman, G. (2011), *The Quadruple Object*, Zero Books, Winchester (UK).

Iten, C. (2008), "Ceramics Mended with Lacquer – Fundamental Aesthetic Principles, Techniques and Artistic Concepts", in Herbert, F. and Johnson Museum of Art (eds), *Flickwerk – The Aesthetics of Mended Japanese Ceramics*, Museum für Lackkunst, pp. 18-24. [Online] Available at annacolibri.com/wp-content/uploads/2013/02/Flickwerk_The_Aesthetics_of_Mended_Japanese_Ceramics.pdf [Accessed 05 November 2021].

May, J. (2017), "Everything Is Already an Image", in *Log*, n. 40, pp. 9-26. [Online] Available at: jstor.org/stable/26323867 [Accessed 26 April 2021].

Reijnders, A. and European Ceramic Work Center (eds) (2005), *The Ceramic Process – A Manual and Source of Inspiration for Ceramic Art and Design*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia.

Russo, R. and Mueller-Russo, K. (2012), "Textiles – Alternate Forms of Malleability", in *Studies in Material Thinking*, vol. 7, pp. 1-9. [Online] Available at: material-thinking.org/sites/default/files/papers/SMT_V7_P9_Russo_and_Russo.pdf [Accessed 26 April 2021].

Sentance, B. (2004), *Ceramics – A World Guide to Traditional Techniques*, Thames & Hudson, London.