

Fonderia: Leonardo aveva ragione! L'enorme cavallo dedicato a Francesco Sforza era materialmente realizzabile

A cura di *Andrea Bernardoni*, IMSS, Istituto e Museo di Storia della Scienza (Museo Galileo), Firenze
Andrea Borsi, Arketipo, San Giovanni Valdarno (AR)
Stefano Mascetti, Alessandro Incognito, Matteo Corrado, XC Engineering, Cantù (CO)

La storia

La sfortunata vicenda del monumento Sforza costituisce uno degli episodi più audaci e meglio documentati della storia dell'arte e della tecnologia. Nessun artista prima di Leonardo si era impegnato in un'impresa che prevedesse la realizzazione in unica fusione di un monumento alto più di sette metri per un peso esorbitante. Purtroppo, il monumento Sforza non è mai stato realizzato.

Con l'invasione francese di Milano del 1499 il modello di argilla del cavallo venne distrutto e la caduta in disgrazia di Ludovico il Moro fece sfumare definitivamente le possibilità di portare a termine la fusione del monumento al quale Leonardo aveva lavorato per circa sedici anni. I disegni e gli appunti di Leonardo consentono di ricostruire la morfologia e la statica del cavallo, di codificare le fasi per la costruzione della forma di fusione e di avanzare ipotesi attendibili sull'impianto a forni multipli con il quale egli intendeva effettuare la colata. Secondo il progetto originario di Leonardo, la colata doveva essere realizzata con la forma collocata nella fossa di fusione in verticale. Essendosi tuttavia reso conto che il completo interrimento della forma comportava uno scavo che avrebbe raggiunto la falda freatica, sviluppò la soluzione alternativa della colata con la forma in posizione orizzontale.

Le indicazioni di tipo qualitativo e quantitativo presenti nei documenti pervenuti hanno consentito di procedere alla ricostruzione del modello digitale dell'impianto di fusione e di sottoporre a test dettagliati i due metodi di fusione concepiti da Leonardo per mezzo di un software che simula virtualmente i processi fisico-chimici coinvolti nella colata e nel raffreddamento del metallo.

Prima di procedere alla "fusione virtuale" del cavallo era necessario mettere a punto i parametri indispensabili per tradurre le indicazioni di Leonardo e i dati da esse desumibili nei valori quantitativi necessari per applicare il



software di simulazione al nostro caso.

Sulla base dei disegni vinciani relativi alla forma di fusione contenuti nel Codice di Madrid II e nella Collezione di Windsor, si è anzitutto proceduto alla realizzazione di un modello di argilla in scala 1:7. Il modello è stato poi tradotto in formato digitale per mezzo di uno scanner tridimensionale, aumentandone la scala secondo le indicazioni di Leonardo e di Luca Pacioli, i quali forniscono, per il solo cavallo, l'altezza di circa 7,20 m.

Sappiamo che il quantitativo di rame che Ludovico il Moro aveva accantonato per la fusione (circa 160.000 libbre = 47tonnellate) fu trasferito nel 1494 nell'arsenale del Duca di Ferrara e destinato alla produzione di artiglierie. Abbiamo considerato questo dato come indicativo dell'ordine di grandezza minimo della fusione, dato che, trattandosi di un monumento di bronzo, il peso finale sarebbe risultato superiore per l'aggiunta dello stagno. I risultati forniti dalla simulazione di fusione suggeriscono un peso complessivo del monumento molto superiore a quello del rame inviato ad Ercole d'Este. Quest'ultimo sarebbe appena bastato per il basamento solidale con le due zampe portanti del cavallo.

Per quanto riguarda lo spessore, le uniche indicazioni fornite da Leonardo riguardano le

zampe portanti, che dovevano essere di bronzo massiccio. Non esistendo esempi di fusioni di queste dimensioni per il XV secolo – il primo monumento equestre fuso in un'unica colata paragonabile a quello di Leonardo è quello a Luigi XIV realizzato nel 1699 da Jean Baltazar Keller – abbiamo effettuato simulazioni del carico statico del cavallo per una gamma di spessori da 3 a 7 centimetri. Tenuto anche conto del carico del cavaliere, si è optato per uno spessore medio di 5 centimetri.

Per quanto riguarda l'impianto fusorio, Leonardo prende in esame soluzioni che prevedono l'impiego da tre a sei

forni. Abbiamo scelto di optare per tre forni, in modo da lasciare un lato della fossa libero per le operazioni di assemblaggio della forma, che essendo realizzata in sette sezioni più il nucleo di fusione doveva essere collocata nella fossa per mezzo di macchine appositamente progettate. Questa opzione trova importante conferma nel De la pyrotechnia dell'ingegnere minerario senese Vannoccio Biringuccio, che circa quaranta anni dopo la triste conclusione del progetto Sforza rievocò quell'ambizioso processo menzionando un impianto fusorio con tre forni.

La ricostruzione e la disposizione dei canali di gettata è chiaramente indicata nei disegni di Leonardo. Nel caso della fusione in verticale, i canali di riempimento risultano disposti in linea sul collo della pancia e sul muso del cavallo. In un altro disegno, relativo alla soluzione in orizzontale, viene presentato uno schema di distribuzione costituito da tre gruppi di canali incrociati provenienti dalle bocche dei tre forni. I canali esterni sono stati dimensionati secondo le indicazioni del Trattato della scultura, di Benvenuto Cellini, il quale descrive un canale di fusione della larghezza di un mattone milanese della metà del Quattrocento (circa 30 centimetri di larghezza). Da un testo di Leonardo si ricava inoltre che l'inclinazione di questi canali dovesse essere modesta.

Il diametro dei canali verticali è stato deter-

COLATA VERTICALE

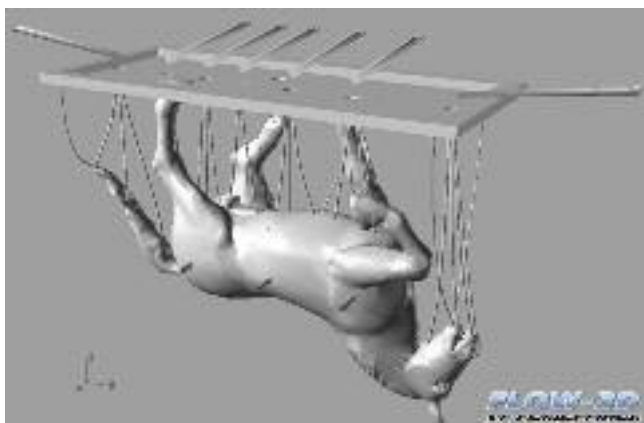


Immagine statica che mostra il sistema di colata.

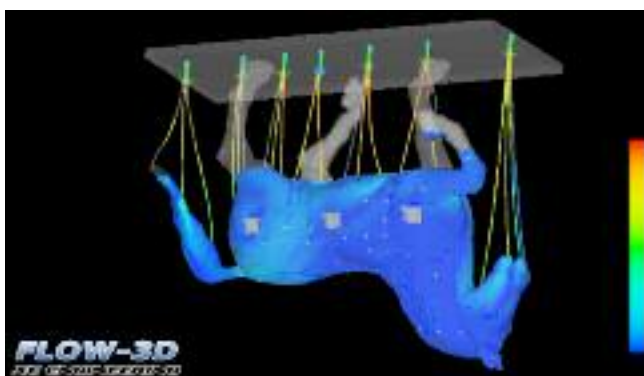


Immagine statica che mostra il campo di velocità del metallo fuso (rosso=velocità più alte, blu=metallo in quiete). È interessante in questa immagine vedere il flusso di metallo che arriva dalla coda e che apporta metallo fresco a tutta la parte posteriore del cavallo, e che i tasselli di separazione provocano delle scie di rimescolamento turbolento.

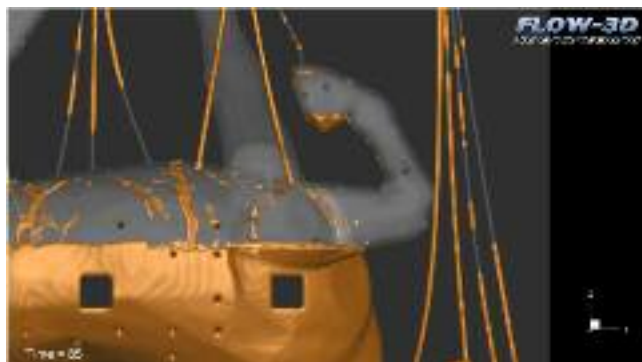


Immagine statica di zoom sulla zampa anteriore sinistra del cavallo. È questo uno dei punti più critici di tutta la fusione poiché il metallo ristagna e si raffredda prima di riprendere a gocciolare nella forma. È comunque interessante rilevare che questa parte critica non influenza la stabilità strutturale della fusione poiché ancora una volta riguarda una zona scarica e non portante.



Immagine in falsi colori della fusione. I colori utilizzati sono quelli del bronzo, con sfumature più scure nelle zone in cui il software ha rilevato una maggiore quantità di difettosità.

minato sulla base delle evidenze offerte da due sculture in bronzo della fine del XV secolo: l'incredulità di S. Tommaso di Andrea Verrocchio, che presenta i resti di un tubo di alimentazione di circa 3,5 cm di diametro, e la protome equina Carafa, oggi al Museo Archeologico di Napoli, ma che apparteneva alla collezione di Lorenzo dei Medici, la quale presenta ancora nella parte interna i canali di fusione di circa 3 centimetri di diametro. Questi dati sono attendibili perché le due opere di dimensioni cospicue e realizzate in un'unica colata erano note a Leonardo.

Un altro parametro necessario per impostare la simulazione di fusione è quello della composizione della lega di bronzo. Nei propri appunti Leonardo mostra di conoscere la distinzione che si faceva nella metallurgia del bronzo tardo-quattrocentesco tra "lega campana" (ad alto tenore di stagno) e "lega bombardata" (a basso tenore di stagno). Sulla base della testimonianza di Biringuccio, che riporta per la lega bombardata una percentuale di stagno tra l'8 e il 12%, e quella di Vasari che per la bombardata indica una percentuale di bronzo del 10%, si è deciso di adottare una lega al 10%.

Leonardo afferma inoltre che il bronzo è pronto per essere colato nel momento in cui smette di bollire. Questa notazione ci ha consentito di ipotizzare per la colata una temperatura di circa 1100°, corrispondente al

momento nel quale, con la fusione del rame, lo stagno e gli altri componenti cessano di bollire.

Elaborando i dati quantitativi sopra evidenziati, il software di simulazione ha fornito una risposta positiva all'interrogativo se la colata, nel caso Leonardo avesse potuto effettuarla, sarebbe riuscita. I risultati ottenuti offrono infatti conferme eloquenti della effettiva praticabilità delle principali soluzioni ideate da Leonardo: l'impiego dei forni multipli, la rete di canali per la distribuzione del bronzo e i sensori pirotecnici per controllare il graduale riempimento della forma. La modellizzazione tridimensionale ci restituisce la visione complessiva di un impianto di fonderia senza precedenti, in grado di gestire una colata gigantesca come quella del Monumento Sforza che avrebbe verosimilmente richiesto circa 70 tonnellate di bronzo per la fusione

Il calcolo strutturale

Per valutare le possibili problematiche statiche inerenti la realizzazione di un'opera di queste dimensioni si è proceduto alla definizione di un modello di calcolo con il metodo degli elementi finiti. Partendo dall'ipotesi di una perfetta omogeneità del materiale in tutte le sue parti e di spessore costante (pari a 5 cm), il modello ha permesso di verificare

sia i livelli di sollecitazione sulle varie parti del monumento, soggetto all'azione del solo peso proprio, sia di determinare l'andamento degli stati tensionali in relazione alle sue variazioni morfologiche. Come qualsiasi corpo soggetto al peso proprio, la statua presenta infatti una variazione di sollecitazioni che dipende dalle caratteristiche intrinseche del materiale (omogeneità in funzione della presenza o meno di eventuali soffiature, tempo di raffreddamento del processo di colatura, ecc.), dallo spessore dello stesso, dalla forma geometrica del manufatto e dalla posizione e natura degli appoggi (zampa anteriore e posteriore di sostegno).

Per quanto riguarda gli appoggi, che Leonardo aveva concepito in bronzo massiccio, è stata riscontrata una diversità di distribuzione del carico, dato che la forza di appoggio della zampa anteriore destra è di circa tre volte superiore a quella della zampa posteriore sinistra.

La modellazione ha permesso inoltre di evidenziare nelle zone di attaccatura delle zampe le parti maggiormente critiche: la forma geometrica di tali zone risulta infatti particolarmente complessa, determinando i livelli massimi di sollecitazione che, rimangono tuttavia entro limiti tollerabili. In questa zona si sarebbe pertanto registrata la maggiore sensibilità nei confronti di

COLATA ORIZZONTALE

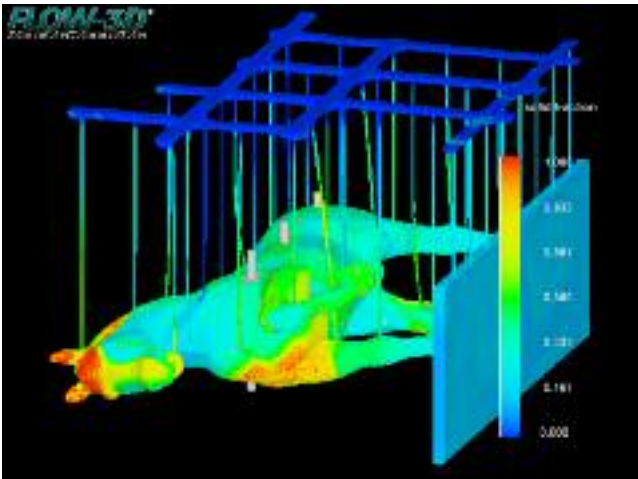


Immagine statica che mostra il diverso stato di solidificazione del metallo nella forma di fusione (rosso=solido, blu=fluido). Nella fusione orizzontale vi è una minor simmetria nello stato finale del cavallo tra parte destra e parte sinistra. Le parti maggiormente critiche (rosso) sono comunque localizzate nei livelli più bassi dello stampo, e questo è importante e corretto ai fini di una buona solidificazione del bronzo.

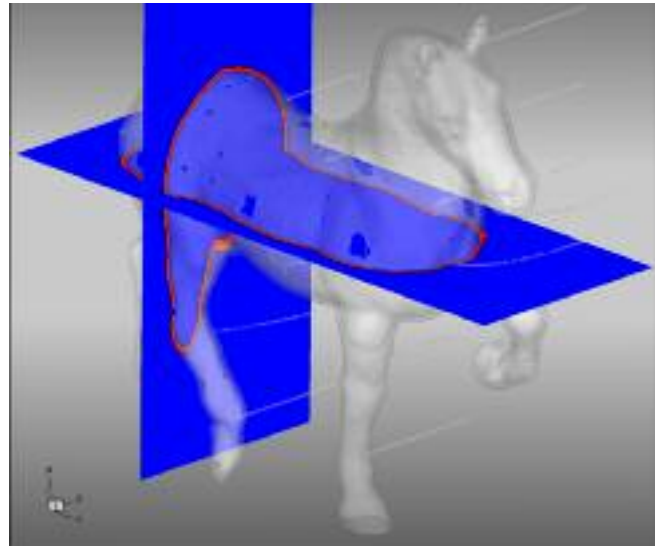


Immagine statica che mostra gli spessori esigui coinvolti in quest'opera, rispetto alle dimensioni generali del cavallo. E' questo uno degli aspetti più problematici di tutta l'opera sia al vero che anche al calcolatore, e che ha visto la necessità di impegnare enormi risorse di calcolo.

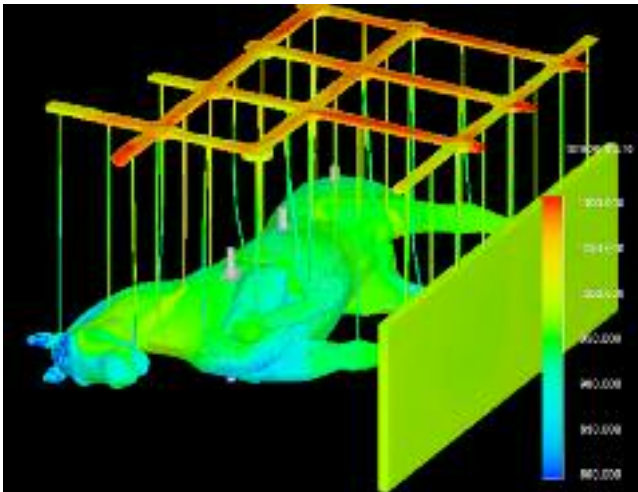


Immagine simile alla precedente, in cui viene utilizzata una colorazione in base alla temperatura anziché in base allo stato di solidificazione. La corrispondenza comunque è equivalente dato che le parti più fredde corrispondono anche alle parti in cui la solidificazione è già in uno stato avanzato.

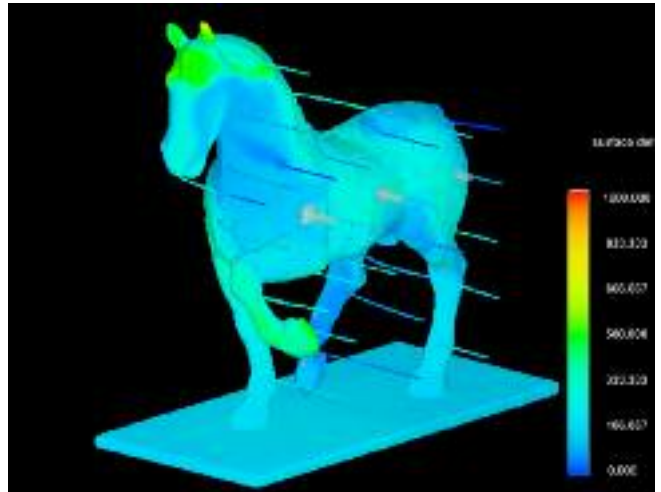
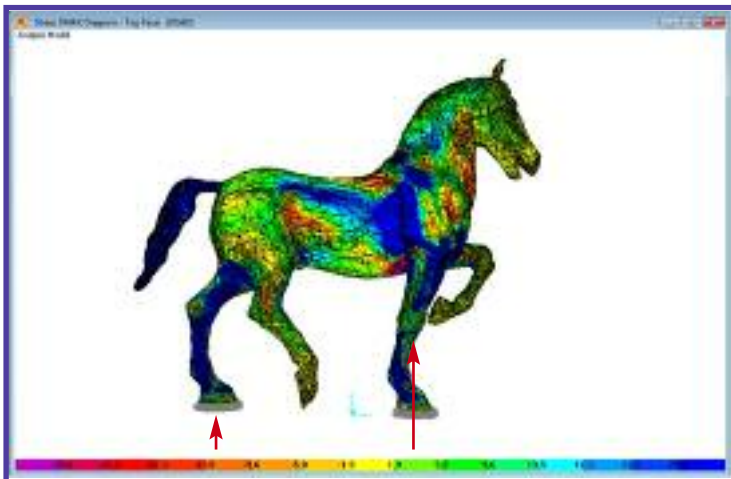


Immagine statica che mostra la localizzazione delle difettosità superficiali del bronzo (rosso=maggiori difettosità, blu=assenza di difettosità). E' interessante notare come, come per la fusione verticale, queste vadano a posizionarsi in parti strutturalmente scariche e di minor importanza ai fini della tenuta portante del peso del cavallo.



Andamento delle sollecitazioni massime con la ripartizione dei carichi tra l'appoggio posteriore e quello anteriore.

un'eventuale disomogeneità e imperfezione del metallo.

Di particolare rilievo è inoltre il problema dell'equilibrio della statua, in particolare della sua resistenza al ribaltamento. Pur sapendo che Leonardo aveva previsto un basamento di notevole consistenza, nella forma del cavallo si rilevano caratteristiche che lasciano presupporre un attento studio da parte di Leonardo per ottenere un equilibrio corretto: l'assetto del cavallo, con la zampa sinistra rampante, che sposta le masse a sbalzo rispetto agli appoggi, viene infatti riequilibrato dalla posizione della testa lievemente inclinata sulla destra. Si ottiene in tal modo una forte compressione sulla zampa anteriore in appoggio.

A riprova di questa intenzionale scelta pro-

gettuale, l'analisi agli elementi finiti ha mostrato una marcata linea di compressione lungo tutta l'altezza della statua: prova evidente della ricerca di un ben bilanciato equilibrio.

L'analisi statica suggerisce che la forma del monumento è stata concepita da Leonardo non solo sulla base di un raffinato effetto estetico, ma anche tenendo in attenta considerazione le forze in gioco, in modo da definire modalità di appoggio e forme pienamente soddisfacenti dal punto di vista della resistenza strutturale.

I risultati

La fusione virtuale del cavallo di Leonardo è stata eseguita con un software di simulazione fluidodinamica che consente di riprodurre i processi fisico-chimici della fusione e di visualizzare il comportamento del metallo fuso in ogni parte della forma di fusione e in ogni fase del suo riempimento.

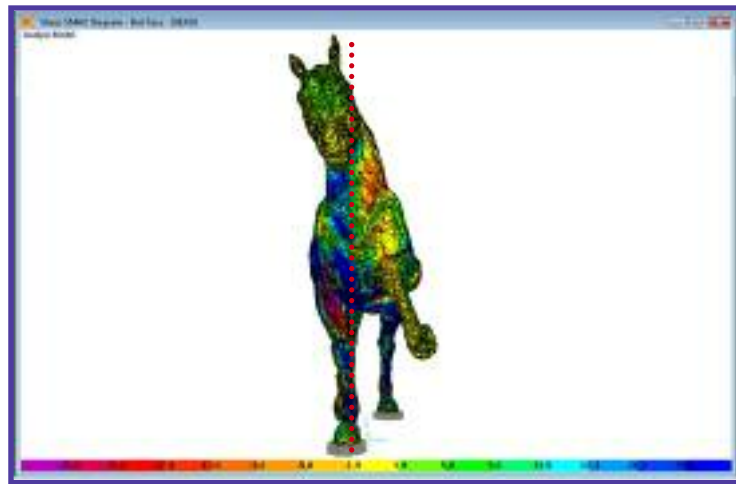
Gli ingegneri della XC Engineering srl di Cantù (Como), in stretta collaborazione con Andrea Bernardoni e con l'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze, hanno utilizzato a questo scopo il software FLOW-3D, da anni adottato dalle maggiori fonderie mondiali per l'ottimizzazione delle loro colate ma mai applicato ad un progetto di ricerca storico-scientifica e di enorme complessità come la fusione del monumento Sforza.

Osservando al rallentatore il filmato delle due fusioni (orizzontale e verticale) concepite da Leonardo a un livello di "macroscala", emergono evidenze di grande interesse. Nella fusione verticale il riempimento, che richiede per essere completato, 165 secondi, avviene in due fasi: la prima, comandata dal primo forno, alimenta con il metodo "a sorgente" solo la testa del cavallo, grazie ai canali di apporto inseriti a circa metà dell'altezza della testa; la seconda fase inizia quando la testa è completamente piena, con l'apertura degli altri due forni per alimentare il resto della forma. Nella fusione orizzontale, che viene completata in 123 secondi, invece il bronzo viene riversato nella forma lungo l'intera sua estensione, con un metodo di alimentazione "a pioggia" (cioè facendo cadere il metallo dall'alto).

La scelta di una soluzione ibrida per la colata con forma verticale (a sorgente per la testa, e a pioggia per la restante parte della forma), o quella diversa (totalmente a pioggia per la forma orizzontale), presenta implicazioni significative sull'evoluzione del metallo, sia dal punto di vista delle difettosità che per quanto attiene alla solidificazione.

Quanto alle difettosità (dovute per esempio all'ossidazione del bronzo), il software ha rivelato come la direzione dominante dei flussi della fusione verticale sia stata ben studiata da Leonardo: il metallo diffuso dai canali di apporto riesce a trascinare e a confinare il bronzo più freddo e ossidato nel dorso e nelle due zampe sollevate del cavallo, parti strutturalmente scariche e di minor importanza.

Uno dei problemi posti dalla fusione verticale era che risultava estremamente difficile capire l'istante in cui, avendo il metallo riempito completamente la testa dell'animale, si doveva procedere all'apertura degli altri forni. Per



Andamento delle tensioni sulla parte anteriore con evidenziata la linea di compressione sulla zampa destra.

risolvere questo problema, Leonardo collocò dei sensori pirotecnici alla base del collo dell'animale. Raggiunti dal bronzo fuso, i sensori sarebbero esplosi, segnalando così ai fonditori il completamento del riempimento della testa. La simulazione ha mostrato come l'uso dei sensori pirotecnici si abbini ottimamente allo schema di alimentazione a sorgente utilizzato per la testa del cavallo, tanto da indurre a supporre che Leonardo abbia progettato l'alimentazione a sorgente proprio a questo scopo. Difficilmente infatti i dispositivi pirotecnici avrebbero funzionato correttamente nel caso di alimentazione a pioggia. Lo schema reticolare a canali orizzontali per il riempimento a pioggia della forma distesa ha invece messo in evidenza il vantaggio di poter gestire grossi quantitativi di bronzo,

tollerando senza danni eccessivi anche eventuali irregolarità nella regolazione dei forni. La maggior velocità di riempimento di questo procedimento garantisce un con afflusso di metallo a temperatura superiore e un tempo di esposizione all'aria inferiore, riducendo il rischio di generazione di ossidi e difettosità superficiali.

L'esperienza di simulazione virtuale mostra che la progettazione della soluzione con forma verticale è stata più analiticamente definita da Leonardo dal punto di vista dei flussi, per l'impiego dei sensori pirotecnici e per l'uso del basamento come bacino di pressione in fase di solidificazione. L'alternativa soluzione orizzontale presenta, d'altra parte, il non marginale vantaggio della maggiore rapidità di riempimento.

SCHEDA TECNICA SIMULAZIONE DI FUSIONE CAVALLO SFORZA

Durata del progetto di ricerca: 15 mesi.

Sviluppo temporale del lavoro:

- Marzo 2008: inizio del progetto con una simulazione di fusione di prova.
- Settembre 2008: simulazione della fusione con forma in orizzontale.
- Marzo 2009: sviluppo del modello matematico della forma di fusione per la simulazione della colata verticale.
- Giugno 2009: conclusione della simulazione con forma in verticale.

Software utilizzato: FLOW-3D® della FlowScience Inc.

Caratteristiche del software: simulatore di dinamica dei fluidi.

Campo di applicazione del software: fonderia, idraulica ambientale, idraulica, micro-fluidica.

Risorse hardware utilizzate: HP Pavilion Elite m9290. Processore Core 2 Quad Q9300, 8Gb ram, scheda video GeForce 8800, sistema operativo Windows Vista 64bit.

Livello dei dettagli da rappresentare: dettagli di circa 1.5 cm su uno spazio di 3x9x7 metri.

Numero di elementi di calcolo utilizzati nella simulazione: 20.282.147 celle.

Processi fisici simulati:

- dinamica dei fluidi e rappresentazione della turbolenza
- tracking accurato della superficie libera del fluido
- scambio termico
- solidificazione del metallo
- ossidazione del metallo
- micro e macro-ritiri
- sorgenti di massa e di calore

CREDITI SIMULAZIONE NUMERICA FUSIONE CAVALLO SFORZA

Andrea Bernardoni (IMSS, Firenze) Ricerca storica e coordinazione del progetto.

Stefano Mascetti, Matteo Corrado, Alessandro Incognito (XC Engineering, Cantù) Esecutori della simulazione di fusione.

Andrea Borsi (Arketipo, San Giovanni Valdarno) Calcolo strutturale.

Fabio Coreca, Riccardo Braga (Laboratorio Multimediale IMSS) Modellazione digitale.

IMSS/Opera Laboratori Fiorentini Finanziatori e promotori del progetto.