Modellazione agli elementi finiti del processo DMLS

V. Luchin, V. Fontanari, M. Benedetti, A. Molinari, L. Facchini, E. Magalini, G. Zappini

La tecnica Direct Metal Laser Sintering è un processo produttivo near-net shape assai complesso a causa della gran quantità di parametri che ne governano i fenomeni. La modellazione numerica del processo può permettere di ridurre, almeno in una fase preliminare, la quantità di prove sperimentali necessarie a ottimizzare il processo, ovvero a minimizzare i tempi ed i costi della fabbricazione del prodotto finale mantenendone inalterata la qualità. In questo lavoro è stata sviluppata e messa a punto un'analisi agli elementi finiti che tiene conto di vari aspetti, quali le proprietà termiche del materiale e i parametri principali, con l'obiettivo di fornire le conoscenze generali per la comprensione dei complessi fenomeni fisici del processo. Una sperimentazione pensata ad hoc è stata impostata per verificare i risultati numerici e modificare il modello nei suoi aspetti critici.
Questo lavoro è parte del progetto di ricerca "FAMAC", co-sponsorizzato dalla Provincia Autonoma di Trento e da Eurocoating SpA, Italia.

PAROLE CHIAVE: FEM - DMLS - PRODUZIONE ADDITIVA

INTRODUZIONE

Il Direct Metal Laser Sintering (DMLS) è un processo produttivo che fa parte delle tecnologie di Additive Manufacturing. Esso si basa sulla fusione localizzata di polveri metalliche mediante laser per costruire strato per strato oggetti tridimensionali anche dalla forma complicata, difficilmente realizzabili con le tecniche tradizionali.

Le variabili di processo di cui tener conto sono molteplici; tra le più importanti troviamo la potenza del laser, la velocità di scansione, lo spessore dello strato di polvere da fondere e la distanza tra le varie passate. Non sono tuttavia da trascurare anche la strategia di scansione, l'orientazione del pezzo nella camera e la temperatura di preriscaldo del letto di polvere. Tutti questi parametri influiscono in maniera consistente sulla qualità del prodotto finale.

Data la grande varietà di parametri in gioco, la possibilità di utilizzare la modellazione numerica fornisce uno strumento molto utile nella fase preliminare della definizione dei parametri di processo così da ridurre tempi e costi della fabbricazione del prodotto finale.

Durante i primi tentativi di utilizzare l'analisi numerica per prevedere i risultati di processi di Additive Manufacturing [3-5] è stata analizzata l'influenza della tipologia di materiale, del suo stato, delle strategie di fusione e delle velocità di scansione sulle distorsioni, gli stress residui ed i difetti dovuti al ritiro in solidificazione. La scarsa conducibilità termica della fase polvere comporta maggiori gradienti di temperatura e di conseguenza maggiori distorsioni rispetto all'utilizzo del solido. L'ottimizzazione dei parametri del laser viene proposta in base ai risultati della modellazione numerica, confrontando due diverse strategie e due diverse velocità di scansione, mentre l'effetto del ritiro in solidificazione viene ritenuto avere una scarsa influenza sul profilo termico. In [17] viene proposta un'analisi bidimensionale del processo di fusione laser, da cui vengono ricavati i profili di temperatura e gli stress residui, sulla base dei quali viene definita una nuova strategia di scansione con minor lunghezza e distanza tra cordoni adiacenti di sinterizzazione.

Uno dei metodi più comuni utilizzato in letteratura per valutare la qualità del processo è quello di valutare le dimensioni del bagno fuso [8,9,20,25], le quali vengono analizzate in funzione della velocità di scansione in [8] e della potenza del laser in [9]. Questi due parametri di processo hanno effetti contrastanti: infatti, le dimensioni del bagno fuso aumentano all'aumentare della potenza e al diminuire della velocità. Un altro aspetto da tener

V. Luchin, V. Fontanari, M. Benedetti, A. Molinari,
Università di Trento

L. Facchini, E. Magalini, G. Zappini,
Eurocoating Spa, Pergine Valsugana

presente è il fatto che parametri di processo uguali producono risultati ben diversi in base alla tipologia di materiale, come ben evidenziato dagli autori in [20], in cui vengono analizzate polveri di Ti-6Al-4V, acciaio inox 316L e alluminio 7075. Nel tentativo di comprendere meglio l'influenza della dimensione della polvere, della potenza del laser e della velocità di scansione sul processo di interazione laser-polvere, Ganeriwala et al. [10] hanno costruito un modello ad elementi finiti molto preciso a livello delle particelle di polvere, evidenziando come le particelle di polvere più piccole fondano prima delle altre creando squilibri nei profili di temperatura, mentre la strategia di scansione abbia un'influenza notevole sulla modalità di riscaldamento.
La modellazione numerica del processo ha come scopo principale quello di prevedere le distorsioni e gli stress residui che si instaurano nel materiale [1,6,7,11-19,21-27]. Uno degli ostacoli maggiori al raggiungimento di questo obiettivo è la grande quantità di tempo e risorse computazionali necessari. In molti lavori [12,14,15,16,18,19] si propone un approccio multi-scala. Esso si basa sull'analisi su più scale di grandezza, partendo da pochi cordoni fino ad arrivare all'oggetto completo. Questo metodo porta con sé molte semplificazioni e quindi viene spesso affiancato ad un'analisi sperimentale che ne confermi l'efficacia. Il modello a scala minore viene spesso validato mediante la misura delle dimensioni dei cordoni [12,13,18,19], mentre le distorsioni vengono verificate su oggetti massivi, che successivamente al taglio dei supporti mostrano distorsioni facilmente misurabili. In [18,19] il profilo di deformazione calcolato segue in modo accettabile quello sperimentale, portando ad errori fino al 26%.
In risposta alle difficoltà nell'utilizzo di software di analisi numerica commerciali alcuni autori hanno intrapreso la strada della creazione di codici proprietari specializzati per simulare il processo DMLS. In [11,13] viene presentato il codice Diablo, sviluppato al Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), i cui risultati vengono confrontati con valori presi in letteratura, mostrando una buona corrispondenza. In [1,6,7,22] viene presentato un codice proprietario di Autodesk®, il quale utilizza una mesh ad attivazione ibrida che prevede elementi mantenuti in quiete o inattivi finché non coinvolti nel processo in modo da sfruttare efficacemente le capacità di calcolo, diminuire i gradi di libertà e le equazioni da risolvere velocizzando sensibilmente l'analisi. Confrontando i risultati delle distorsioni simulate con i dati sperimentali, si nota che il software riesce a riprodurre fedelmente l'andamento ma si discosta dai valori reali per una percentuale massima del 29%. Anche l'azienda 3DSIM® [21-27] utilizza una mesh particolare, la quale si raffina in funzione della vicinanza allo spot del laser. È stato verificato infatti che l'effetto dell'impulso di calore rimane localizzato in una porzione di materiale assai ristretta rispetto alla totalità dello strato. In aggiunta al lavoro sulla mesh, gli autori hanno ottenuto un'ulteriore diminuzione del tempo di calcolo modificando la metodologia di risoluzione e ordinamento delle equazioni differenziali. Anche in questo caso si hanno buoni riscontri per quanto riguarda gli andamenti delle distorsioni ma lo scostamento massimo rispetto ai valori reali rimane nell'intorno del 15%.
Nonostante vi sia un crescente interesse verso le tecniche di analisi numerica del processo DMLS, in sostanza non sembra ancora essere presente sul mercato un prodotto sicuro ed affidabile.
In questo lavoro viene presentata una procedura di analisi mediante elementi finiti del processo DMLS, sviluppata con l'obiettivo di studiare le problematiche che possono essere associate alla modellazione di un processo così complesso e lontano dall'equilibrio termodinamico. Nella prima parte vengono analizzate le caratteristiche del processo DMLS e definito il modello di analisi agli elementi finiti. Successivamente sono esposte le proprietà del materiale, i carichi termici, le condizioni al contorno. Nell'ultima parte vengono esposti i risultati ottenuti, le conclusioni e i possibili sviluppi futuri.

IL PROCESSO DMLS

Il flusso di processo ha inizio con il modello CAD del manufatto, il quale viene opportunamente affettato per mezzo di un apposito software, così da generare i successivi strati di costruzione. L'hardware è costituito da una camera ad atmosfera controllata in cui vi è la build box nella quale viene stesa la polvere in strati di alcune decine di micrometri. Il laser, focalizzato in uno spot di poche decine di micrometri, fonde la polvere seguendo la sezione dettata dal software. Successivamente viene steso un altro strato di polvere, la quale viene fornita da un silo a caduta o da un serbatoio di polvere pre-compattata; il livellamento superficiale dello strato è garantito da un recoater a lama o rullo.
Nel processo DMLS i parametri di processo principali sono: lo spessore dello strato, la distanza tra gli impulsi del laser, il tempo di permanenza su ogni punto, la distanza tra i cordoni, il diametro dello spot del laser, il tempo per la stesa dello strato successivo. Un effetto da non trascurare è, inoltre, quello della potenza del laser, la quale agisce sul flusso di calore che investe la polvere. Per quanto riguarda il percorso del laser, le strategie di scansione possono essere molteplici: meander, consigliata per oggetti di piccole dimensioni, stripes e chess, che vengono utilizzate spesso per manufatti più grandi. Tipicamente il piano di scansione viene ruotato di un angolo di 67° ad ogni strato per favorire una maggior omogeneità nel carico termico e diminuire gli stress residui indotti. Nel codice è stata implementata una traiettoria a zig zag, la quale è alla base di tutte le strategie di scansione. Si sta lavorando per riuscire a riprodurre fedelmente il percorso reale del laser all'interno delle macchine DMLS. La metodologia di applicazione del carico termico si basa su impulsi discreti, come avviene nel caso, ad esempio, delle macchine Renishaw®, e non su un movimento continuo, tipico di altre case produttrici.

DEFINIZIONE DEL MODELLO DI ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

In questo studio preliminare viene modellata mediante il software di analisi agli elementi finiti ANSYS® una geometria costituita da un parallelepipedo con spessore di 1 mm che rappresenta la piastra di supporto su cui viene steso un singolo strato di polvere di dimensioni 4000x435x30 μm. La simulazione prevede il passaggio di un laser ad impulso discreto il quale fonde la polvere per costruire un cordone singolo (Fig. 1).
L'analisi effettuata è un'analisi termica e l'elemento scelto è il

SOLID279, un elemento tridimensionale a 20 nodi in cui la temperatura rappresenta l'unico grado di libertà nodale.
Nel caso del processo DMLS, come già detto in precedenza, la modellazione avrà bisogno di un elevato affinamento nell'intorno del punto di applicazione del carico termico, dove si desidera un'elevata precisione. Allo stesso tempo, vi è la possibilità di mantenere una minor quantità di elementi nel resto della geometria (Fig. 1). Questa tipologia di mesh consente un'elevata precisione nell'intorno della zona di azione del laser mediante l'affinamento locale e permette di snellire i tempi di calcolo con una minor quantità di elementi lontano dallo spot [1,26]. Infatti, il tempo di analisi agli elementi finiti è legato al numero di elementi all'interno del modello ed è stato verificato che l'affinamento dell'intero strato con lo stesso infittimento del tassello porta ad un aumento del numero di elementi di ben 100 volte. Da ciò deriva un allungamento dei tempi di analisi di almeno un fattore 100, il che rende proibitiva l'analisi di oggetti dalle dimensioni e geometrie complesse.
La strategia proposta comporta un risparmio nel tempo di calcolo abbastanza consistente rispetto all'utilizzo di una mesh molto raffinata in tutta la geometria. Un secondo vantaggio derivato dal rifacimento della mesh e dall'utilizzo di singoli passi di analisi è anche quello, non indifferente, di avere un file di soluzioni assai più snello e meno pesante per il calcolatore.

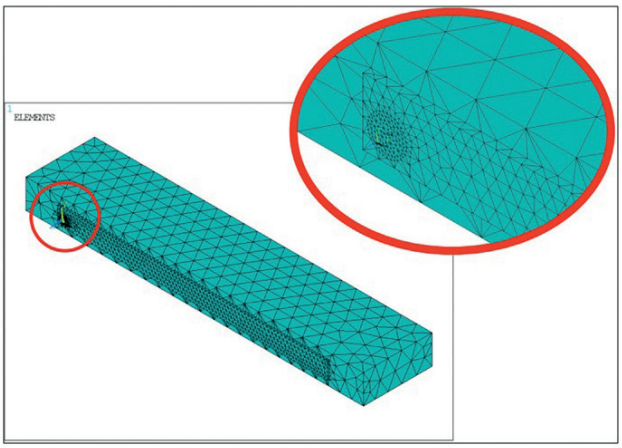

Fig. 1 - Mesh con raffinamento nella zona dove verrà simulato l'impulso del laser.
Mesh refinement in the laser spot zone.

Per poter seguire il movimento del laser lungo il suo percorso è necessario modificare la posizione del tassello infittito della mesh; una metodologia per fare ciò prevede il rifacimento della stessa da zero spostando ad ogni passo il tassello infittito della quantità percorsa dal laser. Il processo risulta abbastanza veloce e flessibile, ma è necessario mantenere memoria dei passi precedenti riportando i risultati dalla mesh precedente a quella successiva. La problematica maggiore sta nel fatto che si hanno posizioni di nodi ed elementi differenti tra le mesh e quindi risulta necessario un processo di mappatura dei valori da trasferire. Questo procedimento di mappatura può essere effettuato salvando i valori desiderati e le coordinate nodali di partenza in vettori. I dati di temperatura vengono riportati sulla nuova mesh proprio in funzione delle coordinate. Dove le posizioni non corrispondono viene utilizzata dal software una strategia di interpolazione triangolare che calcola i nuovi valori nodali in base ai risultati dei tre nodi più vicini della mesh precedente. La metodologia di raccolta dei risultati prevede che ad ogni impulso del laser venga registrata un'immagine contenente i valori nodali della temperatura e che vengano inoltre riportate le dimensioni del bagno fuso, al fine di comprendere come esso vari durante il processo.

PROPRIETÀ DEL MATERIALE

In questa analisi è stata considerata una lega di Ti-6Al-4V ELI, tipicamente utilizzato in campo biomedico. Le proprietà del materiale, soprattutto quelle termiche, sono assai importanti per un'analisi fedele della realtà e nel caso del processo DMLS esse devono essere valutate in funzione della temperatura. I valori di conducibilità termica, densità ed entalpia del materiale sono state ricavate dalla letteratura [9,2], non disponendo di valori sperimentali. Sono stati modellati anche i passaggi di fase solido-liquido e liquido-solido inserendo i rispettivi calori latenti all'interno dell'entalpia del materiale.
Un limite dell'analisi è quello di non disporre di valori sopra i 2000°C, il che non permette di includere il passaggio di fase liquido-vapore. In molti studi [9-11,16] è stato verificato che le temperature assumono grandezze ben oltre quella di evaporazione, supponendo la creazione di plasma sulla superficie dello strato di polvere, il quale porta ad un'attenuazione della potenza del fascio laser. Se ciò è vero, bisogna tenere ben presente che si hanno due forme del materiale all'interno del processo, ovvero la fase polvere e la fase solida.
Le diverse proprietà termiche della polvere sono state ottenute scalando quelle della fase solida mediante un coefficiente pari a 0.6 per la densità e l'entalpia, mentre la conducibilità termica è stata scalata al 10% di quella del solido. Per temperature superiori a quelle di fusione a polvere e solido vengono associati identici valori per le proprietà termiche. Nella modellazione sono stati quindi definiti due materiali diversi, uno rappresentativo

della polvere e uno della fase solida: durante la simulazione, il passaggio da uno all'altro viene attivato in base alla valutazione della temperatura del singolo elemento. Sfruttando il processo di mappatura esposto precedentemente, infatti, la temperatura nodale viene interpolata e applicata agli elementi e se essa ha un valore superiore a 1655°C avviene il cambiamento delle proprietà associate all'elemento, simulando così la transizione da polvere a liquido e successivamente al solido.

CARICHI E VINCOLI

Il carico termico del laser è stato simulato come un carico distribuito secondo un andamento gaussiano, il quale viene modificato in funzione della profondità raggiunta, ovvero la penetrazione ottica del laser all'interno dello strato di polvere. Il fascio laser, infatti, subisce una diffrazione e un'attenuazione nel suo percorso all'interno dello strato di polvere, e tipicamente l'intensità del laser sotto alla superficie dello strato subisce una deviazione che ne fa espandere il raggio d'azione. Viene definita penetrazione ottica del laser la profondità alla quale si registra un valore pari a 1/e (~37%) in relazione all'intensità incidente. Il flusso di calore è stato quindi associato ad un tronco di cono in cui nei vari piani paralleli a quelli di base è stato implementato un andamento gaussiano in funzione della distanza dal centro del raggio. L'equazione in funzione delle coordinate x,y,z di un sistema di riferimento in cui z è la direzione di costruzione, ortogonale al piano, è:

$$F(x,y,z) = C_1 \frac{P\,A}{\pi\, r^2}\, e^{-C_2 \frac{x^2+y^2}{r^2}} \left(e^{-\frac{z}{\beta}}\right) \qquad (1)$$

In cui F è il flusso di calore (W/m^2), P è la potenza del laser, r è il raggio del fascio laser, A è l'assorbanza della polvere (0.7), β è la penetrazione ottica. C_1 e C_2 sono due costanti che sono state assunte essere rispettivamente 0.35 e 3. Questa formula è stata applicata ad una sezione variabile in funzione della profondità e dell'angolo di diffrazione α, il cui raggio è definito come:

$$r_z = r + z \tan(\alpha) \qquad (2)$$

Sia l'angolo di diffrazione che la profondità ottica raggiunta dal laser sono parametri assai difficili da valutare e per questo si è pensato di studiare dei cordoni, andando a misurarne l'inclinazione nel loro tratto finale e le dimensioni del bagno fuso per poi adattare il carico termico allo specifico caso in esame.
Sull'area superficiale dello strato di polvere viene aggiunto l'effetto della convezione data dal flusso laminare di argon il quale viene impostato come unico vincolo del sistema. Ciò viene modellato applicando uno flusso convettivo ai nodi della superficie assumendo il coefficiente di convezione pari a 12.5 W/(m^{2}K) (Fig. 2). La temperatura di riferimento è quella di preriscaldo e pari a 170°C.

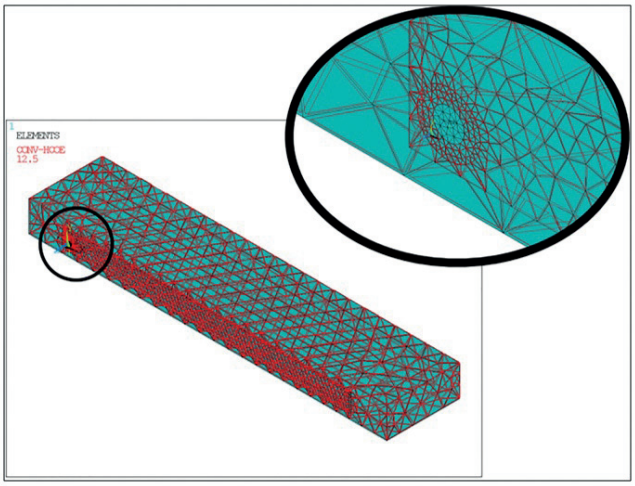

Fig. 2 - Carico convettivo applicato su tutte le superfici esterne dell'oggetto.
Convection applied on all the external surfaces.

L'applicazione del flusso di calore viene ottenuta costituendo una matrice di valori discreti, la quale viene letta dal software che assegna ai nodi selezionati il valore riportato in matrice in funzione delle sue coordinate. Nel caso in cui la posizione dei nodi non corrispondesse ai valori di coordinate riportate in tabella, il software effettua un'interpolazione lineare tra i punti vicini. Ciò rappresenta un'approssimazione, la quale può essere ricondotta ad una funzione continua inserendo un numero elevato di punti per i valori in ascissa e ordinata.

RISULTATI

In Fig. 3 e Fig. 4 è possibile osservare i profili di temperatura delle soluzioni nodali nel caso del primo impulso e dell'impulso numero 50 rispettivamente. Come è possibile notare, la dimensione del bagno fuso cambia notevolmente tra i due punti sia per le dimensioni che per la forma. Nel primo caso si ha una distribuzione circolare del profilo di temperatura dovuto al fatto che lo spot del laser colpisce la polvere circondata da altra polvere e quindi la conducibilità termica è la stessa in tutte le direzioni. La

simmetria circolare riscontrata all'inizio del processo di fusione è conforme a quella individuata in altri lavori [20,24].
Dopo l'impulso numero 50, d'altronde, si può osservare una forma del bagno fuso e del profilo di temperatura "a stella cometa" dovuta al fatto che il calore viene preferenzialmente asportato nella parte posteriore, dove la conducibilità termica del solido è assai superiore a quella della polvere, come evidenziato da numerosi autori [8,9,11,16,20,24].

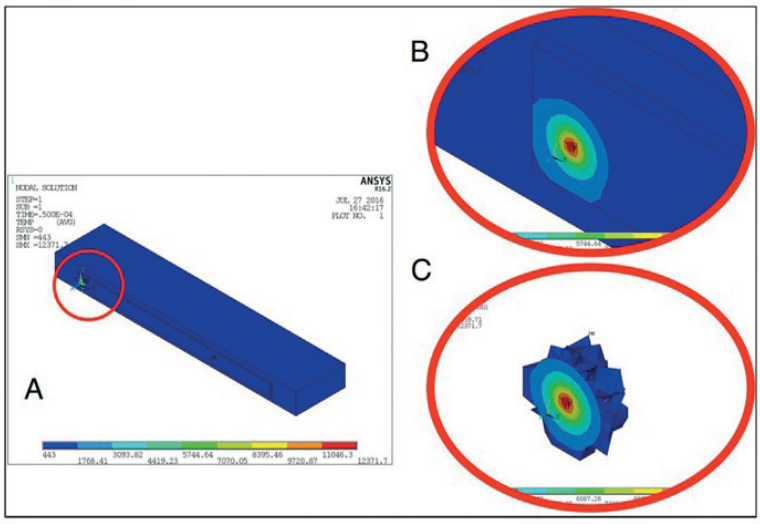

Fig. 3 - Soluzioni nodali per quanto concerne la temperatura al primo impulso: (A) vista dell'intera geometria, (B) zoom nella zona dell'impulso e (C) immagine del bagno fuso ottenuta selezionando gli elementi con temperatura media superiore a 1928K.
Nodal solutions after the first pulse: (A) view of the entire object, (B) zoom in the laser spot and (C) view of the melting pool obtained by selecting only the elements with temperature over 1928K.

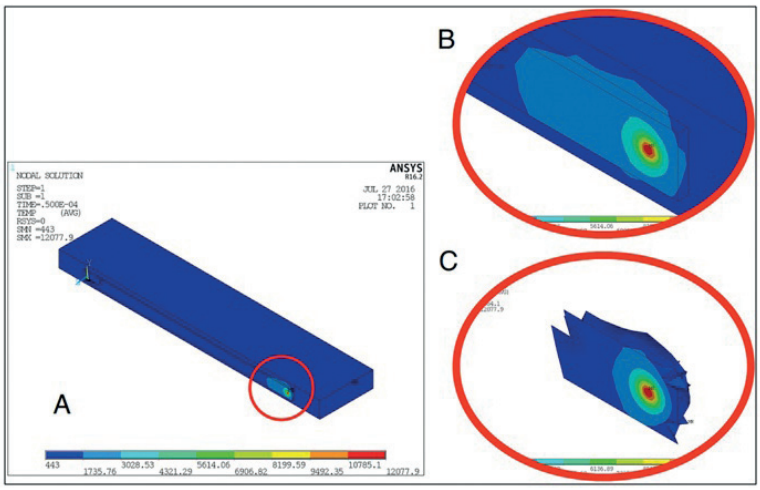

Fig. 4 - Soluzioni nodali per quanto concerne la temperatura al 50° impulso: (A) vista dell'intera geometria, (B) zoom nella zona dell'impulso e (C) immagine del bagno fuso ottenuta selezionando gli elementi con temperatura media superiore a 1928K.
Nodal solutions after the 50° pulse: (A) view of the entire object, (B) zoom in the laser spot and (C) view of the melting pool obtained by selecting only the elements with temperature over 1928K.

Un aspetto interessante che non è stato studiato in letteratura è l'evoluzione del bagno fuso negli istanti immediatamente successivi all'applicazione del carico termico. Le Fig. 5 e Fig. 6 mostrano le due situazioni precedentemente esposte dopo che sono trascorsi 50 micro secondi. È possibile notare una rapida diminuzione delle dimensioni del bagno dovuto in parte all'effetto della convezione ma, soprattutto, all'asportazione di calore per conduzione data dalla presenza della fase solida, come evidenziato dai profili di temperatura. Quest'ipotesi è supportata dall'osservazione della morfologia del bagno fuso. In Figura 6 si può notare che il bagno ha avuto una contrazione radiale consistente mentre essa è limitata per quanto riguarda la profondità. Da ciò si deduce che il calore fluisce preferibilmente in profondità, dove vi è il supporto solido. Nel secondo caso, d'altra parte, si

ha una dispersione di calore abbastanza omogenea lungo tutto il cordone, da cui risulta un bagno fuso meno profondo rispetto al caso iniziale. I valori della temperatura mostrati nelle immagini sono assai elevati, ben oltre la temperatura di evaporazione del materiale.
In questo studio sono state fatte delle semplificazioni e assunzioni per quanto riguarda le proprietà del materiale ed alcuni parametri del flusso termico, le quali sono sotto analisi critica degli autori. Sono state pensate delle procedure di valutazione delle proprietà del materiale, in particolare densità, calore specifico, dilatazione termica e conducibilità termica, che aiuteranno a rendere più affidabile l'analisi. Non è stata trovata in letteratura una procedura sperimentale consolidata per la valutazione della temperatura durante il processo DMLS, il che porta a considerare altri aspetti per la validazione del modello, ad esempio la verifica delle dimensioni del bagno fuso.

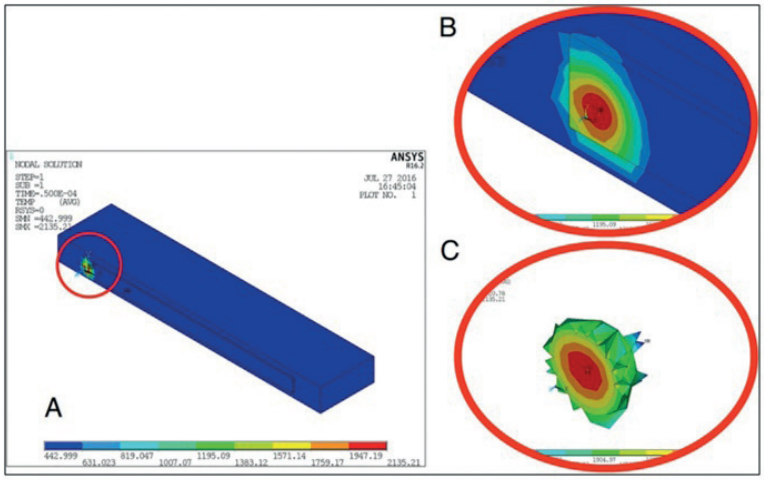

Fig. 5 - Soluzioni nodali per quanto concerne la temperatura dopo 50 micro secondi dopo al primo impulso: (A) vista dell'intera geometria, (B) zoom nella zona dell'impulso e (C) immagine del bagno fuso ottenuta selezionando gli elementi con temperatura media superiore a 1928K.
Temperature nodal solutions 50 micro seconds after the first pulse: (A) view of the entire object, (B) zoom in the laser spot and (C) view of the melting pool obtained by selecting only the elements with temperature over 1928K.

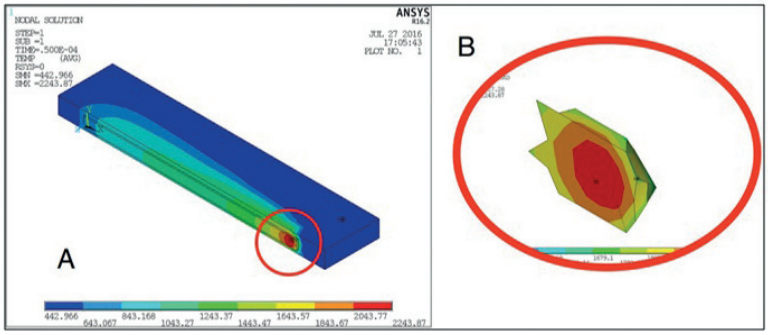

Fig. 6 - Soluzioni nodali per quanto concerne la temperatura dopo 50 micro secondi dopo al 50° impulso: (A) vista dell'intera geometria, (B) zoom nella zona dell'impulso con immagine del bagno fuso ottenuta selezionando gli elementi con temperatura media superiore a 1928K.
Temperature nodal solutions 50 micro seconds after the 50° pulse: (A) view of the entire object, (B) zoom in the laser spot and (C) view of the melting pool obtained by selecting only the elements with temperature over 1928K.

Di seguito sono presentati i dati raccolti riguardanti il volume e le dimensioni del bagno fuso per ogni impulso e il loro andamento nel tragitto percorso è mostrato da Fig. 7 a Fig. 10. È possibile notare nelle figure una netta tendenza delle dimensioni a stabilizzarsi dopo pochi impulsi del laser, come del resto riscontrato in altri studi [8,9,24]. Lo scattering attorno ai valori della curva in rosso è dovuto alla dimensione degli elementi lontano dalla zona raffinata, che quindi è caratterizzata da una minor precisione dimensionale. Il volume medio del bagno fuso dopo la sua stabilizzazione è pari a 3.31×10^6 μm^3. I valori medi della lunghezza, della larghezza e della profondità dopo la fase di convergenza sono rispettivamente di 370 μm, 208 μm e 107 μm. Essi risultano essere conformi ai valori riscontrati in letteratura [8,9,24] anche se vi sono delle differenze nei parametri di processo utilizzati.

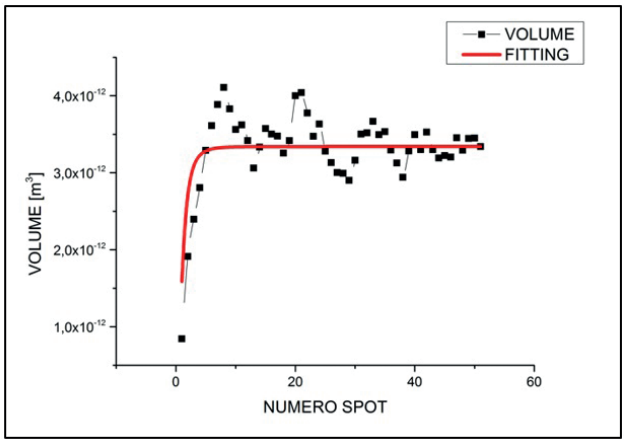

Fig. 7 - Andamento del volume del bagno fuso in funzione del tragitto percorso.
Melting pool volume trend respect the spot number.

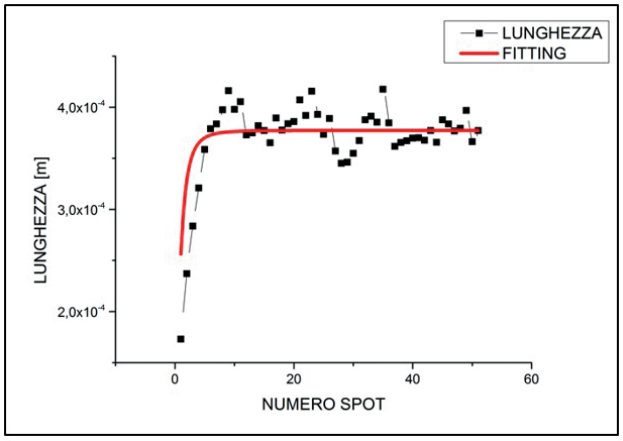

Fig. 8 - Andamento della lunghezza del bagno fuso in funzione del tragitto percorso.
Melting pool length trend respect the spot number

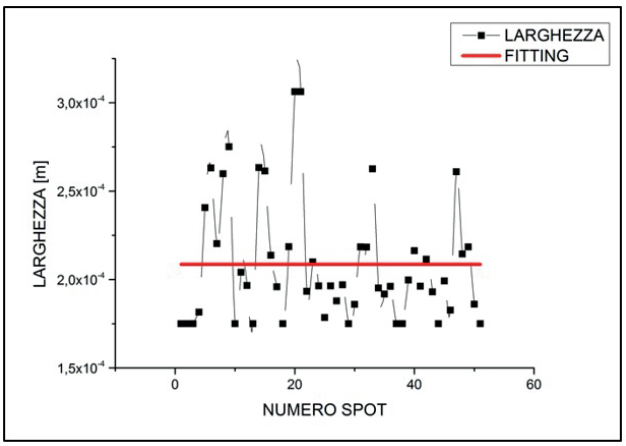

Fig. 9 - Andamento della larghezza del bagno fuso in funzione del tragitto percorso.
Melting pool width trend respect the spot number.

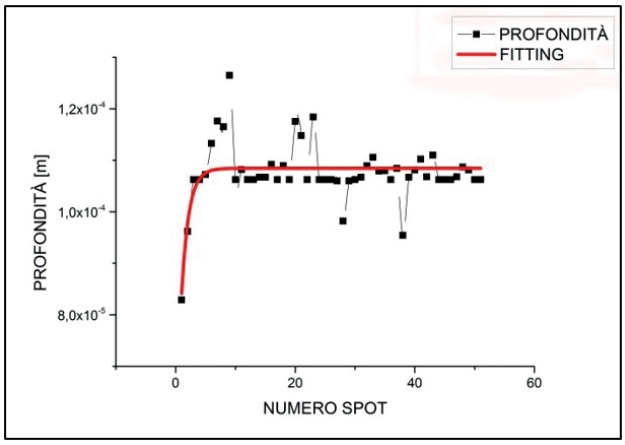

Fig.10 - Andamento della profondità del bagno fuso in funzione del tragitto percorso.
Melting pool depth trend respect the spot number.

Un discorso a parte va fatto per quanto riguarda l'andamento della larghezza del bagno fuso. Essa, infatti, è stata vincolata per geometria ad un valore pari a quello dello strato di polvere creato sopra il supporto, valore che viene subito raggiunto dopo pochi impulsi. Questa ipotesi viene verificata con una seconda analisi in cui la larghezza dello strato di partenza è stata aumentata. Si può notare in Fig. 11 che l'andamento si uniforma a quello delle altre dimensioni e del volume del bagno fuso. In questo caso il valore asintotico si attesta sui 221 μm, di poco superiore rispetto al precedente caso.
La verifica sperimentale delle dimensioni del bagno fuso può essere uno strumento assai utile per la convalida del modello agli elementi finiti [8,11,12], per questo motivo è stata predisposta una campagna sperimentale basata su oggetti costituiti da pochi cordoni dalla quale poter risalire alle dimensioni reali da confrontare con quelle della simulazione numerica.

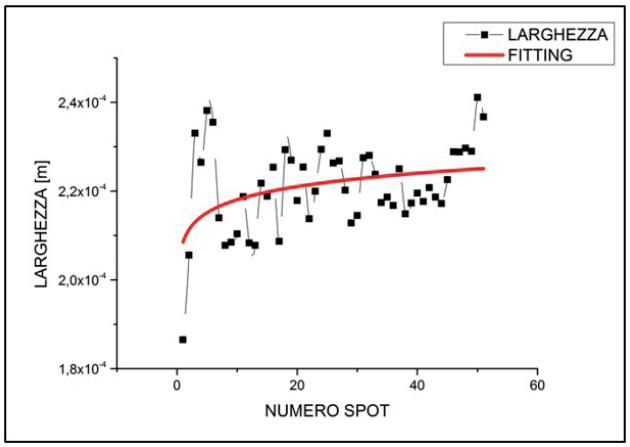

Fig.11 - Andamento della larghezza del bagno fuso in funzione del tragitto percorso nel caso di strato di polvere iniziale più largo.
Melting pool width trend respect the spot number after the powder layer widening.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo lavoro è descritta la procedura di modellazione della tecnica DMLS, la quale è resa assai complessa dai numerosi fattori in gioco, siano essi legati al materiale o al carico termico. Il tutto viene complicato dal problema di dover simulare un processo lontano dall'equilibrio termodinamico. Le soluzioni adottate per la ricostruzione dinamica della mesh e la mappatura dei valori di temperatura passo dopo passo portano con loro una notevole semplificazione e velocizzazione dell'analisi numerica.

Il processo DMLS è stato simulato con successo in quanto le considerazioni appena esposte sono conformi ai lavori presenti in letteratura [2,7-27] e il tempo di simulazione è stato contenuto sotto i 10 minuti. Bisogna, inoltre, ricordare che il tempo di analisi risulta essere legato al numero di elementi presenti nella geometria, quindi un maggior raffinamento o modelli di dimensioni maggiori avranno tempi di analisi maggiori. Ad esempio, affinando l'intero strato al livello del tassello in cui viene applicato il flusso di calore, per la stessa analisi si rendono necessarie più di 16 ore.

Per quanto concerne la validazione del modello mediante raffronto con dati reali, sono state avviate delle campagne sperimentali, nelle quali verranno valutate in maniera più precisa le proprietà termiche del materiale e le interazioni laser-polvere, che influenzano enormemente i valori del carico termico e del suo effetto in profondità. Per far ciò si analizzeranno dei singoli cordoni di sinterizzazione e mediante tecniche di microscopia si tenterà di risalire alla morfologia e alle dimensioni del bagno fuso, soprattutto del suo volume in quanto larghezza e lunghezza sono legate a fenomeni di contrazione dovuti alla tensione superficiale che non sono considerati all'interno della simulazione numerica. L'obiettivo finale è avere uno strumento affidabile per il calcolo del profilo di temperatura all'interno di oggetti anche complessi costruiti mediante DMLS e la successiva valutazione degli stress residui.

Questo studio rappresenta la fase preliminare del progetto di ricerca "FAMAC", co-sponsorizzato dalla Provincia Autonoma di Trento e da Eurocoating SpA (Italia).

BIBLIOGRAFIA

[1] E.R. DENLINGER, J. IRWIN, P. MICHALERIS, Thermomechanical Modeling of Additive Manufacturing Large Parts, Journal of Manufacturing Science and Engineering (2014), vol. 136.

[2] K. C. MILLS, Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys, 2002, Sawston, Cambridge, UK, Woodhead Publishing.

[3] K. DAI, L. SHAW, Thermal and stress modeling of multimaterial laser processing, Acta materialia 49 (2001) 4171–4181.

[4] K. DAI, L. SHAW, Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders, Acta Materialia 52 (2004) 69–80.

[5] K. DAI, L. SHAW, Finite element analysis of the effect of volume shrinkage during laser densification, Acta Materialia 53 (2005) 4743–4754.

[6] E.R. DENLINGER, J.C. HEIGEL, P. MICHALERIS, T.A. PALMER, Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys, Journal of Materials Processing Technology 215 (2015) 123–131.

[7] R. MARTUKANITZ, P. MICHALERIS, T. PALMER, T. DEBROY, Z.K.LIU, R. OTIS, T.W. HEO, L.Q. CHEN, Toward an integrated computational system for describing the additive manufacturing process for metallic materials, Additive Manufacturing 1–4 (2014) 52–63.

[8] A. FOROOZMEHR, M. BADROSSAMAY, E. FOROOZMEHR, S. GOLABI, Finite Element Simulation of Selective Laser Melting process considering Optical Penetration Depth of laser in powder bed, Materials and Design 89 (2016) 255–263.

[9] C.H. FU, Y.B. GUO, Three-dimensional temperature gradient mechanism in selective laser melting of Ti-6Al-4V, Journal of manufacturing science and engineering 2014, 136.

[10] R. GANERIWALA, T.I. ZOHDI, Multiphysics modeling and simulation of selective laser sintering manufacturing processes, Procedia CIRP 14 (2014) 299 – 304.

[11] N.E. HODGE, R.M. FERENCZ, J. M. SOLDBERG, Implementation of a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting, Comput Mech (2014) 54:33–51.

[12] N. KELLER, V. PLOSHIKHIN, New method for fast predictions of residual stress and distortion of AM parts, 1st International Symposium on Material Science and Technology of Additive Manufacturing, Bremen, Germany.

[13] W. KING, A.T. ANDERSON, R.M. FERENCZ, N.E. HODGE, C. KAMATH, S.A. KHAIRALLAH, Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory, Materials Science and Technology, 31:8, 957-968.

[14] T.A. KROL, S. WESTHÄUSER, M.F. ZÄH, J. SCHILP, G. GROTH, Development of a Simulation-Based Process Chain – Strategy for Different Levels of Detail for the Preprocessing Definitions, SNE 21(3-4), 2011, 135-140.

[15] T.A. KROL, M.F. ZÄH, C. SEIDEL, Optimization of supports in metal-based additive manufacturing by means of finite element model, Phys. Procedia, 41 (2013), p. 849.

[16] C. LI, C.H. FU, Y.B. GUO, F.Z. FANG, A multiscale modeling approach for fast prediction of part distortion in selective laser melting, Journal of Materials Processing Technology 229 (2016) 703–712.

[17] M. MATSUMOTO, M. SHIOMI, K. OSAKADA, F. ABE, Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 61–67.

[18] L. PAPADAKIS, A. LOIZOU, J. RISSE, J. SCHRAGE, Numerical computation of component shape distortion manufactured by selective laser melting, Procedia CIRP 18 (2014) 90 – 95.

[19] L. PAPADAKIS, A. LOIZOU, J. RISSE, S. BREMEN, J. SCHRA-

GE, A computational reduction model for appraising structural effects in selective laser melting manufacturing, Virtual and Physical Prototyping, 9:1, 17-25, DOI:10.1080/17452759.2013.868005.
[20] J. ROMANO, L. LADANI, M. SADOWSKI, Thermal Modeling of Laser Based Additive Manufacturing Processes within Common Materials, Procedia Manufacturing Volume 1, 2015, Pages 238–250.
[21] K. ZENG, D. PAL, B. STUCKER, A review of thermal analysis methods in Laser Sintering and Selective Laser Melting, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, pp. 796–814.
[22] P. MICHALERIS, Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes, Finite Elements in Analysis and Design86(2014)51–60.
[23] D. PAL, N. PATIL, M. NIKOUKAR, K. ZENG, K.H. KUTTY, B.E. STUCKER, An Integrated Approach to Cyber-Enabled Additive Manufacturing using Physics based, Coupled Multi-scale Process Modeling, In: Solid freeform fabrication symposium proceedings. 2013.
[24] K. ZENG, D. PAL, N. PATIL, B. STUKER, A New Dynamic Mesh Method Applied to the Simulation of Selective Laser Melting, SFF Symposium 2013, pp. 549–559.
[25] N. PATIL, D. PAL, B.E. STUCKER, A New Finite Element Solver using Numerical Eigen Modes for Fast Simulation of Additive Manufacturing Processes, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, Aug. 12–14, pp. 535–548.
[26] N. PATIL, D. PAL, H.K. RAFI, K. ZENG, A. MORELAND, A.HICKS, D. BEELER, B. STUCKER, A Generalized Feed Forward Dynamic Adaptive Mesh Refinement and De refinement Finite Element Framework for Metal Laser Sintering-Part I: Formulation and Algorithm Development, Journal of Manufacturing Science and Engineering (2015) vol. 137.
[27] K. ZENG, D. PAL, C. TENG, B.E. STUCKER, Evaluations of effective thermal conductivity of support structures in selective laser melting, Additive Manufacturing 6 (2015) 67–73.

Finite element method model of DMLS process

KEYWORDS: FEM - DMLS - ADDITIVE MANUFACTURING

Direct Metal Laser Sintering is a near-net shape manufacturing process very complex because of the large number of parameters that govern the phenomena. The numerical modeling can help to reduce the amount of experimental evidence necessary to optimize the process, to minimize the time and cost of manufacture of the final product while maintaining its quality unchanged.
In this work we developed and set up a finite element analysis that takes into account several aspects, such as the thermal properties of the material and its main parameters. Our aim is providing the general knowledge for understanding some of the complex physical phenomena involved in the process. We performed an experiment specifically designed in order to check the numerical results and modify the model in its critical aspects.
This work is part of the "FAMAC" research project, co-sponsored by the Provincia Autonoma di Trento and Eurocoating SpA, Italy.