

Analisi e confronto di strutture reticolari mediante processi additivi a deposizione

a cura di: V. Di Pompeo, A. Santoni, M.L. Gatto, E. Santecchia, M. Cabibbo

La produzione additiva di parti in materiale metallico sta entrando sempre più nel paradigma di produzione aziendale offrendo componenti sempre più performanti e in grado di rispondere alle esigenze di mercato. Spesso le aziende utilizzano processi additivi ampiamente conosciuti come la powder bed fusion (PBF) o la direct energy deposition (DED). Tuttavia, i costruttori di macchine stanno cercando di offrire soluzioni più accessibili come ad esempio la tecnologia di material extrusion (ME). Questo innovativo processo permette di realizzare parti in materiale inizialmente composito cioè formato da polvere metallica e materiale termoplastico per poi, attraverso successivi trattamenti termici in fornace, si ottengono le parti in materiale metallico. Il presente articolo ha l'obiettivo di dimostrare la fattibilità realizzativa di una struttura auxetica quantificandone la presenza di vuoti. Per poi confrontare, i risultati ottenuti da una prova di trazione svolta: sia su un classico provino di trazione che su una struttura auxetica e risalire alla modalità di frattura.

PAROLE CHIAVE: MATERIAL EXTRUSION, 316L, STRUTTURE RETICOLARI, STRUTTURE AUXETICHE, PROVE DI TRAZIONE, ANALISI DELLA FRATTURA, FRATTURA DUTTILE, ANALISI DEI VUOTI, SINTERIZZAZIONE, TRATTAMENTI TERMICI

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, le tecnologie di Additive Manufacturing (AM) hanno rivoluzionato il modo di fabbricare i prodotti in molti settori industriali, come l'automotive, l'aeronautico e il biomedico. Esse permettono di produrre direttamente dai progetti CAD parti tridimensionali e di geometria complessa, anche con strutture complicate, che sarebbero estremamente difficili da produrre con le tecniche di manifattura tradizionale [1]. Attualmente, esistono molteplici tecnologie additive in grado di creare componenti metallici complessi. I più diffusi sono la powder bed fusion (PBF) in cui la polvere viene fusa mediante un laser o fascio di elettroni o la direct energy deposition (DED) in cui la polvere o un filamento vengono estrusi attraverso un ugello per poi essere fusa mediante un laser. Al di là delle più note tecnologie descritte in precedenza, sempre più aziende stanno cercando di proporre sul mercato tecnologie meno costose e più semplici da utilizzare. Un esempio è la tecnologia di Material Extrusion (ME) proposta da Desktop Metal, in cui la parte viene realizzata estrudendo un materiale composito formato da polvere metallica inglobata all'interno di un legante in cera e materiale termoplastico. Successivamente la parte viene inserita all'interno di una fornace che è in

Valerio Di Pompeo, Alberto Santoni,
Maria Laura Gatto, Eleonora Santecchia,
Marcello Cabibbo

Università Politecnica delle Marche

grado di far evaporare termicamente il materiale plastico e conservare la polvere metallica parzialmente legata con la cera, per poi subire il processo di sinterizzazione con l'eliminazione del legante residuo e la creazione della parte metallica [2]. Attraverso questa tecnologia è possibile realizzare parti con un'elevata complessità geometrica in un ambiente potenzialmente salubre, poiché la deposizione della polvere metallica è inglobata all'interno del legante e quindi meno volatile e pericolosa.

Con la diffusione delle tecniche additive, il portfolio dei materiali disponibili è aumentato notevolmente, in particolar modo per gli acciai inossidabili. Uno dei materiali più utilizzati è l'AISI 316L, un acciaio inox austenitico molto versatile e comune, caratterizzato dalla presenza del Molibdeno.

I casi studio più utilizzati per evidenziare le caratteristiche della produzione additiva riguardano la realizzazione di strutture reticolari poiché risultano essere estremamente complicate da realizzare con le tecnologie tradizionali, sia dal punto di vista economico che da quello del time to market. Infatti, queste parti presentano variazioni di spessore e riempimenti parziali dell'oggetto che ne ostacolano la realizzazione attraverso tecniche convenzionali [3]. Nel corso degli anni queste strutture sono state ideate e utilizzate nel settore aerospaziale dove la leggerezza è uno dei vincoli progettuali più stringenti per il dimensionamento dei componenti [4]. Nello specifico, le strutture reticolari vengono impiegate per ridurre il peso e migliorare le resistenze meccaniche specifiche [5]. Con la diffusione delle

tecnologie additive, le strutture reticolari hanno visto un aumento dell'impiego in settori come quello biomedicale, automotive e civile [6]. Infatti, in precedenza, i componenti con elevata complessità geometrica non venivano realizzati a causa dell'assenza di sistemi produttivi in grado di mantenere i costi accessibili [7]. Inoltre, grazie alla flessibilità delle tecniche additive, si è riusciti a creare strutture reticolari complesse modificandone il paradigma, poiché si è riusciti ad ottenere geometrie in grado di far variare le proprie caratteristiche meccaniche nel tempo se sollecitate. La struttura auxetica è uno degli esempi più noti in cui si ha un coefficiente di Poisson negativo che varia nel tempo, se il materiale è sollecitato meccanicamente [8]. Tale fenomeno ha portato alla diffusione di queste strutture in molteplici settori, tra cui quello dell'edilizia come elementi smorzanti per la protezione sismica o come strutture da costruzione tolleranti al danno [9].

Il presente lavoro si poneva l'obiettivo di valutare la realizzabilità di strutture reticolari auxetiche attraverso tecniche di ME e di dimostrarne il corretto comportamento meccanico se sottoposte a trazione.

MATERIALI E METODI

La polvere utilizzata per il processo di ME è l'acciaio inox AISI 316L. Il materiale metallico è inglobato all'interno di un materiale termoplastico in grado di facilitare il processo di deposizione. In Tabella 1, la composizione chimica (wt%) fornita da Desktop Metal:

Tab.1 - Composizione chimica nominale (% in peso) della polvere di AlCu-TiB₂. / Nominal chemical composition (weight.%) of the AlCu-TiB₂ powder.

Fe	Cr	Mo	Ni	Si	Mn	C
Bal.	16-18	2-3	10-14	1.0 (max)	2.00 (max)	0.03 (max)

I provini di trazione realizzati non presentano intagli in quanto il materiale e il processo di stampa generano un'intensificazione delle tensioni nella stessa zona (vedi Fig. 1).

Le strutture reticolari prese in considerazione sono delle strutture auxetiche che presentano le variabili realizza-

tive (s , ϕ , a e h) riportate in Tab. 1. La variazione di tali parametri permette di ottenere delle strutture differenti confrontabili al fine di ottenere le caratteristiche meccaniche ottimali.

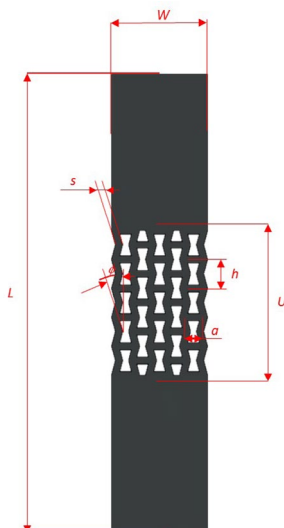


Fig.1 - Provino con struttura auxetica / Auxetic sample.

Tab.2 - Dimensioni del provino con struttura auxetica e provino di trazione / Auxetic and tensile samples dimensions.

Dimensioni	Provino con struttura auxetica	Provino di trazione
[s] Spessore ribs [mm]	3	
[a] Larghezza struttura [mm]	9	
[h] Altezza struttura [mm]	12,16	
[ϕ] Angolo struttura [°]	60	
[U] Tratto utile [mm]	60	60
[W] Larghezza provino [mm]	40	40
[L] Lunghezza provino [mm]	120	120
Spessore provino [mm]	4	4

I due provini sono stati realizzati mediante la stampante Desktop Metal Studio System mentre i parametri di processo utilizzati nella stampante sono riportati in Tab. 3.

Tab.3 - Parametri di processo / Process parameters.

Parametri di processo	Valore
Diametro nozzle [μm]	400
Velocità di stampa [mm/s]	30
Strategia di riempimento	100%
Overlap	0%
Larghezza del layer [mm]	0.48
Altezza del layer [mm]	0.15
[L] Lunghezza provino [mm]	120

Una volta stampati, i componenti sono realizzati in materiale composito dove il metallo, in polvere, è inglobato all'interno di una matrice termoplastica. Al fine di eliminare il materiale superfluo, le parti vengono inserite all'interno di una fornace e trattate termicamente. Nello specifico, viene effettuato dapprima il debinding, in cui la parte viene riscaldata a circa 500°C per 2h e il materiale plastico viene eliminato. Dopo aver eliminato il legante, la parte che è composta da polvere metallica e binder residuo vie-

ne sinterizzata a circa 1370°C ottenendo così la parte finita e ben stabilizzata a livello microstrutturale. I due processi appena descritti avvengono sottovuoto e in ambiente inerte con gas composto dal 97% di Argon e 3% di idrogeno. Inoltre, le parti da trattare in fornace vengono inseriti all'interno di un "Retort" in carbonio puro riportato in Fig. 2 che ha lo scopo di creare un volume a temperatura stabile per evitare gradienti termici e il danneggiamento delle parti.



Fig.2 - Provino con struttura auxetica / Auxetic sample.

Per le prove di trazione è stata utilizzata una macchina MTS 810, con una forza massima applicata pari a 250 KN e una velocità di avanzamento di 0.1 mm/min. Una volta che il provino con struttura auxetica è stato sottoposto a trazione, una cella è stata inglobata con della resina fenolica (Fig. 3) e analizzata sia al microscopio ottico che al microscopio elettronico a scansione (SEM). Per

l'analisi delle superfici e delle porosità è stato utilizzato un microscopio ottico Leica DMI8 mentre per le analisi della frattura è stato utilizzato un microscopio elettronico a scansione (FEG-SEM) Tescan Vega 3. Infine, per la quantificazione dei vuoti presenti nel materiale sono state utilizzate 10 immagini per campione e calcolate attraverso ImageJ.

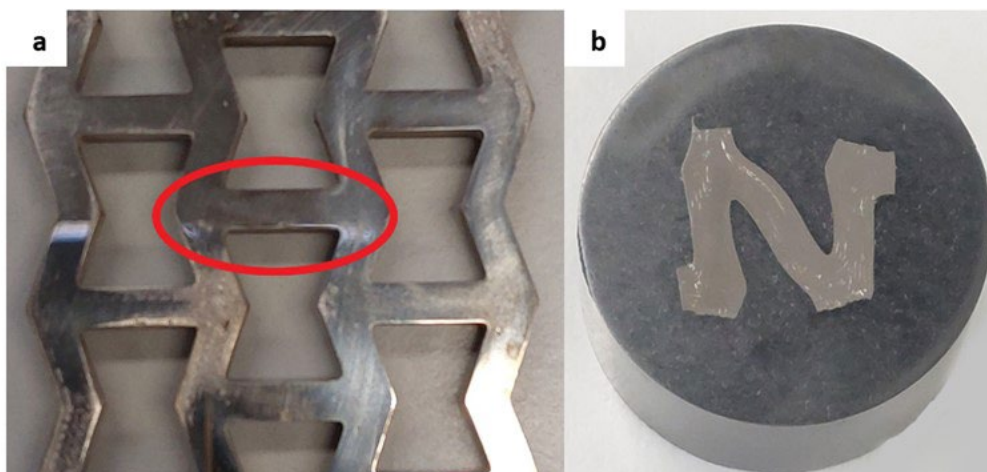


Fig.3 - a) Struttura reticolare prima della prova di trazione b) Parte di cella inglobata / a) Lattice structure before the test b) Auxetic cell embedded.

RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

La norma ASTM-E8 specifica che i test di trazione devono essere fatti su provini ad osso di cane con intaglio tra l'afferraggio e il tratto utile [11]. I primi test svolti hanno portato ad uno scorretto comportamento meccanico delle strutture auxetiche. Infatti, i provini hanno subito il carico esclusivamente nella zona dell'intaglio e i risultati dei test condotti hanno portato a rilevare la classica curva di un provino di trazione. In Fig. 4 è possibile osservare il comportamento errato della struttura con distacco di materiale nella zona dell'intaglio. Inoltre, si può con-

statare che le strutture non hanno subito deformazione proprio perché lo sforzo si è concentrato localmente in quel solo punto. Dalla stessa foto si può notare come il distacco sia stato netto in corrispondenza della zona di contorno mentre nella zona di infill, cioè nei due tratti esterni cerchiati in blu, la rottura sia progressiva evidenziando un comportamento plastico. È evidente dalle immagini che la zona centrale ha subito il distacco immediatamente dopo l'inizio del tratto plastico mentre i due tratti laterali abbiano subito il carico durante tutta la prova per poi rompersi.

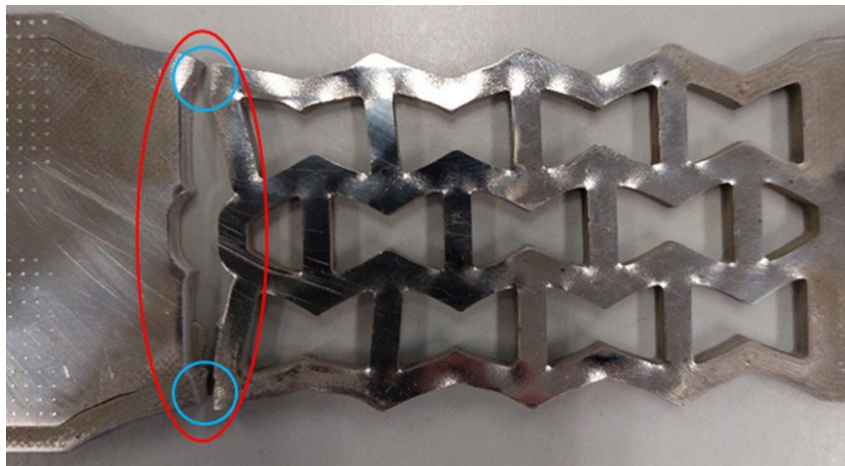


Fig.4 - Provino di trazione ad osso di cane / Tensile sample bone

Individuati i problemi, il provino è stato riprogettato senza l'intaglio. Dalla Fig. 5 si può notare il corretto comportamento della struttura dopo la riprogettazione. Nello stesso grafico è rappresentato una curva di tensione-deformazione di una classica prova di trazione in nero e in rosso di un provino avente come riempimento le strutture auxetiche. Facendo un confronto tra le due curve si può osservare che il Modulo di Young è lo stesso, infatti, il primo tratto di curva cioè il tratto elastico si sovrappongono. A meno di differenze in termini di valore assoluto, le due curve hanno un andamento identico, salvo poi variare nel tratto plastico. Infatti, nel tratto comunemente associato alla strizione la struttura auxetica presenta dei tratti verticali con cali di tensione e successivamente tratti in cui la tensione riaumenta con rapidi aumenti di

deformazione. Tale comportamento è tipico delle strutture auxetiche in cui il calo di tensione avviene quando c'è la variazione di forma della struttura fino ad arrivare ad una posizione di equilibrio in cui la resistenza del provino aumenta con conseguente aumento della tensione. Questo scalini di tensione e deformazione si ripetono per 5 volte fino ad arrivare alla rottura del materiale.

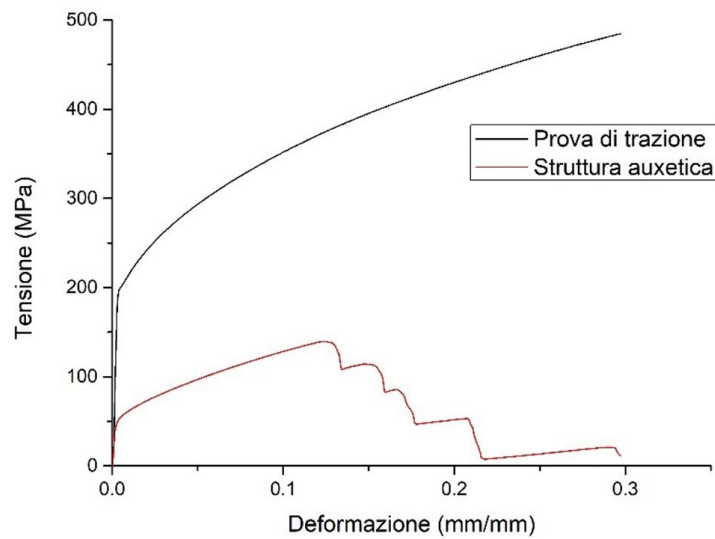


Fig.5 - Confronto tra prova di trazione con materiale pieno e con struttura reticolare / Comparison of tensile test and auxetic tensile test.

La Tab. 4 descrive la tensione di snervamento, di rottura e l'allungamento dei due provini. La differenza di valori di tensione è sostanziale poiché nelle strutture auxetiche la resistenza viene calcolata considerando la sezione apparente mentre nel provino di trazione la sezione è reale. La spiegazione è legata al fatto che la sezione del provino non è mai piena, considerando la struttura reticolare. In

questo caso, se si volesse fare un paragone sulle performance dei due provini bisognerebbe dividere la forza calcolata per il peso e calcolare la forza specifica. L'elevato rapporto resistenza-peso è una delle caratteristiche peculiari delle strutture reticolari.

Tab.3 - Valori sulle prove di trazione / Tensile test values

Nome	Provino di trazione	Provino con struttura auxetica
Tensione di snervamento [MPa]	196	50
Tensione massima [MPa]	480	142
Allungamento %	66	88

In Fig. 6 è rappresentata un'immagine realizzata mediante microscopio ottico della struttura auxetica in cui si notano perfettamente le singole linee di deposizione e la mancata adesione degli stessi durante il processo di sinterizzazione. La mancata adesione degli strati è causata dalla complessità del processo, poiché il legante viene eliminato attraverso l'evaporazione ad alte temperature

facendo rimanere esclusivamente la polvere metallica per poi sinterizzarla a temperature ancora più alte e sottovuoto. È chiaro come la sinterizzazione della polvere e l'applicazione del vuoto non possono compensare totalmente l'eliminazione del binder che varia dal 18% al 22% in volume e di conseguenza si generano porosità su entrambi i provini per un valore pari al 4%.



Fig.6 - Ingrandimento 20x o della struttura reticolare / Lattice structure 20x magnification-

Dopo aver completato la prova di trazione, il provino è stato osservato al SEM per analizzare la modalità di frattura. Dalla Figura 7(a) si può osservare come il provino nella zona di frattura sia pieno di porosità, risultato che conferma quanto osservato al microscopio ottico. Queste porosità, oltre a ridurre la densità del materiale,

facilitano la propagazione della cricca abbassando le caratteristiche meccaniche complessive del provino. Dalla Fig. 7(b) si può osservare come la superficie di frattura mostri la tipica morfologia di una rottura di natura duttile, con dimples di dimensioni variabili [12].

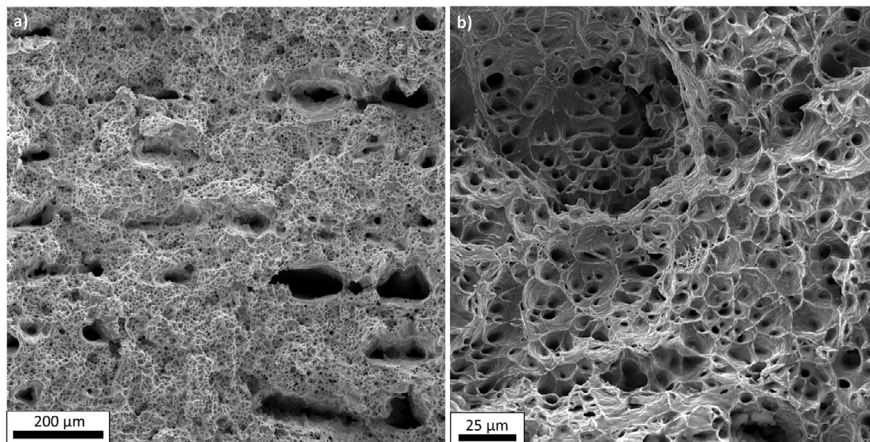


Fig.7 - Zona di frattura duttile, a) panoramica, b) ingrandimento / Ductile fracture zone, a) overview, b) higher magnification.

CONCLUSIONI

Attraverso la tecnologia di ME è possibile realizzare strutture reticolari come nelle altre tecnologie additive più note. Questa tecnologia, però, si differenzia dalle altre per la facilità di utilizzo e la facile gestione delle polveri. Di contro, presenta ancora delle limitazioni in termini di densità del materiale con alte porosità e caratteristiche meccaniche inferiori. Dallo stato dell'arte si evince come la struttura analizzata

presenta il classico comportamento delle strutture auxetiche con i gradini orizzontali che si generano nel tratto plastico. Tale fenomeno potrà essere utilizzato per applicazioni in cui si ha bisogno di buone resistenze meccaniche specifiche e deformazioni evidenti in previsione di una possibile rottura.

In futuro, si prevede di ampliare il lavoro attraverso:

- La realizzazione di un design of experiment (DOE) facendo variare i parametri delle strutture

- auxetiche;
- Le prove di trazione per individuare il miglior comportamento meccanico specifico in funzione dei parametri variati;
- L'analisi dei campioni per individuare il fenomeno di frattura associato;
- L'analisi della microstruttura prima e dopo la rottura

per individuare eventuali deformazioni microstrutturali.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata finanziata parzialmente attraverso il progetto Dipartimento di Eccellenza, MIUR-Italy (ARTI-COLO 1, COMMI 314-337 LEGGE 232/2016)

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gabilondo M, Cearsolo X, Arrue M, Castro F. Influence of Build Orientation, Chamber Temperature and Infill Pattern on Mechanical Properties of 316L Parts Manufactured by Bound Metal Deposition. *Materials* (Basel) 2022.
- [2] Di Pompeo V, Santoni A, Santecchia E, Spigarelli S. On the Short-Term Creep Response at 482 °C (900 °F) of the 17-4PH Steel Produced by Bound Metal Deposition. *Metals* (Basel) 2022.
- [3] Parenti P, Puccio D, Colosimo BM, Semeraro Q. A new solution for assessing the printability of 17-4 PH gyroids produced via extrusion-based metal AM. *J Manuf Process* 2022.
- [4] Di Pompeo V, Forcelllese A, Mancina T, Simoncini M, Vita A. Effect of Geometric Parameters and Moisture Content on the Mechanical Performances of 3D-Printed Isogrid Structures in Short Carbon Fiber-Reinforced Polyamide. *J Mater Eng Perform* 2021.
- [5] Hunt CJ, Morabito F, Grace C, Zhao Y, Woods BKS. A review of composite lattice structures. *Compos Struct* 2022.
- [6] Forcelllese A, Simoncini M, Vita A, Di Pompeo V. 3D printing and testing of composite isogrid structures. *Int J Adv Manuf Technol* 2020.
- [7] Kaur I, Singh P. Critical evaluation of additively manufactured metal lattices for viability in advanced heat exchangers. *Int J Heat Mass Transf* 2021.
- [8] Wang XT, Wang B, Li XW, Ma L. Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures. *Int J Mech Sci* 2017.
- [9] Maran S, Masters IG, Gibbons GJ. Additive manufacture of 3d auxetic structures by laser powder bed fusion—design influence on manufacturing accuracy and mechanical properties. *Appl Sci* 2020.
- [10] www.desktopmetal.com
- [11] ASTM E8. ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1. *Annu B ASTM Stand* 4 2010.
- [12] Pan X, Qian G, Hong Y. Nanograin formation in dimple ridges due to local severe-plastic-deformation during ductile fracture. *Scr Mater* 2021.

Analysis and comparison of lattice structure realized by material extrusion process

Nowadays, the metal additive manufacturing processes are employed in many companies to produce high performance parts able to react to the market request. Many companies are using more well known metal additive manufacturing technologies such as powder bed fusion and directed energy deposition. However, other accessible technologies are arising such as the material extrusion (ME) process. This technology realizes parts from a composite material based on metal powder and thermoplastic binder to final metal parts by heat post-processing treatments. The aim of this document is to demonstrate the feasibility to print the auxetic structures by material extrusion and quantify the voids content. Furthermore, the tensile tests are conducted on the tensile and auxetic samples to compare the results and analysed the fractural mode.

KEYWORDS: MATERIAL EXTRUSION, 316L, LATTICE STRUCTURE, AUXETIC STRUCTURE, TENSILE TEST, FRACTURE ANALYSIS, DUCTILE FRACTURE, VOIDS ANALYSIS, SINTERING, HEAT TREATMENT

TORNA ALL'INDICE >