

La prova di trazione e l'effetto dell'anisotropia.

Giuseppe Pellegrini, Università degli Studi di Bergamo

E' pratica comune valutare le proprietà meccaniche di una lamiera utilizzando la prova di trazione. La prova di trazione e' semplice da effettuare, consente di ottenere uno stato di sollecitazione molto vicino a quello teorico (sollecitazione monoassiale) ed e' in generale molto diffusa per la caratterizzazione di materiali metallici. La normativa utilizza spesso i risultati della prova di trazione (insieme con le analisi chimiche) per classificare molti prodotti. Nel caso delle lamiere per profondo stampaggio, ad esempio, la UNI EN 10111:2008 (per i laminati a caldo, come il DC01) o la UNI EN 10130:2007 (per i laminati a freddo, come il DD11), relative ad acciai da profondo stampaggio laminati a caldo o a freddo) specificano proprietà meccaniche che possono essere ricavate dalla sola prova di trazione.

Come è noto, le informazioni che si ottengono riguardano i valori di sollecitazione massima (carico di rottura, R_m) e di snervamento (R_e , oppure il carico di scostamento dalla proporzionalità $R_{p0,2}$, se il materiale non presenta snervamento discontinuo), ma è molto comune controllare anche i valori di deformazione raggiungibili, soprattutto l'allungamento percentuale dopo la rottura ($A\%$, deve essere specificato il tipo di provino). In alcuni casi (come per i già citati laminati a freddo della UNI EN 10130) sono valutati anche il coefficiente di incrudimento n e quello di anisotropia r .

Tutte le informazioni citate (a parte l'analisi chimica) possono essere ricavate dalla prova di trazione; questa prova e' uno strumento molto versatile per valutare parecchi dettagli sulle proprietà del materiale. A titolo di esempio, in questa relazione, sono riportati i risultati di prove di trazione su lamierini di 2 mm di spessore estratti con diverso orientamento rispetto alla direzione di laminazione, che evidenziano come (e quanto) le caratteristiche del materiale dipendano dall'orientamento del provino rispetto alla direzione di laminazione del prodotto di partenza.

ANISOTROPIA

Nel caso della lamiera il processo di fabbricazione, che include sempre alcuni passaggi di laminazione, induce nel materiale caratteristiche particolari. Le proprietà meccaniche dipendono dall'orientamento del provino rispetto alla direzione di laminazione. In altre parole, le lamiere presentano tutte un certo grado di *anisotropia*. Quando la differenza di caratteristiche interessa direzioni diverse, ma tutte contenute nel piano della lamiera (molto frequentemente si consideriamo la direzione di laminazione e quella perpendicolare) si parla di *anisotropia planare*, quando invece la differenza di proprietà si manifesta lungo lo spessore si parla di *anisotropia normale*.

In teoria, l'anisotropia planare può essere messa in evidenza effettuando la prova di trazione su provini estratti in direzioni diverse rispetto a quella di laminazione e osservando le differenze tra i risultati. In pratica, però, questo metodo e' poco sensibile e l'anisotropia viene valutata confrontando le variazioni di larghezza e di spessore dei provini. Se definiamo con ϵ_b ed ϵ_s le deformazioni (reali, logaritmiche) plastiche (cioe' misurate dopo lo scarico o depurate dalla parte elastica) il coefficiente di anisotropia è dato da:

$$r = \epsilon_b / \epsilon_s$$

In generale, il valore di r dipende dall'orientamento del provino rispetto alla direzione di laminazione: si definiscono r_{00} , r_{90} e r_{45} i valori relativi a provini paralleli ad essa, perpendicolari ed inclinati di 45° . Il valore medio tra i valori relativi alle tre inclinazioni diverse è di fatto una misura dell'anisotropia normale (lo spessore varia più o meno di quanto faccia la dimensione trasversale), mentre la differenza di questi valori può essere legata all'anisotropia planare. Per dettagli a questo proposito è possibile consultare le norme UNI 8341:1982 oppure la ISO 10113:2006.

Il metodo accennato è l'unico possibile per valutare l'anisotropia normale di una lamiera, visto che è tecnicamente impossibile misurare direttamente la resistenza del materiale in direzione normale. Per farlo, sarebbe necessario lavorare un provino perpendicolare al foglio di lamiera: l'asse del provino dovrebbe essere interamente contenuto nello spessore che sovente è di pochi millimetri.

Il comportamento anisotropo della lamiera può essere desiderabile: in particolare l'anisotropia normale può implicare (se il coefficiente è maggiore di 1) che il materiale si deformi maggiormente nel piano della lamiera (effetto desiderato) rispetto a quanto faccia nel senso dello spessore (che porta all'assottigliamento ed alla rottura); relativamente all'anisotropia planare, questo effetto è generalmente indesiderato.

INCRUDIMENTO

L'incrudimento è l'aumento di resistenza di un materiale metallico in seguito alla deformazione plastica applicata. Il solo fatto che il carico di snervamento sia sempre inferiore a quello ultimo (di rottura) è una manifestazione del fenomeno. Nonostante il fenomeno sia di per sé evidente, la sua traduzione in un indice numerico richiede alcune ipotesi di partenza. È necessario infatti poter esprimere con un'equazione il comportamento del materiale, ossia definire la *legge costitutiva* che lega le sollecitazioni con le deformazioni plastiche (anche in questo caso le deformazioni elastiche non vengono considerate). Nella letteratura scientifica sono state proposte molte leggi costitutive (ad esempio Ludwik, Swift, Voce ecc.), ma la normativa prende in considerazione solamente la legge di Hollomon:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n$$

che dipende da due soli parametri, C ed n , che devono essere stimati mediante regressione dai dati sperimentali. Il parametro n , di particolare importanza, è, per definizione, il coefficiente d'incrudimento a trazione (*tensile strain hardening exponent*). La normativa italiana in proposito è recentissima, infatti la UNI EN ISO 10275:2014 è stata pubblicata pochi mesi fa e recepisce la internazionale ISO 10275:2007.

In modo poco intuitivo ma molto efficiente si può utilizzare, come "misura" dell'incrudimento, il valore di deformazione corrispondente al carico di rottura (il massimo della curva σ - ε). Per approfondimenti a riguardo la via più rapida è forse quella di utilizzare un motore di ricerca con le parole chiave "criterio di Considère", "Considerazione" o, meglio, "Considerazione necking". Questa soluzione, però, non è prevista dalla normativa.

Anche per il coefficiente di incrudimento, in teoria, gli esperimenti potrebbero fornire risultati diversi a seconda dell'orientamento del provino, generando coefficienti n_{00} , n_{45} e n_{90} con il già menzionato significato dei pedici. Elevati valori del coefficiente di incrudimento n sono molto desiderabili, perché contrastano la strizione e ritardano il collasso localizzato della lamiera in lavorazione.

LE PROVE

Sono state effettuate alcune prove di trazione per valutare l'effetto dell'anisotropia sui risultati. A prima vista, infatti, si può essere indotti a considerare che questo effetto non sia rilevabile. Sono stati presi in considerazione due materiali che spesso sono utilizzati sotto forma di lamiera, un acciaio al carbonio laminato (DC01) ed un acciaio inox (austenitico). In entrambi i casi il materiale di partenza è una lamiera con spessore nominale di 2 mm, dalla quale sono stati lavorati 10 provini di trazione, 5 dei quali estratti lungo la direzione di laminazione e 5 estratti perpendicolarmente ad essa. La geometria dei provini è riportata in Figura 1, mentre la politica di estrazione dei provini rispetto alla lamiera è riportata in Figura 2, ove sono evidenziati con colori diversi i provini paralleli e trasversali rispetto alla direzione di laminazione.

Prima della prova, è stato tracciato il tratto utile di ciascun provino (due tratti di 30 mm) e sono state misurate le dimensioni iniziali (spessore, larghezza e lunghezza del tratto utile). Le misure di spessore e di larghezza sono state ripetute in tre punti all'interno del tratto utile, utilizzando un micrometro (per gli spessori) ed un calibro digitale per le larghezze. Le misure dei tratti utili sono state realizzate utilizzando un microscopio d'officina a 20 ingrandimenti. La prova è stata condotta utilizzando una macchina di prova elettromeccanica Galdabini Sun 5; registrando, insieme ai valori di forza applicata, lo spostamento della traversa e, per la parte iniziale della prova, un segnale dato da un estensimetro meccanico con lunghezza di riferimento di 10 mm. L'impiego dell'estensimetro consente non solo di migliorare l'accuratezza dei dati, ma anche di depurare gli effetti dell'assestamento del provino tra i dispositivi di afferraggio.

Il risultato delle prove sono una serie di curve sforzo-deformazione, una per provino, come è mostrato nelle Figure 3 e 4 (per l'acciaio DC01 e per l'Inox, rispettivamente). I provini estratti nella direzione di laminazione sono indicati in rosso, quelli trasversali sono blu. Come si può osservare, la differenza, pur non essendo molto evidente, è tuttavia rilevabile: i provini dello stesso tipo sono molto più vicini tra loro rispetto a quelli dell'altra famiglia. Anche i valori del carico di rottura (e le corrispondenti deformazioni) si raggruppano in posizioni differenti in funzione dell'orientamento del provino; le Figure 5 e 6, per i due materiali, riportano un dettaglio delle curve precedentemente mostrate, dove è indicato il punto corrispondente all'inizio della strizione (ossia il carico massimo, di rottura).

In entrambi i casi, i provini longitudinali hanno manifestato un incremento del carico di rottura (medio) pari al 2.4%. Va però osservato che questo valore, pur essendo significativo, è comunque piccolo rispetto all'incertezza media dei risultati della prova. La norma UNI EN ISO 6892-1:2009 (appendice K), che descrive la prova di trazione, riporta le differenze tra i risultati ottenuti da laboratori diversi sullo stesso materiale; questi dati, che sono un indice della riproducibilità del test, sono uguali o maggiori alle differenze trovate.

Materiale	Orientamento (rispetto alla laminazione)	Carico di rottura [N/mm ²]			Deformazione (ingegneristica) al massimo carico [%]		
		min	max	medio	min	max	medio
DC01	parallelo	281.8	284.5	282.9	27.6	28.9	28.2
	trasversale	275.3	277.3	276.1	25.8	26.7	26.3
Inox	parallelo	657.6	674.2	665.3	50.0	55.9	52.6
	trasversale	640.2	661.5	649.9	55.0	62.3	58.6

Tabella 1 – Valori dei carichi di rottura e delle deformazioni corrispondenti.

CONCLUSIONI

E' opportuno ricordare che, ai fini della caratterizzazione del materiale a norma UNI, si dovrebbero utilizzare solo i provini estratti perpendicolarmente alla direzione di laminazione, a meno che la limitata larghezza della lamiera non renda possibile la lavorazione dei provini. Anche per la definizione del coefficiente di incrudimento e di anisotropia (ove specificato), le norme fanno riferimento a provini trasversali, specificando quindi i valori r_{90} e n_{90} .

Va anche detto che la prova di trazione, anche se presenta molti vantaggi (soprattutto una relativa semplicita' di esecuzione) e consente di ricavare molte informazioni circa il materiale studiato, è soggetta anche ad alcuni limiti. I problemi più evidenti sono legati alla sua natura monoassiale ed ai limiti di deformazione raggiungibili. In molte lavorazioni di formatura, infatti, lo stato di sollecitazione applicato è tridimensionale (e spesso le sollecitazioni prevalenti sono di compressione) e sollecita il materiale in modo differente rispetto alla trazione pura. In particolare, l'insorgere della strizione nella prova di trazione impone dei limiti alla massima deformazione raggiungibile nel corso della prova, che sono in generale superati nel corso dei normali processi di formatura che impiegano stati di sforzo più complessi.

Elenco delle figure

Provino_trazione.pdf

Figura 1 - Geometria del provino di trazione.

Estrazione_Provini.pdf

Figura 2 - Posizione dei provini nel foglio di lamiera.

DC01_tutto.pdf

Figura 3 - Curva sforzo-deformazione ingegneristica per i 10 provini in acciaio DC01, laminato a caldo. In rosso i dati dei 5 provini estratti nella direzione di laminazione, in blu i dati dei 5 provini trasversali.

Inox_tutto.pdf

Figura 4 - Curva sforzo-deformazione ingegneristica per i 10 provini in acciaio Inox. In rosso i dati dei provini estratti nella direzione di laminazione , in blu i dati dei provini trasversali.

DC01_dettaglio.pdf

Figura 5 - Dettaglio della curva sforzo-deformazione per il DC01, che mostra la regione del carico massimo e le posizioni dei carichi di rottura e delle corrispondenti deformazioni (Rosso: parallelo alla laminazione, Blu: trasversale).

Inox_dettaglio.pdf

Figura 6 - Dettaglio della curva sforzo-deformazione per l'Inox, che mostra la regione del carico massimo e le posizioni dei carichi di rottura e delle corrispondenti deformazioni (Rosso: parallelo alla laminazione, Blu: trasversale).