

Attualità e prospettive dei sistemi costruttivi cold-formed

Il divario tra aspetti scientifici e tecnologici, ovvero la non sempre perfetta corrispondenza tra metodi di calcolo ed applicazioni, ha caratterizzato la crescente diffusione dei sistemi costruttivi cold-formed. La presente memoria mira a contribuire al superamento di tale divergenza analizzando in particolare le problematiche tipiche di questi due aspetti, partendo dall'esame dei componenti di base (materiale, connessioni e prodotti) per giungere all'analisi dei principali sistemi costruttivi. Tale stato dell'arte, pur avendo come finalità principale quella di fornire al lettore informazioni essenziali sull'attualità dei profili sottili piegati a freddo, è inoltre propedeutico all'individuazione delle prospettive di sviluppo dei sistemi cold-formed, cui è dedicata la parte conclusiva del lavoro. In tale direzione, lo studio condotto ha evidenziato che, nonostante gli sforzi sino ad ora compiuti dal mondo scientifico e produttivo, ulteriori attività di ricerca sono necessarie, oltre che auspicabili, per giungere, in tempi brevi, alla completa e definitiva affermazione della tipologia costruttiva dei cold-formed nel mercato delle costruzioni metalliche.

Current trends and developments for cold-formed constructive systems

The gap among scientific and technological aspects, i.e. the complex link existing between design and application, has characterized the increasing spread of cold-formed constructive systems. From this point of view, this paper is aimed at providing an overview on the main items concerning these two components, starting from the examination of the base elements (material, connections and products) to reach the analysis of the most important constructive systems. Although this state of the art is basically addressed to provide the reader with the current trends, it allows the further developments in the field of the cold-formed constructions to be pointed out and analysed. In this direction, the whole study has emphasised that, despite the efforts made, up to now, by both the scientific and productive sides, researches projects are required and expected, in order to lead to the final and complete success achievement of the cold-formed typology within the metallic construction market

Prof. dr. ing. Raffaele Landolfo, dr. ing. Gianmaria Di Lorenzo, Università di Chieti "G. D'Annunzio"
Dr. ing. Luigi Fiorino, Università di Napoli "Federico II"

1 INTRODUZIONE

Il successo di una tipologia costruttiva è solitamente condizionato dalla contemporanea e progressiva affermazione della sua componente scientifica e di quella tecnologica. Questo principio, di carattere generale, è risultato valido anche per i sistemi cold-formed, ossia per quei sistemi costruttivi basati sull'impiego di elementi strutturali ottenuti per piegatura a freddo di lamiere metalliche di piccolo e medio spessore. Fu, infatti, soltanto a seguito della pionieristica ed intensa attività di ricerca condotta da G. Winter negli anni '50 presso la Cornell University che si resero possibili le prime significative applicazioni degli elementi cold-formed nel settore dell'ingegneria civile. Tali studi condussero, quasi contemporaneamente, anche alla prima codificazione di una metodologia di calcolo specifica per questo tipo di sezioni. Ciò contribuì, in maniera significativa, alla diffusione di tale tipologia costruttiva anche tra i progettisti meno esperti, che avevano così a disposizione lo strumento operativo attraverso il quale comprendere e prevedere il comportamento strutturale di tali sistemi. Da allora, il trend evolutivo che ha caratterizzato i profili piegati a freddo è stato continuo e costante ed ha interessato, quasi parallelamente, la ricerca scientifica, la tecnologia costruttiva e la normativa di riferimento. Ciò ha condotto i sistemi cold-formed a svolgere, oggi, un ruolo di primo piano nel panorama delle costruzioni metalliche, abbandonando di fatto quella nicchia di mercato nella quale sono stati per lunghi anni relegati. Le ragioni di un tale successo vanno, in primo luogo, ricercate in quelle caratteristiche intrinseche che rendono tale tecnologia sempre più competitiva rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali. Tali prerogative possono sintetizzarsi in: elevato rendimento strutturale, semplicità di prefabbricazione, possibilità di utilizzo di differenti materiali, uniforme qualità dei componenti, economia di trasporto e rapidità di posa in opera. In buona sostanza, la competitività di questa tecnologia è oggi fondata principalmente su considerazioni di carattere economico legate alla sostanziale riduzione dei costi di costruzione (costi diretti), generati sia da un sensibile risparmio del materiale di base che, soprattutto, dai ridotti tempi di posa in opera (Pedrazzi & Lozano, 1998). Tali costi, che appaiono sempre più legati ai tempi di realizzazione, possono infatti, sulla base del livello di prefabbricazione raggiunto e del tipo di connessioni adottate, essere abbattuti anche del 50 % rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali (Davies, 1998a).

La crescente diffusione dei profili formati a freddo va però messa in relazione non soltanto agli aspetti economici, ma anche ai requisiti di carattere ambientale (costi indiretti). Da questa angolazione giova ricordare che i sistemi cold-formed, in particolare, ma l'acciaio in generale, si presentano come una tecnologia particolarmente competitiva nel panorama globale delle costruzioni, poiché idonea a perseguire una politica di sviluppo sostenibile, oggi praticata da gran parte dei paesi industrializzati.

Sebbene gli aspetti scientifici e tecnologici non siano sempre facilmente e completamente disaccoppiabili,

Tipo di materiale	Norma di riferimento	Grado	f_{yb} (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
Lamiere di acciaio di tipo strutturale laminate a caldo	EN 10025	S235 S275 S355	235 275 355	360 430 510
Lamiere di acciaio di qualità strutturale ad alta resistenza laminate a caldo	EN 10113-2	S275 N S355 N S420 N S460 N	275 355 420 460	370 470 520 550
	EN 10113-3	S275 M S355 M S420 M S460 M	275 355 420 460	360 450 500 530
Lamiere di acciaio di qualità strutturale ridotte a freddo	ISO 4997	CR220 CR250 CR320	220 250 320	300 330 400
Lamiere di acciaio al carbonio di qualità strutturale con rivestimento continuo di zinco in bagno caldo	EN 10147	Fe E 220 G Fe E 250 G Fe E 280 G Fe E 320 G Fe E 350 G	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Acciai ad alta resistenza per formatura a freddo	prEN10149-2	S315 MC S355 MC S420 MC S460 MC S500 MC S550 MC	315 355 420 460 500 550	390 430 480 520 550 600
	prEN10149-3	S260 NC S315 NC S355 NC S420 NC	260 315 355 420	370 430 470 530
Lamiere e nastri di acciaio a basso tenore di carbonio, zincati a caldo in continuo per formatura a freddo	EN 10142	DX51D+Z DX52D+Z DX53D+Z	≥140	≥270
Lamiere e nastri in lega di alluminio trattati meccanicamente	EN 485 e prEN 508-2	EN AW 3xxx EN AW 5xxx	120 + 145 160 + 180	140 + 160 210 + 230

Tabella 1:
Proprietà
meccaniche dei
principali
materiali metallici
utilizzati in
Europa
nel settore dei
formati a freddo

Il materiale di base utilizzato per la realizzazione di elementi cold-formed, disponibile sotto forma di fogli (lamiere) o rotoli (nastri o coils), può essere suddiviso, in base al tipo di processo di laminazione subito e/o alla presenza di uno strato di rivestimento, in tre classi tipologiche: i laminati piani a caldo, i laminati piani a freddo ed i laminati piani rivestiti.

I laminati piani a caldo, normalmente impiegati per la produzione di elementi pressopiegati, si caratterizzano per l'ampio range di spessori disponibili, che variano, per i prodotti impiegati per le lavorazioni a freddo, da un minimo di 1.5 ad un massimo di 15 mm. Spesso i laminati piani sono forniti in fogli di lamiera decapate, le cui dimensioni planimetriche possono raggiungere i 1500 mm di larghezza ed i 16000 mm di lunghezza.

I laminati piani a freddo, i cui spessori oscillano tra 0.35 ÷ 3 mm, si caratterizzano per l'elevato grado di finitura superficiale che consente l'applicazione di svariati tipi di rivestimento. Tali prodotti siderurgici, data la elevata sottigliezza degli spessori, sono generalmente forniti in rotoli e sono normalmente impiegati per lavorazioni mediante profilatrice.

Molto utilizzati per la produzione di elementi cold-formed sono infine i laminati piani rivestiti, realizzati, per spessori nominali (t_n) inferiori ad 1.5 mm, mediante procedimenti continui eseguiti su laminati piani a freddo, oppure, per $t_n > 1.5$ mm, su laminati piani a caldo. Il più comune sistema di rivestimento è la zincatura in continuo in bagno caldo, che costituisce un sistema di protezione attivo nei riguardi dei fenomeni di corrosione superficiale. Per questi elementi va inoltre ricordato che lo spessore di calcolo da utilizzare per le verifiche di sicurezza è quello nominale interno (t_{cor}), ottenuto sottraendo allo spessore nominale della lamiera lo spessore del rivestimento (t_{zin}), quest'ultimo generalmente dell'ordine di alcune decine di micron (per l'usuale rivestimento di zinco Z275, $t_{zin}=40 \mu m$).

Sebbene l'acciaio sia di gran lunga il materiale più utilizzato nella produzione di elementi formati a freddo, va sempre più diffondendosi in tale settore anche l'impiego delle leghe leggere. Tra queste ultime molto utilizzate risultano soprattutto le leghe di alluminio da trattamento meccanico, che uniscono alla notevole resistenza alla corrosione superficiale discrete proprietà in termini di resistenza e duttilità.

La gamma dei materiali metallici più utilizzati nel continente europeo per la produzione di elementi cold-formed per impiego strutturale è riportata in Tabella 1. In essa sono anche indicate, accanto alle rispettive norme di prodotto, i valori minimi delle tensioni di snervamento (f_{yb}) e rottura (f_u), espresse in N/mm².

In termini di comportamento meccanico effettivo occorre ricordare che nel materiale sia il processo di laminazione che la successiva piegatura a freddo generano delle imperfezioni, la cui entità può essere tale da condizionare in misura sensibile la risposta strutturale delle membrature. Entrambi i processi, infatti, alterano le proprietà del materiale facendo insorgere, in due fasi distinte, sia imperfezioni di natura geometrica che di natura meccanica.

questa memoria si pone come obiettivo quello di fornire, nei limiti di spazio e di contenuti connessi con una trattazione di questo tipo, una panoramica sulle principali problematiche che interessano queste due componenti delle costruzioni cold-formed. Nel portare avanti questo parallelismo si seguirà una metodologia induttiva, partendo cioè dall'esame degli elementi di base (materiale, connessioni e prodotti) per giungere all'analisi dei principali sistemi costruttivi. Tale stato dell'arte, certamente non esaustivo nei confronti delle numerose e complesse tematiche riguardanti i profili cold-formed, pur avendo come finalità principale quella di fornire al lettore le informazioni essenziali sull'attualità dei profili sottili piegati a freddo, è da considerarsi propedeutico all'individuazione ed all'analisi delle prospettive di sviluppo dei sistemi cold-formed, cui sarà dedicata la parte conclusiva del lavoro.

2. COSTRUIRE CON I COLD-FORMED

2.1 Il Materiale

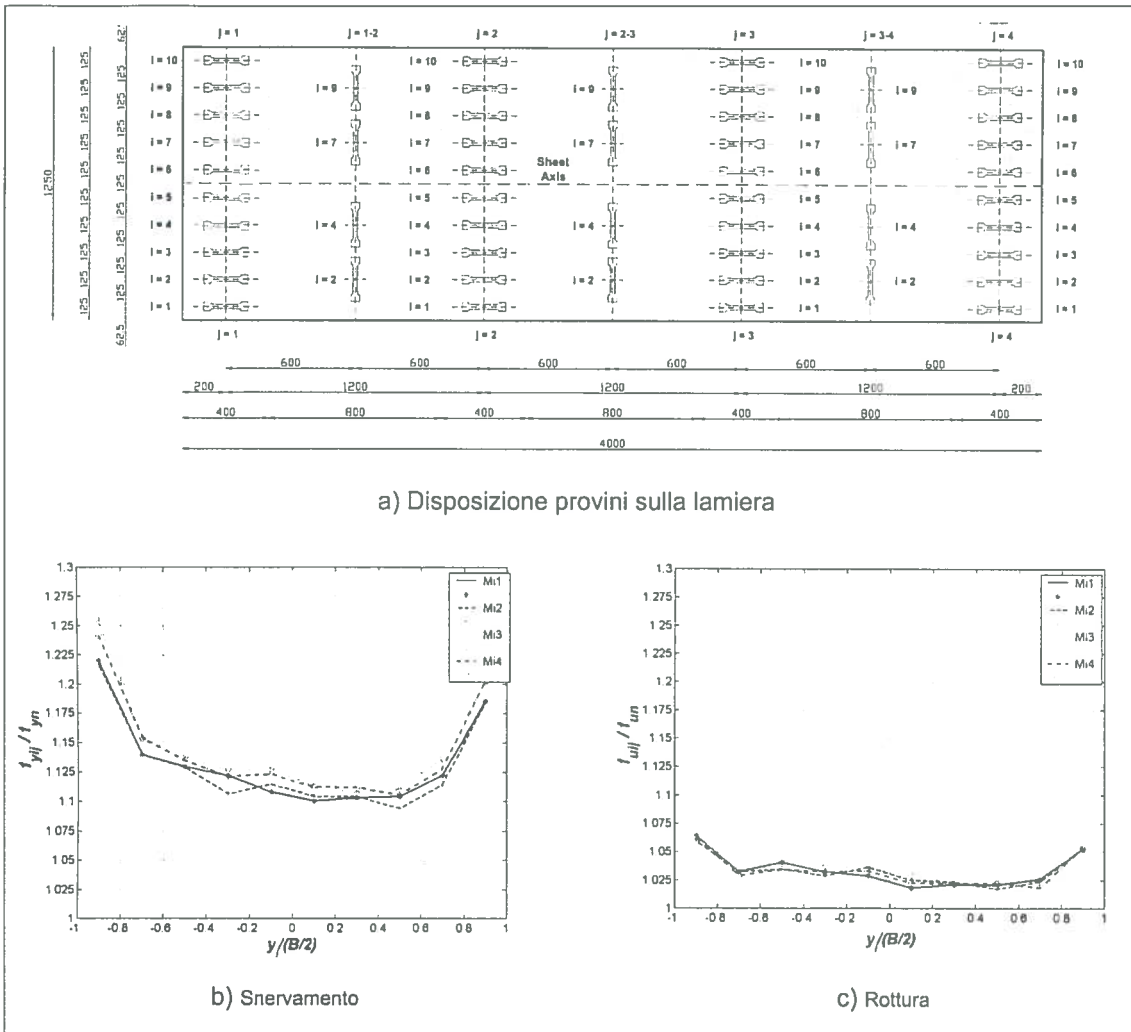


Figura 1: Distribuzione delle imperfezioni meccaniche prodotte dalla laminazione (Landolfo & Di Lorenzo 2001)

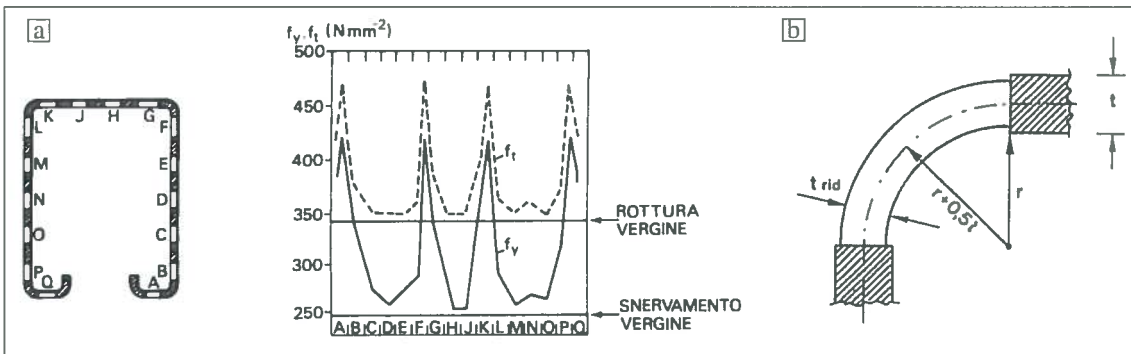


Figura 2: Imperfezioni prodotte dal processo di piegatura (Landolfo, 1992)

Relativamente al processo di laminazione, recenti indagini sperimentali (Landolfo & Di Lorenzo, 2001) hanno mostrato che esso fa insorgere nel materiale di base, per effetto dell'interazione tra il rullo e la lamiera, oltre ad uno stato coattivo di tensioni residue, ulteriori imperfezioni di natura sia meccanica che geometrica. Le tensioni residue, che rientrano comunque nella classe delle imperfezioni meccaniche, sono generalmente costituite da uno stato tensionale, variabile unicamente lungo lo spessore della lamiera, caratterizzato da valori di compressione sulla superficie esterna e valori di trazione nella zona centrale. Altre imperfezioni meccaniche sono rappresentate dalla variazione, lungo lo sviluppo planimetrico del nastro, delle principali proprietà del materiale (eterogeneità meccanica). In particolare, con riferimento ad un generico laminato piano a caldo in acciaio S235 (Fig. 1a), le prove di trazione eseguite su provini estratti direttamente dalla lamiera hanno consentito di accertare che l'eterogeneità si manifesta prevalentemente in direzione ortogonale a quella di laminazione. Tale fenomeno si traduce, infatti, in un incremento della resistenza del materiale in prossimità dei bordi, secondo un profilo regolare di tipo parabolico, più marcato per la resistenza allo snervamento (Fig. 1b) che per la resistenza a rottura (Fig. 1c). Le tipiche e più significative imperfezioni geometriche connesse al processo di laminazione sono invece rappresentate dalla distribuzione non uniforme dello spessore, che produce nel nastro metallico il cosiddetto effetto bombatura. Al riguardo occorre sottolineare che le variazioni di spessore riscontrabili nei laminati piani, rispetto al valore nominale, devono in ogni modo essere contenute nell'ambito delle tolleranze definite dalle corrispondenti

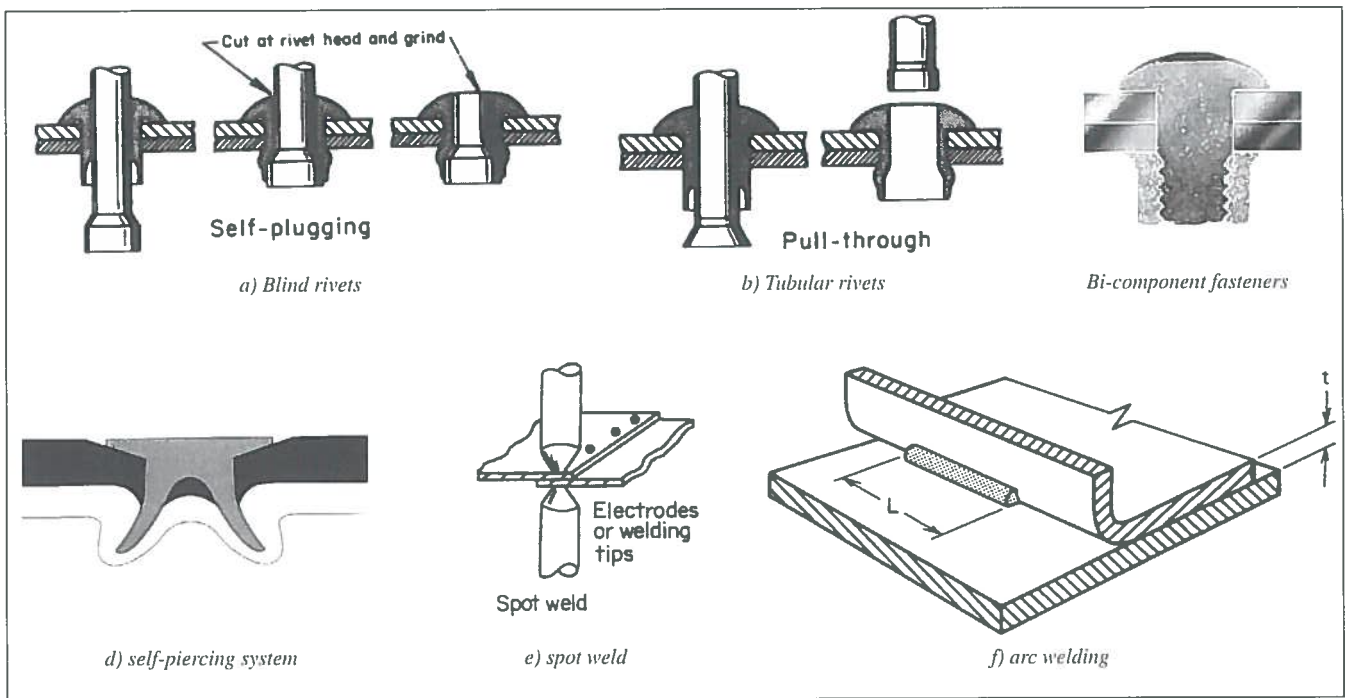


Figura 3:
Dispositivi
meccanici di
nuova generazione
(Yu, 2000;
Landolfo 2002;
CEN ENV1993-1-
3, 1996)

norme di prodotto. Va infine ricordato che il processo di laminazione induce nel materiale di base anche un comportamento anisotropo, più marcato per i laminati a freddo rispetto quelli a caldo.

Ulteriori imperfezioni meccaniche e geometriche sono prodotte dal successivo processo di lavorazione a freddo dei laminati piani, eseguito sia attraverso processi di piegatura che di stampaggio. Le imperfezioni meccaniche sono ancora una volta costituite essenzialmente dall'eterogeneità e dalle tensioni residue (Landolfo & Mazzolani, 1990a). L'eterogeneità, che si traduce in un'alterazione considerevole delle proprietà meccaniche in prossimità della zona di piega, è generata sia dal processo di incrudimento che dall'eventuale invecchiamento. Questi fenomeni determinano localmente un incremento delle proprietà del materiale in termini di resistenza (Fig. 2a), con conseguente riduzione della duttilità. Purtroppo tale incremento può essere utilizzato solo raramente ai fini progettuali, essendo la risposta delle membrature cold-formed generalmente condizionata dai fenomeni instabili. Le imperfezioni geometriche tipiche sono quelle conseguenti alla strizione in prossimità delle zone di piega (Fig. 2b). In pratica, analogamente a quanto accade durante una prova a trazione, l'eccessivo livello di deformazione plastica produce nel materiale di base una riduzione dello spessore. Quest'ultima può essere trascurata se si rispettano alcune limitazioni sui raggi minimi di piegatura ($r/t > 1.5$), in caso contrario andrà opportunamente tenuta in conto in fase di calcolo.

2.2 Le Connessioni

La scelta della tecnologia di connessione rappresenta un aspetto di primaria importanza per le strutture cold-formed, proprio per l'attitudine di tali sistemi alla prefabbricazione in stabilimento. Accanto ai particolari requisiti prestazionali, i sistemi di connessione utilizzati per i formati a freddo si caratterizzano soprattutto per l'elevata velocità di posa in opera (Pedreschi et al., 1997) e possono differenziarsi in: connessioni con organi meccanici e connessioni saldate termicamente.

Le connessioni con organi meccanici si caratterizzano sulla base del tipo di dispositivo impiegato, che può essere rappresentato dai bulloni, dai chiodi o rivetti e dalle viti autofilettanti.

I bulloni, il cui diametro nominale è generalmente compreso tra 8 e 30 mm, sono, com'è noto, organi meccanici bicomponenti, costituiti cioè da una vite e da un dado realizzati generalmente in acciaio normale, ad alta resistenza ed inossidabile (Ballio & Mazzolani, 1987).

I chiodi ed i rivetti si differenziano tra loro unicamente per la dimensione che per i primi risulta superiore ad 8 mm. Tali dispositivi si presentano generalmente come organi meccanici monocomponenti, ossia costituiti unicamente da un fusto (corpo) liscio, dotato di una testa tonda o tronco-conica. L'organo è completato dalla seconda testa, la quale è ottenuta mediante ribattitura a freddo del gambo eseguita attraverso dispositivi meccanici a strappo o esplosivi. In base alla tipologia di gambo, i rivetti possono, a loro volta, suddividersi in due categorie (Yu, 2000): rivetti pieni (blind rivets) (Fig. 3a) e rivetti cavi (tubular rivets) (Fig. 3b). Accanto ai rivetti o chiodi monocomponenti, il cui uso si presenta particolarmente conveniente nei casi in cui il foro sia accessibile da un solo lato, vanno sempre più diffondendosi, grazie anche alle loro elevate prestazioni meccaniche, i chiodi strutturali bicomponenti (Fig. 3c). Tali dispositivi sono costituiti da un gambo rigato e da un collare in acciaio dolce che, plasmato meccanicamente al fusto, conferisce alle connessioni anche un'elevata resistenza a trazione (Landolfo, 2002). Alte prestazioni ed assenza di tolleranze sono invece garantiti dai sistemi di rivettatura senza pretranciatura del foro (self-piercing systems) (Fig. 3d). Si tratta di dispositivi autopercoranti, realizzati attraverso l'applicazione di organi meccanici, che consentono di unire pacchetti di lamiera fino a spessori di circa 6 mm. I materiali impiegati per rivetti e

chiodi sono generalmente rappresentati da acciai microlegati ad alta resistenza, acciai inossidabili o leghe di alluminio.

Le viti sono indubbiamente gli organi meccanici più utilizzati nell'edilizia residenziale in cold-formed soprattutto per la semplicità e rapidità di posa in opera (NAHB-HUD, 1999). Tali dispositivi sono generalmente di tipo autofilettante, ovvero capaci di creare il filetto della madre vite durante l'operazione di serraggio in fori cilindrici di diametro opportuno. Per l'elevata durezza richiesta, le viti autofilettanti sono realizzate con acciai microlegati, trattati termicamente e dotati di un opportuno rivestimento protettivo.

Come precedentemente sottolineato, le connessioni, oltre che con dispositivi meccanici, possono essere realizzate per via termica mediante procedimenti di saldatura, eseguiti sia per punti che per sovrapposizione (CEN ENV 1993-1-3, 1996). In entrambi i casi il collegamento è realizzato attraverso l'apporto localizzato di calore che, normalmente, tende a danneggiare l'eventuale strato protettivo presente sulla superficie

metallica collegata. La procedura che tende a minimizzare il danneggiamento è rappresentata dalla saldatura per punti (spot weld) che, eseguita mediante resistenza elettrica (Fig. 3e), consente di collegare lamiere di spessore sino a 3 mm. Maggiori spessori saldabili possono essere raggiunti attraverso l'impiego di saldature per sovrapposizione, realizzate per fusione con arco voltaico che, in relazione alla configurazione geometrica del materiale fuso, possono suddividersi in saldature a cordoni d'angolo (Fig. 3f) e saldature a bottoni.

2.3 I Prodotti

L'industria siderurgica mette a disposizione dei progettisti una vasta gamma di prodotti ottenuti dalla lavorazione a freddo di lamiere di piccolo e medio spessore (Landolfo, 1992). La complessità delle forme, prerogativa degli elementi cold-formed, è resa possibile attraverso l'impiego di due speciali tecniche di lavorazione: la profilatura in continuo e la pressopiegatura. L'automazione dei processi di lavorazione consente, inoltre, la combinazione di tali tecniche che possono anche essere presenti simultaneamente nella stessa linea di produzione. La profilatura in continuo si presenta particolarmente conveniente per la produzione di elementi mono e bidimensionali di piccola e media altezza. I massimi spessori lavorabili con tale tecnologia variano in funzione del tipo di materiale da deformare. In particolare, il massimo spessore lavorabile è dell'ordine dei 15 mm per gli acciai al carbonio e 8 mm per gli acciai inossidabili. La pressopiegatura, detta comunemente stampaggio, consente di raggiungere velocità di produzione generalmente più basse di quelle della profilatura in continuo e ben si presta alla lavorazione di membrature di grande altezza e spessore (sino a 20 mm). Generalmente, i principali prodotti cold-formed vengono suddivisi, in base ad aspetti morfologici e prestazionali, in due famiglie tipologiche:

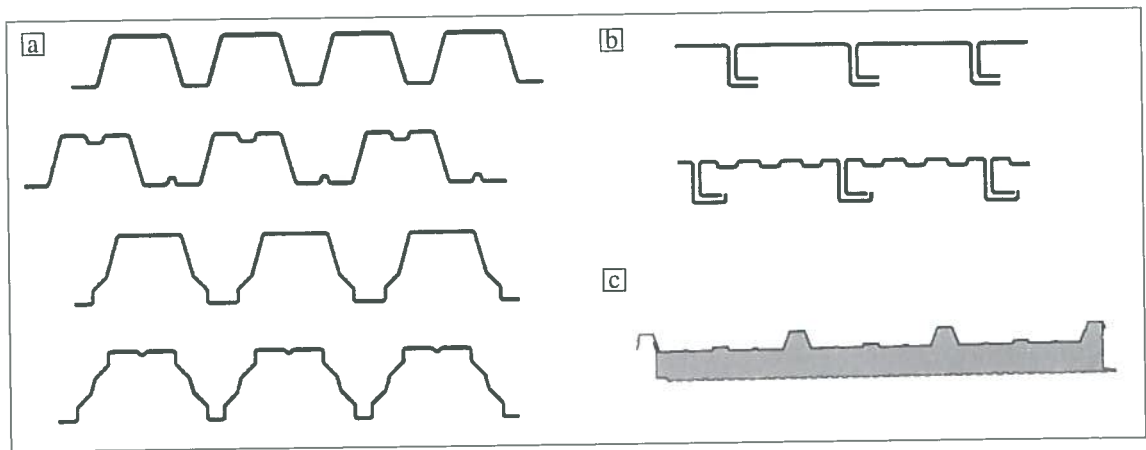
1. Le membrature;
2. Le lamiere grecate.

Le membrature, ovvero gli elementi a prevalente sviluppo monodimensionale, possono essere classificate, a seconda che siano costituite da uno o più elementi componenti, in membrature semplici e membrature composte. Per le prime, sebbene la tecnologia dei cold-formed consenta in linea generale per ciascuna esigenza di carattere tecnologico e/o prestazionale la progettazione della geometria ad hoc del profilo, è possibile in realtà definire un sagomario delle forme ricorrenti con i relativi limiti dimensionali ed i probabili campi di impiego (Tab. 2). Tali membrature, spesso utilizzate come travi secondarie di impalcati ad uso residenziale o industriale, si presentano, in questo settore, particolarmente competitive e possono condurre ad un risparmio in peso rispetto alle soluzioni tradizionali laminare a caldo che può sfiorare il 70% (Coskun, 1999). Le membrature composte sono invece realizzate mediante la composizione di due o più profili semplici, collegati tra loro mediante sistemi di connessione disposti lungo lo sviluppo longitudinale dell'ele-

Tipo	Geometria sezione	Dimensioni minime (mm)	Dimensioni massime (mm)	Usuali campi d'impiego
Sezione ad "L" (angolare a lati eguali)		A=10 B=10 s=0.6	A=300 B=300 s=12	Montanti, aste di parete, diagonali di controvento
Sezione ad "L" (angolare a lati diseguali)		A=15 B=10 s=1	A=300 B=150 s=12	Montanti, aste di parete diagonali di controvento
Sezione ad "L" irrigidita (con irrigidimenti di bordo a singola piega)		A=D=20 B=C=70 S=3	A=D=40 B=C=15 S=8	Montanti, aste di parete, correnti di travi reticolari
Sezione ad "U"		A=5 B=8 s=0.5	A=150 B=400 s=10	Travetti di solai, travi secondarie
Sezione a "C" irrigidita (con irrigidimenti di bordo a singola piega)		A=6 B=8 C=3 s=0.6	A=150 B=400 C=50 s=8	Travi secondarie, travi principali (profilo composto)
Sezione a "C" irrigidita (con irrigidimenti di bordo a doppia piega)		A=25 B=30 C=9.5 D=5 S=1.25	A=100 B=100 C=38 D=18 S=4	Rotaie
Sezione ad "Ω"		A=10 B=20 C=5 s=0.8	A=180 B=110 C=60 s=8	Travi principali e secondarie
Sezione a "Z"		A=10 B=20 s=0.8	A=80 B=200 s=4	Arcarecci

Tabella 2: Tipiche sezioni di membrature cold-formed

Figura 4: Esempi di lamiera grecate e pannelli coibentati (CEN ENV 1993-1-3, 1996)



mento. La composizione delle membrature, finalizzata essenzialmente ad un incremento delle prestazioni, può avvenire generando sezioni aperte o chiuse.

Le lamiere grecate, ovvero gli elementi a prevalente sviluppo bidimensionale, possono anch'esse differenziarsi in lamiere grecate semplici e lamiere grecate composte. Le prime (Fig. 4a) sono ottenute mediante profilatura in continuo di singoli coils metallici di piccolo spessore e si caratterizzano per la presenza di opportuni sistemi di irrigidimento. Alla classe delle lamiere composte appartengono sia quelle ottenute affiancando una serie di elementi a sviluppo longitudinale (Fig. 4b) sia i pannelli sandwich, ossia quegli elementi ottenuti dalla sovrapposizione di due lamiere con interposto strato isolante (Fig. 4c).

2.4 I Sistemi Costruttivi

Il recente sviluppo in tecnologia delle membrature cold-formed è fortemente legato alla crescente diffusione commerciale che si è verificata, a partire dagli anni '90, soprattutto nel mercato delle costruzioni nord americano (Shuster, 1996) e nord europeo (Lawson, 1996). I profili formati a freddo, tradizionalmente impiegati come strutture secondarie di edifici industriali, hanno infatti trovato, in tali Paesi, una brillante e diffusa applicazione nell'edilizia residenziale (housing) grazie soprattutto ad aspetti economici legati alla sostanziale riduzione dei tempi di realizzazione e posa in opera.

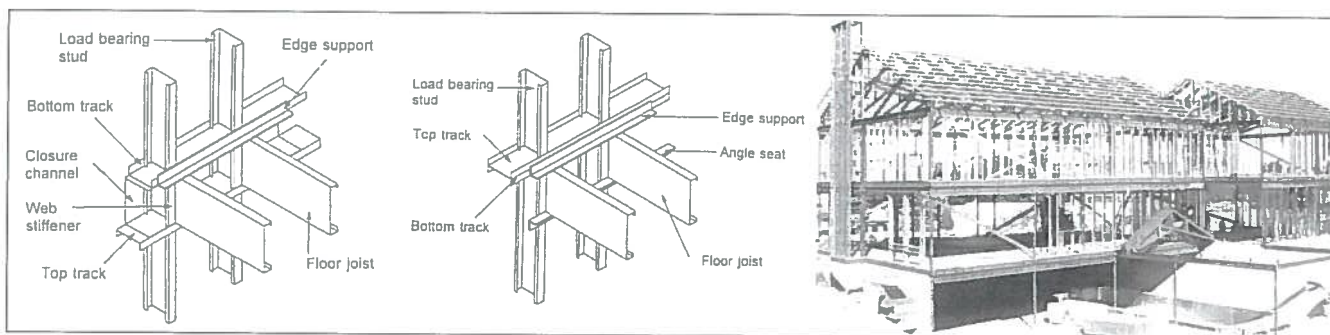
Nel continente americano, sebbene le prime applicazioni nel campo dell'edilizia residenziale risalgano agli inizi degli anni '50, la mancanza di specifiche norme di progetto per il settore dell'housing ha di fatto impedito per lungo tempo la reale diffusione di sistemi cold-formed tra i progettisti ed i costruttori. Solo negli ultimi anni tale carenza è stata colmata, soprattutto grazie ai programmi di ricerca promossi dall'American Iron and Steel Construction (AISI) e dalla North American Steel Framing Alliance (NASFA, 2000). Tali attività hanno condotto alla pubblicazione del recente "Residential Steel Framing Manual" (AISI, 1997) che, oltre a fornire numerose indicazioni progettuali, contiene anche utili suggerimenti di carattere costruttivo. E' anche grazie a queste iniziative, volte a promuovere l'uso della tecnologia cold-formed nell'edilizia residenziale statunitense, che si è passati da una produzione di 15000 unità abitative nel 1993 alle 75000 unità nel 1996. Tale trend appare confortato anche da recenti indagini economiche che prevedono, per l'anno 2002, un ulteriore incremento della produzione, fino a raggiungere quota 375000 unità (Yu, 2000).

Anche nel vecchio continente le iniziative a sostegno dei sistemi costruttivi cold-formed sono divenute solo recentemente più rilevanti, soprattutto per merito di alcuni paesi nord europei. Al riguardo, tra le numerose attività meritano di essere citate quelle condotte in Finlandia, nel periodo 1995-2000, nell'ambito del programma di ricerca denominato "Finnesteel". Tale programma, messo a punto dalla National Technology Agency of Finland (TEKES), oltre ad incrementare la competitività delle costruzioni in acciaio nei settori tradizionali, è stato finalizzato, in particolare, alla promozione di innovativi sistemi di costruzione basati sulla tecnologia dei formati a freddo (Tekes, 2001). Degno di nota è inoltre il programma di ricerca europeo promosso dalla European Coal and Steel Community (ECSC, 2001) e coordinato dal Steel Construction Institute (SCI). Tale progetto, in corso di ultimazione, è finalizzato alla promozione dei cold-formed nel settore delle costruzioni, perseguendo tale obiettivo sia attraverso lo sviluppo di nuovi strumenti di progetto che mediante la preparazione di regole di progetto integrative a quelle attualmente codificate in Europa.

In linea generale, le tipologie costruttive utilizzate nell'housing possono essere classificate in relazione al livello di prefabbricazione ed alla geometria degli elementi impiegati (Shuster, 1996). Al riguardo possono essere individuati tre differenti sistemi costruttivi:

1. Sistemi ad aste (Stick-Built Constructions);
2. Sistemi a pannelli (Panelized Constructions);
3. Sistemi a moduli (Modular Constructions);

I sistemi ad aste derivano dalla tecnologia costruttiva delle case in legno e rappresentano il più comune metodo di costruzione adottato per l'housing in acciaio. La struttura portante delle stick-built constructions si caratterizza infatti per il modesto livello di prefabbricazione, essendo generata dall'assemblaggio in opera di elementi di tipo monodimensionale. Le membrature comunemente adottate per la realizzazione dei sistemi strutturali verticali ed orizzontali, intermedi e di copertura, sono rappresentate da profili cold-formed, in genere con sezione a C o a Z. In particolare, i sistemi portanti verticali (Fig. 5a) sono realizzati ac-



costando profili a C, collegati all'estremità da correnti di chiusura così da realizzare pareti di aste (wall studs) in grado di assorbire le azioni verticali ed orizzontali trasmesse dagli impalcati e di riportarle successivamente in fondazione. I sistemi portanti di calpestio sono normalmente costituiti da un semplice ordito di membrature, collegate superiormente da un sistema bidimensionale realizzato in legno, acciaio, o materiali compositi. Un esempio emblematico di edificio realizzato con il sistema ad aste è riportato in Figura 5b (Yu, 2000). Tale edificio, dotato di un piano interrato e due piani fuori terra, si presenta particolarmente significativo in quanto adotta come sistemi portanti verticali sia le pareti di aste che le colonne isolate (presenti nel piano interrato utilizzato come garage).

Un maggiore livello di prefabbricazione è invece raggiunto nei sistemi a pannelli, impiegati per la realizzazione sia dei sistemi portanti verticali che orizzontali. Tali pannelli sono generalmente prefabbricati in officina, assemblando pareti di aste opportunamente controventate mediante procedimenti automatici o semiautomatici, e successivamente posti in opera mediante l'utilizzo di organi meccanici di connessione (Fig. 6a).

Tra gli edifici realizzati con il sistema a pannelli particolarmente significativo è quello riportato in Figura 6b, realizzato in Inghilterra nel 1996 ad opera del Steel Construction Institute (Lawson & Ogden, 2001). Si tratta di un esempio di edificio prototipo, caratterizzato da due corpi di fabbrica contigui sviluppati rispettivamente su due e tre livelli. Il sistema portante è costituito da pannelli prefabbricati di perimetro e di divisione, collegati all'impalcato attraverso un metodo d'intelaiatura definito a piattaforma, che prevede l'interruzione a livello di piano dei sistemi portanti verticali. Il massimo livello di prefabbricazione è infine raggiunto con i sistemi a moduli ottenuti dall'assemblaggio di unità strutturali tridimensionali, realizzate in officina in ambiente controllato (Fig. 7a). Il complesso strutturale è generato accostando planimetricamente ed altimetricamente, mediante macchine elevatrici, i singoli moduli, che vengono successivamente fissati tra loro mediante organi meccanici di connessione. Tra le applicazioni particolare rilevanza riveste, per la sua notevole dimensione e per la valenza architettonica, l'edificio riportato in Figura 7b, realizzato a Londra ad opera degli architetti Cartwright & Pickard. L'edificio si sviluppa su cinque livelli ed è costituito da un corpo di fabbrica principale, realizzato accostando singole unità strutturali di dimensione planimetrica 8 x 3.2 m e da un elemento cilindrico d'angolo, utilizzato come vano scala, e realizzato anch'esso mediante moduli cold-formed.

3. METODOLOGIE DI CALCOLO E QUADRO NORMATIVO

3.1 Generalità

Nell'ambito delle diverse tipologie di elementi strutturali in acciaio, i profili cold-formed risultano solitamente i più "sottili" e presentano pertanto un comportamento strutturale ancor più influenzato dalle forme di instabilità semplici (locale, globale e distorsionale) e/o accoppiate (Mazzolani & Landolfo, 2002). L'instabilità locale è caratterizzata da spostamenti fuori dal piano degli elementi lastra che compongono la membratura, senza però che le linee di intersezione tra questi elementi subiscano alcuna deformazione (Fig.

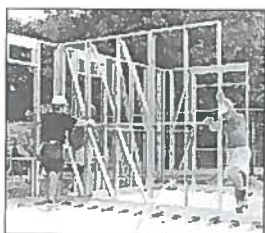


Figura 6: Esempio emblematico di costruzione a pannelli (Lawson & Ogden 2001)

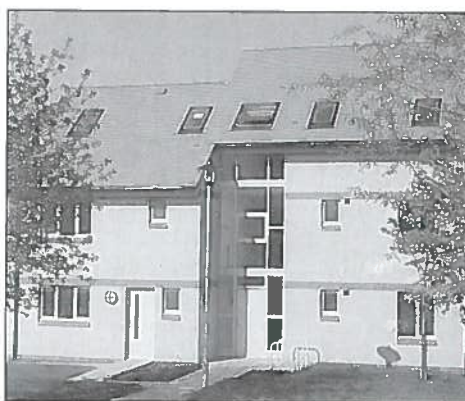


Figura 5: Esempio emblematico di costruzione ad aste (Yu, 2000)

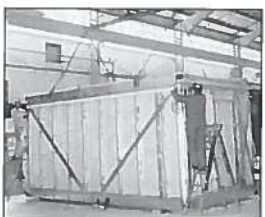


Figura 7: Esempio emblematico di costruzione a moduli (Lawson & Ogden 2001)



8a); essa è detta locale poiché presenta delle deformate instabili le cui semi-lunghezze d'onda sono dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni della sezione trasversale. Quando il valore della semi-lunghezza d'onda è dello stesso ordine di grandezza della membratura, si parla invece di instabilità globale che, come ben noto, è caratterizzata da una deformata instabile nella quale la sezione trasversale non si deforma e può presentarsi in tre distinti modi: flessionale pura, torsionale pura, flessio-torsionale (Fig. 8c). Infine, per valori della semi-lunghezza d'onda compresi tra le dimensioni caratteristiche della sezione trasversale e la lunghezza dell'asta, si ha un tipo di instabilità denominato distorsionale. In questo caso, a differenza dell'instabilità locale, le linee di intersezione tra gli elementi lastra che compongono il profilo subiscono uno spostamento con conseguente distorsione della sezione trasversale (Fig. 8b). Accanto a queste forme di instabilità semplici, deve inoltre contemplarsi l'eventualità che più forme instabili possano presentarsi contemporaneamente, dando luogo a fenomeni instabili accoppiati (Landolfo, 2000).

Tralasciando le ben note forme di instabilità globale, le cui metodologie di analisi nel caso dei profili cold-formed non si discostano sostanzialmente da quelle valide per i laminati a caldo, nel seguito verranno brevemente richiamati gli approcci correnti per lo studio dell'instabilità locale e distorsionale. Queste ultime, infatti, per l'elevata snellezza degli elementi costituenti la sezione trasversale (instabilità locale) nonché per la presenza di irrigidimenti intermedi e di estremità (instabilità distorsionale), rappresentano senza dubbio le forme di instabilità tipiche dei profili cold-formed. Per meglio comprendere anche le ricadute in termini di codificazione dei suddetti approcci è però necessario premettere brevemente il quadro normativo di riferimento, cui sarà dedicato il successivo paragrafo.

3.2 Lo stato attuale della codificazione

Come più volte sottolineato, le problematiche tipiche dei profili sottili formati a freddo, ed in modo particolare la loro elevata sensibilità nei riguardi dei fenomeni instabili, rendono necessaria la messa a punto di specifiche normative per la definizione di validi criteri progettuali (Hancock, 1997a).

Con riferimento ai profili in acciaio, l'attuale normativa italiana (CNR UNI 10022, 1984) è una delle meno aggiornate, mentre più recenti ed avanzate sono la normativa in vigore negli U.S.A.

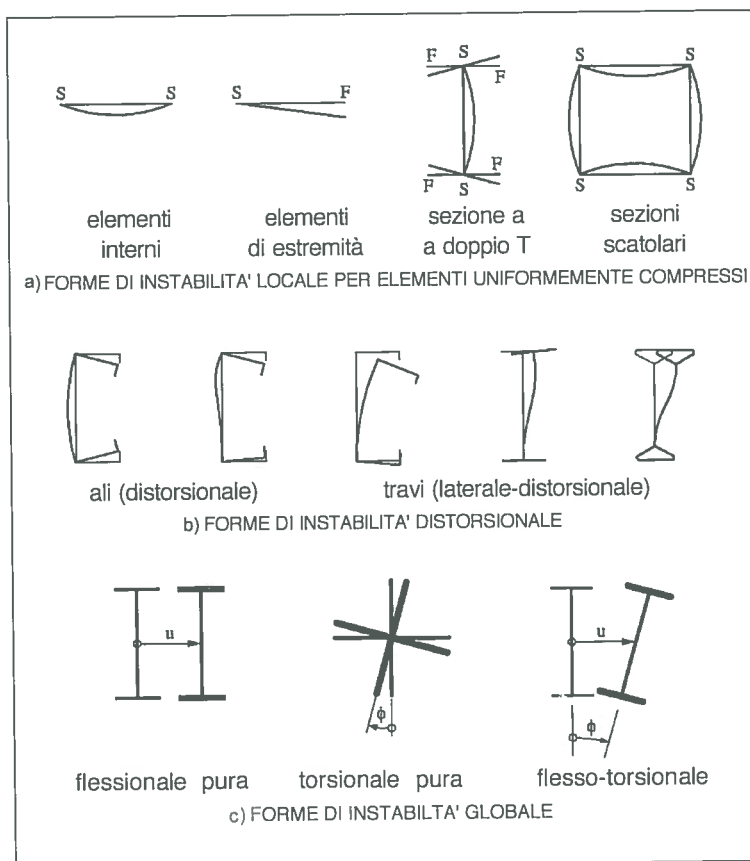


Figura 8: Classificazione dei fenomeni instabili (Mazzolani & Landolfo, 2002)

Figura 9: L'approccio "Element model" (Walker, 1975)

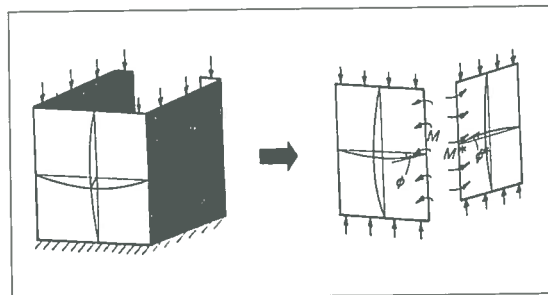
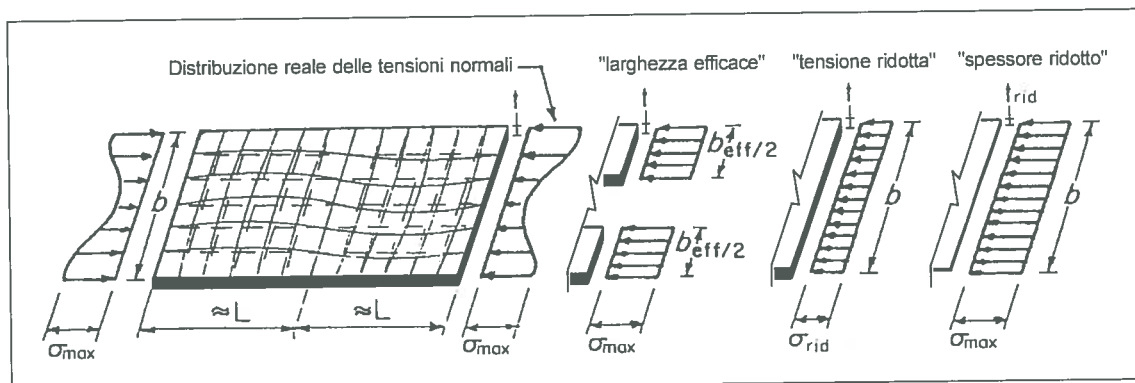


Figura 10: Modelli teorici disponibili per l'analisi della stabilità delle lastre sottili



(AISI, 1996), quella australiana-neozelandese (AS/NZS 4600, 1996) nonché quella europea (CEN ENV 1993-1-3, 1996).

La normativa europea ha carattere provvisorio (ENV) ed è attualmente in fase di conversione. Tale fase, iniziata nell'ottobre 2000, si concluderà con la pubblicazione dell'euronorma definitiva (EN), prevista per i primi mesi del 2003. Il Project Team che si occupa della conversione è giunto recentemente alla redazione del primo draft (CEN EN 1993-1-3, 2001), con il quale sono stati recepiti alcuni dei commenti presentati dai vari paesi appartenenti alla Comunità Europea. Tra le più importanti modifiche introdotte vanno segnalate: un approccio più razionale per l'analisi delle forme di instabilità locali e distorsionali, la maggiore apertura verso l'impiego dei metodi numerici per lo studio dei vari tipi di instabilità nonché l'ampliamento della gamma degli acciai utilizzabili. In tale documento è stato inoltre confermato un importante concetto, già presente nella ENV, riguardante la differenziazione delle costruzioni che impiegano elementi cold-formed in tre classi distinte, in funzione del diverso livello di sicurezza richiesto. In particolare: le costruzioni di classe I sono quelle costituite da sistemi strutturali in cui le membrature in parete sottile e le lamiere formate a freddo sono progettate per contribuire alla resistenza ed alla stabilità globale dell'edificio; alla classe II appartengono i sistemi strutturali in cui le membrature in parete sottile e le lamiere formate a freddo sono progettate per contribuire alla resistenza ed alla stabilità di singoli elementi strutturali; la classe III comprende invece le costruzioni cold-formed i cui elementi sono progettati unicamente per sostenere e trasferire i carichi verticali su di essi gravanti, senza interferire in alcun modo né con la stabilità globale dell'edificio né con quella di una singola membratura.

A questa classificazione, per così dire funzionale, dei sistemi cold-formed si unisce la ben più nota classificazione delle sezioni trasversali, anche questa tipica degli Eurocodici, secondo la quale queste ultime sono suddivise in quattro classi comportamentali, in relazione alla capacità di raggiungere un preciso stato limite (CEN ENV 1993-1-1, 1992; CEN ENV 1999-1-1, 1998). In tale contesto, i profili formati a freddo ricadono generalmente (ma non necessariamente) nella classe delle sezioni snelle (classe 4), ossia quelle sezioni per le quali l'effetto dell'instabilità locale è tale da non consentire alle stesse nemmeno l'attingimento di uno stato limite elastico.

Per i profili cold-formed in lega di alluminio, l'Eurocodice 9 non prevede, al momento, una specifica parte ma si limita a fornire le indicazioni per la loro progettazione nella parte generale (CEN ENV 1999-1-1, 1998). Prescrizioni specifiche sulle lamiere grecate in alluminio sono invece contenute in un documento provvisorio, a carattere non ufficiale, chiamato anch'esso "Parte 1.3" (CEN prENV 1999-1-3, 1999), che rappresenterà un documento di riferimento per l'introduzione di specifiche metodologie di calcolo nella fase di conversione dell'Eurocodice 9.

3.3 Le metodologie di calcolo

In linea generale, tutti i sopraccitati codici prevedono la possibilità di verificare il comportamento di una membratura cold-formed seguendo un approccio sperimentale e/o teorico.

La "progettazione assistita dalle prove", nel caso delle membrature cold-formed, assume un ruolo di primaria importanza ed è certamente utilizzata in modo più esteso rispetto alle altre tipologie strutturali. Il ricorso alle prove sperimentali rappresenta infatti lo strumento più semplice ed efficace per studiare la risposta di sistemi complessi, sia in termini di identificazione strutturale che di progetto. Ciò giustifica la presenza, nelle principali normative, di appositi capitoli contenenti indicazioni qualitative e quantitative sulle metodologie di prove da seguire nonché sull'interpretazione dei relativi risultati.

Dal punto di vista teorico, la previsione della capacità portante di una membratura cold-formed è certamente più complessa. Si tratta infatti di un problema tipicamente "non lineare", la cui risoluzione, mancando ovviamente formulazioni in forma chiusa, può solo condursi mediante un approccio numerico capace di considerare contemporaneamente le non linearità geometriche e meccaniche. Sebbene oggi siano disponibili strumenti capaci di condurre tale analisi, è facile intuire che questa procedura non è però ancora proponibile a livello normativo (almeno come unico metodo disponibile) sia per la sua complessità, sia per alcune difficoltà operative (si pensi ad esempio al problema della codificazione delle imperfezioni).

Per tali motivi, gli approcci normativi correnti valutano gli effetti prodotti dai fenomeni instabili attraverso metodologie di calcolo semplificate, basate, in larga parte, sull'interpretazione semi-empirica di risultati sperimentali (Ghersi & Landolfo, 1992).

Purtroppo, tali metodologie, come meglio specificato nei successivi paragrafi, pur essendo basate su ipotesi alquanto semplificate, conducono generalmente a calcolazioni comunque complesse e di tipo iterativo. Ciò rende l'utilizzo di tali normative estremamente difficile senza l'ausilio di specifici programmi di calcolo. In tale spirito, Ghersi et al. (2001) hanno recentemente sviluppato un opportuno programma di calcolo che consente di valutare la capacità portante di membrature metalliche cold-formed nel rispetto delle principali normative vigenti per i profili sottili in acciaio (Eurocodice 3 ed AISI) ed in alluminio (Eurocodice 9).

3.3.1 Instabilità locale

Per lo studio dell'instabilità locale è largamente diffuso l'approccio "element model", che si traduce nell'applicazione della teoria della stabilità delle lastre sottili ad ogni elemento lastra costituente la sezione trasversale del profilo (Fig. 9). È possibile in tal modo portare in conto la capacità post-critica delle parti compresse della sezione, ossia la possibilità di sopportare carichi crescenti oltre quello critico elastico (o euleriano). Gli approcci teorici disponibili sono tutti finalizzati alla schematizzazione, in maniera semplificata, della redistribuzione dello stato tensionale che si verifica in fase post-critica e si differenziano nel considerare (Fig. 10):

- la tensione massima di bordo (σ_{\max}) agente uniformemente solo su una parte della lastra, chiamata per questo "larghezza efficace" (b_{eff});
- una "tensione ridotta" (σ_{rid}) agente uniformemente su tutta la lastra;
- la σ_{\max} agente uniformemente su una lastra di spessore ridotto, chiamato per questo "spessore ridotto" (t_{rid}).

L'approccio della "larghezza efficace" conduce alla definizione di una "sezione efficace", variabile in funzione della sollecitazione, da utilizzare ai fini delle verifiche di resistenza e deformabilità. La metodologia della "tensione ridotta" adotta, invece, un valore più basso della tensione di progetto senza alterare le caratteristiche geometriche dell'intera sezione. Il metodo dello "spessore ridotto", infine, analogamente a quello della "larghezza efficace", conduce ad una "sezione efficace" da utilizzare ai fini delle verifiche.

Per la determinazione di b_{eff} , σ_{rid} e t_{rid} è comunemente adottata, almeno come formulazione di base, la relazione semi-empirica originariamente proposta da Winter, secondo la quale il coefficiente riduttivo per l'instabilità locale ρ risulta:

$$\rho = \frac{b_{\text{eff}}}{b} = \frac{\sigma_{\text{rid}}}{\sigma_{\max}} = \frac{t_{\text{rid}}}{t} = \frac{1}{\bar{\lambda}_L} \left(1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_L} \right) \quad \text{con} \quad \bar{\lambda}_L = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{cr},L}}} \quad (1)$$

dove b e t sono, rispettivamente, la larghezza e lo spessore della lastra e $\bar{\lambda}_L$ è la snellezza adimensionale per l'instabilità locale, definita in funzione dalla tensione limite elastica σ_y e di quella critica locale $\sigma_{\text{cr},L}$. Quest'ultima viene solitamente valutata in forma chiusa attraverso la relazione:

$$\sigma_{\text{cr},L} = K \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t^2}{b^2} \right) \quad (2)$$

con E modulo di elasticità, ν coefficiente di Poisson e K coefficiente che tiene conto delle condizioni di carico e di vincolo.

La vigente normativa italiana sui profili di acciaio formati a freddo adotta un approccio misto, ossia utilizza la metodologia della "larghezza efficace" per gli "elementi irrigiditi" e quella della "tensione ridotta" per gli "elementi non irrigiditi". In particolare, per "irrigiditi" si intendono gli elementi della sezione che presentano un irrigidimento (sia esso un'anima, un'ala o una piega) in corrispondenza di entrambi i bordi e per "non irrigiditi" quelli per i quali tale vincolo è presente lungo uno solo di essi. Al riguardo, giova precisare che questa definizione è conforme a quella della normativa statunitense, ma differisce dalla classificazione adottata negli Eurocodici. Questi ultimi, infatti, definiscono "internal" ed "outstand" gli elementi che presentano rispettivamente, entrambi o un solo estremo vincolato da un'anima o da un'ala. Sia gli elementi "internal" che gli "outstand" vengono poi denominati "irrigiditi" se presentano irrigidimenti longitudinali (pieghe o incavi) interni e/o di estremità (quest'ultimo caso ovviamente valido solo per gli "outstand"). L'approccio misto "larghezza efficace" - "tensione ridotta" è ormai caduto in disuso, preferendosi ad esso, anche perché in grado di fornire un miglior accordo con i risultati sperimentali, un approccio unificato (Peköz, 1987), che utilizza unicamente il concetto di "larghezza efficace" o, in alternativa quello dello "spessore ridotto".

La versione attuale della normativa statunitense e l'Eurocodice 3 Parte 1.3 adottano entrambi l'approccio unificato in termini di "larghezza efficace" e si differenziano dalla normativa italiana in molteplici aspetti. Inoltre, mentre la CNR è basata sulla metodologia della tensione ammissibile, l'AISI consente di operare anche con gli stati limite mentre l'Eurocodice 3 adotta esclusivamente un'impostazione agli stati limite. Sebbene concettualmente molto semplice, anche l'approccio unificato comporta sovente, per la necessità di un calcolo di tipo iterativo, un notevole onere computazionale e non sempre produce risultati affidabili, soprattutto perché si trascurano le interazioni tra i diversi elementi che costituiscono la sezione (ali, anime, ecc.).

La tecnica dello "spessore ridotto" è recepita dall'Eurocodice 9 per la verifica dei profili sottili in lega di alluminio. Tale metodologia, concettualmente applicabile anche ai profili in acciaio, è stata in questo caso preferita poiché ritenuta operativamente più semplice da applicare in presenza di profili di forma anche molto complessa.

3.3.2 Instabilità distorsionale

Il fenomeno instabile distorsionale può assumere un'importanza significativa per i profili sottili e può riguardare l'intera sezione o singole parti della stessa. Con riferimento a quest'ultimo caso, l'esempio tipico è costituito dagli elementi con irrigidimenti intermedi e/o di estremità. Per essi infatti, se si escludono i casi in cui tali irrigidimenti sono talmente efficaci da costituire un punto fisso, la deformata instabile è di tipo distorsionale poiché coinvolge con spostamenti fuori dal piano gli irrigidimenti stessi. La Figura 11 chiarisce tale concetto con riferimento ad elementi irrigiditi "internal" ed "outstand", per i quali il vincolo offerto dalle anime è stato schematizzato come semplice appoggio.

La normativa statunitense considera l'instabilità distorsionale degli elementi irrigiditi attraverso la riduzione del coefficiente K dell'Eq. (2). Tale riduzione viene valutata in funzione del rapporto tra l'inerzia effettiva dell'irrigidimento ed il suo valore "ottimale", ossia quel valore dell'inerzia cui corrisponde la massima efficacia dell'irrigidimento. Il vantaggio di questo approccio è sicuramente nel modesto onere computazionale richiesto; di contro esso considera solo parzialmente l'interazione tra i diversi elementi costituenti la sezione. La CNR 10022, in maniera più semplicistica, consente di tener conto dell'irrigidimento (conside-

randolo pienamente efficace) solo se la sua inerzia supera un valore minimo opportunamente definito. Un'impostazione più accurata, ma certamente più laboriosa, è utilizzata dalla normativa europea CEN ENV 1993-1-3. La procedura proposta si sviluppa in tre fasi (Fig. 12). Preliminarmente (fase 1) si individua l'effetto dell'instabilità locale attraverso la determinazione della parte efficace dell'elemento (b_{eff}) e dell'irrigidimento (c_{eff}), considerando allo scopo che quest'ultimo fornisca un vincolo perfetto, ossia ipotizzando fisso il punto di intersezione. I passi successivi sono invece dedicati alla valutazione dell'effetto dell'instabilità distorsionale. In particolare, nella fase 2 si schematizza la parte efficace dell'irrigidimento (c_{eff}) e l'adiacente parte efficace dell'elemento (b_{eff2}) come un'asta compressa su suolo elastico di rigidezza k (valutata in funzione della rigidezza degli elementi piani costituenti la sezione), della quale si valuta la tensione critica elastica (o euleriana) con la ben nota formula di Engesser:

$$\sigma_{cr,D} = \frac{2\sqrt{k \cdot E \cdot I_s}}{A_s} \quad (3)$$

dove A_s ed I_s rappresentano rispettivamente l'area ed il momento d'inerzia dell'asta compressa equivalente. L'ultimo passo (fase 3) è infine dedicato alla valutazione del coefficiente riduttivo per instabilità χ_D , funzione della snellezza adimensionale $\bar{\lambda}_D$, attraverso il quale si riducono gli spessori delle parti b_{eff2} e c_{eff} ossia:

$$t_{rid} = \chi_D \cdot t \quad \text{con} \quad \chi_D = f(\bar{\lambda}_D) \quad \text{e} \quad \bar{\lambda}_D = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr,D}}} \quad (4)$$

Il procedimento viene quindi iterato, almeno due volte, aggiornando ad ogni passo le caratteristiche geometriche dell'asta equivalente.

Per la valutazione del coefficiente χ_D , la CEN ENV 1993-1-3 (1996) fa riferimento alla curva a_0 valida per le colonne compresse; il primo draft (CEN EN 1993-1-3, 2001) propone invece una curva specifica per l'instabilità distorsionale di equazione:

$$\begin{aligned} \chi_D &= 1.0 && \text{se } \bar{\lambda}_D \leq 0.65 \\ \chi_D &= 1.47 - 0.723 \bar{\lambda}_D && \text{se } 0.65 < \bar{\lambda}_D < 1.38 \\ \chi_D &= \frac{0.66}{\bar{\lambda}_D} && \text{se } \bar{\lambda}_D \geq 1.38 \end{aligned} \quad (5)$$

Tale proposta, oltre a fornire un miglior accordo con i risultati sperimentali, consente di superare anche una contraddizione concettuale, ossia l'uso di una curva valida per l'instabilità globale di colonne (curva a_0) per la valutazione di un fenomeno distorsionale. Anche in termini quantitativi, le differenze appaiono non trascurabili, come dimostra la Figura 13 nella quale sono riportati, a titolo di confronto, la curva a_0 , la nuova curva normativa e quella proposta da Winter per l'instabilità locale. Questa Figura, inoltre, conferma che il comportamento instabile distorsionale è intermedio tra quello globale e quello locale.

Figura 13: Confronto tra le curve di progetto adottate per i diversi fenomeni instabili

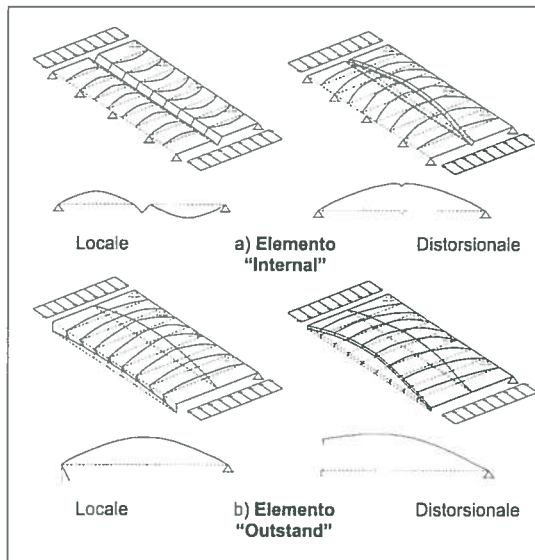


Figura 11: Forme di instabilità in un elemento irrigidito

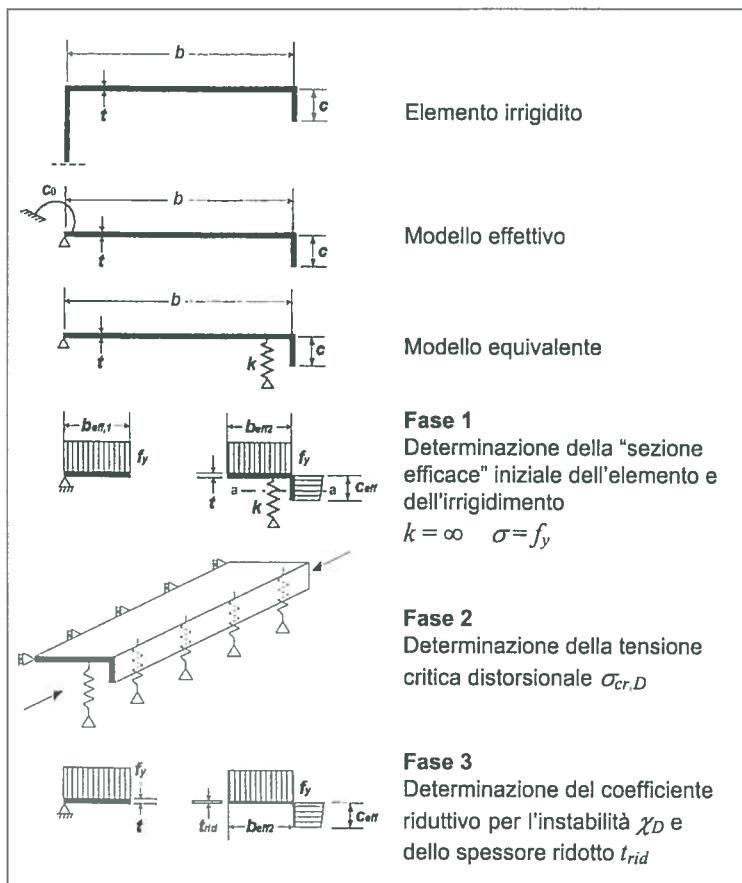


Figura 12: Metodologia di analisi fornita dall'EC3 per l'instabilità distorsionale di un elemento irrigidito

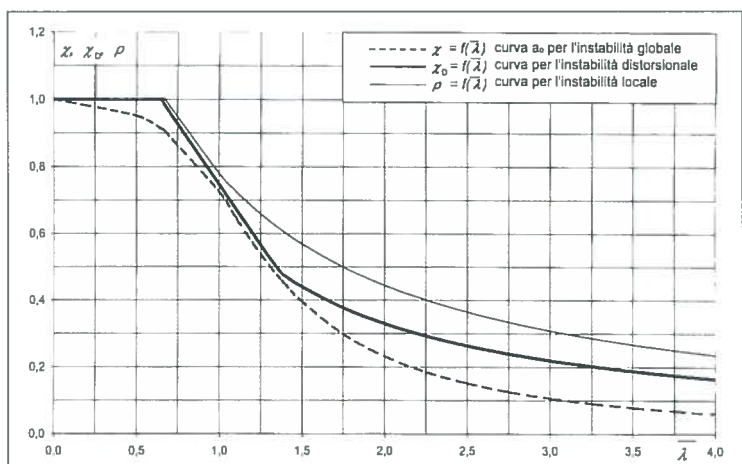
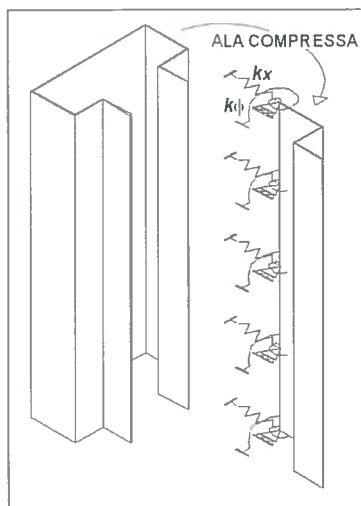


Figura 14:
Modello "flange buckling" per l'instabilità distorsionale di una membratura



Un'interessante modifica a questa metodologia, in linea con le attuali tendenze verso l'impiego di metodi numerici, è stata presentata da Kesti e Davies (1999). Essi, infatti, come alternativa al modello di asta compressa vincolata elasticamente, propongono di determinare la tensione critica distorsionale per un elemento irrigidito utilizzando la teoria generalizzata della trave (Davies & Leach, 1994a e 1994b).

I risultati degli studi più recenti sull'instabilità distorsionale di membrature cold-formed, sia uniformemente compresse (Lau & Hancock, 1987) che inflesse (Hancock, 1997b), sono stati recepiti dall'Australian/New Zealand Standard AS 4600 (1996). Il modello teorico adottato, chiamato anche "flange buckling", considera l'intero elemento irrigidito come un'asta compressa soggetta all'instabilità flessio-torsionale, vincolata rispetto alla rotazione, con un vincolo elastico avente rigidità k_ϕ , e rispetto alla traslazione, con un vincolo elastico avente rigidità k_x (Fig. 14). La rigidità k_ϕ , che rappresenta il vincolo torsionale offerto dall'anima, è un parametro che influenza fortemente i risultati ottenuti mediante l'applicazione di tale modello, mentre la rigidità k_x , che rappresenta il vincolo traslazionale offerto

dalla membratura, non essendo molto importante per questo tipo di instabilità, è solitamente trascurata. Alcuni miglioramenti a questo approccio, che conduce a risultati non conservativi nel caso di sezioni con anime più snelle, sono stati proposti sia da Davies & Jiang (1996a e 1996b) che da Schafer & Peköz (1999).

Dalle precedenti considerazioni appare evidente che sia l'approccio utilizzato dall'Eurocodice 3 sia i più accurati modelli per il trattamento delle forme di instabilità distorsionale conducono in ogni caso a metodologie di calcolo certamente più complesse rispetto a quelle utilizzate nei modelli interpretativi dei fenomeni instabili locali.

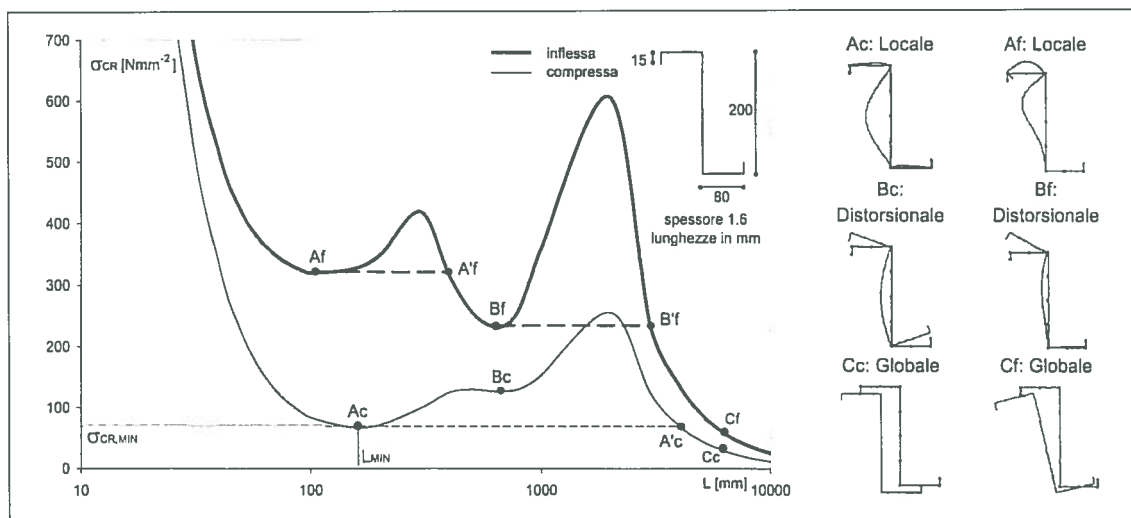
3.4 L'approccio "whole section" ed il metodo "direct strength"

Le metodologie di calcolo precedentemente richiamate sono entrambe basate sulla preliminare valutazione della tensione critica elastica, corrispondente ai fenomeni di instabilità locale e distorsionale. È stato inoltre sottolineato come, ai fini di tale valutazione, sono attualmente proposte delle procedure semplificate basate sul concetto di "element model", che focalizza l'attenzione sulla singola parte della sezione e trascura completamente (nel caso dell'instabilità locale) o parzialmente (per l'instabilità distorsionale) la sua interazione con gli altri elementi della sezione stessa. Si è infine constatato che tale impostazione, sebbene sia concettualmente abbastanza approssimata, non riesce comunque a condurre a procedure di calcolo agevoli, rendendo di fatto praticamente impossibile l'applicazione delle prescrizioni normative senza l'ausilio di un software specifico.

Per cercare di superare i limiti delle attuali impostazioni normative, è forte oggi la tendenza ad utilizzare approcci numerici capaci di considerare la sezione nella sua interezza e, per questo, denominati "whole section". In linea con questa tendenza, Schafer & Peköz (1998) hanno recentemente proposto un metodo, chiamato "direct strength", da loro considerato come valida alternativa metodologica per l'analisi dell'instabilità locale e distorsionale di membrature in parete sottile. Esso si sviluppa essenzialmente in due fasi (Fiorino & Landolfo, 2001):

- a) Viene preliminarmente determinato il carico critico elastico associato ad ogni possibile forma di instabilità (locale, distorsionale e globale) che può interessare la membratura in funzione delle sue caratteristiche geometriche, di carico e di vincolo. Tale valutazione è condotta per via numerica modellando l'intera sezione alle strisce finite (o in alternativa agli elementi finiti), il che consente di portare in conto, in modo rigoroso, l'interazione tra i diversi elementi costituenti la sezione trasversale (approccio "whole

Figura 15: Curva di stabilità elastica di una membratura (Mazzolani & Landolfo, 2002)



section”). Assumendo come variabile indipendente un parametro di snellezza globale, come ad esempio la lunghezza della membratura, può in tal modo costruirsi la “curva di instabilità elastica” della membratura, ossia la curva che, per ogni valore della lunghezza della membratura, fornisce il minimo carico critico elastico ad essa associato e la corrispondente forma della deformata instabile (Fig. 15).

- b) Per la valutazione della capacità portante effettiva della membratura (F_c), si utilizza una procedura semi-empirica basata sui valori della resistenza al limite elastico (F_y) della sezione (in assenza di ogni fenomeno instabile) ed il carico critico elastico (F_{cr}) precedentemente determinato. In pratica, il carico di collasso effettivo si ottiene riducendo la resistenza al limite elastico attraverso l’espressione:

$$F_c = \rho_w(\bar{\lambda}) \cdot F_y \quad (6)$$

nella quale il coefficiente riduttivo ρ_w è valutato, attraverso una relazione semi-empirica calibrata su base sperimentale, in funzione della snellezza adimensionale relativa alla forma di instabilità più penalizzante, ossia:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (7)$$

Tale metodo presenta una forte analogia concettuale con quello della “larghezza efficace” anche se, in questo caso, il coefficiente riduttivo è unico per l’intera sezione ed è applicato alla sua resistenza complessiva piuttosto che alla geometria di alcune sue parti. Tale analogia è confermata anche dal fatto che la relazione di base (ce ne sono in realtà tre) proposta per la determinazione di ρ_w è proprio la (1), ossia quella proposta da Winter per il calcolo della “larghezza efficace” di un singolo elemento.

L’affidabilità del metodo “direct strength” è stata recentemente investigata da Fiorino & Landolfo (2001), attraverso il confronto tra i risultati di prove sperimentali riguardanti profili inflessi e uniformemente compressi e le corrispondenti previsioni teorico-numeriche, ottenute sia con il metodo “direct strength” sia in accordo alle prescrizioni della normativa europea (CEN ENV 1993-1-3, 1996) e di quella statunitense (AISI, 1996). In Figura 16 è mostrato, a titolo di esempio, il confronto tra i risultati sperimentali e le previsioni del metodo “direct strength” secondo le tre diverse formulazioni proposte per il coefficiente ρ_w . In termini quantitativi è emersa una discreta affidabilità del metodo, con un errore medio compreso tra il 2% ed il 14% sul totale dei casi esaminati e comunque dello stesso ordine di grandezza delle previsioni normative. Quest’ultima circostanza è da imputarsi al fatto che i profili esaminati presentavano geometrie abbastanza usuali (sezioni a C, a Z, ad Ω e trapezoidali), per le quali i modelli semplificati dei codici sono piuttosto attendibili. È evidente infatti che, il metodo “direct strength”, per le sue caratteristiche peculiari, è particolarmente indicato per lo studio di sezioni trasversali ottimizzate, cioè dotate di molti irrigidimenti e con geometrie anche piuttosto complesse. In aggiunta, occorre sottolineare che la valutazione preliminare del carico critico elastico, che potrebbe sembrare una limitazione operativa di quest’approccio, è oggi facilitata dalla possibilità di utilizzare semplici programmi di calcolo, basati sul metodo delle strisce finite (Schafer, 2001; Papangelis & Hancock, 1995) o sulla teoria generalizzata della trave (Davies & Leach, 1994a e 1994b), che richiedono un modesto impegno computazionale e sono facilmente reperibili.

Di contro, il metodo “direct strength”, per quanto molto interessante, necessita senza dubbio di ulteriori miglioramenti per superare quelle limitazioni che ne restringono l’attuale campo di applicazione. Una di queste, ad esempio, è la mancanza di una valida formulazione del coefficiente ρ_w nel caso in cui il collasso è governato dall’instabilità distorsionale. Inoltre, esso consente esclusivamente la stima della capacità portante di una membratura, trascurando completamente il problema della deformabilità, ossia della determinazione della sua effettiva rigidità. Non è ancora chiaro, infine, come applicare tale metodologia in presenza di sollecitazioni composte (Rusch & Linder, 2001). Ciò detto, va però riconosciuto a tale metodo il merito di aver spinto i progettisti a considerare, sebbene limitatamente ad un’analisi elastica agli autovalori, la sezione (e la membratura) nella sua globalità, senza ricorrere cioè a sub-modelli più o meno semplificati. Lo studio della stabilità elastica, infatti, pur non offrendo informazioni quantitativamente utili sul carico di collasso, è di fondamentale

importanza per l’interpretazione qualitativa del comportamento instabile della membratura e può essere utilizzato con profitto per condurre indagini numeriche finalizzate all’ottimizzazione morfologica dei prodotti cold-formed. In tale direzione, un’estesa analisi parametrica, eseguita mediante l’utilizzo del metodo delle strisce finite, è stata svolta da Fiorino (2000). In Tabella 3 sono riassunti, a titolo di esempio, i risultati ottenuti in tale studio relativamente al problema della determinazione degli irrigidimenti ottimali (per dimensione e posizione) di una lastra compressa o inflessa.

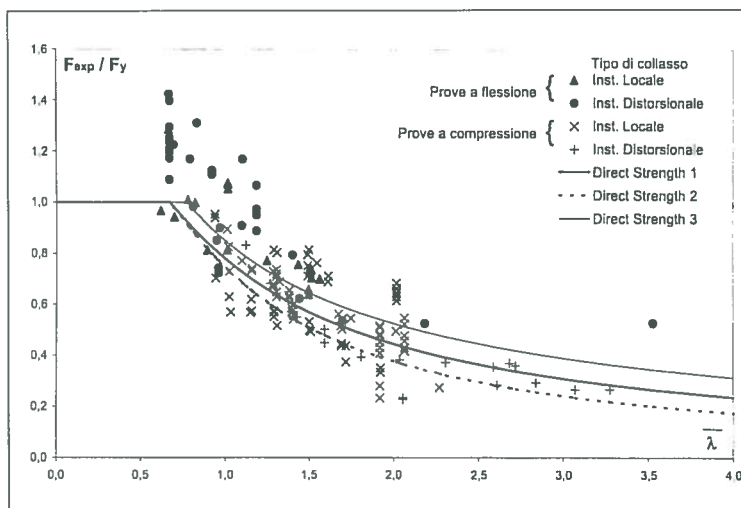


Figura 16: Confronto tra valori sperimentali e curve “direct strength” (Fiorino & Landolfo, 2001)

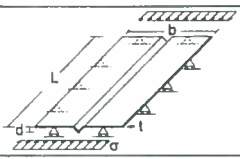
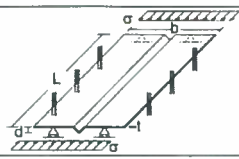
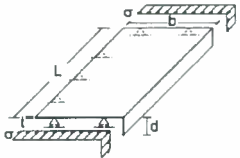
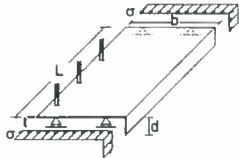
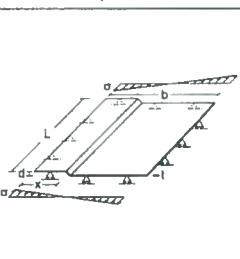
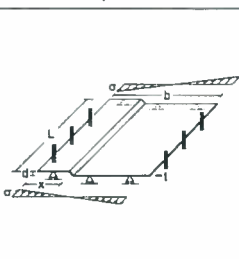
Tipo di irrigidimento	L/b	Rapporti ottimali	Tipo di irrigidimento	L/b	Rapporti ottimali
	≥ 3	$d/b \geq 0.06$ per $b/t \geq 250$		≥ 3	$d/b \geq 0.06$ per $b/t \geq 250$
	$4 + 20$	$d/b = 0.2 + 0.4$ $d/b = 0.2$ per $b/t = 100 \div 500$ $d/b = 0.4$ per $b/t = 12.5 \div 50$		≥ 5	$d/b = 0.2 + 0.4$ $d/b = 0.2$ per $b/t = 50 \div 500$ $d/b = 0.4$ per $b/t = 12.5 \div 25$
	≥ 2	$d/b = 0.01 \div 0.18$ $d/b = 0.01$ per $b/t = 500$ $d/b = 0.18$ per $b/t = 50$ $x/b = 0.1 \div 0.3$ $x/b = 0.2$ per $b/t = 100 \div 500$ $x/b = 0.1 \div 0.3$ per $b/t = 50$		≥ 2	$d/b = 0.02 \div 0.14$ $d/b = 0.02$ per $b/t = 500$ $d/b = 0.14$ per $b/t = 50$ $x/b = 0.25 \div 0.35$ $x/b = 0.25$ per $b/t = 100 \div 500$ $x/b = 0.35$ per $b/t = 50$

Tabella 3: Alcuni esempi di ottimizzazione di lastre irrigidite (Fiorino, 2000)

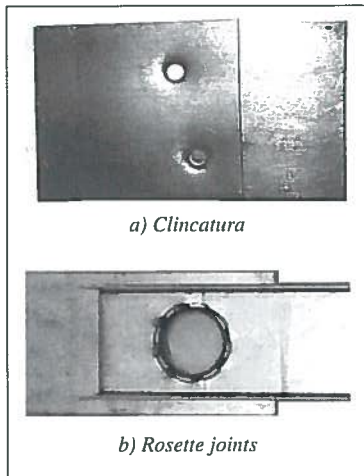


Figura 17: Sistemi di connessione innovativi (Mäkeläinen et al., 1998)

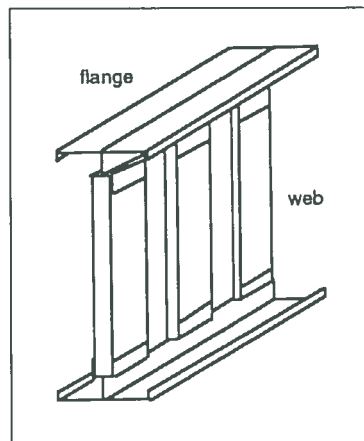


Figura 18: Membratura composta mediante clincatura (Pedreschi, 1999)

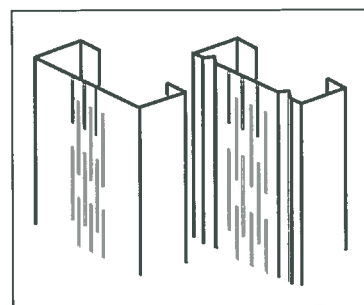


Figura 19: Termo-profilo (Höglund, 1998)

4 LE PROSPETTIVE

4.1 Sistemi Innovativi

La diffusione commerciale che ha caratterizzato la tecnologia dei cold-formed nell'ultimo decennio non è stata accompagnata, purtroppo, da un adeguato sviluppo di nuovi sistemi costruttivi. Solo recentemente il mondo della ricerca, unitamente a quello produttivo, stanno cercando di dare una risposta convincente alla sopracitata richiesta di sviluppo ed innovazione nel campo dei cold-formed. Come sottolineato da Davies (2000), le strategie di progetto seguite in questo processo evolutivo agiscono secondo due principali direttive:

- I. Miglioramento dei fattori tecnologici;
- II. Miglioramento dei fattori prestazionali.

Tra i fattori tecnologici, quelli sui quali appaiono indirizzati maggiormente gli sforzi della ricerca risultano essere: i sistemi di protezione nei riguardi della corrosione superficiale e del fuoco, il processo produttivo e la tecnologia di connessione.

Il miglioramento dei sistemi di protezione svolge certamente un ruolo determinante nel pratico utilizzo dei sistemi cold-formed. Lo sviluppo tecnologico in questo settore mira a realizzare rivestimenti protettivi, sia passivi che attivi, in grado di resistere sempre meglio ai processi di lavorazione a freddo. Analogamente, la possibilità di realizzare profili cold-formed anche molto complessi è sempre più supportata dall'impiego di moderne linee di profilatura che, sfruttando procedure automatizzate, sono in grado di raggiungere e superare, anche per forme molto irregolari, velocità di produzione dell'ordine dei 50 metri al minuto. Allo stesso modo, anche la velocità di assemblaggio dei sistemi cold-formed, necessaria alla riduzione sempre più spinta dei costi di produzione e costruzione, può essere ulteriormente incrementata attraverso l'utilizzo di innovativi sistemi di connessione. Al riguardo, particolarmente efficace e promettente appare la tecnica della clincatura o press-joints (Fig. 17a) che, attraverso la deformazione plastica locale delle lamiere, riesce a connettere le varie parti senza l'utilizzo di organi di connessione e senza danneggiare il rivestimento protettivo (Pedreschi & Shina, 1996). Molto interessante risulta essere anche il sistema Rosette-Joints (Mäkeläinen et al., 1998), che sfrutta il rifollamento locale del materiale in corrispondenza dei bordi di fori circolari per connettere due o più lamiere (Fig. 17b).

Passando ai fattori prestazionali, le prospettive più interessanti sono quelle connesse all'utilizzo di materiali ad alta resistenza ed ai processi di ottimizzazione della forma. Relativamente al primo aspetto, va sottolineato che la particolare risposta strutturale dei sistemi cold-formed, spesso condizionata in modo determinante dai fenomeni di instabilità locale caratterizzati da comportamento post-critico stabile, ben si presta all'adozione di materiali sempre più resistenti. Tale trend appare confortato anche dalle più recenti prescrizioni normative che consentono l'utilizzo di acciai microlegati ad alta resistenza, le cui tensioni di snervamento possono raggiungere e superare abbondantemente i 550 N/mm² (CEN EN 1993-1-3, 2001). L'ottimizzazione della forma, ovvero la possibilità di generare sezioni trasversali sempre più razionali ed efficaci, ha caratterizzato sia le membrature (arcarecci) che le lamiere grecate, attraverso un processo evolutivo che ha consentito di ottenere tre generazioni di elementi (Davies, 2000; Landolfo & Mazzolani, 1990b).

Molteplici sono, infine, gli esempi di sistemi costruttivi innovativi cold-formed la cui concezione è basata sulle due strategie progettuali sopraindicate. Tra le membrature ad alta tecnologia un primo esempio

emblematico è rappresentato dalla Light-Weight Steel Beam (Fig. 18), studiata in Scozia presso l'Università di Edimburgo (Pedreschi, 1999). Tale membratura si presenta come una trave a parete piena a sezione composta, realizzata assemblando quattro semi-flange ad un'anima dotata di profilo corrugato. I vari componenti, realizzati con lamiera formate a freddo in acciaio dolce dello spessore di 2 mm, sono assemblati attraverso clinatura. Il termostato (Fig. 19) rappresenta invece un esempio di membratura cold-formed che si caratterizza per la sua attitudine a ridurre i ponti termici presenti nei sistemi portanti di perimetro (wall studs) utilizzati nell'housing (Höglund, 1998). Esso è costituito da un profilo a C nella cui anima sono presenti una serie di fori ovalizzati la cui presenza rallenta il flusso termico che tende a trasmettersi da un'ala all'altra del profilo. Tra i sistemi bidimensionali ad alta tecnologia, meritano di essere citate le Cassette Wall Systems (Fig. 20). Tali elementi, utilizzati generalmente come struttura portante verticale in costruzioni che adottano la tecnologia dei sistemi a pannelli, sono realizzati semplicemente assemblando in successione profili a C, orditi verticalmente e dotati di irrigidimento di bordo (Davies, 1998b).

Anche per il superamento di grandi luci, molteplici sono le possibilità offerte dai sistemi cold-formed. Una prima strategia consiste nel realizzare sistemi reticolari i cui componenti, tutti piegati a freddo, sono concepiti in modo tale da ricercare il giusto compromesso tra aspetti prestazionali e tecnologici. Un esempio al riguardo è costituito dalle Light-Weight Steel Roof Truss (Fig. 21), studiate in Finlandia presso l'Università di Helsinki (Mäkeläinen & Kaitila, 1999). Si tratta in particolare di una trave reticolare piana, realizzata utilizzando per i correnti profili ad Ω e per le aste di parete profili tubolari semi-aperti. Tutti gli elementi del sistema sono assemblati mediante rosette joints. Membrature ad alte prestazioni che utilizzano la tecnologia cold-formed sono anche quelle in corso di studio presso l'Università di Chieti (Landolfo & Di Lorenzo, 2001). Esse si presentano come un sottosistema strutturale generato dall'accoppiamento "back-to-back" di due semiprofilati a C formati a freddo, così da formare un'unica sezione trasversale simmetrica a doppio T (Fig. 22). I due semiprofilati, ottenuti combinando tecniche di profilatura a quelle di stampaggio, sono collegati tra loro mediante organi meccanici, direttamente in corrispondenza dell'anima ed indirettamente, attraverso piastre di imbottitura, in corrispondenza delle ali. Tali membrature, sfruttando le prerogative sia delle travi reticolari che in parete piena, si caratterizzano per le elevate prestazioni strutturali che ne consentono l'impiego in campi di applicazione sino ad ora accessibili unicamente ai laminati a caldo o ad altre tecnologie strutturali.

Tra gli elementi bidimensionali ad alte prestazioni, accanto alle lamiera grecate di terza generazione (Landolfo & Mazzolani, 1990b), vanno infine menzionate le più recenti lamiera grecate calandrate (Caramelli et al., 2001), che si caratterizzano per un uso generalizzato dell'effetto forma riguardante sia la sezione che l'elemento stesso (Fig. 23).

4.2 L'uso dei cold-formed in zona sismica

Tra le prospettive generali dei sistemi cold-formed, una delle più interessanti, anche per le possibili ricadute in termini economici, è certamente quella legata alla possibilità di un loro impiego nella realizzazione di strutture sismoresistenti. Le membrature cold-formed infatti, essendo generalmente caratterizzate da elevati valori della snellezza locale, presentano capacità rotazionali significativamente minori di quelle offerte dai profili laminati a caldo e sono caratterizzate da un marcato degrado delle proprietà meccaniche in presenza di sollecitazioni cicliche (Fig. 24). Per tale motivo molte normative, tra cui la normativa sismica europea (CEN ENV 1998-1-1, 1994), vietano l'uso dei profili formati a freddo nelle zone dissipative della struttura, limitandone quindi l'uso alle sole strutture non dissipative. Tale restrizione, pur non escludendo

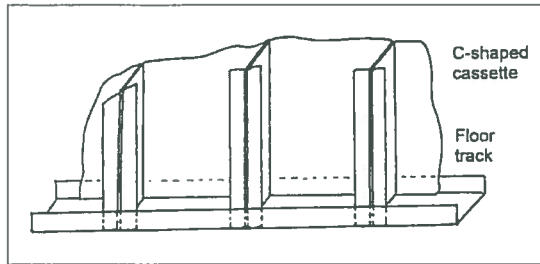


Figura 20:
Pannelli a cassette
(Davies, 1998b)

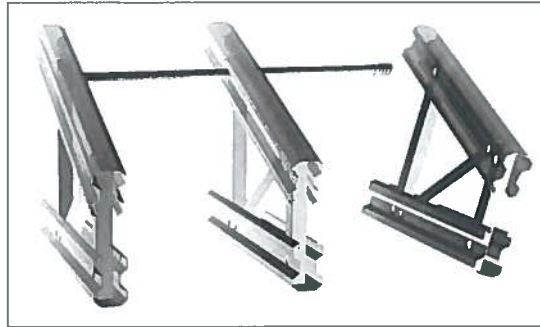


Figura 21: Trave
reticolare
realizzata
mediante rosette
joints (Tekes,
2001)

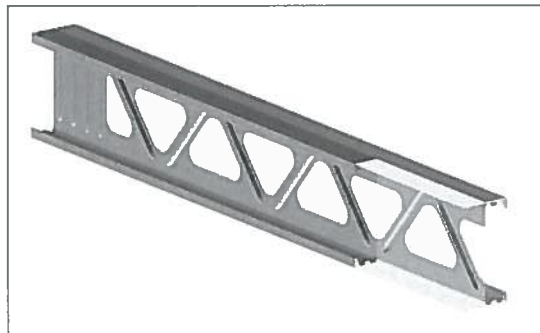


Figura 22:
Membratura cold-
formed ad alte
prestazioni
(Landolfo & Di
Lorenzo, 2001)

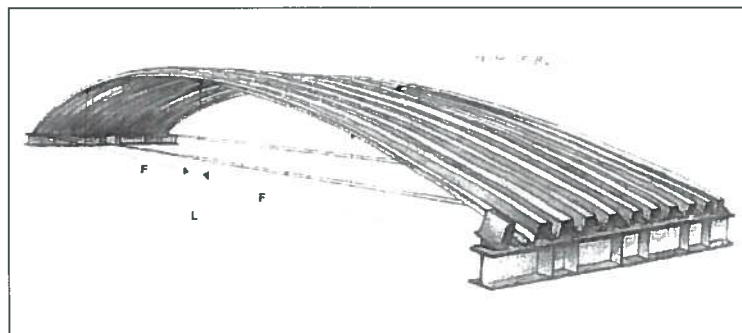


Figura 23:
Lamiera grecate
calandrate
(Caramelli et al.
2001)

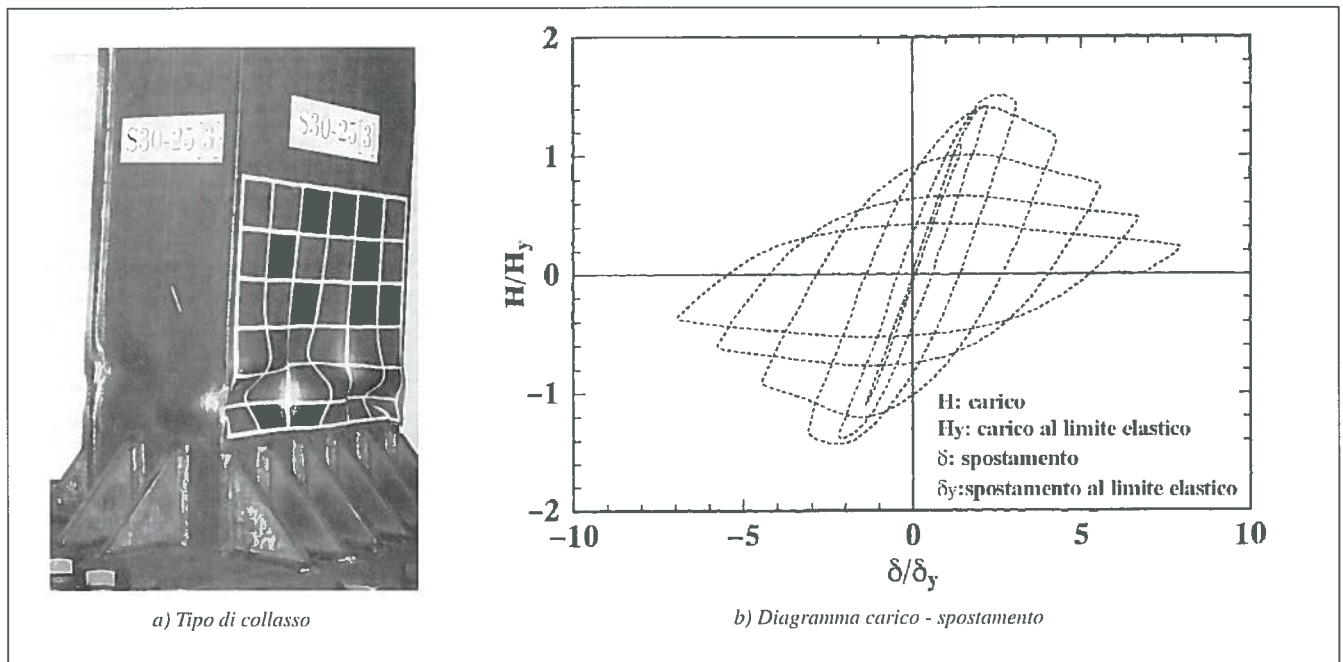


Figura 24:
Comportamento
ciclico di una
colonna scatolare
in parete sottile
(Zheng et al.,
2000)

formalmente l'utilizzo di tali profili, ne determina di fatto una eccessiva penalizzazione poiché impone un progettazione elastica anche nei confronti di un terremoto distruttivo (fattore di struttura $q = 1$).

Per contro, diversi studi sperimentali condotti con riferimento a sezioni a C ed a cassone (Ono & Suzuki, 1986; Zheng et al., 2000) hanno fornito risultati incoraggianti, motivando la ricerca in tale direzione, soprattutto con riferimento ad applicazioni strutturali in zone di sismicità medio-bassa. Al riguardo, ricerche teoriche svolte recentemente presso l'Università di Napoli hanno evidenziato che il degrado di resistenza per effetto dell'instabilità locale può essere accettato entro certi limiti, giungendo anche ad una proposta per il fattore di struttura q da adottare nel progetto di queste tipologie strutturali (Calderoni et al., 1999).

Una ulteriore spinta all'uso dei cold-formed come valida alternativa ai profili tradizionali, almeno in zone con sismicità non elevata, è scaturita dai risultati dei numerosi studi svolti con riferimento al comportamento sismico dei telai di acciaio realizzati con laminati a caldo. Tali studi (Della Corte et al., 2000) hanno infatti inequivocabilmente dimostrato che, per le intensità sismiche Europee, la duttilità locale offerta dai laminati a caldo non è completamente sfruttata, cioè le deformazioni plastiche richieste sono sensibilmente minori di quelle offerte. Ciò accade solitamente perché, per queste strutture, la verifica allo stato limite di servizio (deformabilità laterale) è solitamente più gravosa di quella allo stato limite ultimo, il che conduce ad una struttura finale significativamente sovrar resistente e per la quale le richieste di deformazione plastica sono di gran lunga minori di quelle offerte dalle membrature. Alla luce delle precedenti considerazioni appare particolarmente interessante ed attraente il possibile ricorso all'impiego dei sistemi cold-formed nelle strutture sismoresistenti, soprattutto per la possibilità di "dosare" nel modo più conveniente le snellezze. In aggiunta, va sottolineato che l'adozione di membrature cold-formed produce solitamente una notevole riduzione in peso, con conseguente riduzione delle forze sismiche in ingresso.

Ovviamente tali ricerche, per quanto incoraggianti, costituiscono solo un primo approccio alla problematica dell'impiego dei profili piegati a freddo in zona sismica, soprattutto per la mancanza di una valutazione analitica oggettiva, ossia confortata da chiari e documentati risultati sperimentali, delle massime intensità sismiche compatibili con prefissati livelli di snellezze locali. In tale spirito, è recentemente iniziato, in collaborazione tra l'Università di Chieti e l'Università di Napoli, un nuovo programma di ricerca teorico-sperimentale dal titolo "Studio teorico-sperimentale sulle possibilità di impiego dei profili di acciaio formati a freddo in zona sismica".

La parte teorica della ricerca sarà, in primo luogo, finalizzata allo sviluppo di un modello matematico, capace di seguire la risposta di membrature cold-formed anche in campo post-critico. Questo modello di comportamento locale sarà in seguito implementato in un codice per l'analisi sismica di strutture intelaiate. Parallelamente, saranno condotte prove sperimentali che costituiranno, allo stesso tempo, lo stimolo e lo strumento di verifica dei risultati acquisiti in sede teorica. Anche la campagna di indagini sperimentali, in accordo con l'analisi teorica, sarà eseguita sia su singoli elementi strutturali che su telai monopiano. In tal modo, il codice numerico sviluppato nella fase teorica sarà adeguatamente testato e calibrato.

5 CONCLUSIONI

Il dualismo tra aspetti scientifici e tecnologici, ovvero l'intricato rapporto esistente tra il calcolo e l'applicazione, ha segnato la diffusione dei sistemi cold-formed nel mercato globale delle costruzioni.

Nei riguardi degli aspetti tecnologici, l'analisi critica dello stato dell'arte ha evidenziato come la diffusione commerciale che ha caratterizzato i cold-formed nell'ultimo decennio, favorita essenzialmente da motivazioni di carattere economico, non sia stata accompagnata, purtroppo, da un adeguato sviluppo di nuovi si-

stemi costruttivi. Solo di recente il mondo della ricerca, unitamente a quello produttivo, hanno cercato di dare una risposta convincente alla sempre crescente richiesta di innovazione, basandosi su strategie progettuali finalizzate al massimo sfruttamento delle prerogative tecnologiche e prestazionali, tipiche dei formati a freddo. Parallelamente, notevoli progressi sono stati registrati tra le metodologie di calcolo, soprattutto nella direzione di una migliore interpretazione della reale risposta di tali sistemi, condizionata dai fenomeni instabili globali, locali e distorsionali.

Nonostante gli sforzi sino ad ora compiuti dal mondo scientifico e produttivo, ulteriori iniziative appaiono necessarie ed auspicabili per attenuare il gap esistente tra la componente scientifica e quella tecnologica. L'annullamento di tale divario potrebbe infatti condurre, nel breve termine, alla completa affermazione dei sistemi cold-formed analizzati, anche in quei settori sino ad ora prerogativa di altre tipologie costruttive, come ad esempio nel campo delle strutture sismo-resistenti di tipo dissipativo.

BIBLIOGRAFIA

- AISI (1996). American Iron and Steel Institute. Cold-formed steel design manual.
- AISI (1997). American Iron and Steel Institute. Residential steel framing manual.
- AS/NZS 4600 (1996). Australian Standards/New Zealand Standards. Cold-formed steel structures.
- Ballio G. & Mazzolani F.M. (1987). Strutture in acciaio, Hoepli, Milano.
- Calderoni B., De Martino A., Landolfo R. (1999). Il comportamento sismico di telai in profili sottili: limiti di servizio e definizione del fattore di struttura. Costruzioni metalliche 2.
- Caramelli S., Cecconi A., Croce P., Ristori F., Salvatore W. (2001). Analisi sperimentale di coperture a volta cilindrica in lamiera grecata calandrata. XVIII Congresso CTA, Vol.2, Venezia.
- CEN ENV 1993-1-1 (1992). Eurocodice 3: Progetto di strutture in acciaio - Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici.
- CEN ENV 1993-1-3 (1996). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting.
- CEN EN 1993-1-3 (2001). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting. (1st Draft).
- CEN ENV 1998-1-1 (1994). Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1-1: Seismic action and general requirements of structures.
- CEN ENV 1999-1-1 (1998). Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General rules.
- CEN prENV 1999-1-3 (1999). Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for thin-walled aluminium sheeting. (internal document).
- CNR UNI 10022 (1984). Profili di acciaio formati a freddo. Istruzione per l'impiego nelle costruzioni.
- Coskun H. (1999). Design consideration for light gauge steel profiles in building construction. 4th international conference on steel and aluminum structures - IC-SAS'99, Helsinki.
- Davies J.M. (1998a). Light gauge steel framing for housing construction. 2nd International conference on thin-walled structures, Singapore.
- Davies J.M. (1998b). Light gauge steel cassette wall construction. Nordic steel construction conference '98, Bergen.
- Davies J.M. (2000). Recent research advances in cold-formed steel structures. Journal of construction steel research, Vol.55.
- Davies J.M. & Jiang C. (1996a). Design of thin-walled columns for distortional buckling. 2nd International conference on coupled instabilities in metal structures - CIMS '96, Liege.
- Davies J.M. & Jiang C. (1996b). Design of thin-walled beams for distortional buckling. 13th International specialty conference on cold-formed steel design and construction, St. Louis, Missouri.
- Davies J.M. & Leach P. (1994a). First-order generalised beam theory. Journal of construction steel research, Vol.31.
- Davies J.M. & Leach P. (1994b). Second-order generalised beam theory. Journal of construction steel research, Vol.31.
- Della Corte G., De Matteis G., Landolfo R., Mazzolani F.M., (2000). Seismic analysis of MR steel frames based on refined hysteretic models of connections. Journal of constructional steel research (in corso di stampa).
- ECSC (2001), European Coal and Steel Community. Design tools and new applications of cold formed steel in building. Final report. (Draft).
- Fiorino L. (2000). Il metodo "direct strength" per il progetto di profili "cold-formed" in acciaio (Tesi di Laurea). Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale, Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli "Federico II".
- Fiorino L. & Landolfo R. (2001). Il metodo "direct strength" per la progettazione di membrature in parete sottile formate a freddo in acciaio. XVIII Congresso CTA, Vol.2, Venezia.
- Gherzi A. & Landolfo R. (1992). Aspetti innovativi dell'EC3 nella verifica di aste in parete sottile formate a freddo. Costruzioni metalliche 5.
- Gherzi A. & Landolfo R., Mazzolani F.M. (2001). Design of metallic cold-formed thin-walled members, E & FN Spon, London.
- Hancock G.J. (1997a). Light gauge construction. Progress in structural engineering and material, Vol.1 (1).
- Hancock G.J. (1997b). Design for distortional buckling of flexural members. Thin-walled structures, Vol.27.
- Höglund T. (1998). Design of light-gauge studs with perforate web. Nordic steel construction conference '98, Bergen.
- Kesti J. & Davies J.M. (1999). Local and distortional buckling of thin-walled short columns. Thin-walled structures, Vol.34.
- Landolfo R. (1992). Sul comportamento flessionale dei profili sottili formati a freddo (Tesi di Dottorato). Biblioteche Nazionali di Roma e Firenze.
- Landolfo R. (2000). Coupled instabilities in non linear materials. 3rd International conference on coupled instabilities in metal structures - CIMS 2000, Lisbon.
- Landolfo R. (2002). Le costruzioni d'acciaio. In Le strutture in architettura, Editrice Compositori, Bolo-

gna (in corso di stampa).

Landolfo R. & Di Lorenzo G. (2001). Una nuova generazione di membrane leggere formate a freddo. XVIII Congresso CTA, Vol.2, Venezia.

Landolfo R. & Mazzolani F.M. (1990a). Sur le comportement au flambement des profils tubulaires formés à froid. *Construction Métallique* 4.

Landolfo R. & Mazzolani F.M. (1990b). Behavior of 3rd generation of trapezoidal steel sheeting, In *Testing of metals for structures* (ed. Mazzolani F.M.), E & FN Spon, London.

Lau S.C.W. & Hancock G.J. (1987). Distortional buckling formulas for channel columns. *Journal of structural engineering*, Vol.113 (5).

Lawson R.M. (1996). Residential applications of light steel frames in the UK and continental Europe. 5th International colloquium structural stability research concilium - SSRC, Chicago.

Lawson R.M. & Ogden R.G. (2001). Recent developments in the light steel housing in the UK. 9th North steel conference of construction institute, Helsinki.

Mäkeläinen P. & Kaitila O. (1999). Study of the behavior of a new light-weight steel roof truss. 4th international conference on steel and aluminum structures - IC-SAS'99, Helsinki.

Mäkeläinen P., Kesti J., Kaitila O. (1998). Advanced method for light-weight steel truss joining. Nordic steel construction conference '98, Bergen.

Mazzolani F.M. & Landolfo R. (2002). Le strutture metalliche. In *Introduzione all'ingegneria delle strutture* (ed. Giangreco E.), UTET, Torino. (in corso di stampa).

NAHB-HUD (1999). National Association of Home Builder, Department of Housing and Urban Development. Builders' guide to residential steel floors.

NASFA (2000). North American Steel Framing Alliance. Prescriptive method for residential cold-formed steel framing.

Ono T. & Suzuki T. (1986). Inelastic behaviour and earthquake resistance design method for thin-walled metal structures. IABSE Coll. on thin-walled metal structures in building, Stockholm.

Papangelis J.P. & Hancock G.J. (1995). Computer analysis of thin-walled structural members. *Computer and structures*, Vol.56 (1).

Pedreschi R. F. (1999). Design and development of a cold-formed lightweight steel beam. 4th international conference on steel and aluminum structures - IC-SAS'99, Helsinki.

Pedreschi R.F. & Sinha B.P. (1996). The potential of press-joining in cold-formed steel structures. *Construction and building materials*, Vol.10.

Pedreschi R.F., Sinha B.P., Davies R., (1997). Recent research advances in cold-formed steel structures. *Journal of structural engineering*, Vol.123 (2).

Pedrazzi F.L.M. & Lozano S. (1998). The development of light weight steel structures for housing in Argentina. *Journal of constructional steel research*, Vol.46.

Peköz T. (1987). Development of a unified approach to the design of cold-formed steel members. American Iron and Steel Institute, Report CF 87-1.

Rusch A. & Linder J. (2001). Remarks to the direct strength method. Thin-walled structures, Vol.39.

Schafer B.W. (2001). CU-FSM: Cornell University Finite strip method. Software e tutorials. <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/index.htm>.

Schafer B.W. & Peköz T. (1998). Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solution. 2th International conference on thin-walled structures, Singapore.

Schafer B.W. & Peköz T. (1999). Local distortional buckling of cold-formed steel members with edge stiffened flanges. 4th International conference on steel and aluminium structures - ICSAS '99, Helsinki.

Schuster R.M. (1996). Residential applications of cold-formed steel members in North America. 5th International structural stability research concilium - SSRC, Chicago.

Tekes (2001). National Technology Agency of Finland. Finnsteel technology programme 1995-2000 - Final report.

Walker A.C. (ed.) (1975). Design and analysis of cold-formed sections, Intertext, London.

Yu W.W. (2000). Cold Formed Design (3rd Edition), John Wiley & Sons, New York.

Zheng Y., Usami T., Ge H. (2000). Ductility evaluation procedure for thin-walled steel structures. *Journal of structural engineering*, Vol.126 (11).