

# GRISPE PLUS



VALORISATION OF KNOWLEDGE  
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

**WP N°: 3**

**WP Title: eLectures**

**Deliverable N°: 3.1 (4)**

**Deliverable Title: Manuale di progettazione per lamiere curve**

**Deliverable Date: 30 june 2018**

**The GRISPE PLUS project has received financial support  
from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS)  
under grant agreement N° 754092"**

**Author(s)**

*Walter SALVATORE, Silvia CAPRILI, Irene PUNCELLO  
University of Pisa – Dept. of Civil and Industrial Engineering*

**Drafting history**

*FINAL DRAFT – DATE: 15<sup>th</sup> of July 2018*

*FINAL VERSION – DATE: 15<sup>th</sup> of July 2018*

**Dissemination Level**

<i>PU</i>	<i>Public-Open</i>	<b>X</b>
<i>PP</i>	<i>Restricted to the Commission Services, the Coal and Steel Technical Groups and the European Committee for Standardisation (CEN)</i>	
<i>RE</i>	<i>Restricted to a group specified by the Beneficiaries</i>	
<i>CO</i>	<i>Confidential, only for Beneficiaries (including the Commission services)</i>	

# GRISPE PLUS

VALORISATION OF KNOWLEDGE  
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

## **MANUALE DI PROGETTAZIONE PER PROFILI CURVI**

**Finanziato dal fondo RFCS– contratto di sovvenzione N°  
754092**

VERSIONE FINALE

## **Disclaimer notice and EU acknowledgement of support**

### **Disclaimer notice**

**By making use of any information or content in this manual you agree to the following:**

#### **No warranties**

All the information or content provided in this manual is provided "as is" and with no warranties. No express or implies warranties of any type, including for example implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, are made with respect to the information or content, or any use of the information or content in this manual.

The authors make no representations or extend no warranties of any type as to the completeness, accuracy, reliability, suitability or timeliness of any information or content in this manual.

#### **Disclaimer of liability**

This manual is for informational purposes only. It is your responsibility to independently determine whether to perform, use or adopt any of the information or content in this manual.

The authors specifically disclaim liability for incidental or consequential damages and assume no responsibility or liability for any loss or damage suffered by any person because of the use or misuse of any of the information or content in this manual.

The authors will not be liable to you for any loss or damage including without limitation direct, indirect, special or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from loss of data or loss of business, production, revenue, income, profits, commercial opportunities, reputation or goodwill, arising out of, or in connection with, the use of the information or content in this manual.

The authors do not represent, warrant, undertake or guarantee that the use of the information or content in this manual will lead to any particular outcome or results.

#### **Reasonableness**

By using this manual, you agree that the exclusions and limitations of liability set out in this disclaimer are reasonable. If you do not think they are reasonable, you must not use this manual.

#### **Severability**

If any part of this disclaimer is declared unenforceable or invalid, the remainder will continue to be valid and enforceable.

***"The information and views set out in this/these manual/guidelines are those of the authors and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information or views contained therein"***

### **EU acknowledgement of support**

The GRISPE Plus project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement No. 754092.

Lo scopo di questo manuale di progettazione è di presentare un nuovo metodo di calcolo per i *profili curvi*, così come sviluppato all'interno del progetto europeo GRISPE PLUS.

Il manuale si basa in generale sui principi contenuti nell'Eurocodice e, in particolare, negli Eurocodici EN 1993-1-3 e EN 1993-1-5.

Questo nuovo metodo di progettazione per impalcati in acciaio con rilievi è basato sugli esperimenti condotti all'interno del progetto europeo GRISPE (2013- 2016).

Il quadro generale di questo metodo è descritto nell'allegato 1.

Più nel dettaglio:

Il **capitolo 1** descrive il tipo di profili interessati, lo stato dell'arte, i principali risultati di ricerca del progetto GRISPE e i requisiti e le regole generali di progettazione;

Il **capitolo 2** delinea le considerazioni preliminari che devono essere prese in considerazione durante le fasi di pre-dimensionamento, compresa, in particolare, la verifica del campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione.

Il **capitolo 3** stabilisce i requisiti tecnologici che devono essere rispettati, compresi il telaio di supporto, le caratteristiche dei profili e gli assemblaggi.

Il **capitolo 4** elenca le proprietà dei materiali dei profili.

Il **capitolo 5** specifica la determinazione di azioni e combinazioni che devono essere prese in considerazione nella progettazione.

Il **capitolo 6** spiega nel dettaglio il nuovo metodo di progettazione (principi, campo di applicazione e descrizione di come applicare le nuove formule).

Il **capitolo 7** elenca le specifiche considerazioni progettuali non coperte dal manuale (Antincendio, sismica, aspetti ambientali, termica, acustica).

Il **capitolo 8** illustra un esempio applicativo.

È inclusa inoltre una bibliografia.

## **NOTE IMPORTANTI**

*I dati sperimentali sono stati elaborati e forniti da Rainer Holz, IFL –ING LEICHTBAU, e da Daniel Ruff e Christian Fauth, KIT –KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY.*

## **PREFAZIONE**

Questo manuale di progettazione è stato realizzato con il supporto del finanziamento n° **754092** del fondo europeo RFCS (Research Fund for Coal and Steel).

Questo nuovo metodo di progettazione è stato presentato al gruppo di lavoro del EN 1993-1-3 nel 2016-2017 ed è stato preso in considerazione per l'inclusione negli Eurocodici.

Questo manuale di progettazione è stato scritto da Mickaël BLANC ed è stato discusso in un gruppo di lavoro GRISPE PLUS composto dai seguenti membri:

Mickael BLANC	France
Silvia CAPRILI	Italy
David IZABEL	France
Markus KUHNENNE	Germany
Anna PALISSON	France
Valérie PRUDOR	France
Irene PUNCELLO	Italy
Dominik PYSCHNY	Germany
Thibault RENAUX	France
Walter SALVATORE	Italy
Daniel SPAGNI	France

Corresponding members have included:

Léopold SOKOL	France
---------------	--------

## FIGURES AND TABLES

Le figure sono state fornite dalle seguenti fonti:

Figura 1.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.4	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.6	sito internet <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/File:Roll_forming.png">https://en.wikipedia.org/wiki/File:Roll_forming.png</a>
Figura 1.7	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.8	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.9	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.10	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 1.11	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 6.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 6.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 8.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 8.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 8.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Figura 8.4	editata dal software SAP2000
Figura 8.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Tabella 1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Tabella 2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE
Tabella 3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – progetto GRISPE



## **INDICE**

SCOPO DELLA PUBBLICAZIONE .....	11
NOTAZIONI .....	12
1. INTRODUZIONE .....	13
1.1. Tipologia di lamiere curve trattate .....	13
1.2. Stato dell'arte .....	14
1.3. Principali risultati del progetto GRISPE .....	14
1.4. Regole e requisiti di progettazione generale .....	18
2. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI: FASE PRE-PROGETTUALE .....	19
2.1. Campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione .....	19
3. REQUISITI TECNOLOGICI DI BASE .....	19
3.1. Requisiti per lamiere sagomate e marcatura CE .....	19
4. PROPRIETÀ DEI MATERIALI .....	19
4.1. Lamiere in acciaio .....	19
5. AZIONI E COMBINAZIONI DI CARICO .....	20
6. REGOLE BASE DI PROGETTAZIONE .....	20
6.1. Principi .....	20
6.2. Campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione .....	20
6.3. Procedura di progettazione .....	20
6.3.1. Configurazione a campata singola senza supporti orizzontali: calcolo della capacità a flessione .....	20
6.3.2. Configurazione a campata singola con supporti orizzontali: calcolo della capacità a flessione .....	21
7. CONSIDERAZIONI DI PROGETTAZIONE SPECIFICA .....	24
7.1. Situazioni non coperte dal presente Manuale .....	24
8. ESEMPIO DI PROGETTAZIONE .....	25
8.1. Spiegazione della procedura di progettazione .....	25
8.1.1. Campata singola senza supporti orizzontali .....	26
8.1.2. Campata singola con supporti orizzontali .....	27
9. BIBLIOGRAPHY .....	33

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1 Lamiere curve ottenute tramite roll forming (variante A).....	13
Figura 1-2 Lamiere curve ottenute tramite rottura della flangia interna (variante B). ....	13
Figura 1-3 Lamiere curve ottenute tramite processo di piegatura effettuato in situ (variante C).....	13
Figura 1-4: Sezione strutturale del profilo sinusoidale. ....	14
Figura 1-5: Sezione trasversale del profilo trapezoidale. ....	14
Figura 1-6 Processo di roll-forming. ....	15
Figura 1-7: Parametri dei profili curvi.....	16
Figura 1-8: Configurazione del test su campata singola. ....	17
Figura 1-9: Immagine della configurazione del test su campata singola. ....	17
Figura 1-10: Immagine della configurazione del test su campata singola (profilo 18/76). .....	17
Figura 1-11: Immagine della configurazione del test su campata singola con supporto orizzontale (profilo 39/333). ....	18
Figura 6-1: Esempio di modello semplice con molla orizzontale. ....	22
Figura 6-2: lunghezza critica secondo DIN 18 800 - 2. ....	24
Figura 8-1: Configurazione di campata singola senza supporti orizzontali.....	25
Figura 8-2: Configurazione di campata singola con supporti orizzontali.....	25
Figura 8-3: Dimensioni geometriche del modello. ....	27
Figura 8-4: Esempio di un modello semplice con molle orizzontali.....	29
Figura 8-5: coefficiente b della lunghezza di instabilità da DIN 18800 – 2. ....	30

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Prove effettuate. ....	16
Tabella 2: Deflessione rappresentativa in mezzeria ad un livello di carico caratteristico $F_{u,k}$ .....	23
Tabella 3: Forze interne e inflessione dell'arco soggetto a carico caratteristico di collasso .....	29

## **SCOPO DELLA PUBBLICAZIONE**

Lo scopo di questa pubblicazione è presentare un nuovo metodo di progettazione per profili curvi che è stato proposto per l'inserimento nell'Eurocodice EN 1993-1-3.

Questo manuale di progettazione tratta situazioni che si verificano in condizioni ordinarie.

Per questioni specifiche (ad es. in presenza di aperture) o per situazioni eccezionali di carico/azioni (sisma, incendio, ecc.) è necessario seguire le clausole pertinenti degli Eurocodici e/o delle EN 1090-4.

## NOTAZIONI

I simboli seguenti sono usati all'interno del manuale:

$t_N$	spessore di progetto
$R$	raggio di curvature
$b$	lunghezza dell'arco
$L$	lunghezza della campata
$f$	altezza
$\beta$	coefficiente della lunghezza di instabilità
$\alpha[^\circ]$	angolo di curvatura
$N_D$	valore di progetto della forza di compressione
$M$	valore di progetto del momento flettente
$M_d$	resistenza di progetto al momento flettente
$N_{dD}$	resistenza di progetto allo sforzo normale
$\max N_{dD}$	ideal buckling force
$ult N_{dD}$	critical buckling force
$\alpha$	rapporto di snellezza
$L_{cr}$	lunghezza di instabilità
$i_{ef}$	raggio di rotazione della sezione trasversale efficace
$\sigma_{cd}$	sforzo di compressione di progetto
$A_{ef}$	area della sezione trasversale efficace per la compressione assiale
$\sigma_{elg}$	sforzo di compressione euleriana per la sezione lorda
$A_g$	area della sezione lorda
$M_{c,Rk,F}$	momento flettente caratteristico in campata
$F_{u,k}$	carico caratteristico
$b_V$	larghezza del provino
$L_V$	lunghezza della campata
$L$	lunghezza del provino
$s$	lunghezza di metà arco
$g$	peso- proprio del provino
$f_{max}$	inflessione verticale nel punto medio
$F_u$	carico di collasso della prova sperimentale
$C_{f,i}$	rigidezza complessiva del provino
$C_f$	valore medio ottenuto dalle prove eseguite a stessa tipologia di provini, considerato rappresentativo per una famiglia di provini
$f_{eq}$	inflessione verticale equivalente nel punto medio, rappresentativa per una famiglia di provini
$C_{ind}$	rigidezza della molla del support orizzontale
$f_{yk}$	tensione di snervamento caratteristica

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1. Tipologia di lamiere curve trattate

Questo manuale di progettazione tratta le lamiere curve in acciaio.

Generalmente, questa tipologia di profili può essere ottenuta tramite tre diversi processi di curvatura:

- Profilatura diretta (roll-forming) (Figura 1-1)
- Piegatura della flangia interna (Figura 1-2)
- Processo di piegatura effettuato in situ (Figura 1-3)

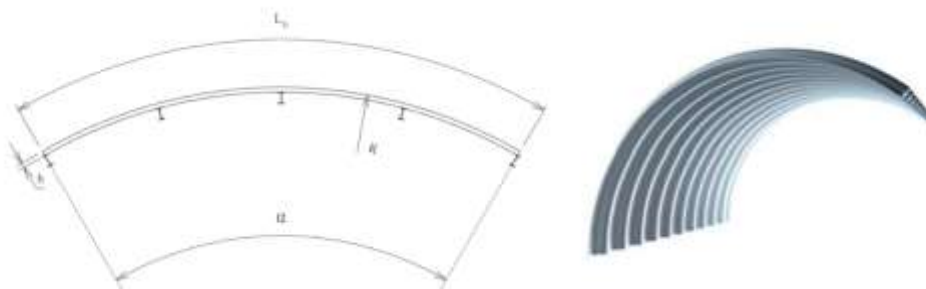


Figura 1-1 Lamiere curve ottenute tramite roll forming (variante A).

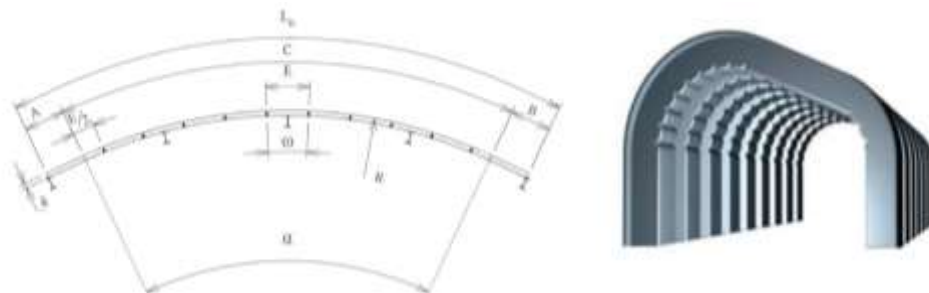


Figura 1-2 Lamiere curve ottenute tramite rottura della flangia interna (variante B).

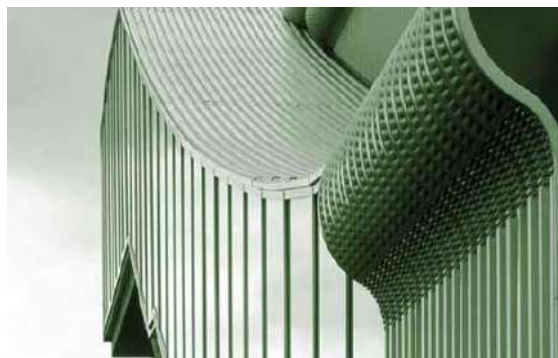


Figura 1-3 Lamiere curve ottenute tramite processo di piegatura effettuato in situ (variante C).

Nel presente manuale di progettazione verranno analizzate solo le prestazioni strutturali delle **lamiere curve ottenute mediante un processo di piegatura** (roll-forming, VARIANTE A). La prestazione strutturale deve essere valutata con riferimento alla capacità portante dei corrispondenti profili piani.

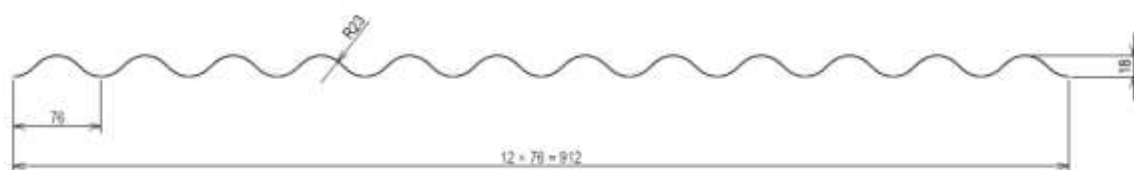


Figura 1-4: Sezione strutturale del profilo sinusoidale.

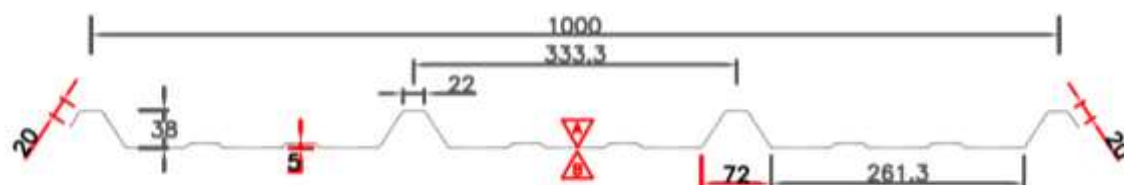


Figura 1-5: Sezione trasversale del profilo trapezoidale.

## 1.2. Stato dell'arte

La capacità di carico a flessione dei profili ottenuti tramite piegatura della flangia interna (variante B) non è stata giudicata rilevante ai fini dello scopo del progetto di ricerca GRISPE in quanto i profili ottenuti tramite questo processo sono solitamente associati a piccole campate.

Allo stesso modo, i profili ottenuti attraverso il "processo di piegatura in situ" (variante C) non sono stati presi in considerazione in quanto, essendo abitualmente associati a un raggio di curvatura molto ampio, possono essere progettati in accordo con quanto previsto dalla EN 1993-1: 2005 per le lamiere piane. Per loro, non è pertanto previsto alcun cambiamento nella capacità portante rispetto ai profili convenzionali.

Questo manuale di progettazione, come anticipato, è quindi focalizzato sui soli profili ottenuti attraverso il processo di roll-forming (variante A).

L'influenza delle tensioni residue dovute ai processi di produzione è stata investigata in passato presso il centro di ricerca su acciaio, legno e muratura in Germania, grazie all'esecuzione di un'ampia campagna di test sperimentali. In accordo con la DIN 18807-2, sono state eseguite numerose prove su profili trapezoidali curvi, forniti da diversi produttori, il cui raggio di curvatura variava tra 4m 19m e i cui supporti non erano entrambi fissi. La differenza di capacità di curvatura misurata tra un profilo piatto e un profilo curvo era risultata compresa tra lo zero e il dieci per cento.

I dati presenti nella attuale letteratura scientifica attribuiscono una variazione della capacità portante dei profili curvi rispetto ai profili piatti che va, circa, dal 20% (flangia stretta in compressione) al 30% (flangia larga in compressione) [1].

Vale la pena notare che se entrambi i supporti sono fissi il profilo si comporta come un arco.

## 1.3. Principali risultati del progetto GRISPE

Come detto in precedenza, lo studio si concentra sui profili curvati durante la produzione mediante piegatura/roll-forming. Il processo di roll-forming comporta la piegatura continua di una lunga striscia di lamiera (tipicamente un acciaio a spirale) nella sezione desiderata.

La striscia passa attraverso gruppi di rulli montati su supporti consecutivi, ciascuno dei quali esegue solo una parte incrementale della piegatura, fino a ottenere la sezione trasversale desiderata (profilo). Questo processo è utilizzato per produrre profili aventi grandi lunghezze ed in grandi quantità. Uno schema semplice della procedura è presentato nel seguito (Figura 1-6).

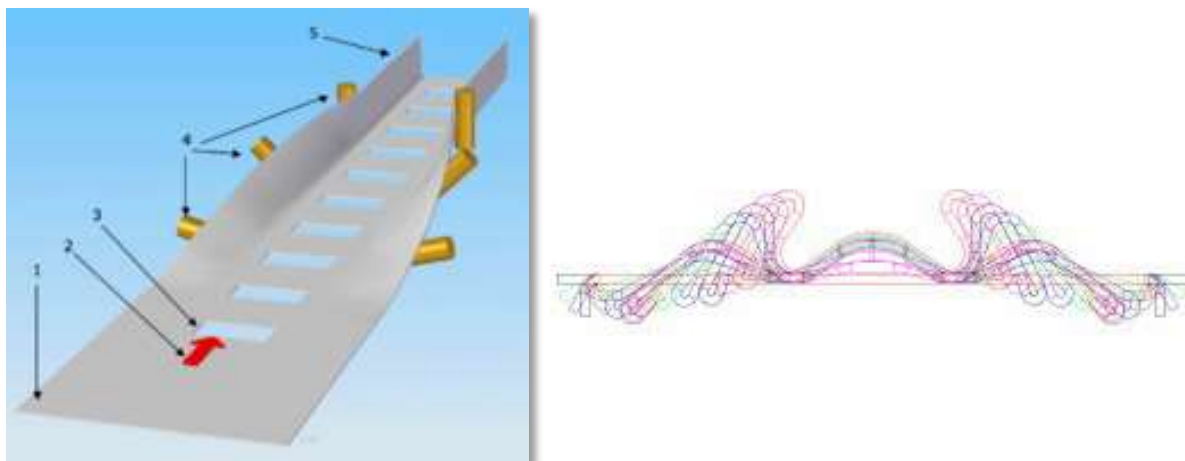


Figura 1-6 Processo di roll-forming.

Le sezioni generate attraverso il processo di roll-forming possiedono alcuni vantaggi rispetto a quelle ottenute tramite il processo di estrusione: i componenti possono essere più leggeri, con pareti più sottili e più resistenti, essendo stati lavorati a freddo; inoltre, il processo di roll forming è più rapido.

Gli effetti del processo di curvatura sulle proprietà del materiale sono minimi. Le proprietà fisiche e chimiche praticamente non cambiano, ma, dal punto di vista delle proprietà meccaniche, il processo può causare indurimento, micro-fessurazioni o assottigliamento in corrispondenza delle piegature, effetti che devono essere adeguatamente considerati.

Quello che è stato studiato nel progetto GRISPE è la variazione delle prestazioni strutturali (capacità portante) del profilo curvo rispetto ai profili piani (deformazioni plastiche sviluppate nelle fibre estreme della sezione trasversale possono alterare la capacità portante) per diversi raggi di curvatura.

Nel progetto GRISPE è stato eseguito un ampio programma di prove sperimentali per determinare la capacità di carico a flessione dei profili curvi per diversi raggi di curvatura. Sono state testate due diverse tipologie di sezione: **profili sinusoidali** forniti da Bacacier (profilo 18/76) come in Figura 1-4 e **profili trapezoidali** con irrigidimenti forniti da Arcelor Mittal Construction France (profilo 39/333) come in Figura 1-5. Per ciascuna tipologia di sezione sono stati forniti profili di 0,63 e 1,0 mm di spessore nominale.

Sono state selezionate due diverse configurazioni per l'esecuzione delle prove sperimentali: una per l'analisi delle prestazioni strutturali del profilo curvo sotto le sole azioni flettenti e una per l'analisi sotto l'azione combinata flessione-sforzo normale.

A seguire, nella Tabella 1, sono riepilogati i test effettuati.

In Figura 1-7 sono mostrati i parametri relativi ai profili curvi.

Type of test	Profile	R [m]	b [mm]	Span L [mm]	s [mm]	f [mm]	$\alpha$ [°]	Number of tests
Single span positive bending test	18/76 $t_k = 0.63$ mm	$\infty$	2200	2000	2200	0	0	3
		20.0	2201			30	6.31	2
		10.0	2204			61	12.63	2
		4.0	2229			154	31.92	2
	18/76 $t_k = 1.00$ mm	$\infty$	3200	3000	3200	0	0	1
		20.0	3203			64	9.18	4
		10.0	3214			129	18.41	3
		4.0	3292			334	47.16	3
	39/333 $t_k = 0.63$ mm	$\infty$	3200	3000	3200	0	0	3
		20.0	3203			64	9.18	2
		10.0	3214			129	18.41	2
		6.0	3239			217	30.93	3
	39/333 $t_k = 1.00$ mm	$\infty$	4200	4000	4200	0	0	2
		20.0	4208			111	12.05	2
		10.0	4232			223	24.24	2
		6.0	4291			380	40.98	2
Single span positive bending test with horizontal support	39/333 $t_k = 0.63$ mm	6.0	3239	3000	3200	217	30.93	2
		6.0	4291	4000	4200	380	40.97	3
		6.0	5300	5000	5129	576	50.61	3

Tabella 1: Prove effettuate.

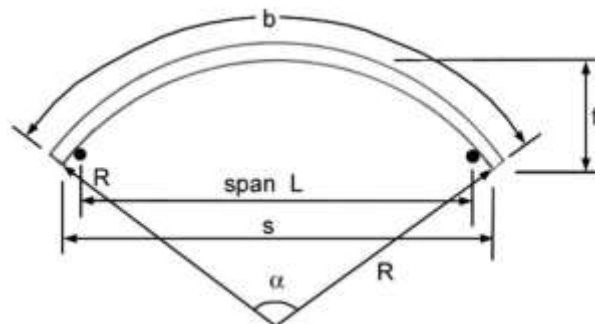


Figura 1-7: Parametri dei profili curvi.

Nella prima configurazione (vale a dire profilo soggetto alla sola flessione), il momento flettente finale e il momento di inerzia efficace sono stati determinati mediante prove di carico su elementi curvi a campata singola, caricati verticalmente tramite due o quattro linee di carico, per simulare l'effetto di un carico uniformemente distribuito (si vedano la Figura 1-8 e la Figura 1-9). I provini sono stati posizionati su supporti mobili in direzione orizzontale. Pertanto, nessuna forza assiale può apparire nell'apice del provino curvo dove il momento flettente diventa massimo. Il raggio di curvatura è stato variato per analizzarne l'influenza sulle tensioni interne e sulla capacità a momento flettente del profilo.



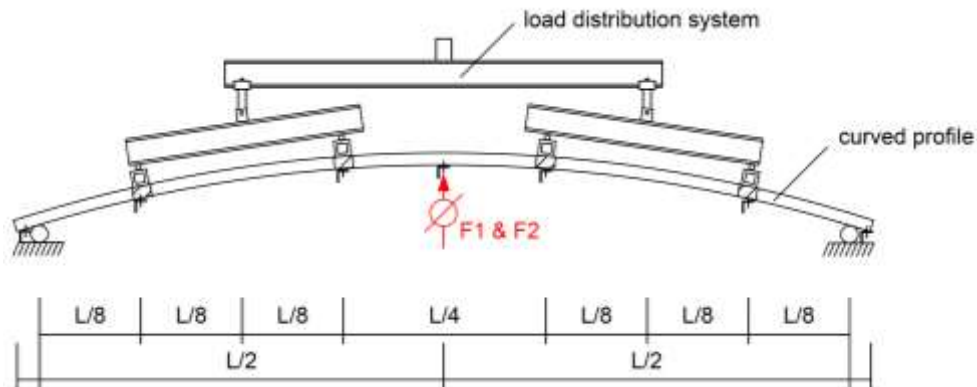


Figura 1-8: Configurazione del test su campata singola.



Figura 1-9: Immagine della configurazione del test su campata singola.

Nella seconda configurazione (vale a dire profilo soggetto a flessione e sforzo normale), i profili curvi sono stati posizionati su supporti fissati orizzontalmente (Figura 1-10 e la Figura 1-11); in questo modo hanno mostrato un funzionamento ad arco ed erano soggetti a sollecitazione di flessione e compressione. Questi test sono stati eseguiti per verificare l'applicabilità della formula di progettazione per azioni combinate flessione/compressione, fornita dalla EN 1993-1-3. Dato che questa formula è valida per lamiere trapezoidali, questi test non sono stati eseguiti su profilo di sezione sinusoidale. Variando la lunghezza del provino, sono state ottenute diverse pendenze e, conseguentemente, diversi valori del rapporto momento flettente / compressione.

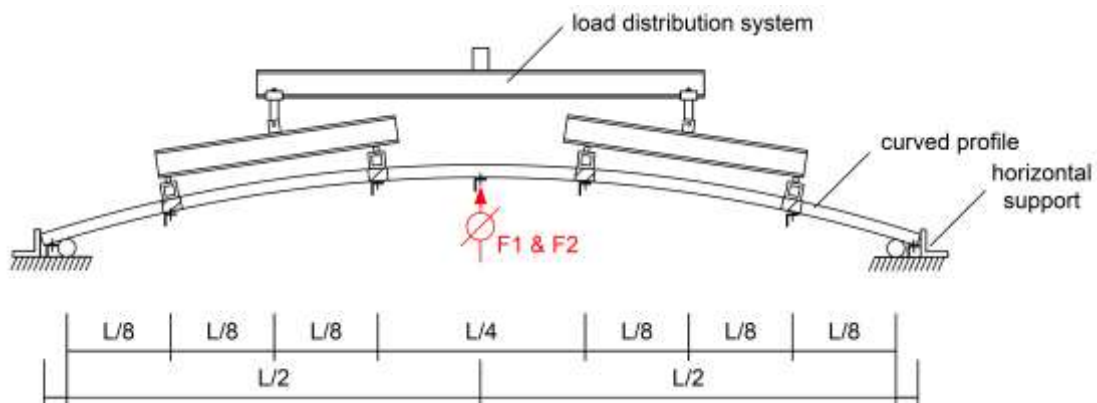


Figura 1-10: Immagine della configurazione del test su campata singola (profilo 18/76).



*Figura 1-11: Immagine della configurazione del test su campata singola con supporto orizzontale (profilo 39/333).*

Sulla base dei risultati delle prove sperimentali condotte sui provini sopracitati, è possibile proporre una riduzione del 10% della capacità flettente dei profili curvi, soggetti alle sole azioni flettenti, rispetto alla capacità dei corrispondenti profili piani.

Per profili curvi con supporto orizzontale (comportamento ad arco e combinazione M+N) devono essere fatte considerazioni aggiuntive in base ai risultati delle prove sperimentali. Prima di tutto si è notato che l'influenza degli spostamenti orizzontali (in questa seconda configurazione non consentiti) non può essere conservativamente trascurata: spostamenti più elevati sono infatti legati a forze interne inferiori. Di conseguenza, la metodologia di progettazione tiene conto direttamente della presenza del supporto orizzontale e lo schema strutturale corrispondente diventa iperstatico. Si consiglia di utilizzare la seguente procedura di progettazione:

1. Le forze interne dell'arco (momenti flettenti, forze assiali) devono essere stimate usando i valori lordi  $A_g$  e  $J_g$  della sezione trasversale della lamiera.
2. Lo spostamento orizzontale in corrispondenza dei supporti non può essere trascurato. Quanto maggiore è lo spostamento, tanto diventano più sfavorevoli le forze interne. Pertanto, è necessario prendere in considerazione lo spostamento orizzontale modellando il supporto mediante l'inserimento di una opportuna molla orizzontale. La rigidità della molla, che dipende dalla sottostruttura e dal fissaggio della lamiera, deve essere calibrata per garantire spostamenti orizzontali di modello affini a quelli reali (sperimentali). Per evitare una progettazione a sfavore di sicurezza, la rigidità delle molle non deve essere sovrastimata; la sottostima della rigidità della molla porta infatti ad una sovrastima degli spostamenti orizzontali e, di conseguenza, ad una progettazione sicura.
3. L'interazione flessione - compressione deve essere calcolata tramite la formula di interazione delle DIN 18807, ma senza porre la limitazione di  $\alpha$  a 1.

#### **1.4. Regole e requisiti di progettazione generale**

- (1) La progettazione deve essere effettuata in accordo con le regole generali previste in EN 1993-1-1.
- (2) Devono essere adottati fattori parziali di sicurezza appropriati per gli stati limite ultimo e di esercizio in accordo a EN 1993-1-3.

## 2. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI: FASE PRE-PROGETTUALE

### 2.1. Campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione

Questo manuale descrive un metodo di progettazione per determinare la resistenza dei profili curvi.

Questo manuale fornisce un metodo di progettazione mediante calcolo.

Questo manuale non copre la distribuzione di carico per i carichi durante le fasi di esecuzione e manutenzione.

Le regole di calcolo riportate in questo manuale sono valide solo se le tolleranze degli elementi formati a freddo sono conformi a EN 1993-1-3.

Le regole di calcolo si basano sull'elaborazione di dati sperimentali ottenuti sui campioni di profili curvi precedentemente descritti.

La procedura di progettazione è valida per i profili che vengono curvati in fase di fabbricazione tramite piegatura (roll-forming). Non si applica ai profili che vengono curvati per piegatura in fase di costruzione o a quelli ottenuti tramite piegatura della flangia interna della sezione trasversale.

Il rapporto di snellezza alfa non deve essere limitato a 1, come invece richiesto nella DIN 18807 per i profili piani.

Lo spostamento orizzontale al livello dei supporti può essere modellato per mezzo di molle orizzontali e tale spostamento porta a momenti flettenti maggiori nell'arco. La rigidità della molla deve essere calibrata alla rigidità orizzontale della sottostruttura, comprese le deformazioni nel fissaggio del profilo dell'arco. Più piccola è la rigidità della molla, maggiore è il momento flettente; la sottostima della rigidità della molla porta a una progettazione più sicura.

## 3. REQUISITI TECNOLOGICI DI BASE

### 3.1. Requisiti per lamiere sagomate e marcatura CE

I profili in acciaio devono avere la marcatura CE, in accordo agli standard in EN 14782 (non strutturali) or 1090-1 (se strutturali).

## 4. PROPRIETÀ DEI MATERIALI

### 4.1. Lamiere in acciaio

Se non diversamente specificato, le proprietà del materiale utilizzate in fase di calcolo devono soddisfare i requisiti forniti in EN 1993-1-3, sezione 3.

Le tolleranze sullo spessore devono soddisfare i requisiti indicati in EN 1993-1-3, sezione 3.2.4.

- spessore del nucleo d'acciaio  $t_{cor} = 0,58 \text{ mm}$
- tensione di snervamento  $f_{y,k} = 408,3 \text{ N/mm}^2$

Informazioni più dettagliate riguardanti le caratteristiche dei profili sono riportate nel paragrafo 8.1.

## **5. AZIONI E COMBINAZIONI DI CARICO**

Le azioni e le combinazioni da prendere in considerazione devono essere determinate in accordo con:

EN 1990 : Eurocodice 0: criteri generali di progettazione strutturale

EN 1991-1-1: 2005 Eurocodice 1: Azioni sulle strutture - Parte 1-1: Azioni generali - Densità, pesi propri, sovraccarichi per edifici

EN 1991-1-3: 2005- Eurocodice 1: Azioni sulle strutture - Parte 1-3: Azioni in generale - Carichi da neve

EN 1991-1-6: 2005 Eurocodice 1: Azioni in generale - Azioni durante la costruzione

## **6. REGOLE BASE DI PROGETTAZIONE**

### **6.1. Principi**

Questo nuovo metodo di progettazione può essere utilizzato per determinare:

- Resistenza alle sollecitazioni flettenti in mezzera, nella configurazione di campata singola senza supporti orizzontali.
- Interazione momento-compressione, nella configurazione di campata singola con presenza di supporti orizzontali.

Per poter applicare questo metodo, la struttura deve essere simmetricamente caricata.

### **6.2. Campo di applicazione del nuovo metodo di progettazione**

La seguente procedura di progettazione può essere utilizzata per valutare la capacità portante dei profili curvi.

Durante i test sperimentali condotti nell'ambito del progetto GRISPE, sono stati testati profili con spessore, lunghezza e raggio di curvatura diversi, così come descritto nella Tabella 1.

Le forze interne dell'arco (momenti flettenti, forze assiali) devono essere calcolate utilizzando i valori  $A_g$  e  $J_g$  della sezione trasversale lorda della lamiera.

Il modello di progettazione è verificato per archi soggetti a configurazioni di carico simmetriche.

Lo spostamento orizzontale ai supporti non può essere trascurato.

Il campo di applicazione è uguale a quello indicato per la formula interattiva fornita nella DIN 18807, parte 3, sezione, punto 3.3.6.1.

### **6.3. Procedura di progettazione**

#### **6.3.1. Configurazione a campata singola senza supporti orizzontali: calcolo della capacità a flessione**

Il processo di curvatura attraverso piegatura o roll-forming crea deformazioni plastiche nelle fibre estreme della sezione trasversale. Ciò porta a tensioni interne nella sezione

trasversale che possono influenzare la capacità a flessione della sezione trasversale stessa. I risultati del test hanno mostrato, d'altra parte, che l'influenza è piuttosto piccola e inoltre non uniforme:

- Per i profili di spessore pari a 1.0 mm, la curvatura non influenza la capacità a flessione del profilo curvo rispetto a quello piano.
- Per i profili di spessore pari a 0.63 mm, la capacità a flessione è influenzata dall'applicazione della curvatura in entrambi i sensi:

- + 25 % per il profilo sinusoidale 18/76
- 15 % per il profilo trapezoidale 39/333

Considerando questo comportamento e la bassa sensitività della capacità a flessione si propone - conservativamente - di ridurre la capacità del momento flettente del corrispondente profilo piano del 10% (vedere eq. 6.1). Questo fattore di riduzione deve essere considerato come un ulteriore fattore di sicurezza per coprire eventuali variabilità e oscillazioni; non è un coefficiente basato su considerazioni di tipo meccanico.

$$M_{c,Rk,F}(curved\ profile) = 0,9 \cdot M_{c,Rk,F}(flat\ profile) \quad 6(1)$$

### 6.3.2. Configurazione a campata singola con supporti orizzontali: calcolo della capacità a flessione

La normativa tedesca DIN 18807, contiene regole di progettazione per profili trapezoidali soggetti ad azione combinata di flessione e compressione. È stato verificato che questa procedura possa essere adottata anche per i profili curvi con effetto arco.

In caso di azione di compressione e flessione, viene fornita la seguente equazione 6 (2):

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[ 1 + 0,5 \cdot \alpha \left( 1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1 \quad 6(2)$$

Essendo:

- $N_D$  valore di progetto dello sforzo di compressione
- $M$  valore di progetto del momento flettente
- $M_d$  resistenza di progetto a flessione
- $N_{dD}$  resistenza di progetto a compressione

Il rapporto di snellezza è definito come:

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{i_{eff} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{y,k}}{E}} \quad 6(3)$$

Dove:

- $L_{cr}$  lunghezza critica. La formula è ritenuta valida poiché fornita, ad esempio, nella DIN 18 800 parte 2 (vedere Figura 6-2).
- $i_{ef}$  giratore di inerzia della sezione efficace

Generalmente, nella formula di interazione di M-N, il coefficiente  $\alpha$  dovrebbe essere limitato ad 1 se  $\alpha > 1$ . Questo limite non è valido quando il rapporto di snellezza  $\alpha$  è

usato direttamente per determinare la massima sollecitazione di compressione rispetto all'instabilità globale.

Di seguito è descritta dettagliatamente, passo dopo passo, la procedura della DIN per l'azione combinata flessione / compressione, modificata per "adattarsi" al caso di profili curvi.

1. Determinazione delle forze interne dell'arco soggetto a carico caratteristico di rottura

Questo passaggio (1) può essere effettuato calibrando un semplice modello basandosi sui risultati delle prove sperimentali. La calibrazione consente di assumere una rigidezza rappresentativa delle molle orizzontali posizionate in corrispondenza delle due estremità del profilo (vedi Figura 6-1).

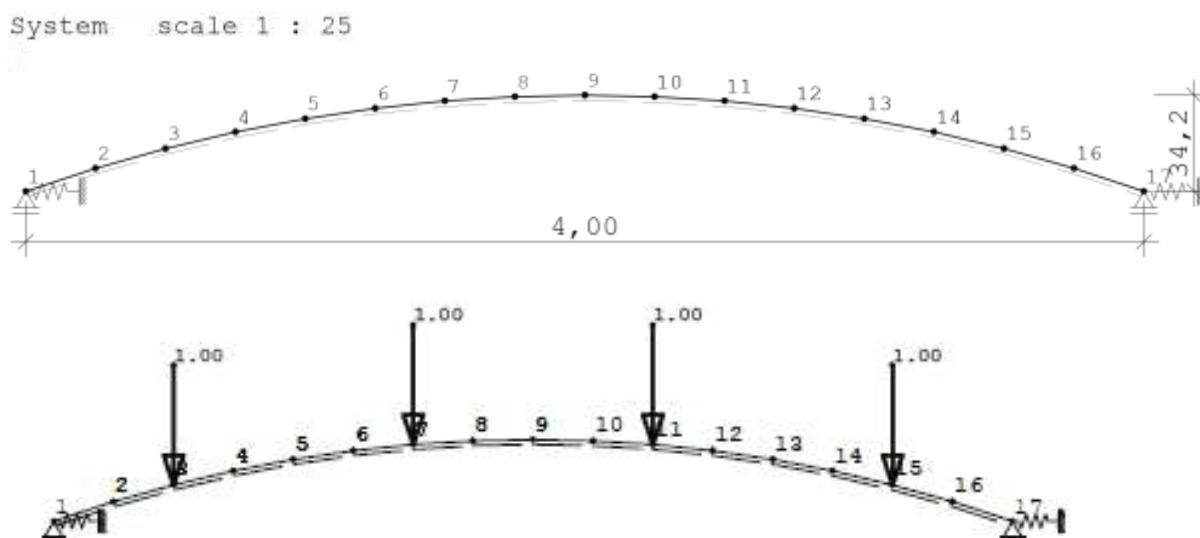


Figura 6-1: Esempio di modello semplice con molla orizzontale.

Ad esempio, tenendo conto dei dati sperimentali presentati in precedenza, sarà elaborato un semplice modello rappresentativo della configurazione strutturale del profilo curvo. Per semplificare, l'arco può essere approssimato da un poligono. I due supporti all'estremità sono dotati di molle nelle direzioni orizzontali per consentire e controllare le deflessioni orizzontali, mentre i supporti sono fissati in direzione verticale. Il carico caratteristico di rottura viene applicato in base alle prove sperimentali eseguite (ad esempio con 4 carichi di linea verticale uguali a  $0,125 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,125 L$ ) ed è trascurato il peso proprio del profilo. Ovviamente, per la procedura di calibrazione, in caso di differenti schemi di carico, il modello deve essere opportunamente aggiornato.

Il calcolo delle forze interne viene eseguito per il sistema che rappresenta il sottoinsieme considerato sotto carico caratteristico a rottura. Ogni sottogruppo è costituito da diversi test identici con diversi carichi di rottura individuali e diversi valori di deflessione individuale. Un valore di deflessione comune deve essere valutato dalle prove, che rappresentano l'intero sottoinsieme: questo valore rappresentativo non è quindi direttamente la deflessione di un singolo test (ad esempio, può essere la deflessione media al carico di rottura caratteristico, come

assunto nel seguito). Ad esempio, prendendo in considerazione i risultati ottenuti dai test precedenti, è possibile adottare la seguente procedura.

Per ogni i-esima prova, la deflessione verticale in mezzeria  $f_{max}$  e il corrispondente (singolo) carico di rottura  $F_u$  (test) consentono la determinazione di un singolo "parametro di rigidezza", come nel seguito:

- Rigidezza complessiva dell'i-esimo provino

$$C_{f,i} = F_u / f_{max} \quad 6(4)$$

- Valore medio di tutti i test dello stesso sottoinsieme, considerato come rappresentativo di questa famiglia

$$C_f = \text{Media}(C_{f,i}) \quad 6(5)$$

Usando il valore di rigidezza complessiva della famiglia ( $C_f$ ), è possibile valutare una deflessione in mezzeria sotto carico caratteristico di rottura, che è considerata rappresentativa per questa famiglia.

Poiché le forze interne dell'arco sono calcolate per la larghezza unitaria, il risultato dovrebbe essere moltiplicato per la larghezza del campione utilizzato nella prova.

$$f_{eq} = F_{u,k} / C_f * b_v \quad 6(6)$$

Calcolando l'arco con lo stesso software utilizzato per realizzare il modello, la rigidezza della molla ai supporti orizzontali viene dapprima fatta variare ed infine fissata su di un valore, per il quale la deflessione calcolata in mezzeria sotto carico caratteristico corrisponde alla deflessione  $f_{eq}$  secondo la Tabella 2. La rigidezza della molla del supporto orizzontale  $C_{ind}$  è citata sopra.

Dopo la calibrazione del modello basandosi su quanto sopra presentato, è possibile la valutazione delle forze interne.

test no. SSP- H-39-...	$F_u$ kN	deflection $f_{max}$ at mid- span (mm)	L m	$b_v$ m	overall stiffness specimen $C_{f,i}$ (kN/mm)	mean value stiffness $C_f$	repr. deflection (mm) for $F_{u,k}$ , width 1 m
217-063-1	9,12	18,0	3,00	0,667	0,507	0,444	16,6
217-063-2	8,95	23,5	3,00	0,667	0,381		
380-063-1	9,49	17,6	4,00	0,667	0,539	0,589	14,4
380-063-2	11,43	19,2	4,00	0,667	0,595		
380-063-3	11,03	17,4	4,00	0,667	0,634		
576-063-1	5,67	23,6	5,00	0,667	0,240	0,329	13,4
576-063-2	5,17	14,1	5,00	0,667	0,367		
576-063-3	6,83	18,0	5,00	0,667	0,379		

Tabella 2: Deflessione rappresentativa in mezzeria ad un livello di carico caratteristico  $F_{u,k}$ .

## 2. Determinazione della lunghezza critica $L_{cr}$ .

La lunghezza critica di instabilità di un arco è reperibile in letteratura, ad esempio nella DIN 18 800 parte 2 (si veda Figura 6-1).

Lunghezza critica di instabilità  $L_{cr} = s_K \quad =: s_K = \beta \cdot s$

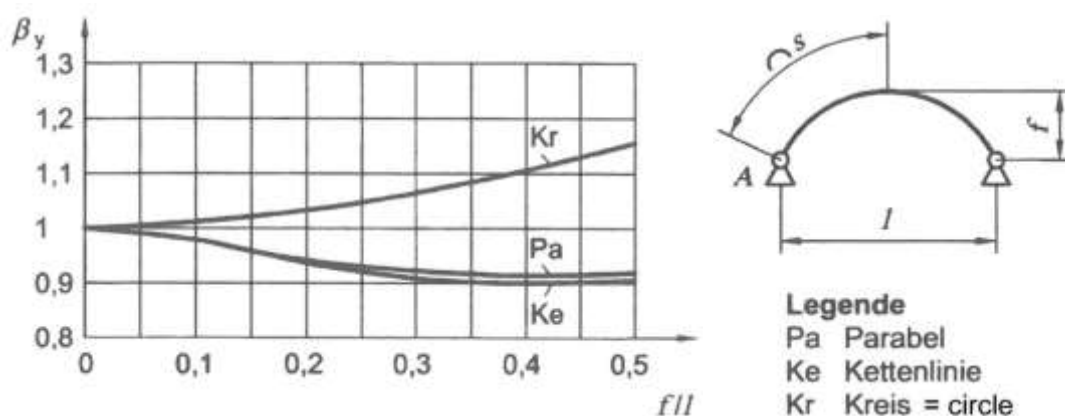


Figura 6-2: lunghezza critica secondo DIN 18 800 - 2.

3. Determinazione della resistenza di progetto a compressione  $N_{dD}$

$$N_{dD} = \min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0,8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g) \quad 6(7)$$

Essendo:

- $\sigma_{cd}$  tensione di progetto a compressione
- $A_{ef}$  area della sezione efficace per compressione
- $\sigma_{elg}$  tensione Euleriana di compressione della sezione lorda
- $A_g$  area della sezione lorda

4. Calcolo dell'interazione flessione/compressione, secondo DIN 18807

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[ 1 + 0,5 \cdot \alpha \left( 1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1 \quad 6(8)$$

Essendo:

- $N_D$  valore di progetto dello sforzo di compressione
- $M$  valore di progetto del momento flettente
- $M_d$  resistenza di progetto a flessione
- $N_{dD}$  resistenza di progetto a compressione

Secondo la DIN 18807, il valore di snellezza precedentemente definito dall'equazione 6(3) dovrebbe essere limitato a 1. Sulla base dei risultati di GRISPE, viene proposta una procedura DIN modificata senza la limitazione di  $\alpha$  a un valore pari ad 1; in questo modo, i risultati ottenuti sono un po' più conservativi di quelli ottenuti con l'approccio DIN.

La calibrazione del metodo è stata fatta considerando unicamente un carico simmetrico.

## 7. CONSIDERAZIONI DI PROGETTAZIONE SPECIFICA

### 7.1. Situazioni non coperte dal presente Manuale

Le seguenti questioni non sono trattate nel presente manuale di progettazione:



- Per la progettazione antincendio: devono essere considerati i regolamenti nazionali in accordo con EN 1991-1-2 e EN 1993-1-2 ed i loro allegati.
- Per la progettazione sismica: devono essere considerati i regolamenti nazionali in accordo con EN 1998-1 ed i loro allegati.
- Per gli spetti ambientali: devono essere considerati i regolamenti nazionali.
- Per gli aspetti termici: devono essere considerati i regolamenti nazionali in accordo con EN 1991-1-5 ed i loro allegati.
- Per gli aspetti acustici: devono essere considerati i regolamenti nazionali.

E tutti gli altri temi non chiaramente identificati più in alto o più in basso.

## 8. ESEMPIO DI PROGETTAZIONE

### 8.1. Spiegazione della procedura di progettazione

La procedura di progettazione presentata consente di calcolare il momento resistente in campata per un profilo curvo, ottenuto mediante il processo di roll forming eseguito su un profilo laminato piano. Due diverse configurazioni sono state prese in considerazione:

- Campata singola senza supporti orizzontali (profilo sollecitato solo dal momento flettente), vedere la Figura 8-1.
- Campata singola con supporti orizzontali (profilo sollecitato da una combinazione di momento flettente e forze assiali), vedere la Figura 8-2.

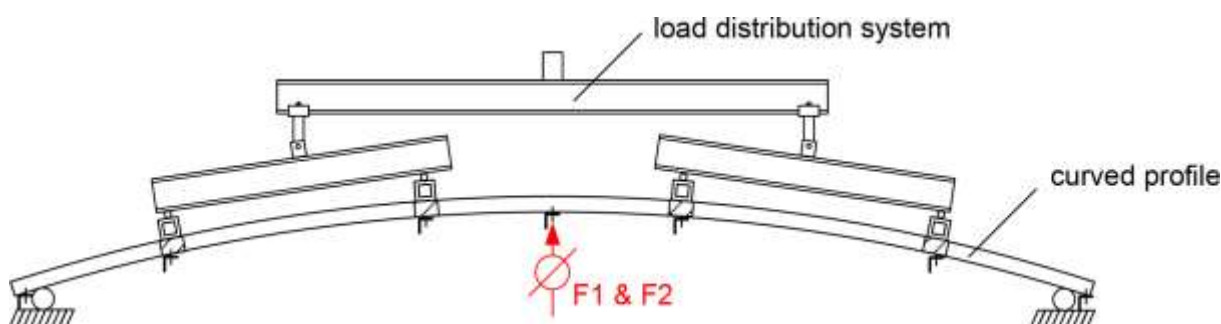


Figura 8-1: Configurazione di campata singola senza supporti orizzontali.

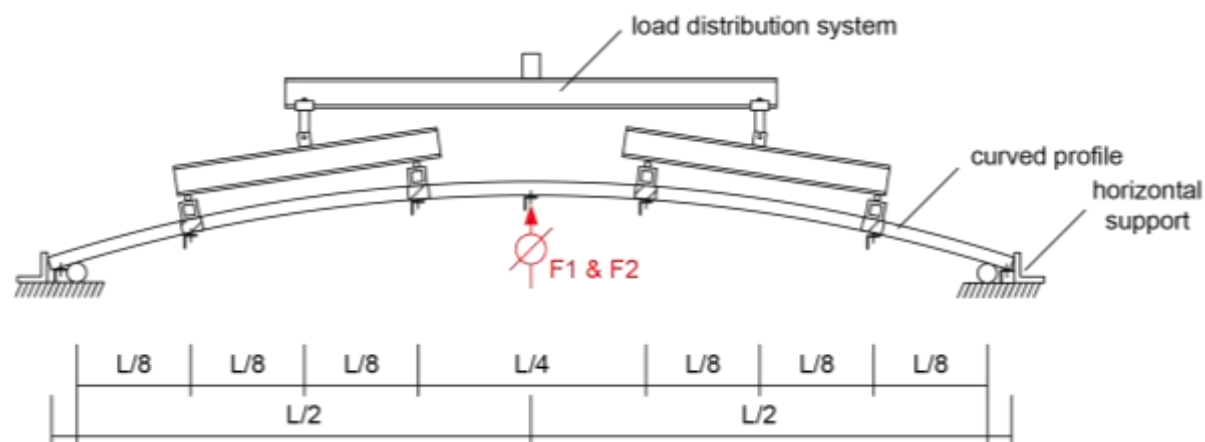
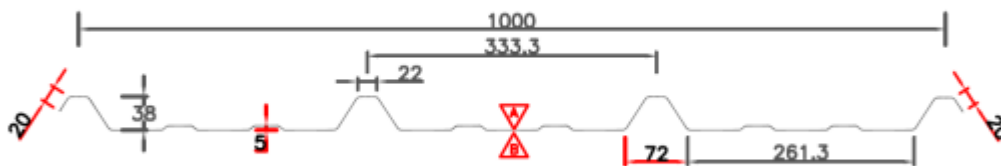


Figura 8-2: Configurazione di campata singola con supporti orizzontali.

Nei paragrafi seguenti, la valutazione della capacità portante delle configurazioni descritte è presentata in dettaglio considerando un profilo con le seguenti caratteristiche:



- Profilo: Arcelor 39/333
- Famiglia di test: H-39-380-63
- Lunghezza di campata dell'arco: 4.0 m
- Altezza dell'arco: 342 mm
- Larghezza dell'arco: 1 m
- Raggio di curvature: 6.02 m
- Carico di collasso caratteristico (carico applicato nel calcolo): 12.77 kN/m
- Peso proprio del profilo: 0.095 kN/m<sup>2</sup>
- Lunghezza del profilo: 4.20 m
- Proprietà della sezione trasversale lorda
  - area  $A_g = 6.58 \text{ cm}^2/\text{m}$
  - momento di inerzia  $J_g = 9.77 \text{ cm}^4/\text{m}$
  - raggio di rotazione  $i_g = 1.218 \text{ cm}$
- Proprietà della sezione trasversale efficace per compressione assiale
  - area  $A_{ef} = 1.89 \text{ cm}^2/\text{m}$
  - momento di inerzia  $J_{ef} = 5.21 \text{ cm}^4/\text{m}$
  - raggio di rotazione  $i_{ef} = 1.660 \text{ cm}$
- La resistenza a flessione del profilo è data dal produttore
  - Momento flettente positivo  $M_d^+ = 1.093 \text{ kNm/m}$
  - momento flettente negativo  $M_d^- = 1.426 \text{ kNm/m}$

### 8.1.1. Campata singola senza supporti orizzontali

Nel caso di campata singola senza supporti orizzontali, il carico genera momenti flettenti e forze di taglio nel profilo; le forze assiali sono, invece, trascurabili.

Il carico viene applicato lungo 4 linee di carico a 0,125 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,125 L e, a causa del sistema di distribuzione del carico isostatico, tutte e 4 le linee di carico sono uguali.

Secondo quanto proposto da GRISPE in seguito alla campagna di test sperimentali, la capacità portante del profilo curvo può essere valutata come il 90% della capacità portante del corrispondente profilo piano.

Il massimo momento flettente in campata di un profilo piano può essere stimato usando la seguente equazione:

$$M_{c,Rk,F} = \frac{F_{u,k}}{b_v} \cdot \frac{L}{8} + g \cdot L_v \cdot [2L - L_v]/8$$

Dove:

$M_{c,Rk,F}$  momento flettente caratteristico in campata (kNm/m)

$F_{u,k}$  carico caratteristico espresso in kN (inclusivo del precarico)

$b_v$  larghezza del campione di prova

$L_v$  lunghezza del campione di prova

L lunghezza della campata (qui:  $L = 2,00$  or  $3,00$  or  $4,00$  m)

g peso proprio del profilo

In base alle caratteristiche del profilo esplicativo sopra menzionato, è possibile ottenere il seguente valore per il profilo piano "originale":

$$M_{c,Rk,F} = \frac{12.77}{1} \cdot \frac{4}{8} + 0.095 \cdot 4.20 \cdot [2 \cdot 4 - 4.20] / 8 = 6.57 \text{ kNm/m}$$

Questo valore deve essere inserito nella tabella excel nella cella rossa corrispondente. In questo modo, il valore della capacità portante del profilo curvo corrispondente viene automaticamente mostrato dal file excel, valutandolo semplicemente tramite una riduzione del 10% rispetto alla capacità del profilo piano.

$M_{c,Rk,F}(\text{curved profile}) = 0,9 \cdot M_{c,Rk,F}(\text{flat profile})$				
$M_{c,Rk,F,flat\ profile}$	6.57	[kNm/m]	$M_{c,Rk,F,curved\ profile}$	5.91 [kNm/m]

### 8.1.2. Campata singola con supporti orizzontali

Nel caso di campata singola con supporti orizzontali, deve essere adottato un approccio a più fasi, come descritto dettagliatamente in seguito. Come già spiegato nel manuale di progettazione, la soluzione del problema in questa condizione di carico/ vincolo deve essere trovata risolvendo un problema iperstatico. Con gli spostamenti orizzontali impediti, il profilo curvo si comporta come un arco.

Fase 1: Determinazione delle forze interne dell'arco soggetto a carico caratteristico di collasso.

System scale 1 : 25

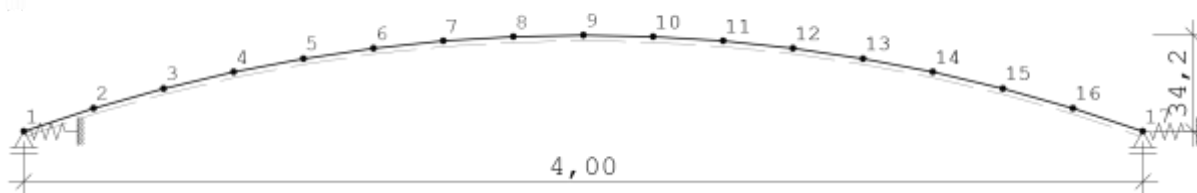


Figura 8-3: Dimensioni geometriche del modello.

La forma dell'arco è approssimata da un poligono composto da 16 segmenti rettilinei; i nodi sono chiamati con numeri da 1 a 17 (vedi Figura 8-3 e Figura 8-4). Il calcolo si riferisce a una larghezza unitaria di 1,0 m del profilo. I supporti alle estremità (nodi 1 e 17) sono dotati di molle in direzione orizzontale per consentire e controllare gli spostamenti orizzontali; i supporti sono fissi in direzione verticale. Il carico di collasso caratteristico viene applicato lungo 4 linee di verticali si carico uguali, poste a  $0,125 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,125 L$  (in corrispondenza dei nodi 3, 7, 11 e 13). Il peso proprio del profilo è trascurato.

Poiché le forze interne dell'arco dipendono dallo spostamento orizzontale in corrispondenza dei supporti, è fondamentale adottare la corretta rigidità della molla,

quando tali forze vengono calcolate. Considerando l'influenza della rigidità della molla sulle forze interne, la rigidità dovrebbe essere stimata per difetto, in modo da ottenere una condizione a favore di sicurezza per il progetto. Trascurare gli spostamenti orizzontali dei supporti porta a forze interne che sono troppo favorevoli e, di conseguenza, a una progettazione non sicura. La rigidità della molla viene quindi scelta in modo che l'inflexione dell'arco calcolata alla sommità sia compatibile con lo spostamento verticale misurato nelle prove.

Il calcolo delle forze interne viene effettuato per un sistema che rappresenta la configurazione considerata soggetta a carico di collasso caratteristico. Un valore di inflessione comune deve essere dedotto dalle prove sperimentali che rappresentano la famiglia di provini testati. È importante notare che questo valore rappresentativo non è direttamente derivato da un singolo test.

Per ciascuna prova, la inflessione verticale in mezzzeria  $f_{max}$  e il corrispondente (singolo) carico di collasso  $F_u$  (test) definiscono un singolo "parametro di rigidità":

Rigidità complessiva del campione

$$C_{f,i} = F_u / f_{max}$$

Il valore medio tra tutti quelli ottenuti per la stessa categoria di prove sperimentali è considerato come rappresentativo per la 'famiglia' di test.

$$C_f = \text{Mean} (C_{f,i})$$

Utilizzando il valore di rigidità complessivo della 'famiglia', può essere calcolata una inflessione della campata sotto carico caratteristico di collasso. Tale inflessione è considerata rappresentativa per la 'famiglia' in esame.

Poiché le forze interne dell'arco sono calcolate per unità di larghezza, il risultato deve essere moltiplicato per la larghezza del campione di prova.

$$f_{eq} = F_{u,k} / C_f * b_v$$

Test setup/ span	Cross section	Spring stiffness at support $C_f$ [kN/m/cm]	Failure load [kN/m]	Displacement		Support reactions [kN/m]		M/N values [kN/m/m, kN/m]		
				$f_h$ (support)	$f_v$ (summit)	$R_h$	$R_v$	at load point near to summit		at support
								max M	corresp N	max N
1/3.00m	gross	fixed	11.03	0.00	0,11	20.46	5.52	0.17	20.62	21.19
		68.00	11.03	0.28	1.67	18.81	5.52	0.49	18.98	19.60
		20.00	11.03	0.79	4.55	15.76	5.52	1.08	15.94	16.65
		10.00	11.03	1.28	7.33	12.82	5.52	1.65	13.01	13.80
	effective	fixed	11.03	0.00	0.41	20.35	5.52	0.19	20.51	21.08
		88.00	11.03	0.22	1.66	19.64	5.52	0.33	19.80	20.40
2/4.00m	gross	fixed	12.77	0.00	0.08	19.13	6.39	0.35	19.35	20.16
		62.00	12.77	0.30	1.45	18.64	6.39	0.40	18.87	19.70
		20.00	12.77	0.88	4.10	17.69	6.39	0.71	17.92	18.80
		10.00	12.77	1.64	7.56	16.45	6.39	1.11	16.69	17.62
	effective	fixed	12.77	0.00	0.39	19.09	6.39	0.26	19.31	20.13
		79.00	12.77	0.24	1.44	18.88	6.39	0.33	19.11	19.93

		20.00	12.77	0.91	4.51	18.29	6.39	0.51	18.53	19.37
		10.00	12.77	1.76	8.33	17.56	6.39	0.75	17.80	18.68
3/5.00m	gross	fixed	6.62	0.00	0.02	9.23	3.31	0.16	9.36	9.81
		29.00	6.62	0.31	1.34	9.01	3.31	0.26	9.14	9.60
		20.00	6.62	0.45	1.91	8.91	3.31	0.30	9.04	9.50
	effective	fixed	6.62	0.00	0.23	9.22	3.31	0.16	9.35	9.80
		33.00	6.62	0.28	1.33	9.12	3.31	0.21	9.09	9.70
		20.00	6.62	0.45	2.07	9.05	3.31	0.24	9.18	9.63
		10.00	6.62	0.89	3.91	8.88	3.31	0.31	9.01	9.48

Tabella 3: Forze interne e inflessione dell'arco soggetto a carico caratteristico di collasso

Evidenziato in verde: rigidità delle molle ai supporti, adottando le inflessioni in mezzeria derivate dai test sperimentali.

Riquadrato in rosso: esempio di configurazione considerata nel calcolo dettagliato.

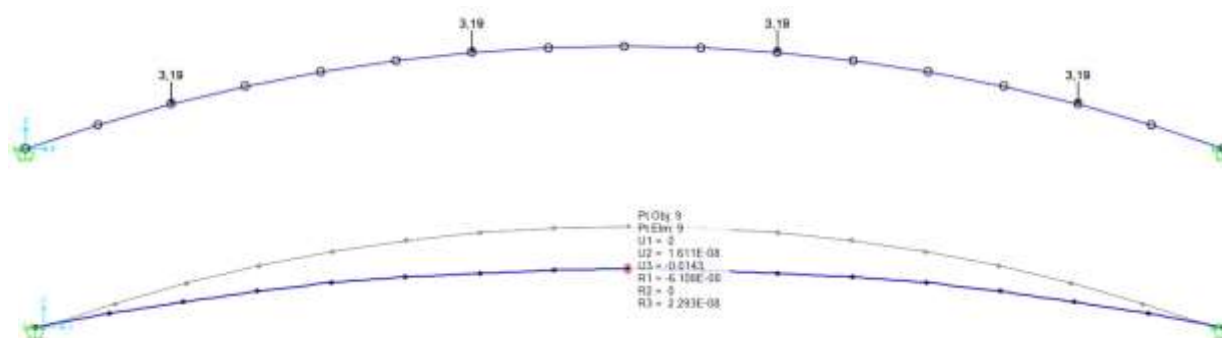


Figura 8-4: Esempio di un modello semplice con molle orizzontali.

Calcolando l'arco con un software, la rigidità della molla del supporto orizzontale viene variata e infine bloccata su un valore, per il quale l'inflessione in mezzeria calcolata sotto carico di collasso caratteristico corrisponde alla  $f_{eq}$  di inflessione. Questa rigidità della molla è il citato sopraccitato  $C_{ind}$ .

Il carico di collasso nell'esempio analizzato ha valore di 12.77kN/m come può essere visto nella Tabella 3. Nel modello questo valore è applicato in quattro punti, risultando pertanto in ogni punto pari al seguente valore:

$$F_{u, nodes} = 12.77/4 = 3.19\text{kN}$$

L'inflessione verticale in mezzeria per l'esempio in esame ha valore pari a:

$$f_v = 1.45 \text{ cm}$$

Questo valore è raggiunto dal modello adottando una rigidità delle molle in corrispondenza dei supporti orizzontali pari a

$$C_f = 62 \text{ kN/m/cm}$$

Nel modello calibrato, considerando la sezione con massimo momento flettente (in corrispondenza del punto di carico vicino alla sommità) sono ottenuti i seguenti valori:

$$M = 0.40 \text{ kNm/m}$$

$$N_D = 18.87 \text{ kN/m}$$

Questi valori devono essere inseriti in corrispondenza delle corrispondenti celle rosse del foglio excel.

$f_{yb}$	408.3	[N/mm <sup>2</sup> ]	$N_{C,Ed}$	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]	$M_{C,Ed}$	0.40	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta s$	207.9	[cm]	$M_{C,Rd}$	1.09	[kNm/m]
$A_g$	6.58	[cm <sup>2</sup> /m]			
$i_g$	1.22	[cm]			
$A_{ef}$	1.89	[cm <sup>2</sup> /m]			
$i_{ef}$	1.66	[cm]			

Fase 2: Determinazione della lunghezza di instabilità  $L_{cr}$ .

La lunghezza di instabilità di un arco può essere trovata in letteratura, per esempio nelle DIN 18800-2 è fornita la seguente espressione:

Lunghezza dell'arco  $b$

Rapporto altezza/ lunghezza di campata  $f/L$

Coefficiente di lunghezza di instabilità  $\beta = f$  (Rapporto altezza/ lunghezza di campata  $f/L$ ) dal diagramma

Lunghezza di instabilità  $L_{cr} = \beta * s = \beta * b/2$

$s$  corrisponde alla metà lunghezza dell'arco, come rappresentato Figure 8-4.

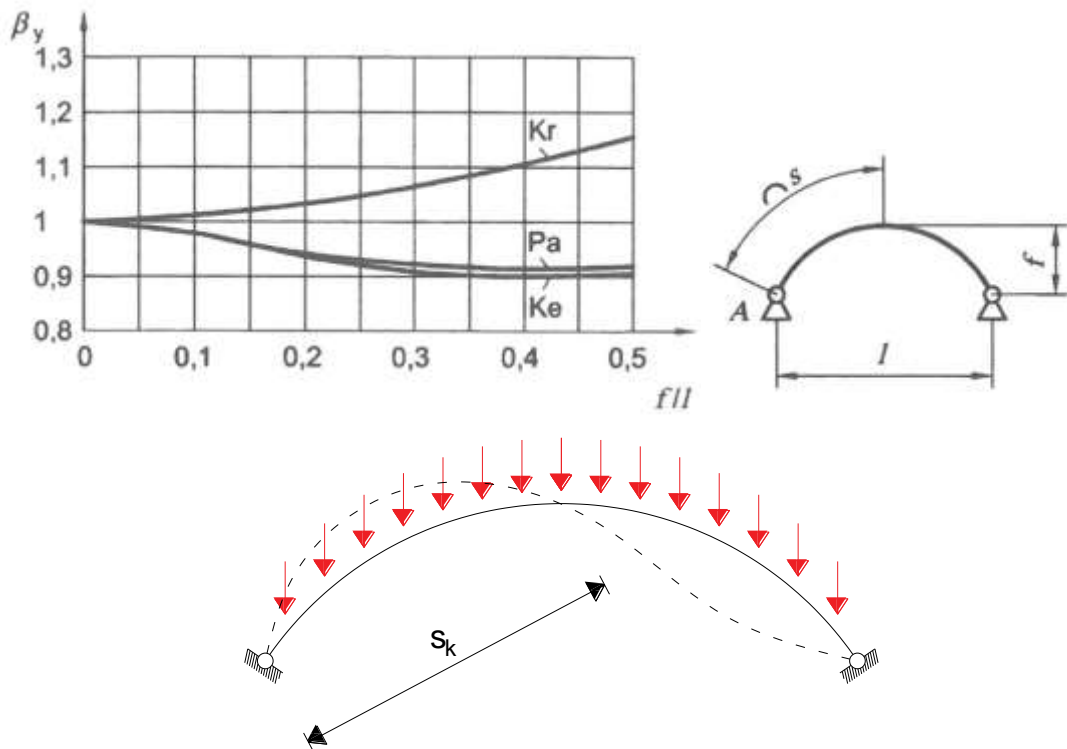


Figura 8-5: coefficiente  $b$  della lunghezza di instabilità da DIN 18800 - 2.

Per esempio, possiamo usare i seguenti dati:

altezza dell'arco  $f = 342 \text{ mm}$

lunghezza di campata  $L = 4000 \text{ mm}$

pendenza al supporto  $\alpha/2 = 0,338$

raggio di curvatura  $R = 4000 / (2 * \sin 0,338) = 6024 \text{ mm}$

lunghezza dell'arco  $b = 6024 * 2 * 0,338 = 4072 \text{ mm}$

rapporto altezza/ lunghezza di campata  $f/L = 342 / 4000 = 0,085$

coefficiente di lunghezza di instabilità  $\beta = 1,02$

lunghezza di instabilità  $L_{cr} = 1,02 * 4072 / 2 = 2079 \text{ mm}$

Il valore della lunghezza di instabilità deve essere inserito nella corrispondente cella rossa della tabella excel.

$f_{yb}$	408.3	[N/mm <sup>2</sup> ]	$N_{c,Ed}$	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]	$M_{c,Ed}$	0.4	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta s$	207.9	[cm]	$M_{c,Rd}$	1.09	[kNm/m]
$A_g$	6.58	[cm <sup>2</sup> /m]			
$i_g$	1.22	[cm]			
$A_{ef}$	1.89	[cm <sup>2</sup> /m]			
$i_{ef}$	1.66	[cm]			

Fase 3: Determinazione della resistenza di progetto della forza di compressione  $N_{dD}$

$$N_{dD} = \min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0.8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g)$$

Forza di instabilità ideale:

$$\max N_{dD} = 0.8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g$$

$$\max N_{dD} = 0.8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_g}{L_{cr}^2}$$

$$\max N_{dD} = 0.8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 9.77}{207.9^2}$$

$$\max N_{dD} = 37.47 \text{ kN}$$

Forza di instabilità critica:

$$ult N_{dD} = \sigma_{cd} \cdot A_{ef}$$

Rapporto di snellezza:

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{i_{ef} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{yk}}{E}}$$

$$\alpha = \frac{207.9}{1.66 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{408.3}{210000}} = 1.758$$

Curva di instabilità da DIN 18807:

$\alpha$	$\sigma_{cd}/\beta_s$
$\alpha \leq 0.30$	1.00
$0.30 < \alpha \leq 1.85$	$1.126 - 0.419 \alpha$
$1.85 < \alpha$	$1.2 / \alpha^2$

$$\frac{\sigma_{cd}}{f_{yk}} = 1.126 - 0.419 \cdot 1.758 = 0.390$$

$$\sigma_{cd} = 0.390 \cdot 408.3 = 159.0 \text{ N/mm}^2$$

Forza di instabilità critica:

$$ultN_{dD} = 15.9 \cdot 1.8895 = 30.06 \text{ kN/m}$$

Resistenza progettuale assunta:

$$N_{dD} = 30.06 \text{ kN/m}$$

I valori del rapporto di snellezza, della forza di instabilità ideale, del fattore di riduzione e della forza di instabilità critica vengono automaticamente mostrati dal file di Excel, una volta che le celle rosse sono state riempite con tutti i dati richiesti.

$f_{yb}$	408.3	[N/mm <sup>2</sup> ]	$N_{c,Ed}$	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]	$M_{c,Ed}$	0.40	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta s$	207.9	[cm]	$M_{c,Rd}$	1.09	[kNm/m]
$A_g$	6.58	[cm <sup>2</sup> /m]			
$i_g$	1.22	[cm]			
$A_{ef}$	1.89	[cm <sup>2</sup> /m]			
$i_{ef}$	1.66	[cm]			

Slenderness ratio	Ideal buckling force	Reduction factor	Critical buckling force
$\alpha$ [-]	[kN/m]	$\chi$ [-]	[kN/m]
1.76	37.45	0.39	30.05
$N_{c,Rd}$	30.05 [kN/m]		
$N_{c,Ed} / N_{c,Rd}$	0.63 [-]		
$M_{c,Ed} / M_{c,Rd}$	0.37 [-]		

Fase 4: interazione momento flettente/ compressione assiale

Secondo le DIN 18807, il valore di snellezza  $\alpha = 1,758$  deve essere limitato a 1, ma qui di seguito viene proposto il calcolo con la procedura modificata DIN 18807: la modifica consiste nel non limitare il valore del coefficiente  $\alpha$  nella formula di interazione M-N.



$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[ 1 + 0.5 \cdot \alpha \left( 1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1$$

$$\frac{18.87}{30.06} \cdot \left[ 1 + 0.5 \cdot 1.758 \left( 1 - \frac{18.87}{30.06} \right) \right] + \frac{0.40}{1.093}$$

$$= 0.628 \cdot [1 + 0.5 \cdot 1.758(1 - 0.628)] + 0.366$$

$$= 0.833 + 0.366 = 1.20 > 1$$

L'interazione M-N è automaticamente mostrata nel foglio excel.

Interaction formula	$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \cdot \left[ 1 + 0.5 \cdot \alpha \cdot \left( 1 - \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \right) \right] + \frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}}$	<b>1.20 &gt; 1.0</b>
---------------------	--	----------------------

La formula conferma che con 4 carichi da 3.19kN, quindi per un totale di 12.77kN, l'arco collassa così come visto durante i test sperimentali.

## 9. BIBLIOGRAPHY

- [1] James L. Jorgenson J.L., Chowdhury A.H.: Buckling Strength of cold formed steel curved panels.
- [2] EN 1090-4:2016 Execution Of Steel Structures And Aluminium Structures - Part 4: Technical Requirements For Cold-Formed Structural Steel Elements And Cold-Formed Structures For Roof, Ceiling, Floor And Wall Applications
- [3] CEN, EN 1990 Eurocode: basis of structural design
- [4] CEN, EN 1991-1-1: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- [5] CEN, EN 1991-1-2: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- [6] CEN, EN 1991-1-3: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads
- [7] CEN, EN 1991-1-4: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions
- [8] CEN, EN 1991-1-5: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions
- [9] CEN, EN 1991-1-6: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-6: General actions - Actions during execution"
- [10] CEN, EN 1993-1-2: 2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- [11] CEN, EN 1993-1-3:2006 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting, Brussels, 2006.
- [12] CEN, EN 1998-1: 2013 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
- [13] DIN 18807 part 1 and part 3: trapezoidal sheeting in buildings; steel trapezoidal sheeting.
- [14] DIN 18800 part2: steel structures- stability- buckling of bars and skeletal structures
- [15] R. HOLZ, GRISPE – WP2: Curved Profiles – D2.2 Test program definition, 2016
- [16] R. HOLZ, GRISPE – WP2: Curved Profiles – D2.4 Test analysis and interpretation,2016

## Allegato 1

Background del nuovo metodo di progettazione per profili curvi.

<b>D2.1</b>	GRISPE WP2 Background document	Christian FAUTH (KIT)
<b>D2.2</b>	GRISPE WP1 Test programme definition	Rainer HOLZ (IFL)
<b>D2.3</b>	GRISPE Test report of curved profiles	Christian FAUTH (KIT)
<b>D2.4</b>	GRISPE WP1 Test analysis and interpretation	Rainer HOLZ (IFL)
<b>D2.5</b>	GRISPE Background guidance for EN 1993-1-3 to design of sheeting with embossments and indentations	Christian FAUTH (KIT)