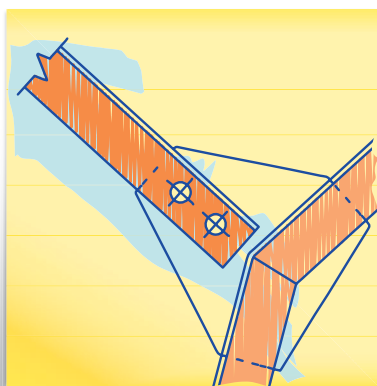


Alfredo Boracchini

COLLEGAMENTI IN ACCIAIO

PROGETTO E CALCOLO DI GIUNZIONI BULLONATE

SECONDO LE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI, GLI EUROCODICI
E LE AISC (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION)



SOFTWARE INCLUSO

Glossario (principali termini tecnico-normativi), **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti),
Test iniziale (verifica della formazione di base), **Test finale** (verifica dei concetti analizzati)




GRAFILL

Alfredo Boracchini

COLLEGAMENTI IN ACCIAIO

ISBN 13 978-88-8207-511-8

EAN 9 788882 075118

Manuali, 147

Prima edizione, febbraio 2014

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, nè memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

SOMMARIO

INTRODUZIONE	p.	11
1. CONCETTI FONDAMENTALI PER IL PROGETTO DELLA STRUTTURA RELATIVAMENTE ALLE GIUNZIONI	"	13
1.1. Cerniere e giunzioni in grado di resistere un momento	"	13
1.1.1. Sicurezza, performance, costi	"	13
1.1.2. Sistema laterale resistente	"	13
1.1.3. Cerniere ed incastri nel modello di calcolo ad elementi finiti	"	18
1.2. La cerniera plastica	"	19
1.2.1. Piatto di base	"	20
1.2.2. Capriate	"	22
2. CONCETTI FONDAMENTALI PER L'ANALISI DELLE GIUNZIONI	"	23
2.1. Divisione giunzioni	"	23
2.2. Schema di calcolo ed azioni	"	24
2.3. Sforzi proporzionali a rigidezza	"	27
2.4. Duttilità	"	28
2.5. "Load path" ovvero tragitto delle forze	"	28
2.6. Ignoranza del tragitto delle forze	"	30
2.7. Vincoli ulteriori	"	30
2.8. Metodi per definire gli stati limite ultimi nelle giunzioni	"	31
2.9. Resistenza dei bulloni	"	31
2.10. "Yield line"	"	31
2.11. Connessioni eccentriche	"	31
2.12. Economia, ripetitività, semplicità	"	32
2.13. Ore uomo, peso materiale	"	32
2.14. Angoli di diffusione	"	32
2.15. Pretensionamento dei bulloni e resistenza	"	33
2.15.1. Influenza (o meno) su resistenza	"	33
2.15.2. Necessità (o meno) del pretensionamento	"	34
2.16. Trasferimento forze	"	34
2.17. Comportamento di una giunzione bullonata a taglio	"	35
2.18. Comportamento di una giunzione bullonata a trazione	"	36

3. GLI STATI LIMITE

PER LE PARTI COMPONENTI LA GIUNZIONE	p.	38
3.1. Capacità di deformazione (rotazione) e relativa rigidezza	"	38
3.1.1. Rigidezza rotazionale	"	39
3.2. Deformazione anelastica gioco foro-bullone	"	40
3.3. Rottura a taglio bullone	"	41
3.3.1. Filettatura all'interno della sezione di taglio	"	42
3.3.2. Numero di sezioni resistenti	"	43
3.3.3. Spessoramenti o "packing plates"	"	44
3.3.4. Giunti lunghi	"	44
3.3.5. Tirafondi	"	45
3.3.6. Coefficiente di rigidezza	"	46
3.4. Rottura a trazione bullone	"	46
3.4.1. Bulloni a testa svasata – countersunk bolts	"	47
3.4.2. Coefficiente di rigidezza	"	47
3.5. Rottura bullone con combinazione di trazione e taglio	"	48
3.6. Resistenza bulloni ad attrito	"	48
3.6.1. Taglio e trazione combinati	"	50
3.7. Rifollamento e taglio lamiera – bolt bearing e bolt tearing	"	50
3.7.1. Bulloni a testa svasata	"	55
3.7.2. Coefficiente di rigidezza	"	55
3.8. Block shear (o block tearing)	"	56
3.9. Rottura saldature	"	58
3.9.1. Calcolo saldatura	"	61
3.9.2. Saldature a tratti	"	64
3.9.3. Eccentricità	"	65
3.9.4. Gruppi di cordoni	"	65
3.10. T-stub, con e senza effetto leva	"	66
3.10.1. T-stub con effetto leva	"	67
3.10.2. Possibile approccio semplificato	"	69
3.10.4. Lunghezza limite per effetto leva e T-stub senza effetto leva	"	70
3.10.5. Calcolo T-stub per i vari "componenti" secondo Eurocodice	"	72
3.10.6. Calcolo T-stub per i vari "componenti" secondo [37]	"	77
3.10.7. T-stub per bulloni esterni all'ala in angolo	"	82
3.10.8. Coefficiente di rigidezza	"	82
3.11. Punzonamento	"	83
3.12. Sistemi equivalenti in parallelo	"	83
3.13. Taglio su anima colonna ("web panel shear")	"	84
3.13.1. Coefficiente di rigidezza	"	85
3.14. Compressione trasversale su anima	"	85
3.14.1. Parametro di trasformazione β	"	87
3.14.2. Altre formule per instabilità	"	88
3.14.3. Coefficiente di rigidezza	"	88
3.15. Trazione trasversale su anima colonna	"	89

3.15.1. Coefficiente di rigidezza	p.	89
3.16. Compressione su anima e ala	"	89
3.17. Trazione su anima trave	"	90
3.18. Resistenza piatti	"	90
3.18.1. Proprietà materiali	"	90
3.18.2. Trazione	"	91
3.18.3. Compressione	"	93
3.18.4. Taglio	"	93
3.18.5. Flessione	"	93
3.18.6. Combinazione sforzi	"	93
3.18.7. Sezione Whitmore	"	93
3.19. Sezione ridotta profili	"	95
3.19.1. Shear lag	"	95
3.20. Capacità locale	"	99
3.21. Stabilità piatti ed elementi strutturali	"	100
3.21.1. Instabilità per compressione	"	100
3.22. Integrità strutturale	"	104
3.23. Duttilità	"	105
3.24. Strappo lamellare piatti	"	106
3.25. Altri stati limite in collegamenti con profili sottili a freddo e lamiere	"	108
3.26. Fatica	"	108
3.27. Stati limite altri materiali collegati	"	109
4. TIPOLOGIE ED ANALISI CON ESEMPI DI CALCOLO	"	110
4.1. Simboli comuni	"	110
4.2. Giunzione bullonata eccentrica nel piano di contatto	"	112
4.2.1. Metodo elastico	"	112
4.2.2. Esempio calcolo eccentricità metodo elastico	"	113
4.2.3. Metodo secondo il centro di rotazione istantanea	"	115
4.2.4. Esempio calcolo eccentricità con centro di istantanea rotazione	"	116
4.3. Giunzione bullonata eccentrica perpendicolare al piano di contatto	"	116
4.3.1. Asse neutro nel baricentro	"	117
4.3.2. Esempio calcolo eccentricità fuori piano con metodo asse neutro nel baricentro	"	118
4.3.3. Asse neutro non nel baricentro	"	119
4.3.4. Esempio calcolo eccentricità fuori piano con metodo asse neutro non nel baricentro	"	120
4.4. Piatto di base con tirafondi gettati	"	120
4.4.1. Spessore piastra	"	121
4.4.2. Pressione di contatto	"	129
4.4.3. Tirafondi in trazione	"	133

4.4.4.	Saldature.....	p.	136
4.4.5.	Resistenza a taglio.....	"	136
4.4.6.	Rigidezza rotazionale.....	"	138
4.4.7.	Accorgimenti per migliorare la duttilità.....	"	139
4.4.8.	Dettagli pratici e altre note.....	"	139
4.4.9.	Schematizzazione ad incastro.....	"	141
4.4.10.	Esempio calcolo piastra di base secondo Eurocodice.....	"	141
4.5.	Ancoranti chimici o meccanici.....	"	146
4.6.	Fin plate.....	"	146
4.6.1.	Scelte e possibili varianti.....	"	147
4.6.2.	Stati limite da considerare.....	"	151
4.6.3.	Capacità di rotazione.....	"	151
4.6.4.	Accorgimenti per migliorare la duttilità.....	"	152
4.6.5.	Accorgimenti per migliorare l'integrità strutturale.....	"	152
4.6.6.	Esempio calcolo trave-trave secondo Din.....	"	153
4.7.	Doppio piatto bullonato.....	"	159
4.7.1.	Capacità di rotazione.....	"	161
4.7.2.	Duttilità.....	"	161
4.7.3.	Integrità strutturale.....	"	161
4.7.4.	Esempio calcolo trave-trave secondo Eurocodice.....	"	161
4.8.	"End plate" flessibile.....	"	164
4.8.2.	Stati limite da considerare.....	"	166
4.8.3.	Rigidezza rotazionale.....	"	167
4.8.4.	Duttilità.....	"	167
4.8.6.	Esempio calcolo trave-colonna secondo NTC.....	"	168
4.9.	Squadrette su anima.....	"	171
4.9.1.	Varianti.....	"	172
4.9.2.	Stati limite da considerare.....	"	173
4.9.3.	Integrità strutturale, duttilità, capacità di rotazione.....	"	173
4.9.4.	Consigli pratici.....	"	173
4.9.5.	Esempio calcolo trave-trave secondo AISC.....	"	173
4.10.	Giunzioni travature reticolari.....	"	175
4.10.1.	Abbottonature.....	"	175
4.11.	Appoggio sopra colonna.....	"	177
4.11.1.	Stati limite da considerare.....	"	178
4.12.	"End plate" rigido.....	"	179
4.12.1.	Taglio su anima colonna ("web panel shear").....	"	180
4.12.2.	Braccio di trasmissione del momento.....	"	181
4.12.4.	Verifiche piatto saldato ad anima.....	"	183
4.12.5.	Verifiche irrigidimento colonna in zona compressa.....	"	183
4.12.6.	Verifiche irrigidimento colonna in zona tesa.....	"	184
4.12.7.	Verifiche irrigidimento diagonale per taglio.....	"	184
4.12.8.	Taglio forze verticali.....	"	185
4.12.9.	Progetto con haunch.....	"	185

4.12.10. Progetto trave-trave	p.	186
4.12.11. Disposizioni BS	"	186
4.12.12. Approccio AISC	"	186
4.12.13. Stati limite da considerare	"	186
4.12.14. Rigidezza rotazionale	"	188
4.12.15. Suggerimenti per semplificare il calcolo	"	189
4.12.16. Consigli pratici	"	190
4.12.17. Duttilità, capacità di rotazione ed integrità strutturale	"	190
4.12.18. Esempio di calcolo end plate trave-colonna secondo Eurocodice	"	190
4.13. "Splice": giunto a coprigiunto	"	198
4.13.1. Modello di calcolo e stati limite	"	200
4.13.2. Capacità di rotazione, integrità strutturale, duttilità	"	201
4.13.3. Esempio di calcolo splice su colonna secondo NTC	"	201
4.14. Giunti controventi	"	205
4.14.1. Metodi americani: UFM e KISS	"	207
4.14.2. Accorgimenti pratici	"	212
4.14.3. Esempio connessione controventi ad attrito secondo NTC	"	212
4.15. Appoggio a sedia	"	216
4.16. Collegamenti per arcarecci	"	218
4.17. Giunzioni saldate tubolari	"	221
4.18. Giunzioni in strutture composte miste acciaio-calcestruzzo	"	221
4.19. Giunti con saldature e bullonatura che lavorano in parallelo	"	221
4.20. Giunti per dilatazioni	"	222
4.21. Cerniere perfette	"	223
4.22. Carrelli	"	224
4.23. Chiodature	"	225
4.24. Giunti "sismici"	"	225
4.24.1. End plate rigido	"	226
4.24.2. Controventi	"	228
5. SCELTA DELLA GIUNZIONE	"	231
5.1. Priorità a chi produce e monta	"	231
5.2. Considerazioni sui pro e contro delle varie giunzioni	"	231
5.3. Organizzazione dell'officina	"	232
5.3.1. Piatti o lamiere	"	232
5.3.2. Concetto di "prendere in mano un pezzo"	"	233
5.4. Elementi culturali	"	233
6. ACCORGIMENTI E NOTE VARIE ANCHE PRATICHE	"	235
6.1. Standardizzazioni progettuali	"	235
6.1.1. Materiale	"	235
6.1.2. Spessori	"	235

6.1.3.	Diametro bulloni	p.	235
6.2.	Giochi foro-bullone.....	"	236
6.2.1.	Gioco foro-bullone per piastra di base	"	237
6.3.	Montaggio.....	"	238
6.3.1.	Labilità struttura	"	238
6.3.2.	Ordine di montaggio ed ingombri.....	"	238
6.3.3.	Spaziature ed interferenze per bulloneria.....	"	239
6.3.4.	Appoggi e posizionamenti.....	"	239
6.3.5.	Fori o piatti saldati per la movimentazione.....	"	240
6.4.	Spazi di manovra chiavi.....	"	240
6.4.1.	Giunzioni con squadrette.....	"	246
6.5.	Spaziature ed interassi	"	247
6.6.	Sovrapposizione con raccordo	"	250
6.7.	Scantonature.....	"	253
6.8.	Serraggio e pretensionamento.....	"	253
6.8.1.	Chiave dinamometrica	"	255
6.8.2.	Giro del dado.....	"	255
6.8.3.	Indicatori di tensione.....	"	257
6.8.4.	Bulloni a controllo di tensione	"	257
6.8.5.	Tensionatori idraulici.....	"	258
6.9.	Rondelle.....	"	258
6.9.1.	Rondelle a lato inclinato.....	"	259
6.9.2.	Vibrazioni.....	"	259
6.10.	Dimensioni viteria, dadi e rondelle.....	"	259
6.10.1.	Altezza dado e testa della vite	"	260
6.10.2.	Larghezza e spessore rondelle.....	"	260
6.11.	Riutilizzo bulloni	"	261
6.12.	Classi di materiale bulloni	"	262
6.13.	Spessori di aggiustaggio	"	262
6.14.	Zincatura	"	263
6.14.1.	Tubolari	"	263
6.14.2.	Piatti saldati come rinforzo su profili	"	264
6.14.3.	Piastre di base.....	"	266
6.15.	Altri trattamenti successivi alla fabbricazione.....	"	266
6.16.	Controfreccie.....	"	267
6.17.	Malta nei piatti di base.....	"	267
6.18.	Rappresentazione grafica giunzioni e bulloni.....	"	269
6.19.	Saldature in opera	"	269
6.20.	Giunti speciali (inclinati).....	"	269
7.	ESEMPI DI POSSIBILI REALIZZAZIONI	"	276
8.	INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO	"	335
8.1.	Introduzione	"	335

8.2. Requisiti minimi hardware e software	p.	335
8.3. Download del software e richiesta della password di attivazione	"	335
8.4. Installazione e attivazione del software	"	336
BIBLIOGRAFIA	"	339
INDICE DELLE TABELLE	"	343
INDICE ANALITICO	"	345

A mia madre Alda.

Ringraziamenti

A Giovanna per il Suo assiduo supporto e a Renzo per i Suoi consigli.

Ad Antonella, Alda, Emma, Irma, Vera e Lea per il Loro amore e per condividere quotidianamente con me, talvolta Loro malgrado, la mia passione per l'ingegneria strutturale.

Errata

Per una lista di refusi/errori riscontrati nel testo e relativa correzione, si veda www.steelstudio.it.

Feedback

Si prega di usare sempre www.steelstudio.it per inviare commenti, segnalazioni, suggerimenti.

L'autore ringrazia anticipatamente.

Disclaimer

Il testo, le figure, le tabelle, le formule ed i relativi esempi sono stati prodotti e riportati con la massima cura, nell'intento, da parte dell'autore, di aiutare l'ingegnere lettore a meglio capire ed impostare i propri calcoli relativi alle giunzioni bullonate in acciaio. Tuttavia, è possibile la presenza di refusi e/o errori, per cui l'ingegnere è invitato ad avere come riferimento primario le normative. Non si accettano perciò responsabilità per l'applicazione di formule e/o concetti illustrati in questo testo: l'ingegnere dovrà redigere progetti sotto la propria esclusiva competenza e responsabilità professionale.

INTRODUZIONE

Le strutture in acciaio hanno in Italia alcuni centri formativi e di ricerca di eccellenza (in particolare le università di Milano, Napoli, Trento e zone limitrofe, anche se non solo) ma culturalmente non sono all'Ingegnere italiano note e familiari come il cemento armato.

Questo testo si propone quindi, con una trattazione pratica più che teorica, di illustrare alcuni concetti che possono facilitare e rendere più efficace la progettazione delle connessioni nelle strutture in acciaio ad ingegneri che non la eseguono quotidianamente.

Si dice infatti che i problemi tipici da considerare sulle strutture in acciaio sono soprattutto stabilità e connessioni, per cui si cercherà di soffermarsi su questo secondo fondamentale aspetto delle costruzioni in acciaio, cruciale anche per la competitività economica di realizzazione.

ABBREVIAZIONI

Si riportano di seguito alcune abbreviazioni utilizzate nel testo:

- EC: Eurocodice.
- EN: European Norm.
- NTC: Norme Tecniche per le Costruzioni.
- DIN o Din: Norme Tedesche.
- BS: British Code.
- AISC o Aisc: American Institute of Steel Construction, che emette le prescrizioni per le strutture in acciaio negli USA.

CONCETTI FONDAMENTALI PER IL PROGETTO DELLA STRUTTURA RELATIVAMENTE ALLE GIUNZIONI

In relazione alle giunzioni, il primo concetto fondamentale che l'Ingegnere deve avere chiaro quando inizia il calcolo è quali delle sue connessioni tra elementi strutturali dovranno essere in grado di sviluppare un momento resistente e quali invece sarà possibile eseguire come semplici cerniere. Per poter decidere questo è necessario chiarire il sistema laterale resistente.

1.1. Cerniere e giunzioni in grado di resistere un momento

1.1.1. *Sicurezza, performance, costi*

Le strutture in acciaio devono essenzialmente essere sicure, performanti ed economiche.

Sicure perché fungono da tettoie, soppalchi, palazzi, grattacieli, ponti e tanto altro ancora che ripara, accoglie, serve e protegge l'uomo, quindi un collasso strutturale potrebbe con forte probabilità uccidere vite umane.

Le strutture devono pure essere adatte a svolgere con buona performance l'attività per cui sono state progettate e a sopportare nel tempo i carichi di servizio senza problemi per l'occupabilità. Questi sono i concetti tipici dell'analisi secondo gli stati limite di servizio, che si occupa appunto di verificare, a titolo non limitativo di esempio, che le deformazioni possano evitare il danneggiamento di strutture secondarie oppure che eccessive vibrazioni rendano non confortevole l'abitabilità.

Una cattiva performance danneggerebbe inoltre il valore immobiliare della committenza che ne ha ordinato l'esecuzione.

Allo stesso tempo, per ovvie ragioni di mercato, la struttura deve essere economica e competitiva rispetto alle alternative in altri materiali o di progetto o di concorrenza. L'economicità è un discorso complesso che dipende da tanti fattori ma è compito dell'ingegnere cercare per quel che lo riguarda di rendere la struttura economica nei limiti imposti dalla sicurezza e lo scopo di impiego. L'ingegnere dovrebbe infatti rendere un servizio alla sua clientela anche in termini di costo pur non impattando in questo modo le normative e la funzionalità. Per l'economicità della struttura l'ideazione della giunzioni bullonate riveste un punto molto importante che come cercheremo di illustrare deve essere chiaro al progettista sin dalle prime battute.

1.1.2. *Sistema laterale resistente*

La scelta iniziale delle giunzioni non può prescindere dalla scelta del sistema laterale resistente. Si analizzi questo punto chiave più in dettaglio: l'ipotesi di partenza è che all'ingegnere siano già chiari la geometria della struttura, che sia già stato deciso di farla in acciaio, che siano già definiti seppur sommariamente i carichi di progetto. L'ingegnere potrebbe cioè, per le ipotesi

prese, mettersi al computer e costruire il modello di analisi della struttura con il suo programma di analisi ad elementi finiti. Prima però di tracciare il proprio modello wireframe, l'ingegnere dovrebbe scegliere ed avere chiaro il sistema laterale resistente. Dalla scelta di questo dipende infatti l'economicità e l'imposizione o meno di vincoli architettonici.

I sistemi laterali resistenti possono essere diversi, più o meno combinati. Bisogna inoltre considerare che ogni direzione orizzontale può avere sistemi diversi.

I sistemi laterali resistenti "base" sono:

- controventi;
- portali;
- incastrati alla base (colonne a mensola);
- appoggio ad esistente o struttura ad hoc in altro materiale (scala in c.a., pareti in muratura o altro, ecc.).

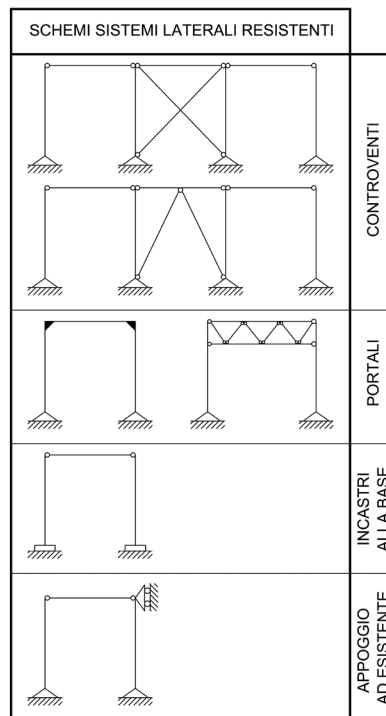


Figura 1.1. Sistemi resistenti laterali

L'ingegnere strutturale che lavora per la carpenteria vorrebbe di solito usare un sistema di controvento perché questo permette la massima economicità. I vantaggi dei controventi sono infatti:

- la struttura è facilmente dimensionata contro le forze orizzontali (solitamente vento e sisma) permettendo un dimensionamento di travi e soprattutto colonne molto economico (i controventi si occupano essenzialmente della resistenza laterale e la colonna può lavorare a sola compressione, a grandi linee);

- le giunzioni possono essere, genericamente, a semplice taglio o azione assiale, cioè economiche e snelle;
- il controllo delle deformazioni laterali della struttura è eccellente;
- buona risposta sismica (con opportuni accorgimenti).

Allo stesso tempo il controvento ha svantaggi che lo possono rendere indesiderato alla committenza od alla parte architettonica:

- ostruisce il passaggio laterale o comunque possibili finestre o aperture;
- può non piacere all'architetto o alla committenza per ragioni estetiche.

Il secondo problema può essere talvolta risolto “esaltando” il controvento e dandogli una precisa valenza architettonica. Ne sono esempi alcuni famosi grattacieli (figura 1.2) ma anche costruzioni più “ordinarie” (figura 1.3) in cui l'architetto ha saputo e voluto creare un'interessante antitesi di materiali e dare risalto ai controventi.

Il punto dell'ostruzione del passaggio viene invece solitamente by-passato scegliendo una campata che si adibisce a zona controventi, se possibile. Questo può solitamente essere fatto alle estremità del sistema strutturale e poi con controventi di falda si riportano le forze a questi (non viene qui approfondito l'uso dei controventi di falda, ma una delle sue funzioni fondamentali, oltre a quella di limitare la lunghezza di libera inflessione di travi inflesse per migliorare la resistenza flessio-torsionale è appunto il collegare campate con schema pendolare ad altre controventate).

Un altro metodo per limitare l'impedimento fisico dei controventi è adattarne la geometria ai vincoli architettonici, utilizzando forme diverse (si vedano immagini ad esempio ma è facile trovare tanti altri casi pratici).



Figura 1.2. Controventi valorizzati come motivo estetico nella John Hancock Tower di Chicago (da Wikipedia, foto di “Akavid”, 2008)



Figura 1.3. Esempio di edificio con controventi valorizzati architettonicamente anche sull'interno (Interpuls, Reggio Emilia)

Detto quindi della bontà della soluzione controventata per le strutture in acciaio e dello sforzo di informazione/riciesta/sensibilizzazione necessario da parte del progettista alla committenza o direzioni lavori per farsi approvare tale soluzione, bisogna concludere che tante volte non si può assumere la controventatura come schema in entrambe le direzioni. È quindi necessario ricorrere a portali o ad incastri alla base (o ad una loro combinazione) se non addirittura all'intervento di ulteriori sistemi (per i quali si esce dal fine di questa trattazione, cioè pareti a taglio in lamiera o altro, sistemi misti di vario genere).

In particolare il vantaggio principale di entrambe le soluzioni diventa quello per cui non era possibile utilizzare i controventi, cioè un'assenza di impedimenti allo sfruttamento delle luci. Inoltre, per il portale (sottolineiamo come un sistema colonne più capriata sia un caso particolare di portale) si hanno come potenziali vantaggi:

- possibile economia (ai danni della colonna) sulla profondità delle travi in quanto la giunzione a momento può permetterne un migliore sfruttamento delle travi;
- aspetto più rassicurante delle colonne che, essendo di taglia maggiore, all'occhio possono risultare più confortanti;
- cerniere alla base, quindi risparmio sulle fondazioni (ancora maggiori rispetto ai controventi in quanto questi ultimi potrebbero "alzare" la struttura e richiedere una dimensione di zavorra di alcuni plinti);
- discreta risposta sismica (con opportuni accorgimenti).

Svantaggi per il portale possono invece essere:

- giunzioni in acciaio complesse quindi costose;
- possibile ingombro ulteriore nella zona d'attacco colonna-trave (una giunzione a momento può ridurre l'altezza utile, per cui può diventare necessario sopraelevare l'intera realizzazione); lo stesso ingombro di un sistema a capriata è evidentemente maggiore;

- in media un peggioramento del peso a metro quadro della struttura in acciaio;
- spostamenti laterali da controllare attentamente;
- lunghezza di libera inflessione delle colonne.

Per il sistema laterale resistente con colonna incastrata alla base (mensola) si notano invece come vantaggi:

- luci libere;
- colonne più rassicuranti.

I contro di un sistema con incastro alla base possono essere invece riassunti come:

- sistema di fondazione impegnativo e costoso: grossi plinti, eventuali palificazioni;
- spostamenti laterali da verificare (anche se migliori del sistema a portale puro in media);
- necessario maggior utilizzo di materiale;
- lunghezza di libera inflessione delle colonne;
- cattiva performance sismica (le normative americane per esempio ne vietano tout court l'utilizzo per edifici di almeno "media" importanza in zone altamente sismiche).

Tante volte quindi per sopperire al problema delle deformazioni e migliorare la snellezza delle colonne si adottano entrambi i sistemi portale-incastro alla base in combinazione.










VALORE "K"	CASI	TIPI DI VINCOLO	SISTEMI CONTROVENTATI O EQUIVALENTI ($k \leq 1$)
Intervallo consigliato 0.50 - 0.70		 Rotazioni e traslazioni impedito  Rotazioni e traslazioni impedito	
Intervallo consigliato 0.70 - 0.80		 Rotazioni libere e traslazioni impedito  Rotazioni e traslazioni impedito	
Valore consigliato 1.00		 Rotazioni libere e traslazioni impedito  Rotazioni libere e traslazioni impedito	

Figura 1.4. Coefficiente per snellezza in sistemi controventati

VALORE "K"	CASI	TIPI DI VINCOLO	SISTEMI NON CONTROVENTATI ($k > 1$)
Intervallo consigliato 1.10 - 1.20		Rotazioni impedito e traslazioni libere Rotazioni e traslazioni impedito	
Intervallo consigliato 2.00 - 2.10		Rotazioni e traslazioni libere Rotazioni e traslazioni impedito	
Valore consigliato 2.00		Rotazioni impedito e traslazioni libere Rotazioni libere e traslazioni impedito	

Figura 1.5. Coefficiente per snellezza in sistemi non controventati

Come si vede dalla figura infatti, la lunghezza di libera inflessione delle colonne è doppia della lunghezza fisica della colonna in entrambi i sistemi “puri”, mentre torna vicino all’unità (per i sistemi controventati si ha 1) nel sistema misto.

Le situazioni sono comunque varie e disparate e non sempre la controventatura è la prima ipotesi da valutare: ad esempio, se la struttura presenta ampie luci (oltre i 20 m) e in quella direzione si prevedono capriate già a livello architettonico, questo è già un sistema a portale e non conviene mettere controventi in quella direzione mentre potrebbe essere una buona idea controventare l’asse debole delle colonne (direzione opposta alle capriate solitamente).

L’ingegnere con chiaro il concetto di sistema laterale resistente saprà comunque valutare al meglio la convenienza e consigliare la committenza dal punto di vista strutturale per raggiungere sicurezza, funzionalità ed economia.

1.1.3. Cerniere ed incastri nel modello di calcolo ad elementi finiti

Come sopra illustrato, è quindi necessario che il progettista scelga il sistema resistente in accordo con committenza e architetto prima di costruire il suo modello di calcolo.

Sottolineiamo che il problema non va posto in questi termini alla committenza, non abituata a problematiche di calcolo e non familiare con terminologie quali “sistema laterale resistente”. È

invece consigliabile porre il problema in termini di fattibilità architettonica, cercando di capire dove si può controventare e spiegando i benefici in termini di economia e performance che i controventi possono dare. Dove il controvento non è permesso o non piace proprio, l'ingegnere dovrà pensare alle alternative sopra esposte o ad una loro combinazione.

Ora, nel modello di calcolo, l'ingegnere sa dove dovrà mettere *incastri* e dove potrà invece svincolare e modellare delle *cerniere*.

Al di fuori di possibili scelte di mettere travi in continuità per risparmiare peso o migliorare le deformazioni, tutte le giunzioni che non servono strettamente alla stabilità globale della struttura (cioè al sistema laterale resistente a portale e/o pendolo invertito), dovrebbero infatti essere modellate a favore di sicurezza e per l'economia delle giunzioni come cerniere.

È infatti un possibile problema per l'ingegnere non familiare con le strutture in acciaio una modellazione non attenta al sistema laterale resistente e non attenta ai vincoli tra le travi. Se infatti tutto viene modellato "incastro", la struttura può venire sottodimensionata e labile se, quando si realizzano le giunzioni, queste non vengono correttamente eseguite e irrigidite come veri incastri. Anche nel caso in cui si realizzassero davvero come incastri, l'economicità di tale sistema tutto ad "incastro" con complesse e laboriose giunzioni è quantomeno dubbia.

Sintetizzando, l'ordine progettuale dovrebbe essere il seguente:

- scegliere il sistema laterale;
- modellare come incastro ciò che è strettamente necessario ad esso (e quindi alla stabilità globale della struttura);
- modellare come cerniera tutto il resto;
- dimensionare la struttura;
- eventualmente scegliere di rendere più rigido qualche nodo (aggiungere incastri) per risparmiare materiale (il dimensionamento può essere ritoccato al ribasso) o per migliorare gli spostamenti se necessario (a discapito di giunzioni meno semplici);
- dimensionare i nodi;
- calcolare le reali rigidezze dei nodi;
- confrontare se il comportamento assunto (incastro o cerniera) è congruo con il particolare giunto scelto;
- eventualmente modificare lo schema di calcolo originale con molle per simulare i giunti con comportamento intermedio (semi-rigidi);
- ri-eseguire il dimensionamento e reiterare i passaggi elencati ove e se necessario.

Si noti che con un dimensionamento di tipo elastico "classico" l'approccio di verifica delle rigidezze era più secondo esperienza ma le normative oggi iniziano a richiedere una verifica anche analitica.

1.2. La cerniera plastica

A differenza del calcestruzzo armato in cui l'appoggio e l'incastro sono più facilmente individuabili in quanto la connessione fisica è simile a quella ideale, per l'acciaio il concetto è meno intuitivo.

Se per il calcestruzzo si può provvedere realmente ad appoggiare una trave su un'altra, con l'acciaio quello che viene schematizzato come cerniera può non sembrare come cerniera a chi non progetta regolarmente in acciaio.

Le giunzioni a cerniera infatti non sono dei veri e propri appoggi o snodi e sono in grado di resistere inizialmente dei momenti di calcolo più o meno rilevanti. L'ingegnere deve però sapere che l'esperienza e la duttilità del materiale rendono quel particolare tipo di collegamento utilizzato schematizzabile come cerniera e che anni di strutture in acciaio hanno dimostrato tale procedimento a favore di sicurezza. Ne discende anche che non sarebbe a favore di sicurezza affidargli dei momenti a livello di calcolo, in particolare se questi momenti sono essenziali alla stabilità della struttura. L'acciaio infatti ha nella duttilità un concetto fondamentale e il materiale, una volta superato il limite di snervamento, in assenza di fenomeni fragili o instabilizzanti, si plasticizza, comportandosi in quella zona come una cerniera e ridistribuendo gli sforzi. Questo spiega come alcune giunzioni che non sono a prima vista classificabili come cerniere, siano nella pratica progettuale usualmente considerate come tali.

Come anche accennato al paragrafo precedente, un comportamento intermedio cioè semi-rigido è previsto ad esempio dalla stesso Eurocodice e dalle AISC americane (giunti "partially restrained", cioè PR) ma è importante capire il concetto di cerniera plastica usato per anni e anni nella progettazione per cui si vedono più in dettaglio due esempi tipici quali possono essere le giunzioni saldate delle capriate e le piastre di base.

1.2.1. *Piatto di base*

I piatti di base, possono essere schematizzati sia come cerniere che come incastri.



Figura 1.6. *Base colonne della Stazione di Milano (foto di Massimiliano Manzini)*

Per schematizzare un piatto di base come cerniera non è necessario creare un giunto a cerniera perfetto (come si usava fare anni indietro, si veda ad esempio la struttura della stazione ferroviaria di Milano in fotografia) o mettere un solo tirafondo: anche schemi di piatti di base classici, addirittura con costolature, come quelli riportati in figura 1.7 hanno infatti la duttilità necessaria per essere considerati delle cerniere perché ad un eventuale snervamento conseguente ad un primo momento, la giunzione si plasticizza creando una cerniera plastica. È quindi a favore di sicurezza considerare lo schema da subito come cerniera (ed il momento di calcolo inizialmente