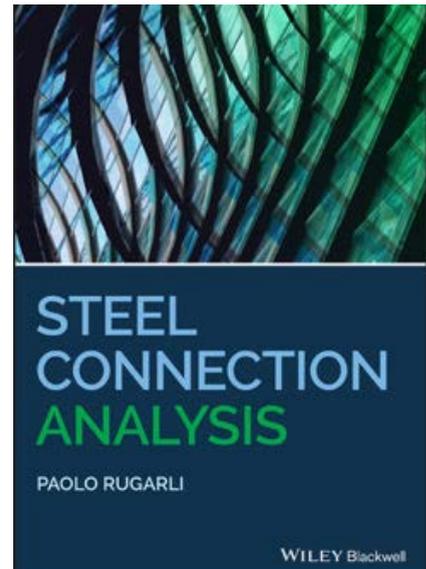


# METODI GENERALI PER IL CALCOLO DELLE CONNESSIONI

## General method for steel connection analysis and design

Paolo Rugarli, ingegnere strutturista, progettista e sviluppatore di software di calcolo per l'ingegneria strutturale (Sargon, CSE, Cesco, SICS, ed altri) è titolare di Castalia srl. Si è laureato al Politecnico di Milano nel 1987. Ha scritto diversi libri (Calcolo Strutturale con gli Elementi Finiti, anche tradotto in inglese, Analisi Modale Ragionata, Validazione Strutturale ed altri), tradotto diversi autori (Heyman, Booth, Gardner e Nethercot), curato la pubblicazione in italiano della collana ICE *Designers' Guide to Eurocodes*, e ideato e curato la collana *I Diagonali* per EPC. Ha spesso contribuito al dibattito sulle norme e sui metodi di calcolo con articoli ed interventi pubblici.

La redazione di Costruzioni Metalliche lo ha intervistato a proposito della pubblicazione del suo ultimo libro, per l'editore Wiley-Blackwell, dal titolo: "Steel Connection Analysis".



ING. RUGARLI, in questi giorni è uscito un suo ponderoso volume, più di 500 pagine, dal titolo: "Steel Connection Analysis". Ci sono molti libri in commercio sull'argomento, c'era proprio bisogno di un nuovo testo?

Ci sono bellissimi libri sul calcolo delle strutture in acciaio ma pochi solo sulle connessioni, i quali peraltro trattano aspetti tecnologici ed aspetti di calcolo. Tuttavia i metodi di calcolo che vengono illustrati in queste pubblicazioni sono metodi *ad hoc* relativi ad alcune (non molte) tipologie di nodi, in genere molto semplici, anzi semplificate.

In che senso semplificate?

Nel senso che il nodo reale di una struttura in acciaio, nel quale convergono diversi elementi strutturali, viene "sfronato" da alcuni di essi, giudicati secondari o magari viene affrontato trattandoli uno per volta perdendo così la visione di insieme. Inoltre lo stato di sforzo è semplificato trascurando svariate componenti di azione interna. Ci si riporta così a schemi semplici, per lo più bidimensionali, e a poche, pochissime condizioni di carico. Per questi schemi sono stati elaborati vari metodi di calcolo, ognuno adatto ad una tipologia: la trave incernierata, la trave flangiata, il

diagonale di controvento, il nodo di continuità di una colonna, e così via. In realtà soprattutto con le norme degli ultimi trent'anni le cose sono molto più complicate.

E il suo libro invece?

Il mio libro affronta il problema del calcolo delle connessioni in generale, per qualunque tipologia di nodo reale, con un qualsiasi numero di aste convergenti e con qualsivoglia combinazione di parti (piatti e altro) saldature e bulloni, nello spazio tridimensionale e non nel piano, e per ogni possibile combinazione di carico. Ma è proprio necessario questo approccio generale, non sono più comode e più gestibili delle procedure tradizionali, che possono essere applicate anche a mano, o al massimo con un foglio excel?

Dipende. Facciamo un paragone con il calcolo delle strutture. Se lei ha una trave semplicemente appoggiata, con una disposizione semplice di carico per i permanenti ed una altrettanto semplice per i carichi variabili, e vuole dimensionarla: ricorre ad un programma di calcolo generale, basato sul metodo degli spostamenti e che magari tiene anche conto degli effetti del second'ordine, o fa dei semplici calcoli manuali con carta matita e calcolatrice?

**Certamente faccio soltanto dei calcoli manuali!**

Ma se lei ha invece un telaio spaziale, con aste anche inclinate, in parte controventato ed in parte con attacchi a momento, e poi magari abbastanza deformabile da dover pensare che gli effetti del second'ordine non sia saggio trascurarli, ed ha per giunta innumerevoli combinazioni di carichi, come si comporta?

**Faccio comunque dei calcoli manuali orientativi, per un primo dimensionamento e per un controllo della fase successiva, e poi uso un programma di calcolo che tenga conto di tutti i fenomeni in gioco.**

Giusto, la penso esattamente come lei. Lo stesso vale per il calcolo delle connessioni. Vede, se dovessimo progettare un edificio molto regolare, con colonne pendolari e travi semplicemente appoggiate e realizzassimo i nodi delle travi con doppi angolari, o con *fin plate* o con *end plate*, e se decidessimo che è saggio e possibile trascurare azioni assiali nelle travi e tagli in direzione orizzontale, allora potremmo fermarci a dei calcoli manuali che seguono procedure collaudate da molti anni. Anzi, sarebbe ancora più saggio fare come fanno gl'Inglese con i loro Green Book: unificare queste connessioni, calcolarle una volta per tutte (e nell'unificarle tenere conto delle esigenze dei costruttori, che poi si riverberano in un risparmio per il committente), e dare al progettista un catalogo di connessioni dalle quale scegliere. Ma molte strutture sono estremamente complesse anche nelle connessioni, sia per scelte architettoniche che per necessità impiantistiche (se si opera nel campo industriale). In queste connessioni convergono molte aste disposte nello spazio, ci sono dei piatti di collegamento di ogni foggia, saldature e bulloni comunque disposti, ci sono innumerevoli combinazioni di carico. Certo, si può "buttar via" alcune aste, molte combinazioni di carico, riportarsi a schemi semplici e dimensionare con questi. Ma siamo sicuri che così facendo non trascuriamo azioni, trasmesse dalle parti "sfrondate", che sono invece importanti per il dimensionamento? Penso che il calcolo delle connessioni con le metodologie tradizionali, valide per strutture semplici e poche combinazioni, non sia più sostanzialmente applicabile alle situazioni molto più complesse che oggi dobbiamo considerare.

**Esistono già però delle teorie abbastanza generali, come ad esempio il metodo del T-stub per il calcolo delle connessioni trave-colonna flangiata e delle piastre di base. Perché in questi casi usare un metodo generale e non queste teorie?**

Perché il metodo del T-stub non è affatto generale, ma è limitato a presso o tenso flessione retta, e a poche disposizioni geometriche. Se lei ha, per esempio, una trave flangiata con 4 file di bulloni in verticale invece che 2, o ha 2 file orizzontali di bulloni sopra l'ala superiore della trave invece che una, o ha una piastra di base con 3 tirafondi per parte invece che 2: può applicare il metodo del T-stub così come illustrato nell'Eurocodice EN 1993-1-8?

No.

Esatto, non può applicarlo, e se prova lei ad adattarlo con buon-senso, in parecchi casi potrebbe non saper valutare di quanto è stato approssimato. E allora? Un metodo più generale sarebbe la scelta migliore.

**I metodi approssimati sono semplici da impiegare però, consentono di fare calcoli manuali, quelli generali richiedono invece del software.**

Ma lei ha mai provato ad applicare manualmente il metodo del T-stub ad una trave flangiata anche con soli 4 bulloni in prossimità dell'ala tesa e 2 di quella compressa? Deve fare moltissime moltiplicazioni delle quali non capisce il significato fisico, con un altissimo rischio di commettere errori. Allora, per quella flangia, molto meglio applicare metodi ancor più semplificati, quali quelli che si trovavano sui vecchi quaderni Italsider, che almeno governa con pochi calcoli. Il T-stub non è generale e comunque richiede del software per applicarlo. Del resto, se calcola una struttura complicata accetta di usare del software: perché se calcola una connessione complicata dovrebbe rifiutare di usarlo? **Capisco che con un metodo generale si possono cogliere le vere forze che i vari elementi costituenti una connessione si scambiano. Ma, come insegna il teorema statico dell'analisi limite, non è necessario conoscere le vere forze, basta ipotizzare distribuzioni equilibrate di forze e trascurare la congruenza, e dimensionare per queste forze i vari elementi della connessione. Se così facendo dimensiono i vari elementi con un moltiplicatore limite pari a 1, cioè li sfrutto al massimo, il teorema mi garantisce che il "vero" moltiplicatore limite, cioè quello che otterrei se usassi le "vere" forze che i vari elementi si scambiano e che tengono conto sia dell'equilibrio che della congruenza, è maggiore o eguale di 1. Cioè, usando metodi approssimati e non generali, sono sempre a favore della sicurezza. Dunque?**

Lo scopo di un metodo generale non è calcolare le forze che si scambiano "esattamente". Lo scopo di un metodo generale è sollevare il progettista da un mare di calcoli e non trascurare alcun effetto o modalità di crisi potenzialmente disastroso o dimensionante. I metodi generali che ho proposto (non sono uno, ma due con approcci intermedi tra i due) e che trova nel libro, non si pongono necessariamente lo scopo di cogliere le "vere" forze all'interno di una connessione. Quelle, me lo lasci dire, non c'è metodo che le possa cogliere (vale quanto detto da Jacques Heyman nel suo capolavoro *Lo Scheletro di Pietra*, da me tradotto e proposto ai lettori italiani: i giochi foro-bullone, gli attriti, le diverse proprietà dei materiali, le tolleranze dimensionali, le non linearità di contatto, l'incertezza sui dati di ingresso di casi reali, eccetera rendono di fatto impossibile il calcolo "esatto"). I metodi che ho proposto si basano sui tre pilastri della analisi delle connessioni (e della meccanica): equilibrio, principio di azione e reazione e teorema statico della analisi limite. Nel

capitolo 5 del libro ho lungamente discusso questi aspetti, con anche i “pilastri mancanti” relativi a fatica, frattura e *buckling*. Ma allora perché i metodi semplificati non bastano? Perché essi hanno anche un’altra limitazione: *considerano poche componenti di sforzo* e ne “buttano via” parecchie altre che agiscono sul nodo, derivanti anche da altre aste che esistono e vengono trascurate, ed inoltre non considerano la contemporaneità degli effetti, limitando le verifiche spesso a formule convenzionali non sempre applicabili. I metodi generali da me proposti invece considerano tutte le componenti di sforzo agenti e su queste, e non solo su parte di esse, applicano la filosofia del sistema equilibrato ma non necessariamente congruente. In questo modo, e solo in questo modo almeno per le connessioni non proprio semplicissime, si può essere sicuri di avere progettato un nodo stando dalla parte della sicurezza ed in modo saldamente ancorato ai principi base della meccanica, che, mi si lasci dire, non dipendono dalle normative.

Lei è un ricercatore e queste sono teorie, certamente valide ma teorie. È sicuro che, calando queste teorie all’interno di un software, non vengano fuori dei problemi pratici, che insomma la pratica possa dimostrare che le sue teorie non sono completamente generalizzabili, applicabili cioè a tutte le condizioni reali che si incontrano nella prassi progettuale?

Io sono innanzi tutto un ingegnere strutturista, poi un progettista e sviluppatore di software di calcolo per ingegneri strutturisti ed infine, per necessità, un ricercatore. Dico “per necessità” perché la mia ricerca è orientata a risolvere problemi reali, saldamente ancorati alle necessità pratiche. In questo caso: come tener conto di tutte le azioni agenti in un nodo, e di tutte le combinazioni di carichi, e giungere facilmente ad un dimensionamento dalla parte della sicurezza. Detto questo, praticamente tutto quanto ho descritto nel libro io lo ho già applicato in un mio vasto software che è in commercio ormai da dieci anni e che è stato utilizzato da anni da me e dai miei clienti, con risultati soddisfacenti. Lo scenario che si è aperto mi pare del tutto nuovo, anche se la ricerca è tutt’altro che finita.

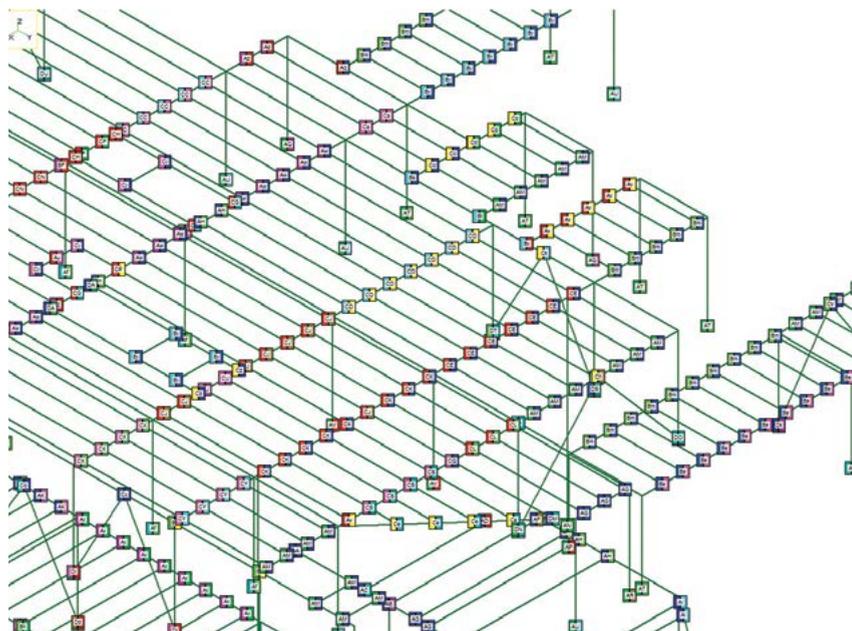
Tenga comunque presente che i metodi esposti in questo libro potrebbero essere applicati, in tutto o in parte, anche da altri sviluppatori per creare altri programmi. Insomma, questo libro non è il manuale di un mio software, ma la base teorica sulla quale si può sia continuare a studiare ed andare avanti, sia sviluppare dei software applicativi.

Vogliamo entrare più nel merito del libro e illustrare i metodi di calcolo proposti?

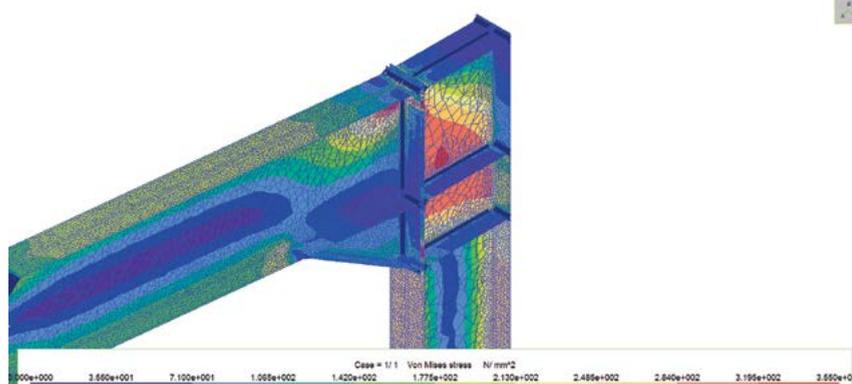
Certamente. Il libro è stato scritto in tredici mesi, ma riflette un lavoro di studio, analisi, approfondimento e sviluppo che mi ha impegnato per ben 17 anni. In un certo senso, il libro è il “diario di bordo” di una navigazione che mi ha condotto a ideare i metodi di cui andiamo a parlare, partendo da problemi eminentemente



Nodo non standard: Parco Forlanini, Milano (foto di Paolo Rugarli)



Riconoscimento dei jnode in una struttura reale. Le diverse istanze dello stesso jnode hanno tutte lo stesso simbolo e vengono selezionate tutte assieme. Alcuni jnode non sono mostrati.



Esempio di modello PFEM con analisi elastica perfettamente plastica.

reali, ancorati ai problemi pratici miei e dei miei clienti che dovevano calcolare complesse connessioni per le loro strutture. **Cosa sono i Jnode?**

Nello sviluppare i miei metodi ho dovuto inventarmi tutta una terminologia, perché non ne esisteva già una. Lo scopo è quello di trasferire rapidamente un preciso significato come sempre quando si propongono nuovi termini. I *jnode* sono nodi del modello di calcolo ad aste della struttura in acciaio (BFEM, Beam Finite Element Model, realizzato con il software che si preferisce) che sono sede di una connessione, o tra due o più membrature, o tra una o più membrature e un riferimento. Ogni *jnode* contiene tutte le informazioni geometriche e statiche che caratterizzano appunto questo “nodo”, ma senza entrare nel dettaglio di come materialmente il nodo è realmente costruito. Ci sono varie tipologie di *jnode*, che io ho enumerato, i più frequenti sono quelli gerarchici, dove esiste una membratura master, che “riceve” le altre.

E' importante che un software che si occupa di progettazione di connessioni sia in grado di individuare in modo automatico, in un modello strutturale BFEM, i *jnode* diversi tra loro e le loro diverse istanze identiche nella struttura, perché sono quelli da progettare. Se pensiamo all'edificio con colonne pendolari, travi incernierate e magari tutte uguali cui si accennava prima, allora lì vi saranno 4-5 *jnode* differenti e una individuazione automatica sarebbe superflua. Ma se pensiamo, ad esempio, ad un complesso edificio industriale, l'incastellatura che regge una caldaia di una centrale termica per esempio, allora lì individuare le tipologie di *jnode* da dimensionare e disegnare è un lavoro improbo da fare a mano. Ma il caso peggiore credo che siano quelle strutture, tanto amate dagli architetti, la cui forma è tale che non c'è un elemento di carpenteria uguale all'altro, e conseguentemente un nodo uguale all'altro. Ho avuto modo di mettere alla prova l'algoritmo per la individuazione dei *jnode* in strutture particolarmente complesse, ed esso ha mostrato di funzionare egregiamente.

L'individuazione dunque dei *jnode* di una struttura, con le relative informazioni, è il primo passo per il progetto delle connessioni.

**Ma un *jnode* non è un nodo reale, fisico, della struttura.**

Certamente no. Infatti il passo successivo è il passaggio dal *jnode* al nodo fisico, che ho definito *renode*, “real node”. Il *renode* è proprio il nodo fisico, tridimensionale, formato dai profili che convergono in esso, e dai piatti, angolari, irrigidimenti, cordoni di saldatura, bulloni e quant'altro si trovi all'incrocio delle varie aste. Il *renode* sarà quindi formato da costituenti divisi in **membrature**, tramite (o **force transfer**) cioè tutti quegli elementi (piatti, angolari, spezzoni di profilato, cunei, etc.) che sono necessari per far passare le azioni tra le membrature o tra le membrature ed il riferimento, e **connettori** (bullonature e saldature), che sono gli elementi che collegano membrature e tramite, consentendo il transito degli sforzi. Il *renode* viene costruito

graficamente, con tecniche di modellazione 3D, e consente la definizione di tutte le eventuali (ma quasi immancabili) eccentricità che ci sono tra i vari costituenti, in modo che i pacchetti di forze scambiati siano correttamente posizionati nello spazio. All'interno di ogni *renode* si individuano automaticamente le catene di passaggio degli sforzi, che vedono i connettori come protagonisti. Ciò consente in modo automatico di analizzare la coerenza e corretta progettazione per così dire “logica” del *renode*. Per esemplificare in modo banale: se ho due profilati IPE in trazione e li collego con due coprigiunti d'anima collegati a ciascun profilo mediante 2 bulloni, avrò due catene: dalla membratura A alla bullonatura B1, dalla bullonatura B1 al piatto P1, dal piatto P1 alla bullonatura B2, e dalla bullonatura B2 alla membratura B: “mA:B1:P1:B2:mB”. L'altra catena sarà: “mA:B1:P2:B2:mB”. In nodi più complessi le catene saranno magari centinaia e molto più lunghe ma, con l'analisi da me fatta, il software che ne deriva può individuarle automaticamente. Queste catene possono essere agevolmente rappresentate mediante grafi. Il *renode* sarà ovviamente corredato da tutte le caratteristiche di costituenti e connettori, e dalle azioni che i profili si scambiano per tutta la serie delle combinazioni di carichi.

**Come si fa allora a calcolare la distribuzione degli sforzi nei vari elementi (costituenti e connettori) che collegano tra loro i profili?**

Si può fare, tenendo presente una configurazione assolutamente generica in due modi principali ed in un terzo che utilizza entrambi:

- 1) Mediante un approccio ibrido;
- 2) Mediante un approccio PFEM.
- 3) Mediante un mix dei due metodi precedenti.

**Cos'è un approccio ibrido?**

Si tratta di costruire un particolare modello ad elementi finiti (Initial Renode Finite Element Model, IRFEM), nel quale i pacchetti di forze generalizzate scambiati dai connettori alle loro varie estremità, tre forze e tre momenti, sono le incognite principali. Gli estremi dei connettori sono i punti ideali in cui i pacchetti di forze vengono scambiati. Il modello IRFEM si può costruire automaticamente per qualsiasi *renode*, dal più semplice al più complesso. Nel modello IRFEM:

- a) Le membrature ed i tramite sono ipotizzati come corpi *rigidi*;
- b) I connettori (bullonature e saldature) sono schematizzati come corpi *deformabili*, tenendo conto delle loro caratteristiche e della loro posizione (e anche della rigidità locale associata al rifollamento).

La parola “Elementi Finiti” non deve far pensare a modelli complessi con decine di migliaia di gradi di libertà. Avendo semplificato l'analisi con l'ipotesi di corpi rigidi applicata a membrature e tramite, l'implementazione software di una tale tecnica è abbastanza semplice, per chi volesse costruire un nuovo software.

Ovviamente ciò è già stato implementato da circa 10 anni nel mio programma. Il grosso della difficoltà è stato comprendere che la chiave di volta era lo scambio di pacchetti di forze idealizzati da parte dei connettori (da cui poi i concetti di iso- iper- ed ipo- connettività), e poi nel definire le matrici di rigidezza dei connettori, cioè delle bullonature (considerate come gruppi di bulloni affini per elementi connessi, e tali da definire quindi un unico connettore) e delle saldature (anch'esse viste come gruppi di cordoni affini e tali da definire un unico connettore). A valle di questa analisi IRFEM, che è rapidissima, si trovano i pacchetti di forze dei connettori in equilibrio con le azioni interne delle membrature. Ciò in perfetta aderenza al teorema statico della analisi limite ed all'equilibrio. Quindi, come risultato dell'analisi, si sono trovati pacchetti di forze che rispettano l'equilibrio ma non necessariamente la congruenza, così come il teorema statico dell'analisi limite consente. A questo punto i pacchetti di forze di insieme possono essere distribuiti ai sub connettori (singoli bulloni e singoli cordoni) in coerenza con le ipotesi assunte, e questi possono essere verificati con le usuali regole. Il principio di azione e reazione applicato a livello di sub connettore consente di conoscere in dettaglio le forze che caricano localmente le membrature ed i tramite, autoequilibrati sotto questi sistemi di forze. Essi possono poi essere verificati con regole semplici anch'essi, oppure modellati singolarmente ad elementi finiti in modo automatico (SCOFEM, single constituent finite element model), sotto l'azione delle forze equilibrate trovate, e quindi verificati.

**Quando parla di "usuali regole" per connettori e costituenti, si riferisce alle prescrizioni delle normative (taglio dei bulloni, rifollamento dei piatti, calcolo delle saldature, *block shear*, etc.)?** Sì, certamente. Tenga però presente che alcune regole sono state estese. Le faccio l'esempio del *block shear*, dove le norme fanno il caso più semplice: blocco rettangolare con un lato parallelo all'azione, e quindi un lato che lavora a taglio ed uno a trazione. Io ho esteso la regola a piatti di forma generica con generiche distribuzioni di forze caricate da singole forze (i tagli dei bulloni) comunque orientate. Vengono esaminate una moltitudine di modalità di rotture a blocco, assegnato un punteggio ad ognuna ed alla fine prescelta la peggiore. Il tutto in automatico.

Ricordiamo poi che il discorso del trovare sistemi di forze equilibrati ma non congruenti vale se si escludono: rotture fragili, *buckling* locale, fatica. Questi aspetti sono discussi nel capitolo 5.

**Cosa sono gli approcci ibrido-PFEM e PFEM?**

Per PFEM intendo: Pure Finite Element Model. Cioè una analisi FEM tradizionale (ho introdotto il termine per distinguerla dalla IRFEM di cui ho detto prima). E' difficile sintetizzare tutto il lavoro fatto ma ci provo.

Se si usa un approccio PFEM, si schematizza tutto il *renode* in elementi finiti, usando elementi plate shell per membrature e tramite. In questo caso le ipotesi di rigidezza di IRFEM vengono

rilasciate e gli stessi elementi finiti speciali usati per i singoli bulloni e segmenti di cordone ai fini della modellazione IRFEM vengono impiegati in un modello PFEM globale, ma senza far conto sulla organizzazione dei sub connettori derivante dalla ipotizzata rigidezza dei pezzi. Il metodo è quindi la generalizzazione logicamente coerente del metodo IRFEM. Se si modellano membrature e tramite con materiali rigidi, si ritrovano i risultati IRFEM. La creazione del modello e la sua analisi in campo lineare o con limitata non linearità di materiale è di solito abbastanza rapida, anche per molte combinazioni (poche decine di secondi o pochi minuti). Certo, su modelli molto grandi, con tutte e tre le non linearità presenti (materiale, geometrica e di contatto) e con le moltissime combinazioni che dobbiamo considerare esso può diventare molto oneroso. Una analisi PFEM va a mio avviso applicata in specie quando l'analisi ibrida, per qualche ragione, non convince, o anche per fare un confronto.

L'approccio ibrido-PFEM (MCOFEM, Multiple Constituent Finite Element Model) si ha quando una parte del *renode* è modellata MCOFEM e nel modello MCOFEM si usano come forze applicate in arrivo dall'"esterno" parte dei pacchetti di forze scambiati calcolati dal modello IRFEM.

**Quindi, se un progettista calcola le connessioni seguendo i metodi da lei proposti (con il suo software o con software di altri che seguano gli stessi principi), può rinunciare all'uso delle procedure semplificate sempre usate, e presenti in molti programmi di calcolo?**

No. Nel mio stesso programma esse continuano ad essere usate come uno dei metodi applicabili in certi casi scelti dall'analista. Io credo che le procedure semplificate che sono state usate per decenni non perderanno il loro valore, esattamente come la capacità di calcolare a mano un arco a tre cerniere è premessa indispensabile per chi voglia fare modelli complessi. La loro applicabilità è però stata messa a dura prova da tutti i cambiamenti che ci sono stati e dal drastico aumento della complessità dei problemi che come strutturisti dobbiamo risolvere. Anche per i nodi è quindi tempo che si introducano metodi generali, sempre sorretti dalla competenza del progettista, dal suo indispensabile giudizio critico, e da un controllo o predimensionamento alternativo che non deve mai mancare.

**Un'ultima domanda: nel libro lei ha ringraziato i suoi professori al Politecnico di Milano, come mai questo ricordo a distanza di trent'anni?**

Credo di essere stato molto fortunato a frequentare il Politecnico di Milano nei primi anni '80, e credo che senza la ottima formazione che ho ricevuto non avrei mai potuto fare le cose che ho fatto. Mi è sembrato giusto ricordare alcuni dei professori che hanno particolarmente influito sulla mia formazione, e citare la mia Scuola, il Politecnico di Milano, alla quale sono legato da sentimenti di affetto e riconoscenza.