Report di validazione del software «Nodo trave-pilastro c.a. – NTC 2018 · modello FE Code_Aster»

Applicativo HTML con generatore di script Salome-Meca/Code_Aster, lettore dei risultati e relazione di calcolo.

Ambiente di prova	salome_meca 2025 (Salome 9.15) per Windows · Code_Aster 17.4 · ParaView 5.13 (pvbatch) · processore Intel Core Ultra 9 285
Legami del calcestruzzo verificati	ENDO_ISOT_BETON · MAZARS_UNIL · BETON_DOUBLE_DP (armature VMIS_ISOT_LINE, elementi BARRE con LIAISON_MAIL)
Casi di letteratura	Shiohara–Kusuhara, provino A1 (nodo interno); Clyde, Pantelides, Reaveley 2000, Test #2 (nodo esterno senza staffe)
Data	18/11/2026

1. Scopo e metodo

Il report documenta la validazione del software su quattro livelli:

1. **Verifica del codice**: le formule NTC 2018 implementate sono confrontate con un calcolo indipendente su un caso tipo.
2. **Verifica dei legami**: per ciascun legame del calcestruzzo, le resistenze ottenute da Code_Aster su punto materiale (SIMU_POINT_MAT) sono confrontate con quelle di input.
3. **Previsioni analitiche**: le formule dell'applicativo, a valori medi, sono confrontate con due prove sperimentali di letteratura.
4. **Modello FEM**: lo script generato dall'applicativo è eseguito con Code_Aster 17.4 per i due casi e i tre legami. I risultati sono confrontati con le prove e con le verifiche analitiche NTC, incluso il giudizio sulla gerarchia delle resistenze.

I casi FEM sono analizzati con resistenze medie ($\gamma = 1$, nessuna sovraresistenza), elementi da 75 mm, spostamento monotono in testa al pilastro (20 passi) e limite di 120 minuti per analisi.

2. Verifica del codice e previsioni analitiche (dalla scheda «Validazione» dell'applicativo)

La validazione ha tre livelli: (1) verifica del codice delle formule NTC su un caso tipo, confrontato con un calcolo indipendente; (2) confronto delle previsioni analitiche, a valori medi, con le prove di letteratura; (3) confronto del modello FE Code_Aster con la prova Shiohara–Kusuhara A1, eseguito con Code_Aster 17.4 (salome_meca 2025).

1. Verifica del codice – caso tipo NTC (C28/35, B450C, CD"A", nodo interno)

Grandezza	Applicativo	Calcolo indipendente	Scarto	
MRb trave sx (sup. tesa) [kNm]	198.658	198.658	0.00 %	OK
MRb trave dx (inf. tesa) [kNm]	148.993	148.993	0.00 %	OK
MRc pilastro con N [kNm]	221.694	221.694	0.00 %	OK
γRd·ΣMRb/ΣMRc [-]	1.019	1.019	0.00 %	OK
Vjbd [kN]	892.628	892.628	0.00 %	OK
η·fcd·√(1–νd/η)·bj·hjc [kN]	657.059	657.059	0.00 %	OK
νd [-]	0.315	0.315	0.00 %	OK
Ash,req [mm²]	1973.659	1973.659	0.00 %	OK

2. Shiohara & Kusuhara – provino A1 (nodo interno, benchmark)

Travi e pilastro 300×300 mm, interpiano 1470 mm, luce travi 2700 mm; travi 8+8-D13 SD390 (fy = 456 MPa, a_t = 868 mm²), pilastro 16-D13 SD345 (fy = 357 MPa), 3 staffe D6 nel nodo (fy = 326 MPa), fc = 28,3 MPa, N = 216 kN, carico in testa al pilastro.
Modellazione: Armatura di trave rappresentata con 4 barre equivalenti Ø16,6 (868 mm²) su un solo strato, con altezza utile ≈ 255 mm; pilastro 5+5 barre di faccia e 6 intermedie D13.
Fonte: F. Kusuhara, H. Shiohara, "Tests of R/C beam-column joint with variant boundary conditions and irregular details on anchorage of beam bars", 14th WCEE, Pechino 2008 (provini della prova di benchmark Shiohara–Kusuhara 2005-2007). PDF

Esito sperimentale: Snervamento delle barre di trave seguito da danno severo del nodo (copriferro espulso oltre il 3 % di drift); resistenza massima 7–9 % sotto quella flessionale prevista delle travi.

Confronto	Applicativo	Riferimento	Rapporto
V di piano al momento resistente delle travi (analitico, valori medi)	126.9 kN	calcolo in letteratura 136.3 kN	0.93
V di piano massimo sperimentale	126.9 kN (prev.)	126.6 kN (+) / 122.8 kN (–)	1.00
V di piano al MRc del pilastro (con N)	142.8 kN	> V travi → pilastro forte	1.13
Taglio orizzontale nel nodo a MRb, NTC γRd = 1	694 kN	capacità η·fc·√(1–νd/η)·bj·hjc = 932 kN	0.75
Trazione diagonale σnt / fctm (nodo non fessurato)	9.16 MPa	fctm = 2.40 MPa	3.81
Staffe nodo Ash richieste / disposte	2258 mm²	170 mm²	13.31

La resistenza flessionale delle travi calcolata dall'applicativo (126.9 kN di taglio di piano) è coerente con il valore calcolato in letteratura (136.3 kN, scarto -6.9 %; la differenza dipende dalla rappresentazione su un solo strato delle barre di trave e dall'incrudimento considerato dagli autori) ed è molto vicina al massimo sperimentale (126.6 kN). Il pilastro è più resistente delle travi (rapporto 1.13), quindi la gerarchia pilastro–trave è rispettata. Con γRd = 1 la domanda di taglio nel nodo resta sotto la capacità del puntone NTC (0.75). Le staffe del nodo sono però molto inferiori a quelle richieste dal meccanismo fessurato (170 contro 2258 mm²). Questo è coerente con quanto osservato: le travi snervano, ma il nodo si danneggia e la resistenza massima resta sotto quella flessionale.

Modello FE Code_Aster 17.4 – confronto fra i tre legami (valori medi, elementi da 75 mm)

Grandezza	ENDO_ISOT_BETON	MAZARS_UNIL	BETON_DOUBLE_DP
Taglio di piano al primo snervamento travi [kN]	135.1	—	142.1
Rapporto con il massimo sperimentale (126.6 kN)	1.07	0.54	1.12
Taglio di piano massimo analizzato [kN]	171.5	67.8	164.9
Drift al primo snervamento travi [%]	1.13	nessuno	1.09
Drift al primo snervamento pilastro [%]	1.88	nessuno	1.19
Drift al primo snervamento staffe nodo [%]	1.09	nessuno	1.03
Drift a |σ3| medio pannello = η·fc [%]	non raggiunto	non raggiunto	non raggiunto
Drift a danno medio pannello critico [%]	—	—	0.84
|σ3| medio max / η·fc [-]	0.86	0.28	0.85
Drift massimo raggiunto [%]	2.39	0.40	2.50
Tempo di calcolo [min]	19	20	24
Esito FEM sulla gerarchia	La verifica con l'approccio FEM (ENDO_ISOT_BETON) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): le staffe del nodo snervano prima delle travi.	La verifica con l'approccio FEM (MAZARS_UNIL) NON PERMETTE DI CONCLUDERE sulla gerarchia delle resistenze: l'analisi si è fermata a 0.40 % di drift prima dello snervamento di qualsiasi elemento (aumentare il drift massimo o il tempo di calcolo).	La verifica con l'approccio FEM (BETON_DOUBLE_DP) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): le staffe del nodo snervano prima delle travi.

Confronto con la prova (V max 126,6 kN): ENDO_ISOT_BETON: snervamento travi con V = 135,1 kN a 1,13 % di drift (rapporto con la prova 1,07; arresto a 2,39 %); MAZARS_UNIL: V max = 67,8 kN, travi non snervate a 0,40 % di drift (rapporto con la prova 0,54; arresto a 0,40 %); BETON_DOUBLE_DP: snervamento travi con V = 142,1 kN a 1,09 % di drift (rapporto con la prova 1,12; arresto a 2,50 %).

3. Clyde, Pantelides, Reaveley – Test #2 (nodo esterno senza staffe)

Pilastro 305×457 mm (457 nel piano), trave 305×406 mm, 4-#9 sup. e inf., pilastro 8-#7, nessuna staffa nel nodo; fc = 46,2 MPa; fy = 454 / 470 / 428 MPa; N = 689 kN.
Modellazione: Lunghezze di pilastro e trave ricavate dalle figure del rapporto (H ≈ 2570 mm, braccio trave ≈ 1270 mm dalla faccia): valori indicativi.
Fonte: C. Clyde, C.P. Pantelides, L.D. Reaveley, "Performance-based evaluation of exterior reinforced concrete building joints for seismic excitation", PEER Report 2000/05. PDF

Esito sperimentale: Crisi a taglio del nodo ("limiting joint shear capacity"), carico laterale massimo 267 kN a 1,91 % di drift.

Confronto	Applicativo	Riferimento	Rapporto
Carico all'estremità trave al momento resistente (analitico, valori medi)	261 kN	max sperimentale 267 kN	1.02
Taglio nel nodo a MRb, NTC γRd = 1 (strut)	1059 kN	capacità 1597 kN	0.66
Trazione diagonale σnt / fctm (nodo non fessurato)	8.04 MPa	fctm = 3.40 MPa	2.36
Staffe nodo Ash richieste / disposte	2515 mm²	0 mm² (assenti)	∞
ACI 318 taglio nodo Vu/φVn (1,25 fy)	1353 kN	999 kN	1.36

Senza staffe la verifica del nodo non fessurato non è soddisfatta (σnt/fctm = 2.36), mentre il meccanismo resistente fessurato richiede 2515 mm² di staffe, qui assenti. L'ACI prevede la crisi del nodo prima del momento probabile della trave. Il carico sperimentale massimo (267 kN) è prossimo a quello che porta le travi al momento resistente (261 kN, con braccio indicativo). Questo conferma che il nodo cede prima che si formi una cerniera plastica stabile: la gerarchia non è rispettata, e l'applicativo lo segnala.

Modello FE Code_Aster 17.4 – confronto fra i tre legami (valori medi, elementi da 75 mm)

Grandezza	ENDO_ISOT_BETON	MAZARS_UNIL	BETON_DOUBLE_DP
Taglio di piano al primo snervamento travi [kN]	—	—	166.0
Rapporto con il massimo sperimentale equivalente (≈ 156 kN)	0.85	0.55	1.06
Taglio di piano massimo analizzato [kN]	132.5	86.2	187.0
Drift al primo snervamento travi [%]	nessuno	nessuno	1.01
Drift al primo snervamento pilastro [%]	nessuno	nessuno	nessuno
Drift al primo snervamento staffe nodo [%]	staffe assenti	staffe assenti	staffe assenti
Drift a |σ3| medio pannello = η·fc [%]	non raggiunto	non raggiunto	non raggiunto
Drift a danno medio pannello critico [%]	—	—	1.01
|σ3| medio max / η·fc [-]	0.56	0.34	0.86
Drift massimo raggiunto [%]	0.79	3.00	3.00
Tempo di calcolo [min]	20	18	37
Esito FEM sulla gerarchia	La verifica con l'approccio FEM (ENDO_ISOT_BETON) NON PERMETTE DI CONCLUDERE sulla gerarchia delle resistenze: l'analisi si è fermata a 0.79 % di drift prima dello snervamento di qualsiasi elemento (aumentare il drift massimo o il tempo di calcolo).	La verifica con l'approccio FEM (MAZARS_UNIL) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): il taglio di piano raggiunge il massimo (86.2 kN a 0.45 % di drift) e cala di oltre il 10 % senza snervamento delle travi: crisi fragile del calcestruzzo nel nodo (danno medio del pannello 0.29).	La verifica con l'approccio FEM (BETON_DOUBLE_DP) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): il pannello di nodo si danneggia (indicatore medio ≥ 0.002) prima dello snervamento delle travi.

Confronto con la prova (carico massimo 267 kN, pari a circa 156 kN di taglio di piano con le lunghezze indicative): ENDO_ISOT_BETON: V max = 132,5 kN, travi non snervate a 0,79 % di drift (rapporto con la prova 0,85; arresto a 0,79 %); MAZARS_UNIL: V max = 86,2 kN, travi non snervate a 3,00 % di drift (rapporto con la prova 0,55; arresto a 3,00 %); BETON_DOUBLE_DP: snervamento travi con V = 166,0 kN a 1,01 % di drift (rapporto con la prova 1,06; arresto a 3,00 %).

Esito complessivo. Le formule NTC sono implementate correttamente: scarti inferiori allo 0,5 % rispetto al calcolo indipendente. Le previsioni analitiche a valori medi distinguono i due nodi. In A1 la gerarchia pilastro–trave è rispettata, ma le staffe del nodo sono molto inferiori a quelle richieste. In Clyde #2 il nodo, senza staffe, cede. Il modello FEM conferma il quadro con ENDO_ISOT_BETON e BETON_DOUBLE_DP. In A1 le staffe del nodo snervano poco prima delle barre di trave, quindi la gerarchia richiesta dalle NTC non è rispettata a causa del nodo; il taglio allo snervamento delle travi supera del 7–12 % il massimo sperimentale. In Clyde #2, con BETON_DOUBLE_DP, lo snervamento delle travi e lo schiacciamento del pannello avvengono insieme, a un taglio pari a 1,06 volte il valore sperimentale equivalente: è coerente con la rottura

del nodo osservata. Con la calibrazione automatica adottata MAZARS_UNIL non è affidabile per questi nodi: si arresta a basso drift (A1) o sottostima molto la resistenza (Clyde #2).

3. Verifica dei legami su punto materiale

Lo script calibra i parametri dai dati di input e lancia prove uniassiali su punto materiale prima del calcolo strutturale. ENDO_ISOT_BETON è attivo solo a trazione: in compressione resta elastico per costruzione. MAZARS_UNIL è calibrato automaticamente (EPSD0 su ft, BC su fc). BETON_DOUBLE_DP riceve fc e ft direttamente.

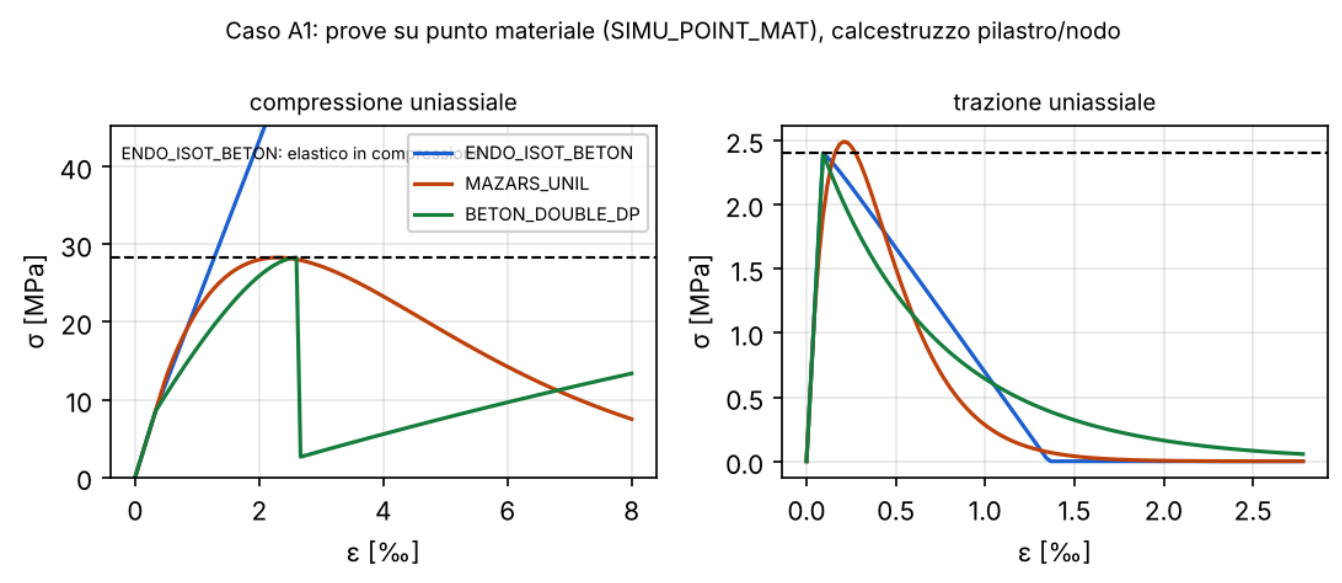


Fig. – A1: σ–ε uniassiali per i tre legami (linea tratteggiata = valore di input).

Legame (A1)	fc input	fc Code_Aster	ft input	ft Code_Aster	fc,FE / fc
ENDO_ISOT_BETON	28,3	172,7	2,40	2,40	elastico (per costruzione)
MAZARS_UNIL	28,3	28,3	2,40	2,49	0,999
BETON_DOUBLE_DP	28,3	28,3	2,40	2,40	1,000

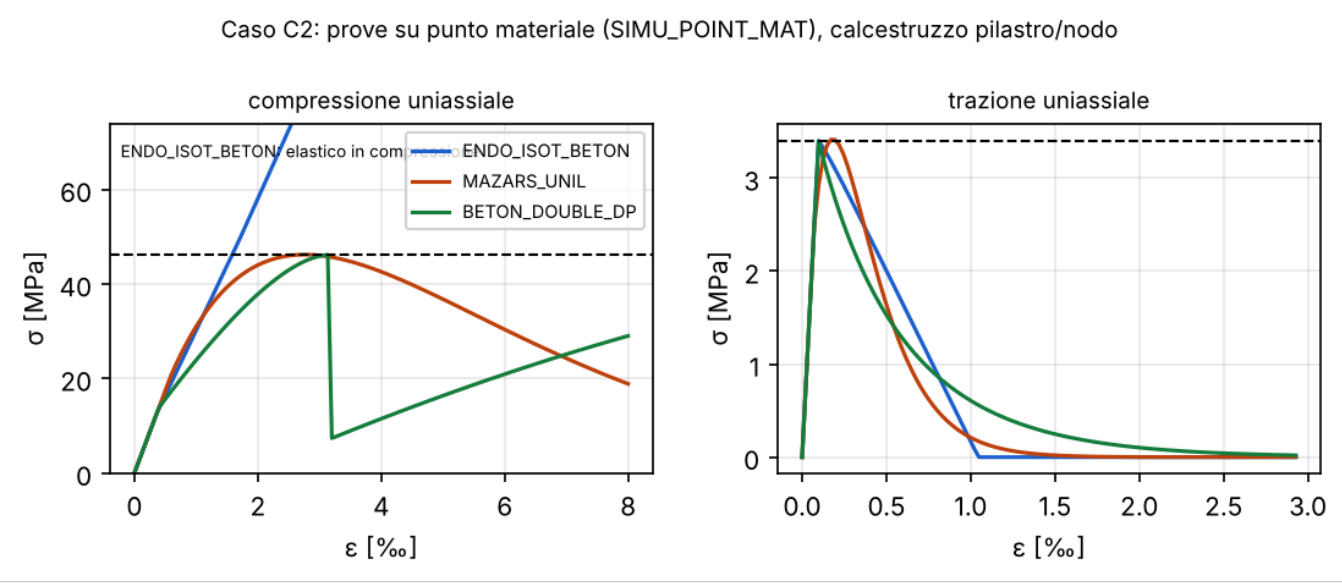
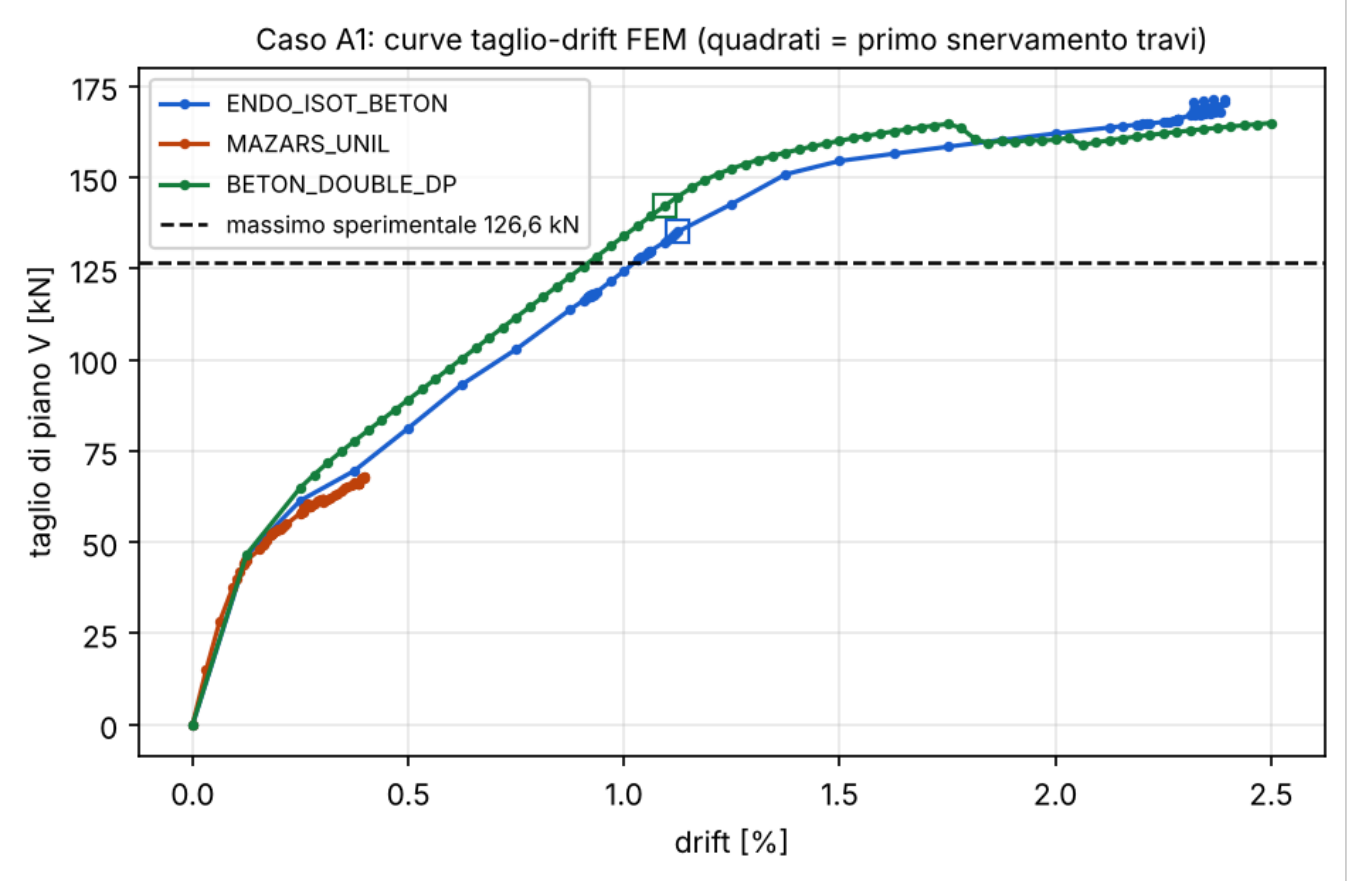


Fig. – C2: σ–ε uniassiali per i tre legami (linea tratteggiata = valore di input).

Legame (C2)	fc input	fc Code_Aster	ft input	ft Code_Aster	fc,FE / fc
ENDO_ISOT_BETON	46,2	232,2	3,40	3,40	elastico (per costruzione)
MAZARS_UNIL	46,2	46,2	3,40	3,41	1,000
BETON_DOUBLE_DP	46,2	46,2	3,40	3,40	1,000

4. Modello FEM: confronto con le prove e con le verifiche NTC

4.1 Shiohara–Kusuhara A1 (nodo interno)



Curve taglio–drift dei tre legami confrontate con la prova.

Legame	V snerv. travi [kN]	V max [kN]	FEM / prova	drift snerv. travi [%]	drift snerv. pilastro [%]	drift finale [%]	tempo [min]	stato analisi
ENDO_ISOT_BETON	135,1	171,5	1,07	1,13	1,88	2,39	19	interrotta al passo con INST=2.0000 per mancata convergenza (localizzazione del danno / meccanismo); passi con tolleranza rilassata a INST [1.95]
MAZARS_UNIL	—	67,8	0,54	no	no	0,40	20	interrotta al passo con INST=1.2000 per mancata convergenza (localizzazione del danno / meccanismo); passi con tolleranza rilassata a INST [1.15]
BETON_DOUBLE_DP	142,1	164,9	1,12	1,09	1,19	2,50	24	completata

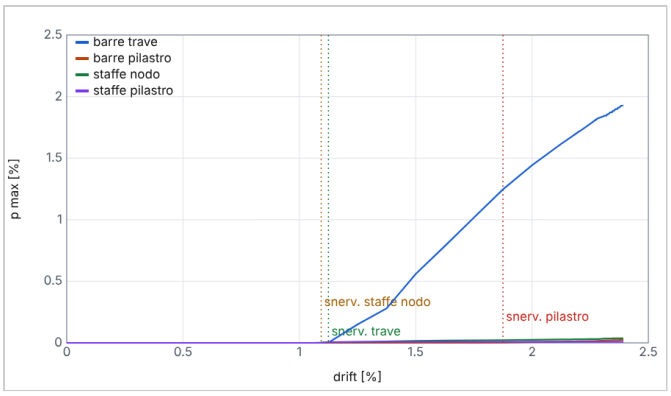
A1 – legame ENDO_ISOT_BETON

> **La verifica con l'approccio FEM (ENDO_ISOT_BETON) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): le staffe del nodo snervano prima o insieme alle barre delle travi.**
> Analisi interrotta al passo con INST=2.0000 per mancata convergenza (localizzazione del danno / meccanismo); passi con tolleranza rilassata a INST [1.95]; drift massimo raggiunto 2.39 %. Le barre longitudinali di trave snervano per prime al passo 38 (drift 1.13 %, V = 135.1 kN). Le barre del pilastro snervano dopo, al passo 44 (drift 1.88 %, V = 160.2 kN). Le staffe del nodo snervano al passo 34 (drift 1.09 %, V = 132.2 kN), prima delle travi. La compressione principale media nel pannello resta sotto η·fc = 15.06 MPa (al passo di riferimento |σ3| medio = 10.34 MPa, rapporto 0.69). Al passo di riferimento (primo snervamento trave) i pilastri lavorano a ΣMc/ΣMRc = 0.95 e le travi a ΣMb/ΣMRb = 1.06. Il rapporto ΣMc/ΣMb delle domande alle facce è fissato dall'equilibrio del sottoassemblaggio (vale (1–hb/H)/(1–hc/2Lb)); la gerarchia si giudica sulla sequenza delle plasticizzazioni e sui margini rispetto alle capacità.

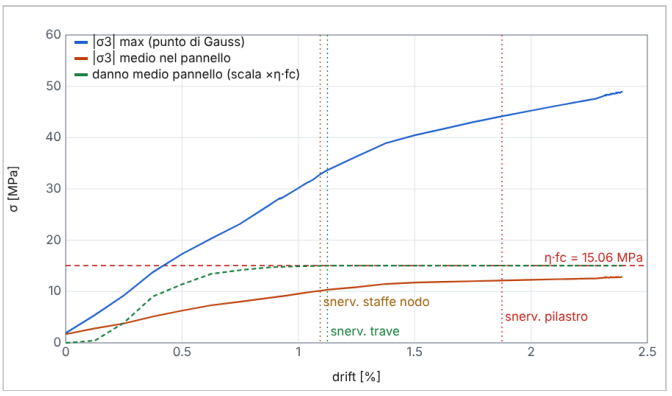
Confronto analitico NTC 2018 – FEM

Grandezza	NTC 2018 (fd)	Analitico, mat. FE	FEM Code_Aster	FEM / anal.	Note
Momento resistente delle travi ΣMRb [kNm]	166	166	177 ΣMb FEM al primo snervamento travi	1.06	
Momento resistente dei pilastri ΣMRc con N [kNm]	167	167	201 ΣMc FEM massimo nell'analisi	1.20	pilastro alla resistenza
Gerarchia ΣMRc / (γRd·ΣMRb) [-]	0.78	0.78	1.06 ΣMRc / ΣMc FEM al primo snervamento travi	—	≥ 1 richiesto
Taglio orizzontale nel nodo Vjh [kN]	852	—	634 FEM al primo snervamento travi (ΣMb/z – Vc); max 805	0.74	NTC con γRd·As·fyd
Capacità del puntone η·fc·√(1–νd/η)·bj·hjc [kN]	591	932	805 Vjh FEM massimo	0.86	domanda FEM / capacità
Compressione diagonale nel pannello [MPa]	10.04	15.06	12.88 |σ3| medio FEM massimo (max puntuale 49.0)	0.86	limite η·fc
Trazione diagonale σnt (nodo non fessurato) [MPa]	11.48	—	8.27 da Vjh FEM al primo snervamento travi; fctd = 1.60	5.17	> 1: nodo fessurato
Staffe nel nodo: tensione [MPa]	283	—	326 σ massima staffe FEM (E·ε, ≤ fy = 326)	1.00	NTC: Ash,req/Ash = 17.70
Taglio di piano al momento resistente delle travi [kN]	—	127	135 V FEM al primo snervamento travi; Vmax 171.5	1.06	

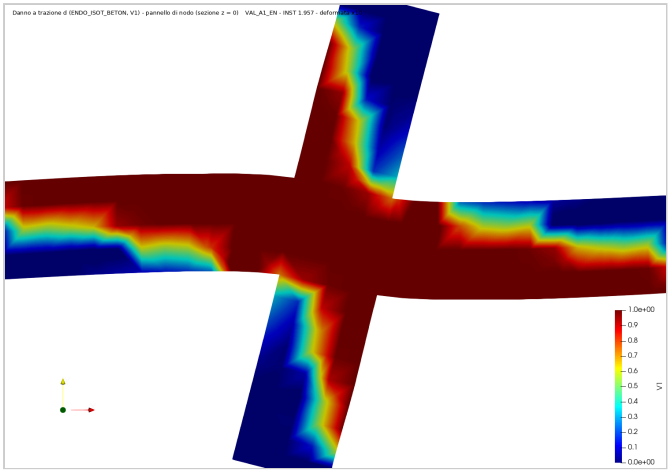
Colonne: NTC 2018 con le resistenze di calcolo; «analitico, mat. FE» con le formule NTC e le resistenze assegnate al modello FEM; FEM = valori estratti da Code_Aster (momenti dalle reazioni per equilibrio, Vjh = ΣMb/z – Vc con z = 0,9·d = 230 mm). Il rapporto è FEM / analitico con materiali FE: valori vicini a 1 indicano che modello numerico e formule di normativa descrivono lo stesso meccanismo.



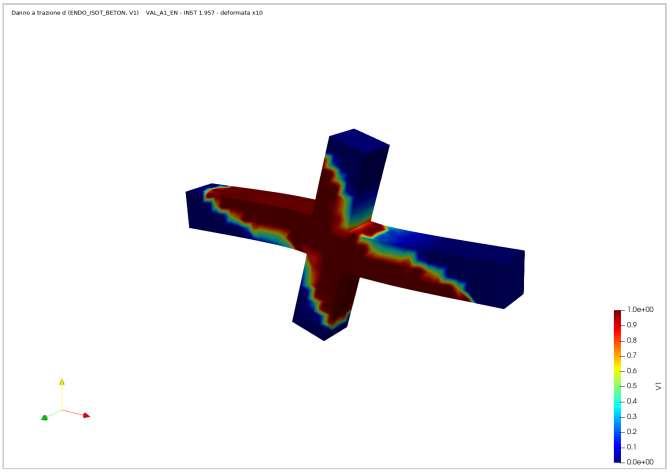
Plasticizzazione delle armature



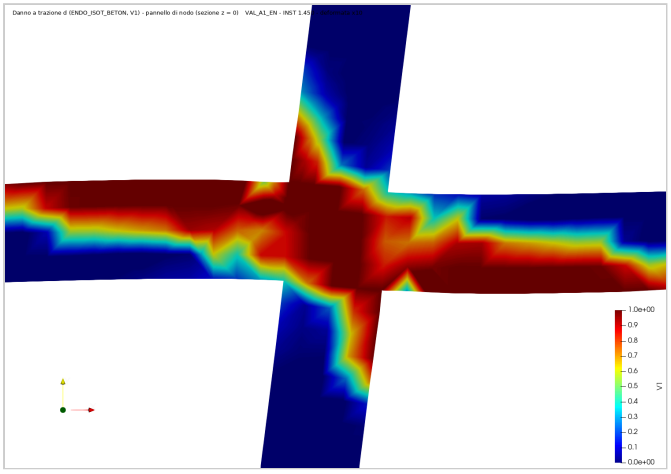
Compressione principale nel pannello



A1 – zoom fine (Salome-Meca/ParaView)



A1 – iso fine (Salome-Meca/ParaView)



A1 – zoom snerv (Salome-Meca/ParaView)

A1 – legame MAZARS_UNIL

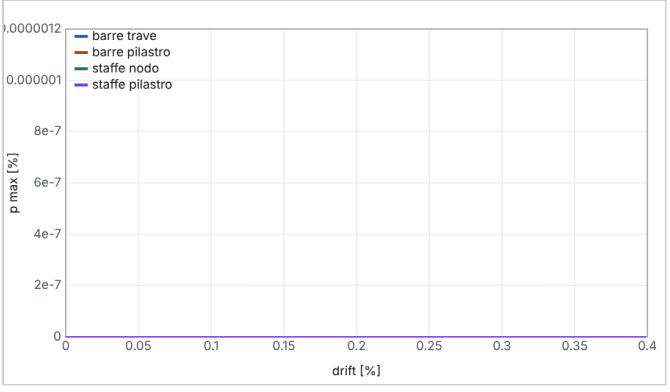
> **La verifica con l'approccio FEM (MAZARS_UNIL) NON PERMETTE DI CONCLUDERE sulla gerarchia delle resistenze: l'analisi si è fermata a 0.40 % di drift prima dello snervamento di qualsiasi elemento (aumentare il drift massimo o il tempo di calcolo).**
>
> Analisi interrotta al passo con INST=1.2000 per mancata convergenza (localizzazione del danno /

meccanismo); passi con tolleranza rilassata a INST [1.15]; drift massimo raggiunto 0.40 %. Le barre di trave non snervano nel campo di drift analizzato: il meccanismo duttile di trave non si attiva. Le barre del pilastro restano elastiche in tutta l'analisi. Le staffe del nodo restano elastiche. La compressione principale media nel pannello resta sotto η·fc = 15.06 MPa (al passo di riferimento |σ3| medio = 4.20 MPa, rapporto 0.28). Al passo di riferimento (ultimo) i pilastri lavorano a ΣMc/ΣMRc = 0.47 e le travi a ΣMb/ΣMRb = 0.53. Il rapporto ΣMc/ΣMb delle domande alle facce è fissato dall'equilibrio del sottoassemblaggio (vale (1–hb/H)/(1–hc/2Lb)); la gerarchia si giudica sulla sequenza delle plasticizzazioni e sui margini rispetto alle capacità.

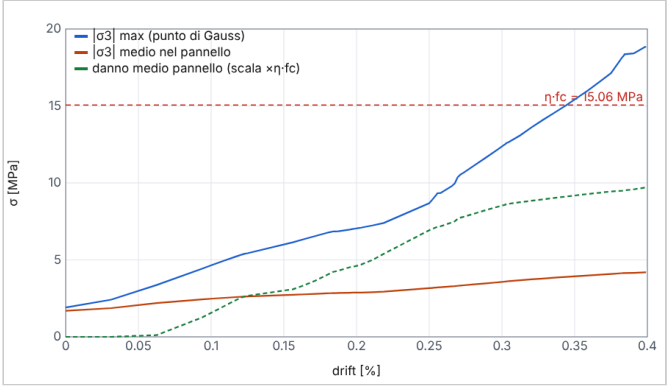
Confronto analitico NTC 2018 – FEM

Grandezza	NTC 2018 (fd)	Analitico, mat. FE	FEM Code_Aster	FEM / anal.	Note
Momento resistente delle travi ΣMRb [kNm]	166	166	88.54 ΣMb FEM all'ultimo passo	0.53	
Momento resistente dei pilastri ΣMRc con N [kNm]	167	167	79.36 ΣMc FEM massimo nell'analisi	0.47	pilastro sotto la resistenza
Gerarchia ΣMRc / (γRd·ΣMRb) [-]	0.78	0.78	2.11 ΣMRc / ΣMc FEM all'ultimo passo	—	≥ 1 richiesto
Taglio orizzontale nel nodo Vjh [kN]	852	—	318 FEM all'ultimo passo (ΣMb/z – Vc); max 318	0.37	NTC con γRd·As·fyd
Capacità del puntone η·fc·√(1–νd/η)·bj·hjc [kN]	591	932	318 Vjh FEM massimo	0.34	domanda FEM / capacità
Compressione diagonale nel pannello [MPa]	10.04	15.06	4.20 |σ3| medio FEM massimo (max puntuale 18.9)	0.28	limite η·fc
Trazione diagonale σnt (nodo non fessurato) [MPa]	11.48	—	3.66 da Vjh FEM all'ultimo passo; fctd = 1.60	2.29	> 1: nodo fessurato
Staffe nel nodo: tensione [MPa]	283	—	172 σ massima staffe FEM (E·ε, ≤ fy = 326)	0.53	NTC: Ash,req/Ash = 17.70
Taglio di piano al momento resistente delle travi [kN]	—	127	67.76 V FEM all'ultimo passo; Vmax 67.8	0.53	

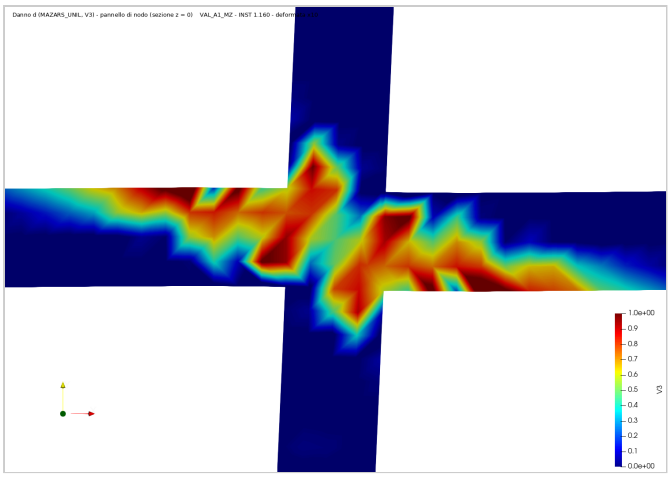
Colonne: NTC 2018 con le resistenze di calcolo; «analitico, mat. FE» con le formule NTC e le resistenze assegnate al modello FEM; FEM = valori estratti da Code_Aster (momenti dalle reazioni per equilibrio, Vjh = ΣMb/z – Vc con z = 0,9·d = 230 mm). Il rapporto è FEM / analitico con materiali FE: valori vicini a 1 indicano che modello numerico e formule di normativa descrivono lo stesso meccanismo.



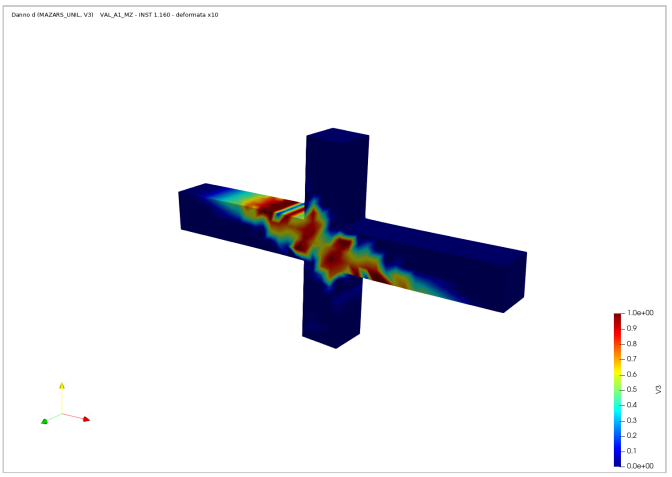
Plasticizzazione delle armature



Compressione principale nel pannello



A1 – zoom fine (Salome-Meca/ParaView)



A1 – iso fine (Salome-Meca/ParaView)

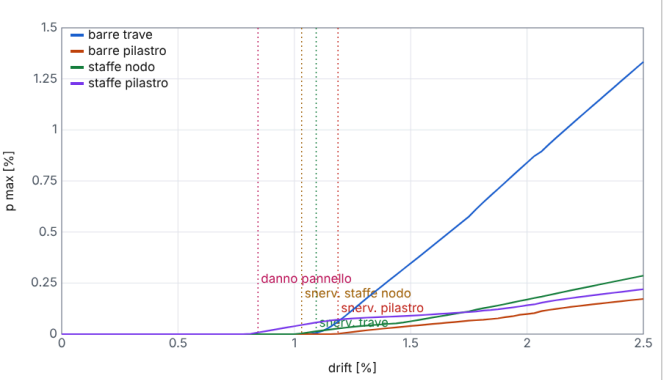
A1 – legame BETON_DOUBLE_DP

> **La verifica con l'approccio FEM (BETON_DOUBLE_DP) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): le staffe del nodo snervano prima o insieme alle barre delle travi.**
> Analisi completata; drift massimo raggiunto 2.50 %. Le barre longitudinali di trave snervano per prime al passo 31 (drift 1.09 %, V = 142.1 kN). Le barre del pilastro snervano dopo, al passo 34 (drift 1.19 %, V = 149.2 kN). Le staffe del nodo snervano al passo 29 (drift 1.03 %, V = 136.7 kN), prima delle travi. La compressione principale media nel pannello resta sotto η·fc = 15.06 MPa (al passo di riferimento | σ3| medio = 9.81 MPa, rapporto 0.65). L'indicatore medio di danno del pannello supera 0.002 al passo 23 (drift 0.84 %, V = 120.0 kN). Al passo di riferimento (primo snervamento trave) i pilastri lavorano a ΣMc/ΣMRc = 1.00 e le travi a ΣMb/ΣMRb = 1.12. Il rapporto ΣMc/ΣMb delle domande alle facce è fissato dall'equilibrio del sottoassemblaggio (vale (1–hb/H)/(1–hc/2Lb)); la gerarchia si giudica sulla sequenza delle plasticizzazioni e sui margini rispetto alle capacità.

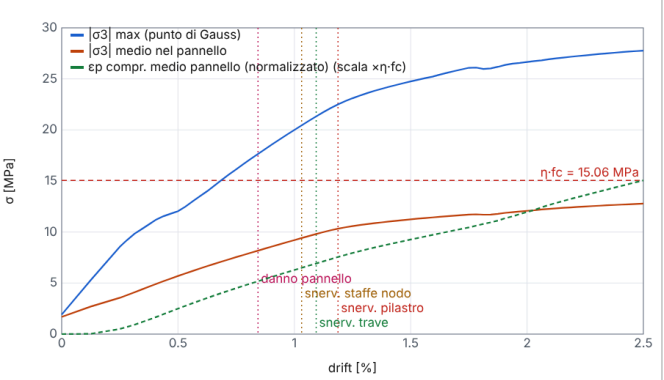
Confronto analitico NTC 2018 – FEM

Grandezza	NTC 2018 (fd)	Analitico, mat. FE	FEM Code_Aster	FEM / anal.	Note
Momento resistente delle travi ΣMRb [kNm]	166	166	186 ΣMb FEM al primo snervamento travi	1.12	
Momento resistente dei pilastri ΣMRc con N [kNm]	167	167	193 ΣMc FEM massimo nell'analisi	1.15	pilastro alla resistenza
Gerarchia ΣMRc / (γRd·ΣMRb) [-]	0.78	0.78	1.01 ΣMRc / ΣMc FEM al primo snervamento travi	—	≥ 1 richiesto
Taglio orizzontale nel nodo Vjh [kN]	852	—	667 FEM al primo snervamento travi (ΣMb/z – Vc); max 774	0.78	NTC con γRd·As·fyd
Capacità del puntone η·fc·√(1–νd/η)·bj·hjc [kN]	591	932	774 Vjh FEM massimo	0.83	domanda FEM / capacità
Compressione diagonale nel pannello [MPa]	10.04	15.06	12.78 |σ3| medio FEM massimo (max puntuale 27.8)	0.85	limite η·fc
Trazione diagonale σnt (nodo non fessurato) [MPa]	11.48	—	8.75 da Vjh FEM al primo snervamento travi; fctd = 1.60	5.47	> 1: nodo fessurato
Staffe nel nodo: tensione [MPa]	283	—	326 σ massima staffe FEM (E·ε, ≤ fy = 326)	1.00	NTC: Ash,req/Ash = 17.70
Taglio di piano al momento resistente delle travi [kN]	—	127	142 V FEM al primo snervamento travi; Vmax 164.9	1.12	

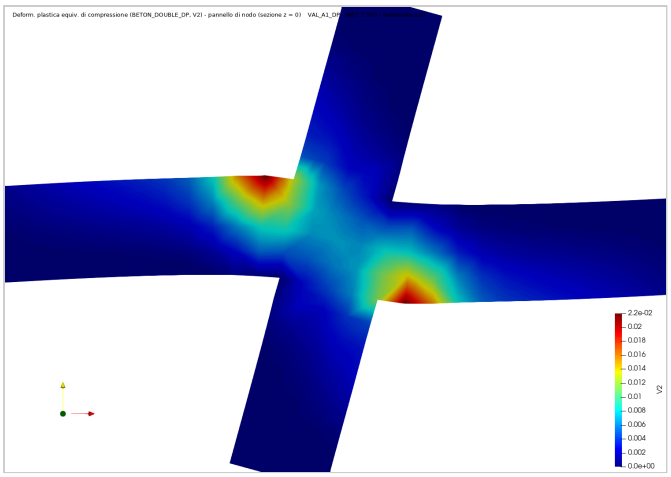
Colonne: NTC 2018 con le resistenze di calcolo; «analitico, mat. FE» con le formule NTC e le resistenze assegnate al modello FEM; FEM = valori estratti da Code_Aster (momenti dalle reazioni per equilibrio, Vjh = ΣMb/z – Vc con z = 0,9·d = 230 mm). Il rapporto è FEM / analitico con materiali FE: valori vicini a 1 indicano che modello numerico e formule di normativa descrivono lo stesso meccanismo.



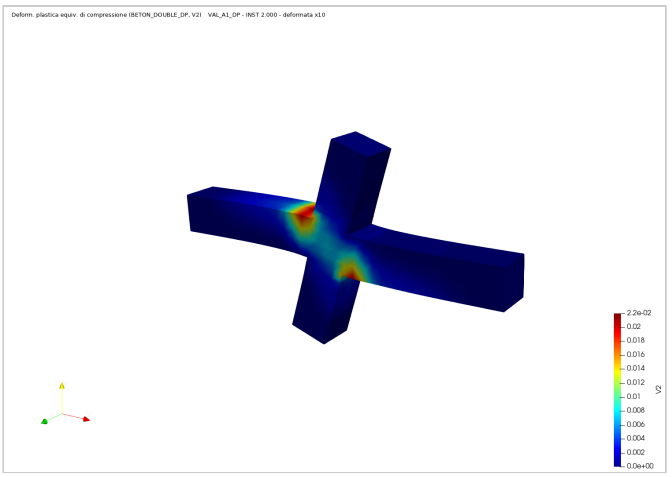
Plasticizzazione delle armature



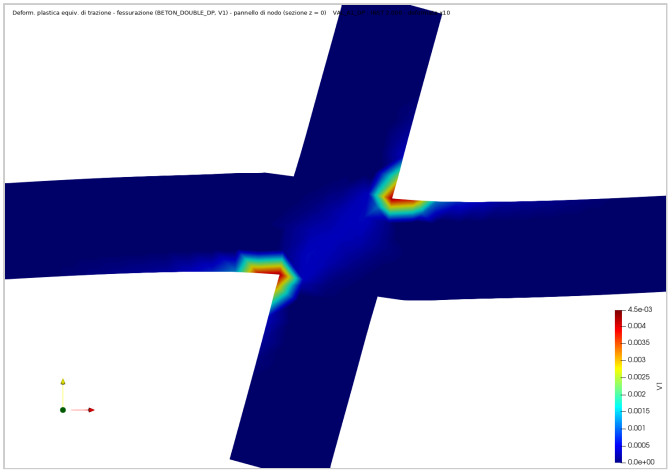
Compressione principale nel pannello



A1 – zoom fine (Salome-Meca/ParaView)

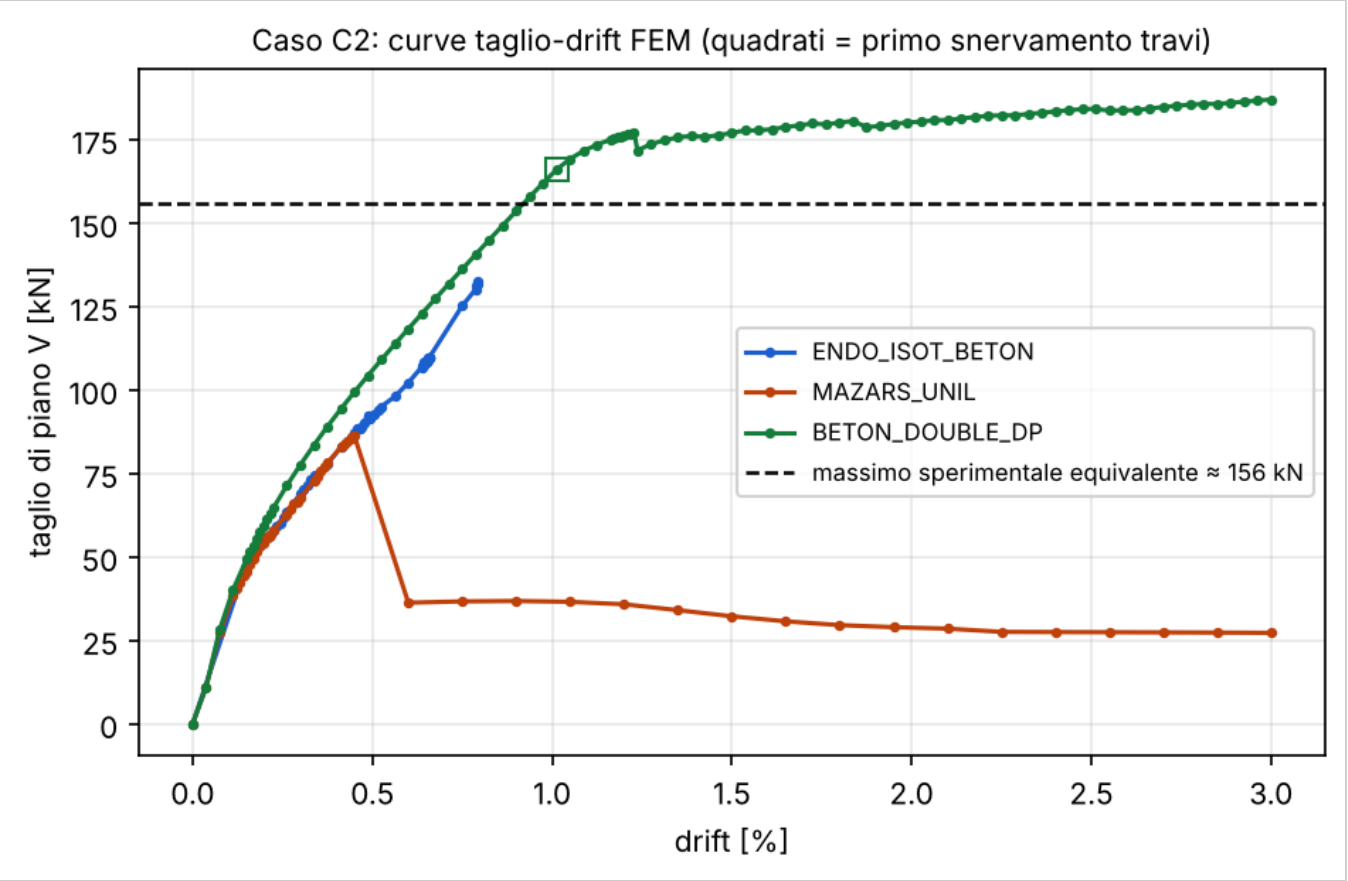


A1 – iso fine (Salome-Meca/ParaView)



A1 – zoom trazione (Salome-Meca/ParaView)

4.2 Clyde et al. Test #2 (nodo esterno senza staffe)



Curve taglio–drift dei tre legami confrontate con la prova.

Legame	V snerv. travi [kN]	V max [kN]	FEM / prova	drift snerv. travi [%]	drift snerv. pilastro [%]	drift finale [%]	tempo [min]	stato analisi
ENDO_ISOT_BETON	—	132,5	0,85	no	no	0,79	20	interrotta al passo con INST=1.3000 per mancata convergenza (localizzazione del danno / meccanismo); passi con tolleranza rilassata a INST [1.25]
MAZARS_UNIL	—	86,2	0,55	no	no	3,00	18	completata
BETON_DOUBLE_DP	166,0	187,0	1,06	1,01	no	3,00	37	completata

C2 – legame ENDO_ISOT_BETON

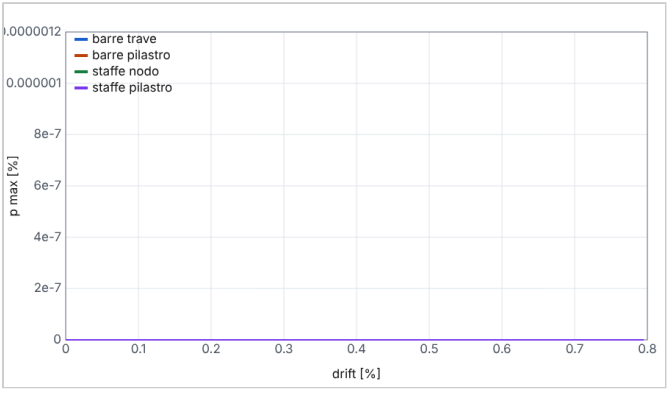
> **La verifica con l'approccio FEM (ENDO_ISOT_BETON) NON PERMETTE DI CONCLUDERE sulla gerarchia delle resistenze: l'analisi si è fermata a 0.79 % di drift prima dello snervamento di qualsiasi elemento (aumentare il drift massimo o il tempo di calcolo).**
>
> Analisi interrotta al passo con INST=1.3000 per mancata convergenza (localizzazione del danno / meccanismo); passi con tolleranza rilassata a INST [1.25]; drift massimo raggiunto 0.79 %. Le barre di trave non snervano nel campo di drift analizzato: il meccanismo duttile di trave non si attiva. Le barre del pilastro restano elastiche in tutta l'analisi. Le staffe del nodo restano elastiche. La compressione principale media nel pannello resta sotto η·fc = 18.08 MPa (al passo di riferimento |σ3| medio = 10.08 MPa, rapporto 0.56). Al passo di riferimento (ultimo) i pilastri lavorano a ΣMc/ΣMRc = 0.71 e le travi a ΣMb/ΣMRb = 0.87. Il rapporto ΣMc/ΣMb delle domande alle facce è fissato dall'equilibrio del

> sottoassemblaggio (vale (1–hb/H)/(1–hc/2Lb)); la gerarchia si giudica sulla sequenza delle plasticizzazioni e sui margini rispetto alle capacità.

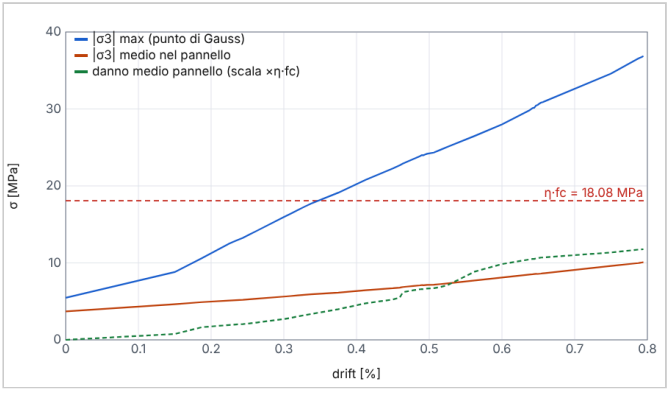
Confronto analitico NTC 2018 – FEM

Grandezza	NTC 2018 (fd)	Analitico, mat. FE	FEM Code_Aster	FEM / anal.	Note
Momento resistente delle travi ΣMRb [kNm]	332	332	289 ΣMb FEM all'ultimo passo	0.87	
Momento resistente dei pilastri ΣMRc con N [kNm]	406	406	287 ΣMc FEM massimo nell'analisi	0.71	pilastro sotto la resistenza
Gerarchia ΣMRc / (γRd·ΣMRb) [-]	1.11	1.11	1.42 ΣMRc / ΣMc FEM all'ultimo passo	—	≥ 1 richiesto
Taglio orizzontale nel nodo Vjh [kN]	1177	—	799 FEM all'ultimo passo (ΣMb/z – Vc); max 799	0.68	NTC con γRd·As·fyd
Capacità del puntone η·fc·√(1–νd/η)·bj·hjc [kN]	959	1597	799 Vjh FEM massimo	0.50	domanda FEM / capacità
Compressione diagonale nel pannello [MPa]	12.05	18.08	10.08 |σ3| medio FEM massimo (max puntuale 36.9)	0.56	limite η·fc
Trazione diagonale σnt (nodo non fessurato) [MPa]	9.15	—	5.63 da Vjh FEM all'ultimo passo; fctd = 2.27	2.48	> 1: nodo fessurato
Staffe nel nodo: tensione [MPa]	—	—	0.00 σ massima staffe FEM (E·ε, ≤ fy = 428)	0.00	NTC: Ash,req/Ash = ∞
Taglio di piano al momento resistente delle travi [kN]	—	152	132 V FEM all'ultimo passo; Vmax 132.5	0.87	

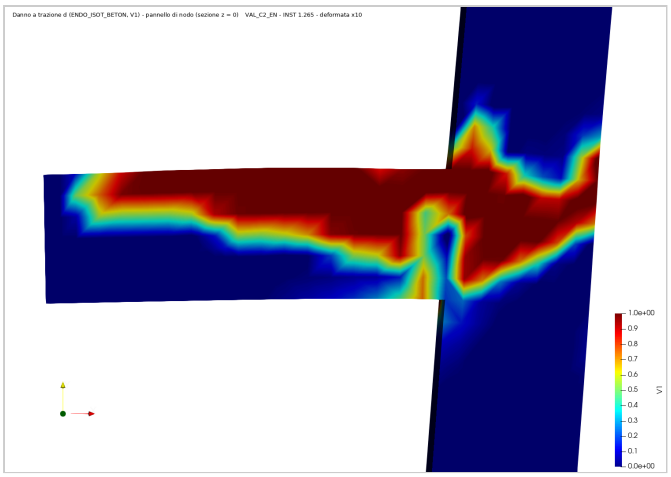
Colonne: NTC 2018 con le resistenze di calcolo; «analitico, mat. FE» con le formule NTC e le resistenze assegnate al modello FEM; FEM = valori estratti da Code_Aster (momenti dalle reazioni per equilibrio, Vjh = ΣMb/z – Vc con z = 0,9·d = 310 mm). Il rapporto è FEM / analitico con materiali FE: valori vicini a 1 indicano che modello numerico e formule di normativa descrivono lo stesso meccanismo.



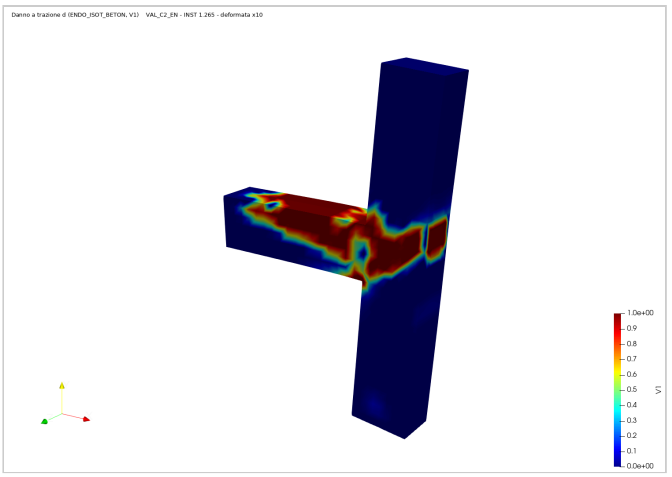
Plasticizzazione delle armature



Compressione principale nel pannello



C2 – zoom fine (Salome-Meca/ParaView)



C2 – iso fine (Salome-Meca/ParaView)

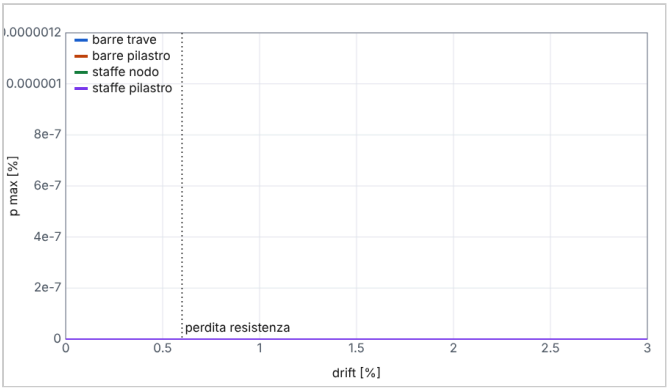
C2 – legame MAZARS_UNIL

> **La verifica con l'approccio FEM (MAZARS_UNIL) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): il taglio di piano raggiunge il massimo (86.2 kN a 0.45 % di drift) e cala di oltre il 10 % senza snervamento delle travi: crisi fragile del calcestruzzo nel nodo (danno medio del pannello 0.29).**
>
> Analisi completata; drift massimo raggiunto 3.00 %. Le barre di trave non snervano nel campo di drift analizzato: il meccanismo duttile di trave non si attiva. Le barre del pilastro restano elastiche in tutta l'analisi. Le staffe del nodo restano elastiche. La compressione principale media nel pannello resta sotto $\eta \cdot fc$ = 18.08 MPa (al passo di riferimento $|\sigma 3|$ medio = 3.49 MPa, rapporto 0.19). Al passo di riferimento (ultimo) i pilastri lavorano a $\Sigma Mc/\Sigma MRc$ = 0.15 e le travi a $\Sigma Mb/\Sigma MRb$ = 0.18. Il rapporto $\Sigma Mc/\Sigma Mb$ delle domande alle facce è fissato dall'equilibrio del sottoassemblaggio (vale $(1–hb/H)/(1–hc/2Lb)$); la gerarchia si giudica sulla sequenza delle plasticizzazioni e sui margini rispetto alle capacità.

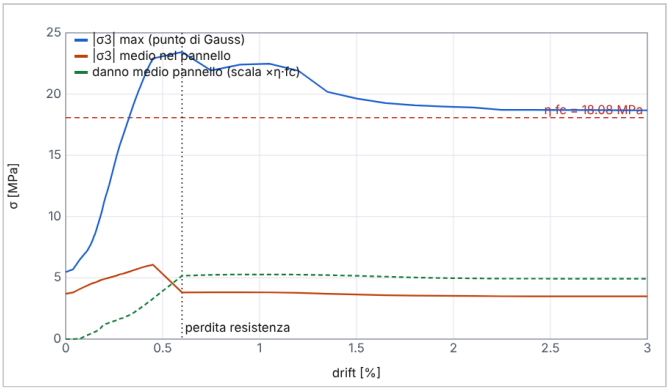
Confronto analitico NTC 2018 – FEM

Grandezza	NTC 2018 (fd)	Analitico, mat. FE	FEM Code_Aster	FEM / anal.	Note
Momento resistente delle travi ΣMRb [kNm]	332	332	59.32 ΣMb FEM all'ultimo passo	0.18	
Momento resistente dei pilastri ΣMRc con N [kNm]	406	406	187 ΣMc FEM massimo nell'analisi	0.46	pilastro sotto la resistenza
Gerarchia ΣMRc / (γRd·ΣMRb) [-]	1.11	1.11	6.89 ΣMRc / ΣMc FEM all'ultimo passo	—	≥ 1 richiesto
Taglio orizzontale nel nodo Vjh [kN]	1177	—	164 FEM all'ultimo passo (ΣMb/z – Vc); max 520	0.14	NTC con γRd·As·fyd
Capacità del puntone η·fc·√(1–νd/η)·bj·hjc [kN]	959	1597	520 Vjh FEM massimo	0.33	domanda FEM / capacità
Compressione diagonale nel pannello [MPa]	12.05	18.08	6.07 |σ3| medio FEM massimo (max puntuale 23.4)	0.34	limite η·fc
Trazione diagonale σnt (nodo non fessurato) [MPa]	9.15	—	0.46 da Vjh FEM all'ultimo passo; fctd = 2.27	0.20	> 1: nodo fessurato
Staffe nel nodo: tensione [MPa]	—	—	0.00 σ massima staffe FEM (E·ε, ≤ fy = 428)	0.00	NTC: Ash,req/Ash = ∞
Taglio di piano al momento resistente delle travi [kN]	—	152	27.23 V FEM all'ultimo passo; Vmax 86.2	0.18	

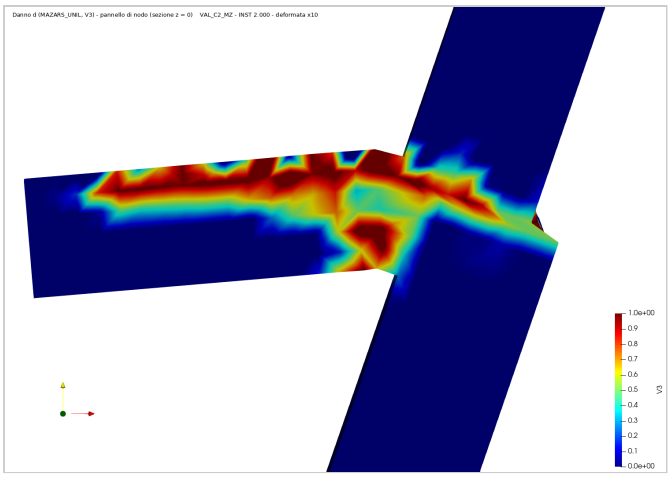
Colonne: NTC 2018 con le resistenze di calcolo; «analitico, mat. FE» con le formule NTC e le resistenze assegnate al modello FEM; FEM = valori estratti da Code_Aster (momenti dalle reazioni per equilibrio, Vjh = ΣMb/z – Vc con z = 0,9·d = 310 mm). Il rapporto è FEM / analitico con materiali FE: valori vicini a 1 indicano che modello numerico e formule di normativa descrivono lo stesso meccanismo.



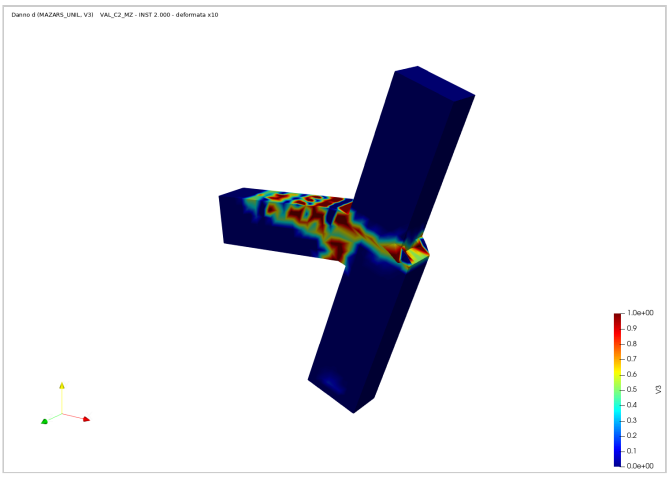
Plasticizzazione delle armature



Compressione principale nel pannello



C2 – zoom fine (Salome-Meca/ParaView)



C2 – iso fine (Salome-Meca/ParaView)

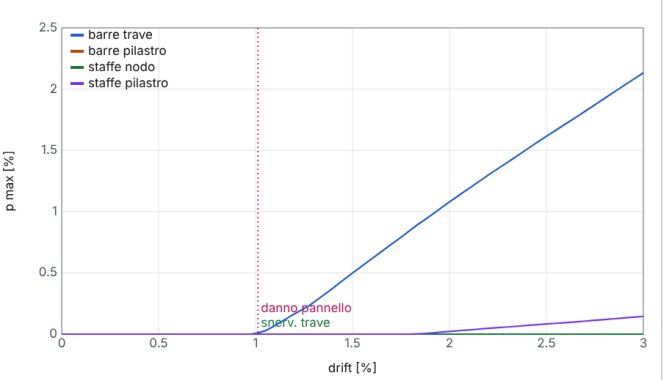
C2 – legame BETON_DOUBLE_DP

> **La verifica con l'approccio FEM (BETON_DOUBLE_DP) NON RISPETTA la gerarchia delle resistenze richiesta dalle NTC 2018 (§7.4.4.2.1 e §7.4.4.3): il pannello di nodo si danneggia (indicatore medio ≥ 0.002) prima o insieme allo snervamento delle travi.**
>
> Analisi completata; drift massimo raggiunto 3.00 %. Le barre longitudinali di trave snervano per prime al passo 35 (drift 1.01 %, V = 166.0 kN). Le barre del pilastro restano elastiche in tutta l'analisi. Le staffe del nodo restano elastiche. La compressione principale media nel pannello resta sotto η·fc = 18.08 MPa (al passo di riferimento |σ3| medio = 11.99 MPa, rapporto 0.66). L'indicatore medio di danno del pannello supera 0.002 al passo 35 (drift 1.01 %, V = 166.0 kN). Al passo di riferimento (primo snervamento trave) i pilastri lavorano a ΣMc/ΣMRc = 0.88 e le travi a ΣMb/ΣMRb = 1.09. Il rapporto ΣMc/ΣMb delle domande alle facce è fissato dall'equilibrio del sottoassemblaggio (vale (1–hb/H)/(1–hc/2Lb)); la gerarchia si giudica sulla sequenza delle plasticizzazioni e sui margini rispetto alle capacità.

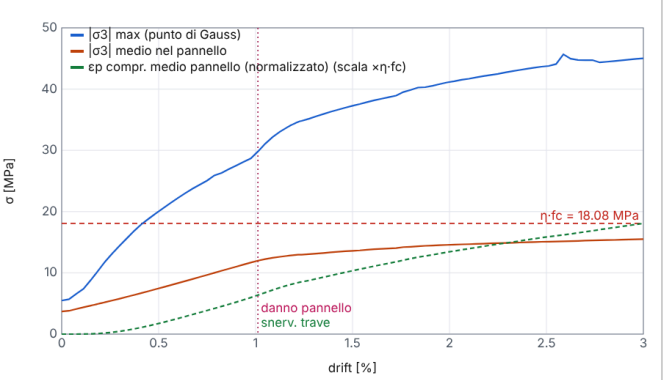
Confronto analitico NTC 2018 – FEM

Grandezza	NTC 2018 (fd)	Analitico, mat. FE	FEM Code_Aster	FEM / anal.	Note
Momento resistente delle travi ΣMRb [kNm]	332	332	362 ΣMb FEM al primo snervamento travi	1.09	
Momento resistente dei pilastri ΣMRc con N [kNm]	406	406	405 ΣMc FEM massimo nell'analisi	1.00	pilastro sotto la resistenza
Gerarchia ΣMRc / (γRd·ΣMRb) [-]	1.11	1.11	1.13 ΣMRc / ΣMc FEM al primo snervamento travi	—	≥ 1 richiesto
Taglio orizzontale nel nodo Vjh [kN]	1177	—	1001 FEM al primo snervamento travi (ΣMb/z – Vc); max 1128	0.85	NTC con γRd·As·fyd
Capacità del puntone η·fc·√(1–νd/η)·bj·hjc [kN]	959	1597	1128 Vjh FEM massimo	0.71	domanda FEM / capacità
Compressione diagonale nel pannello [MPa]	12.05	18.08	15.51 |σ3| medio FEM massimo (max puntuale 45.7)	0.86	limite η·fc
Trazione diagonale σnt (nodo non fessurato) [MPa]	9.15	—	7.50 da Vjh FEM al primo snervamento travi; fctd = 2.27	3.31	> 1: nodo fessurato
Staffe nel nodo: tensione [MPa]	—	—	0.00 σ massima staffe FEM (E·ε, ≤ fy = 428)	0.00	NTC: Ash,req/Ash = ∞
Taglio di piano al momento resistente delle travi [kN]	—	152	166 V FEM al primo snervamento travi; Vmax 187.0	1.09	

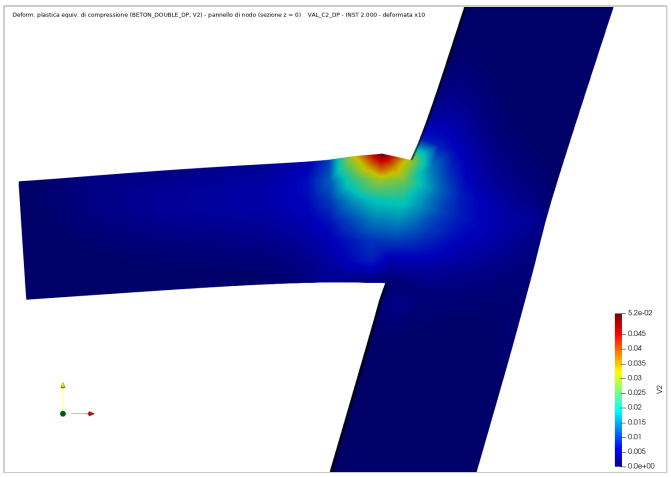
Colonne: NTC 2018 con le resistenze di calcolo; «analitico, mat. FE» con le formule NTC e le resistenze assegnate al modello FEM; FEM = valori estratti da Code_Aster (momenti dalle reazioni per equilibrio, Vjh = ΣMb/z – Vc con z = 0,9·d = 310 mm). Il rapporto è FEM / analitico con materiali FE: valori vicini a 1 indicano che modello numerico e formule di normativa descrivono lo stesso meccanismo.



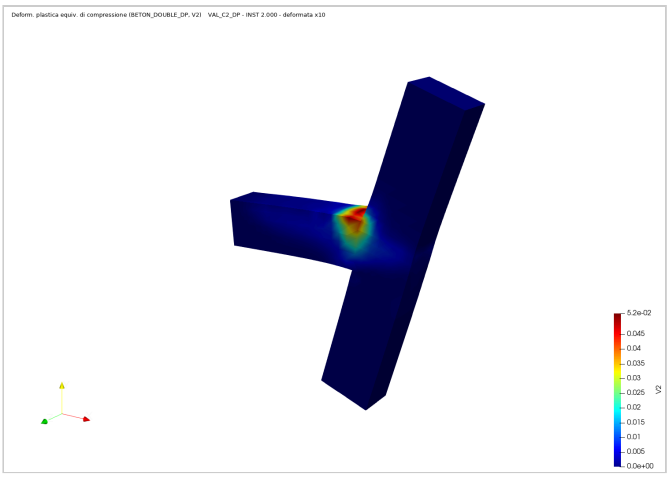
Plasticizzazione delle armature



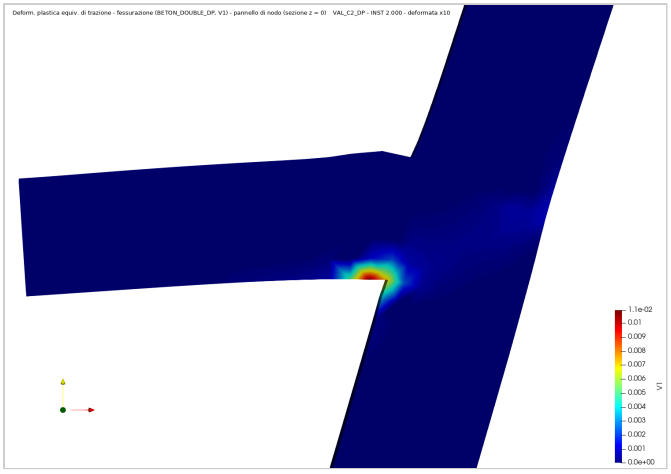
Compressione principale nel pannello



C2 – zoom fine (Salome-Meca/ParaView)



C2 – iso fine (Salome-Meca/ParaView)



C2 – zoom trazione (Salome-Meca/ParaView)

5. Conclusioni della validazione

5.1 Verifica del nodo secondo NTC 2018 e ACI 318-19 (resistenze di calcolo, FC = 1)

Caso	NTC 2018	ACI 318-19	NTC γRd·ΣMRb/ ΣMRc	NTC Vjbd/VRd	NTC staffe nodo disposte/richieste [mm²]	ACI 1,2·ΣMnb/ ΣMnc	ACI Vu/ φVn
Shiohara–Kusuhara A1 (CD"A")	**NON VERIFICATO (7)**	**NON VERIFICATO (4)**	1,29	1,44	170 / 3002	1,21	1,32
Clyde et al. Test #2 (CD"B")	**NON VERIFICATO (4)**	**NON VERIFICATO (5)**	0,90	1,23	0 / 3033	1,01	1,36

5.2 Dimostrazione della gerarchia delle resistenze con il modello FEM

Caso	Legame	Gerarchia (FEM)	Motivazione
A1	ENDO_ISOT_BETON	**NON RISPETTATA**	le staffe del nodo snervano prima o insieme alle barre delle travi.
A1	MAZARS_UNIL	**NON DIMOSTRATA**	l'analisi si è fermata a 0.40 % di drift prima dello snervamento di qualsiasi elemento (aumentare il drift massimo o il tempo di calcolo).
A1	BETON_DOUBLE_DP	**NON RISPETTATA**	le staffe del nodo snervano prima o insieme alle barre delle travi.
Clyde #2	ENDO_ISOT_BETON	**NON DIMOSTRATA**	l'analisi si è fermata a 0.79 % di drift prima dello snervamento di qualsiasi elemento (aumentare il drift massimo o il tempo di calcolo).
Clyde #2	MAZARS_UNIL	**NON RISPETTATA**	il taglio di piano raggiunge il massimo (86.2 kN a 0.45 % di drift) e cala di oltre il 10 % senza snervamento delle travi: crisi fragile del calcestruzzo nel nodo (danno medio del pannello 0.29).
Clyde #2	BETON_DOUBLE_DP	**NON RISPETTATA**	il pannello di nodo si danneggia (indicatore medio ≥ 0.002) prima o insieme allo snervamento delle travi.

Le formule NTC 2018 sono implementate correttamente: gli scarti rispetto al calcolo indipendente sono inferiori allo 0,5 %. Le prove su punto materiale riproducono le resistenze di input per MAZARS_UNIL e BETON_DOUBLE_DP. ENDO_ISOT_BETON riproduce la sola resistenza a trazione, come previsto. Provino A1: a valori medi il pilastro è più resistente delle travi (rapporto 1,13). Con $\gamma Rd = 1,3$ e le resistenze di calcolo, invece, la verifica §7.4.4.2.1 non è soddisfatta (1,29). Le staffe del nodo sono molto inferiori al necessario: 170 mm² contro 2258 a valori medi e 3002 con le resistenze di calcolo. Il modello FEM conferma che il punto debole è il nodo, con ENDO_ISOT_BETON (staffe del nodo a 1,09 %, travi a 1,13 %, taglio allo snervamento 1,07 volte il massimo sperimentale); BETON_DOUBLE_DP (staffe del nodo a 1,03 %, travi a 1,09 %, taglio allo snervamento 1,12 volte il massimo sperimentale). Le staffe del nodo snervano poco prima delle barre di trave, il pilastro resta elastico fino allo snervamento delle travi e la gerarchia richiesta risulta non rispettata a causa del nodo. È coerente con la prova, in cui alla plasticizzazione delle travi è seguito il danneggiamento severo del nodo. Nodo Clyde #2: con BETON_DOUBLE_DP lo snervamento delle travi e lo schiacciamento del pannello avvengono insieme (1,01 % di drift), a un taglio pari a 1,06 volte il valore sperimentale equivalente; la gerarchia risulta non rispettata. È coerente con la rottura a taglio del nodo osservata in prova e con le verifiche NTC (nodo senza staffe). Con ENDO_ISOT_BETON l'analisi si arresta a 0,79 % di drift senza snervamenti e non permette di concludere. MAZARS_UNIL, con la calibrazione automatica adottata, non è affidabile per questi nodi: in A1 si arresta a 0,40 % di drift e in Clyde #2 sottostima la resistenza (rapporto 0,55). Si sconsiglia per le verifiche di gerarchia, salvo calibrazione specifica. In entrambi i casi il software individua, in accordo con le verifiche NTC e con le prove, la causa del mancato rispetto della gerarchia: staffe insufficienti in A1, nodo non staffato in Clyde #2. Fra le prove di letteratura usate non c'è un nodo conforme alla gerarchia: il comportamento su un nodo ben progettato è verificato solo indirettamente (pilastro che resta elastico). Per l'uso progettuale si raccomandano BETON_DOUBLE_DP (danno a compressione e confinamento) o ENDO_ISOT_BETON (rapido, con verifica a posteriori di $\sigma 3$). I valori numerici FEM vanno letti con i limiti del paragrafo 6.

6. Limiti noti

- Tutti i legami sono locali: in fase di softening i risultati dipendono dalla mesh e l'analisi tende ad arrestarsi poco dopo lo snervamento delle travi.
- Aderenza perfetta armature–calcestruzzo, carico monotono: rigidezza e resistenza dopo lo snervamento sono sovrastimate rispetto alle prove cicliche.
- ENDO_ISOT_BETON non danneggia in compressione: lo schiacciamento del puntone si controlla con $\sigma 3 \leq \eta \cdot fc$. MAZARS_UNIL, con la calibrazione automatica, si arresta presto o sottostima la resistenza. BETON_DOUBLE_DP usa $Gc \approx 250 \cdot Gf$ e COEF_BIAX = 1,16 da letteratura.
- Il criterio di crisi del pannello per BETON_DOUBLE_DP (deformazione plastica media di compressione ≥ 2‰) e quello di perdita di resistenza (calo > 10 % senza snervamento delle travi) sono scelte del software, documentate nella relazione.
- Le lunghezze del provino Clyde #2 sono ricavate dalle figure del rapporto: il confronto in termini di carico è indicativo; il confronto sul modo di rottura è significativo.

Fonti: F. Kusuhara, H. Shiohara, 14th WCEE 2008, paper 05-03-0098 · 14th WCEE 2008, paper 05-03-0131 · C. Clyde, C.P. Pantelides, L.D. Reaveley, PEER Report 2000/05 · D.M. 17/01/2018 (NTC 2018) e Circolare n. 7/2019 · documentazione Code_Aster R7.01.04 (ENDO_ISOT_BETON), R7.01.08 (MAZARS), R7.01.03 (BETON_DOUBLE_DP).