

EDIL CAM Sistemi srl

LINEE GUIDA CUCITURE ATTIVE A MARCHIO CAM[®]

Applicazione e calcolo sulle strutture in CA

Ing. Alessandro Vari – Ing. Marianna Leonori



CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE CON CUCITURE INOX

NOTE E INTEGRAZIONI ALLE NTC2018 E RELATIVA CIRCOLARE

SOMMARIO

1	LA EDIL CAM SISTEMI S.R.L.....	4
2	CARATTERIZZAZIONE DELLA STRUTTURA ALLO STATO ATTUALE	6
3	ANALISI STRUTTURALE.....	10
3.1	MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA.....	10
3.2	METODI DI ANALISI E CRITERI DI VERIFICA.....	12
4	INDIVIDUAZIONE DELLE CRITICITA' STRUTTURALI E STRATEGIA DI INTERVENTO	14
5	SCELTA DELLE METODOLOGIE DI RINFORZO	17
6	INTRODUZIONE AL SISTEMA CAM [®] APPLICATO AL CEMENTO ARMATO	22
6.1	PERCHÉ APPLICARE IL SISTEMA CAM [®]	26
6.2	CAMPI DI APPLICAZIONE DEL SISTEMA CAM [®] SU EDIFICI IN CA.....	27
6.2.1	CONSOLIDAMENTO DEI PILASTRI.....	27
6.2.2	CONSOLIDAMENTO DELLE TRAVI	29
6.2.3	CONSOLIDAMENTO DEI NODI TRAVE- PILASTRO NELLE STRUTTURE INTELAIATE	32
6.2.4	CONSOLIDAMENTO DEI SOLAI.....	34
6.2.5	REALIZZAZIONE DEI VINCOLI TRA MACROELEMENTI NEGLI EDIFICI INDUSTRIALI.....	35
6.3	IL RINFORZO 'ATTIVO': L'EFFETTO DELLA PRESOLLECITAZIONE DEI NASTRI	43
7	CRITERI DI CALCOLO PER IL RINFORZO DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A. MEDIANTE IL SISTEMA CAM [®]	47
7.1	RESISTENZE DI CALCOLO DEI MATERIALI	47
7.1.1	CALCESTRUZZO.....	47
7.1.2	I MATERIALI DEL SISTEMA CAM [®]	49
7.2	RINFORZO PER CONFINAMENTO DELLA SEZIONE IN C.A. MEDIANTE SISTEMA CAM [®]	50
7.2.1	CALCOLO DELL'AUMENTO DI RESISTENZA A COMPRESSIONE CENTRATA DEL CALCESTRUZZO CONFINATO MEDIANTE IL CAM [®]	51
7.2.2	CALCOLO DELL'AUMENTO DI DUTTILITÀ A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO CONFINATO MEDIANTE IL CAM [®]	53
7.2.3	EFFETTO DEL CONFINAMENTO INDOTTO	53
7.3	RINFORZO A TAGLIO DELLA SEZIONE IN C.A. MEDIANTE SISTEMA CAM [®]	54
7.3.1	VALUTAZIONE RESISTENZA A TAGLIO PER ELEMENTI IN CA SENZA ARMATURA TRASVERSALE.....	55
7.3.2	VALUTAZIONE RESISTENZA A TAGLIO PER ELEMENTI IN CA CON ARMATURA TRASVERSALE.....	57

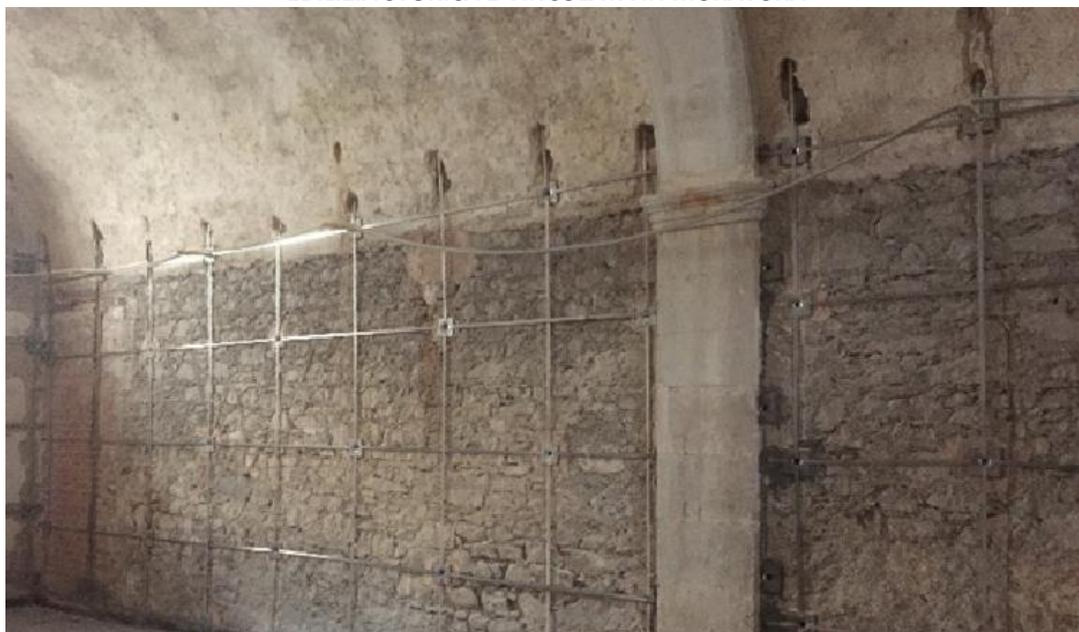
7.3.3	VALUTAZIONE RESISTENZA A TAGLIO PER ELEMENTI RINFORZATI MEDIANTE IL SISTEMA CAM®	64
7.4	RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DELLA SEZIONE IN C.A. MEDIANTE SISTEMA CAM®	75
7.4.1	DIAGRAMMI DI CALCOLO TENSIONE-DEFORMAZIONE.....	75
7.4.2	CRITERI DI VERIFICA A PRESSOFLESSIONE DEVIATA.....	76
7.4.3	VALUTAZIONE DELL'INCREMENTO RESISTENTE PER ELEMENTI RINFORZATI MEDIANTE IL SISTEMA CAM®	79
7.5	IL RINFORZO DEL NODO TRAVE-PILASTRO MEDIANTE IL SISTEMA CAM®	85
7.5.1	INDIVIDUAZIONE DELLA GEOMETRIA.....	85
7.5.2	CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI AL NODO.....	86
7.5.3	VERIFICA DEL NODO NELLO STATO DI FATTO	89
7.5.4	IL RINFORZO CAM®	90
8	LA MODELLAZIONE DEL SISTEMA CAM®.....	98
9	PRINCIPALI LAVORI EDIL CAM SISTEMI SRL	100
9.1	EDIFICIO SCOLASTICO	100
9.2	CENTRO COMMERCIALE "I GIGLI"	103
9.3	EDIFICIO SCOLASTICO	105
9.4	UFFICI 'ENEL OPEN FIBER'.....	108
9.5	EDIFICIO SCOLASTICO	110
9.6	EDIFICIO SCOLASTICO	111
9.7	STUDENTATO 'CEUR'	113
9.8	EX SEDE BNL.....	115

1 LA EDIL CAM SISTEMI S.R.L

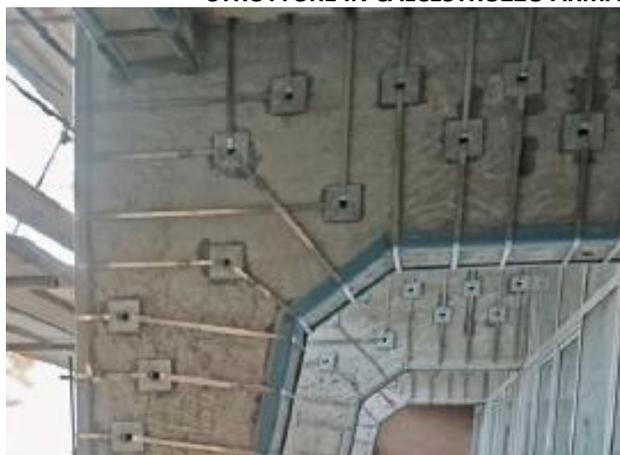
La Edil CAM Sistemi, nasce per l'applicazione e la commercializzazione del sistema brevettato delle cuciture attive, poi conosciuto con l'acronico e marchio CAM[®].

Il sistema nasce nei laboratori universitari della Basilicata come tecnologia per l'impacchettamento delle murature. Nel tempo la tecnologia si specializza per intervenire nel campo del consolidamento non solo delle strutture in muratura storiche e vincolate, ma anche per le strutture in calcestruzzo armato e miste.

EDILIZIA STORICA E VINCOLATA IN MURATURA



STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO



STRUTTURE PREFABBRICATE



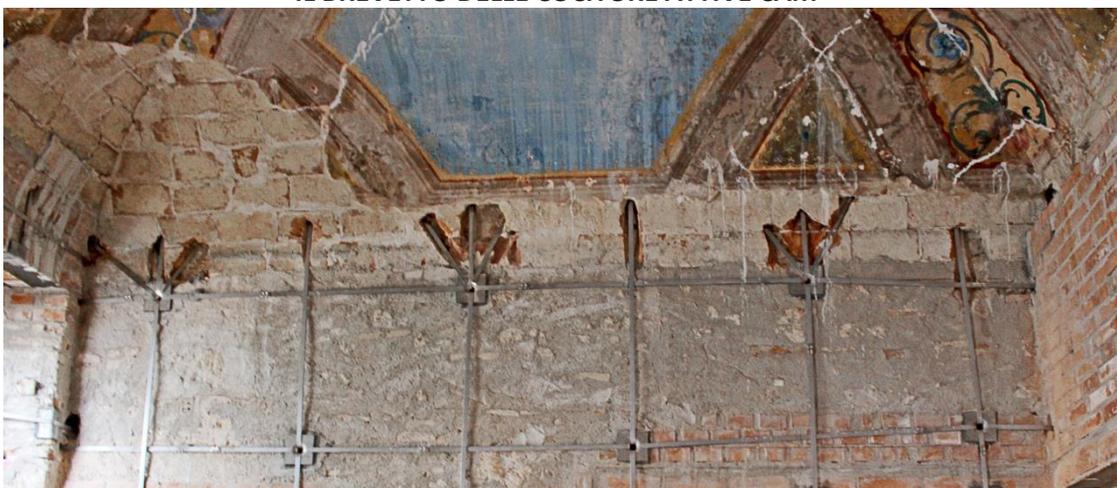
La EDIL CAM[®] Sistemi s.r.l. è l'azienda che ha creduto, promosso e sostenuto il brevetto delle cuciture attive, la tecnologia antisismica commercializzata con i marchi CAM[®] e SISTEMA CAM[®].

La Società ha al suo attivo centinaia di applicazioni, studiate da un largo staff di tecnici e messe in opera da

maestranze specializzate, su edifici in muratura storici e vincolati, in calcestruzzo armato, prefabbricati e strutture miste.

La EDIL CAM[®] Sistemi S.r.l. vanta la proprietà di marchi e brevetti inerenti le proprie tecnologie e un know-how unico sulla metodologia di calcolo e applicazione, legato anche all'intensa attività di collaborazione con enti autorevoli quali Protezione Civile, ReLUIS, ENEA ed importanti Università: UNIBAS, UNIME, POLIMI, 'La Sapienza', 'Federico II'.

IL BREVETTO DELLE CUCITURE ATTIVE CAM[®]



IL DIS-CAM[®]



IL SOL-CAM[®]



2 CARATTERIZZAZIONE DELLA STRUTTURA ALLO STATO ATTUALE

Fondamentale per l'individuazione della strategia di intervento su un fabbricato esistente risulta la conoscenza della struttura in termini di materiali, geometrie, dettagli costruttivi carenze tipiche anche in base all'epoca di costruzione.

L'insieme di informazioni raccolte per la struttura serve nella definizione della conoscenza. Maggiore è la conoscenza acquisita, maggiore è la sicurezza e quindi di conseguenza i fattori di sicurezza da assumere relativamente alle incertezze che sempre si hanno nelle strutture esistenti.

Sulla base del rilievo geometrico, dei dettagli costruttivi e della conoscenza delle caratteristiche meccaniche dei materiali si stima il livello di conoscenza della struttura.

Al crescere del livello di conoscenza della struttura si impiega un fattore di confidenza minore. Di seguito tabelle estratti di normativa.

TAB. C8A.1.2 (NTC2008) o TAB. C8.5.IV (NTC2018) – LIVELLI DI CONOSCENZA IN FUNZIONE DELL'INFORMAZIONE DISPONIBILE E CONSEGUENTI METODI DI ANALISI AMMESSI E VALORI DEI FATTORI DI CONFIDENZA PER EDIFICI DI CALCESTRUZZO ARMATO O IN ACCIAIO.

Livello di Conoscenza	Geometria (Carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1		Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	1,20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche di progetto con estese prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	1,00

Come meglio si esplicherà nel seguito, la conoscenza della struttura nei fabbricati in CA, di più recente costruzione e per cui attraverso analisi simulate e riscontri in situ si può raggiungere un buon livello di conoscenza, influisce notevolmente anche sulla tipologia di analisi che è possibile svolgere. Va da sé che analisi non lineari perdono di significato su strutture per le quali sono molte le incertezze.

TAB. C8A.1.3A (NTC2008) o TAB. C8.5.V (NTC2018) – DEFINIZIONE ORIENTATIVA DEI LIVELLI DI RILIEVO E PROVE PER CA

	Rilievo (dei dettagli costruttivi) ^(a)	Prove (sui materiali) ^{(b)(c)}
	Per ogni tipo di elemento "primario" (trave, pilastro...)	
Verifiche limitate	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
Verifiche estese	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
Verifiche esaustive	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

- Nel controllo del raggiungimento delle percentuali di elementi indagati ai fini del rilievo dei dettagli costruttivi si tiene conto delle eventuali situazioni ripetitive, che consentano di estendere ad una più ampia percentuale i controlli effettuati su alcuni elementi strutturali facenti parte di una serie con evidenti caratteristiche di ripetibilità, per uguale geometria e ruolo nello schema strutturale.
- Le prove sugli acciai sono finalizzate all'identificazione della classe dell'acciaio utilizzata con riferimento alla normativa vigente all'epoca di costruzione. Ai fini del raggiungimento del numero di prove sull'acciaio necessario per il livello di conoscenza è opportuno tener conto dei diametri (nelle strutture in c.a.) o dei profili (nelle strutture in acciaio) di più diffuso impiego negli elementi principali con esclusione delle staffe.
- Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con più ampio numero, almeno triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.
- Il numero di provini riportate nelle tabelle 8A.3a e 8A.3b può esser variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale. Nel caso del calcestruzzo in opera tali caratteristiche sono spesso legate alle modalità costruttive tipiche dell'epoca di costruzione e del tipo di manufatto, di cui occorrerà tener conto nel pianificare l'indagine. Sarà opportuna, in tal senso, prevedere l'effettuazione di una seconda campagna di prove integrative, nel caso in cui i risultati della prima risultino fortemente disomogenei.

RILIEVO STRUTTURALE

- Rilievo geometrico dei componenti strutturali (travi, pilastri e setti)
- Identificazione dei dettagli costruttivi (armature di travi, pilastri e setti, spessore del copriferro, lunghezze di sovrapposizione delle barre longitudinali di armatura, ecc.) tramite l'impiego di verifiche in situ o progetto simulato
- Tessitura e tipologia dei solai
- Fondazioni
- Tipologia del terreno di fondazione

RILIEVO DEL QUADRO FESSURATIVO

CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

- Indagini distruttive
 - Prelievo di carote per:
 - Resistenza, modulo elastico e livello di carbonatazione
 - Prelievo di barre d'armatura estratte per:
 - Diametro, resistenza e modulo elastico
- Indagini non distruttive
 - Prove Pacometriche per:
 - Diametro e disposizione delle armature
 - Prove Sclerometriche per:
 - Resistenza del calcestruzzo
 - Individuazione di eventuali vuoti e/o disuniformità
 - Prove Ultrasoniche per:
 - Modulo elastico dinamico e modulo di Poisson
 - Individuazione di eventuali vuoti e/o disuniformità

- Metodo SONREB per:
 - Combinazione delle prove sclerometriche e ultrasoniche
- Prove di carico su solai

RIFERIMENTI NORMATIVI

- NTC 2008 e NTC2018 e relative circolari (per le NTC 2018 sono inserite note integrative richiamate per ciascun paragrafo di competenza)
- UNI EN 12504-1
- UNI EN 12504-2
- UNI EN 12504-4

La determinazione del FC è indispensabile per la corretta definizione delle capacità dei materiali e per individuare la corretta metodologia di analisi della struttura.

Si sottolinea che si possono impiegare dei FC differenti per tipologia di materiale (es. resistenza del calcestruzzo, resistenza dell'acciaio).

3 ANALISI STRUTTURALE

3.1 MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA

La costruzione del modello della struttura deve tenere in considerazione, oltre che la geometria dei componenti strutturali e dei loro dettagli costruttivi anche l'eventuale presenza di elementi secondari se questi possono considerevolmente influenzare il comportamento strutturale d'insieme (presenza di tamponature che possono modificare la rigidezza e loro distribuzione in pianta e prospetto).

Le fasi principali della modellazione sono:

- inserimento della geometria
- inserimento delle armature
- inserimento dei parametri meccanici
- caratterizzazione dei materiali
- inserimento vincoli interni
 - connessioni tra travi e pilastri (caso di travi prefabbricate)
 - connessioni tra pareti (ad es. pannelli prefabbricati) ed elementi portanti (pilastri, travi, ...)
 - definizione della tipologia di solaio (rigido, deformabile, non solidale)
 - sconnessioni conseguenti alle eventuali fessurazioni (dal rilievo del quadro fessurativo)
- inserimento vincoli esterni
 - schematizzazione del vincolo di base (fondazioni e terreno)
 - eventuali vincoli di continuità con edifici/strutture adiacenti
- inserimento dei carichi (con riferimento ai coefficienti parziali (γ_G , γ_Q , ...) allo stato limite considerato)
- permanenti: strutturali, portati
- distorsioni

- termiche (irrilevante)
- accidentali
 - accidentali di piano per categoria d'uso
 - vento
 - neve
- sismici
 - spettro di riferimento
 - zonizzazione:
 - ag : accelerazione al suolo
 - F0 : fattore di amplificazione dello spettro
 - tipologia di terreno (A, B, C, D, E: tab. 3.2.II & 3.2.III)
 - coefficienti di caratterizzazione (cap. 3.2)
 - S: topografico (tab. 3.2.V & 3.2.VI)
 - ξ : coefficiente di smorzamento viscoso (in mancanza di più precise valutazioni si assume pari al 5%)
 - η : fattore di alterazione dello spettro in funzione di ξ
 - fattore di struttura: q (coefficiente demoltiplicativo dello spettro) p.to 7.4.3.2 - differenziato per tipologia di analisi
 - analisi non lineare (push_over): q=1
 - analisi lineari: q>1

3.2 METODI DI ANALISI E CRITERI DI VERIFICA

Tipologie di analisi numeriche (in ordine di accuratezza del risultato):

STATICA LINEARE EQUIVALENTE

Non può essere impiegata:

- per le costruzioni la cui risposta sismica in ciascuna direzione non dipenda significativamente dai modi di vibrare superiori (7.3.2)
- per edifici con altezza superiore a 40m
- per edifici non regolari in altezza
- per edifici per cui il primo modo di vibrare della struttura T_1 sia superiore a $2.5 \cdot T_c$.
- Nelle NTC2008 $T_1 = C_1 \cdot H^{3/4}$ è calcolato in maniera approssimata a partire dalle sole caratteristiche costruttive e dall'altezza del fabbricato. Nelle NTC2018 viene approfondito tale aspetto, fornendo anche dei criteri più dettagliati per la determinazione di T_1 (funzione dello spostamento massimo del fabbricato, valutato in analisi elastica e quindi attraverso un modello tridimensionale del fabbricato).

DINAMICA LINEARE (CON SPETTRO DI PROGETTO E FATTORE 'Q')

- È il principale metodo di analisi per gli edifici in C.A.
- Si applica a tutti i tipi di edifici, non regolari in pianta e/o elevazione
- Il modulo elastico del calcestruzzo può essere opportunamente ridotto, per tenere in considerazione l'effetto della fessurazione (massima riduzione del 50%)
- Ha estrema importanza la scelta di un fattore di struttura quanto più vicino al reale comportamento ipotizzato della struttura. Si consiglia la validazione dell'assunzione svolta tramite analisi non lineare del fabbricato.
- Nel caso in cui si impieghi uno spettro elastico, viene assunto $q \leq 1,5$ e l'analisi è dinamica lineare elastica
- Nel caso in cui si impieghi uno spettro di progetto ($q \geq 1,5$), comunque la verifica dei meccanismi fragili di collasso deve essere svolta con le sollecitazioni derivanti dall'analisi del fabbricato con fattore $q = 1,5$. Per le verifiche duttili si può impiegare un valore per tipologia costruttiva come riportato nel 7.3.1 al limite pari a 3.

- Per le proprietà dei materiali si impiegano:
 - MECCANISMI DUTTILI: $f_d = \frac{f_m}{FC}$
 - MECCANISMI FRAGILI: $f_d = \frac{f_m}{FC \cdot \gamma_m}$

STATICA NON LINEARE

- Consiste nell'applicazione di un gruppo di forze secondo diverse distribuzioni
- Non può essere impiegata in LC1
- Nelle NTC2008 era applicabile solo se i modi di vibrare della struttura nelle due direzioni principali possedevano massa partecipante superiore al 75%. Nelle NTC 2018 (p.to 7.3.4.2) si introduce la distribuzione di spinta elaborata considerando la combinazione dei modi principali fino al raggiungimento dell'85% di massa, rendendo quindi possibile la sua applicabilità anche a strutture con periodi principali di vibrazione con massa partecipante inferiore al 75% .
- Il modulo elastico del calcestruzzo può essere opportunamente ridotto, per tenere in considerazione l'effetto della fessurazione (massima riduzione del 50%)
- Il fattore 'q' da impiegare nelle analisi deve essere unitario (spettro elastico).
- Per le proprietà dei materiali si impiegano:
 - MECCANISMI DUTTILI: $f_d = \frac{f_m}{FC}$
 - MECCANISMI FRAGILI: $f_d = \frac{f_m}{FC \cdot \gamma_m}$

Eseguita la modellazione della struttura la verifica si effettua in termini di resistenza per le analisi statica lineare e dinamica lineare ed in termini di spostamento per le analisi non lineari.

4 INDIVIDUAZIONE DELLE CRITICITA' STRUTTURALI E STRATEGIA DI INTERVENTO

Attraverso la corretta analisi dei risultati prodotti dal modello di calcolo è possibile individuare le criticità della struttura e quindi individuare la più corretta strategia di rinforzo dell'edificio esistente.

In particolare è bene ricordare alcuni principi di progettazione che vengono impiegati negli edifici nuovi anche nell'ambito dei progetti di consolidamento.

Il principio di gerarchia di resistenza e di rottura è un principio ben noto ai professionisti nell'ambito della nuova progettazione che fornisce delle regole del tutto generali che possono essere adottate anche nell'ambito del miglioramento sismico o dell'adeguamento di un manufatto esistente.

La maggior parte del nostro costruito presenta alcune carenze che spesso possono essere legate alla tipologia strutturale, piuttosto che dell'epoca di costruzione.

È quindi il caso di strutture con assenza di intelaiatura in una direzione, piuttosto che l'elevato impiego di travi a spessore (utilizzate per vincoli architettonici) o nel caso di distribuzioni di tamponature irrigidenti fortemente dissimetriche.

Tali scelte progettuali unitamente a carenze quali basse percentuali d'armatura, sono sicuramente legate all'assenza di regole di progettazione legate all'epoca di costruzione (fabbricati realizzati prima delle formulazioni delle normative antisismiche) che tenessero in debito conto l'azione del sisma sia in termini di sollecitazioni orizzontali sia in termini di buone regole di modulazione dell'intelaiatura resistente (ad es. regolarità in pianta ed in elevazione, ecc.).

Ecco quindi che il costruito italiano si distingue per elementi prevalentemente calcolati per azioni statiche, con travi che presentano forti carenze nel caso di inversione del momento flettente, presenza di ferri piegati in luogo delle staffe verticali che non possono essere considerati per la verifica nei confronti delle azioni sismiche in quanto non reagenti nel caso di inversione della sollecitazione tagliante, pilastri carenti di armatura longitudinale perché progettati per soli carichi assiali.

Altro aspetto peculiare è l'assenza nella quasi totalità dei casi di armatura trasversale che nel pilastro prosegue in corrispondenza del nucleo di intersezione con la trave.

Da un primo approccio al consolidamento nasce immediata l'idea di sanare tutte le carenze (di sezione o specialmente di armatura) attraverso l'impiego di rinforzi estesi ed invasivi su tutti gli elementi.

È importante invece in questa fase pensare e progettare secondo i moderni principi legati alla conoscenza del comportamento sismico delle strutture.

In prima analisi quindi vanno limitate o evitate brusche variazioni di distribuzione di massa e rigidità all'interno della struttura, sia in pianta che in elevazione. L'analisi delle forme modali principali della struttura può essere uno strumento estremamente valido in questa fase per stimare anche possibili interventi di irrigidimento (o de-irrigidimento) necessari al ricentraggio dei centri di massa e rigidità.

Regolarizzati i principali modi di vibrare fino a rendere i moti torcenti della struttura meno significativi si può procedere al consolidamento degli elementi ancora carenti.

Mediante una analisi a spettro si individuano facilmente i meccanismi di collasso dei singoli elementi, mentre mediante un'analisi non lineare è possibile individuare oltre al meccanismo anche le zone di plasticizzazione o rottura e la loro sequenza. Analizzandoli in ordine di pericolosità si individuano le seguenti macroclassi di rottura:

- Crisi per schiacciamento degli elementi compressi (pilastri)
- Crisi degli elementi di connessione (nodo) trave-pilastro
- Crisi per raggiungimento della resistenza a taglio di travi e pilastri
- Crisi per raggiungimento della resistenza a flessione di travi e pilastri

Individuata la tipologia di collasso va individuata la tecnica di consolidamento tra quelle a disposizione.

Particolare importanza avrà il comportamento globale del fabbricato che dovrà essere indirizzato verso una risposta quanto più duttile in cui possono essere sfruttate al massimo le iperstaticità della struttura intelaiata. In tal senso particolare cura andrà posta da parte del tecnico nell'evitare la formazione dei meccanismi di collasso fragile a livello locale e globale. I principi di 'gerarchia di resistenza' ben noti nella progettazione del nuovo sono proprio rivolti in tal senso, pertanto in via generale possono essere considerati come buone indicazioni anche nel progetto di consolidamento.

Primari interventi saranno quindi rivolti a sanare le carenze di armatura trasversale in travi, pilastri e nodi così da evitare il collasso locale fragile dei singoli componenti strutturali, mentre a livello

globale alcuni meccanismi fragili quali ad esempio la formazione di un piano 'soffice' potranno essere scongiurati preferendo la plasticizzazione alle estremità delle travi anziché dei pilastri, garantendo quel funzionamento a trave debole e pilastro forte, attraverso interventi di incremento resistente anche flessionale sui pilastri e in duttilità sulle estremità di trave.

A tal fine si ricorda che l'incremento in duttilità della sezione è ottenibile per effetto del confinamento.



ISO 9001:2015

ISO 14001:2015

ISO 45001:2018



0273



UNI EN ISO 3834-2

5 SCELTA DELLE METODOLOGIE DI RINFORZO

CONFINAMENTO DELLA SEZIONE

Cerchiatura/Confinamento mediante legature orizzontali

Trasferimento dell'effetto del confinamento per effetto degli angolari di ripartizione

- Parametri: passo, numero legature sovrapposte, dimensioni degli angolari;
- Principio di miglioramento:
 - Incremento di resistenza a compressione del calcestruzzo
 - Incremento di deformazione ultima ed elastica del calcestruzzo
 - Aumento della capacità rotazionale della sezione
 - L'effetto della pretensione delle legature è una pressione indotta che permette il recupero (parziale) delle sezioni già caricate e permette di allungare il ramo elastico dell'elemento sottoposto a carico.
 - Applicando il rinforzo su un elemento scarico si attiva una compressione radiale (strizione della sezione). L'azione di un carico verticale produce deformazioni trasversali per effetto Poisson che, fintanto che non annullano la deformazione radiale applicata dalla pretensione, non producono deformazioni "dannose" alla colonna rinforzata.
- Dimensionamento:
 - Analisi elastica lineare - dimensionamento in termini di resistenza: si calcola il valore necessario in resistenza del calcestruzzo da raggiungere per effetto del confinamento per raggiungere quella necessaria dall'analisi.
 - Analisi non lineare - dimensionamento in termini di resistenza

RINFORZO DI SEZIONI INFLESSE, PRESSO O TENSOINFLESSE

Confinamento / collaborazione flessionale degli angolari

- Parametri: passo, numero legature sovrapposte, dimensione angolare, barre di continuità
- Principio di miglioramento:
 - Per effetto del confinamento indotto sulla sezione dalle legature trasversali si aumentano le capacità rotazionali della sezione.
 - L'angolare svolge a tutti gli effetti armatura aggiuntiva per effetto dell'aderenza, conferendo incremento di capacità portante a trazione (incremento diretto del momento ultimo); nella sezione di interruzione dell'angolare va garantita la continuità d'armatura.
- Dimensionamento:
 - Analisi elastica lineare - dimensionamento in termini di resistenza; si calcola l'armatura necessaria per raggiungere la resistenza necessaria dall'analisi; il dominio resistente dell'asta rinforzata risulta espanso per effetto del confinamento indotto e dell'armatura aggiuntiva
 - Analisi non lineare – dimensionamento in termini di resistenza, duttilità e capacità rotazionale della sezione. Per effetto del confinamento indotto aumenta non solo la resistenza del materiale ma anche la deformazione ultima ed elastica.
 - Il legame costitutivo dell'asta $M-\phi$ risulta incrementato in termini di momento resistente principalmente per l'armatura aggiuntiva, mentre per effetto del confinamento indotto si allunga il ramo plastico.

RINFORZO DI ELEMENTI A TAGLIO

Rafforzamento del comportamento a traliccio: inserimento di ricorsi di nastri equivalenti a staffe aggiuntive.

- Parametri: passo, numero legature sovrapposte
- Principio di miglioramento:
 - le legature incrementano l'armatura a taglio preesistente
 - si scongiura la rottura fragile della sezione
- Dimensionamento
 - Analisi elastica lineare - dimensionamento in termini di resistenza; dimensionamento della coppia passo / numero di nastri in funzione della sollecitazione a taglio (domanda) richiesta
 - Analisi elastica non lineare: - dimensionamento in termini di resistenza; dimensionamento della coppia passo / numero di nastri in funzione della sollecitazione a taglio (domanda) richiesta.

RINFORZO DEL NODO TRAVE-PILASTRO

Incremento resistenza a taglio del pannello nodale: inserimento di ricorsi (maglie di nastri) orizzontali e/o criss-cross

- Parametri: numero di ricorsi, altezza utile di trave e legature sovrapposte
- Principio di miglioramento:
 - I ricorsi orizzontali disposti nell'altezza utile di trave sotto solaio realizzano delle staffe per il pilastro che attraversano il nodo
 - Si scongiura la rottura fragile del nodo, elemento atto al trasferimento degli sforzi tra trave e pilastro.
- Dimensionamento
 - In termini di domanda: dimensionamento della coppia numero ricorsi / numero di nastri in funzione dell'altezza di nodo a disposizione per l'applicazione del rinforzo affinché si sviluppi il comportamento a traliccio nel nodo in CA. Nelle NTC2008 per le costruzioni in CDB (quindi anche per strutture esistenti) il dimensionamento poteva essere svolto, in via semplificata, in termini di particolari costruttivi, disponendo un quantitativo minimo di staffe al nodo. Nelle NTC2018 sia strutture in CDA che strutture in CDB è necessario soddisfare lo stesso requisito in termini di verifica.

RINFORZO DEGLI ORIZZONTAMENTI

Miglioramento taglio e flessione dei solai in latero-cemento attraverso il Sistema **SOL-CAM®**

- Parametri: passo, numero legature sovrapposte, inclinazione nastrature, dimensione piatto
- Principio di miglioramento:
 - Le nastrature sono staffe che permettono di trasformare il comportamento di un elemento non armato a taglio in uno armato con meccanismo resistente a traliccio.
 - Le nastrature inclinate svolgono anche la funzione di piolature di connessione tra piatto e supporto permettendo il funzionamento del piatto a flessione, senza che sia necessaria l'aderenza sul supporto genericamente di scarse caratteristiche meccaniche o conservative.
 - Si scongiura concomitaneamente la rottura a taglio e flessione del travetto di solaio.
- Dimensionamento
 - In termini di resistenza nei confronti dei carichi statici

6 INTRODUZIONE AL SISTEMA CAM[®] APPLICATO AL CEMENTO ARMATO

Il Sistema delle cuciture attive a marchio CAM[®] nasce per il consolidamento degli edifici in muratura.

L'acronimo e marchio CAM[®] identifica il sistema di consolidamento strutturale basato sulla realizzazione di tirature metalliche realizzate tramite un nastro di spessore ridotto (19x0.90mm) che vengono poste a cerchiare porzioni limitate di struttura. Ciascun nastro è posto in tensione attraverso una macchina pneumatica di caratteristiche certificate in grado di imprimere al nastro tiro all'atto del crimpaggio. La 'presollecitazione' che fa sì che l'elemento risulti subito rinforzato ovvero 'attivo' già per i carichi gravanti nella fase d'esercizio della struttura.

La sua applicazione è stata poi specializzata anche per gli interventi sugli edifici in CA siano essi intelaiati o prefabbricati.

Il principio sopra esposto applicato alle strutture in CA è ben rappresentato dallo schema base riportato di seguito:

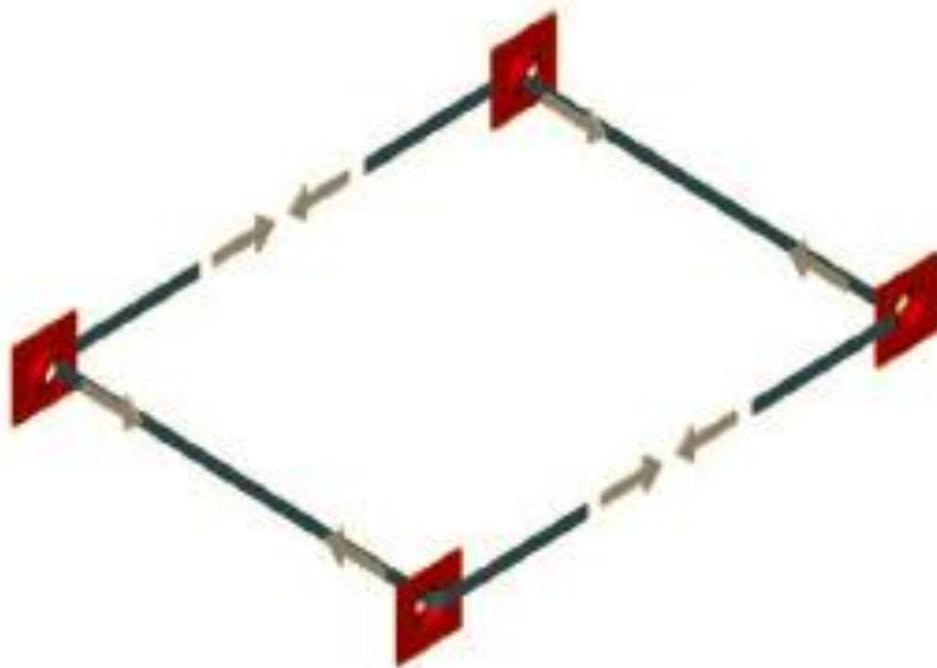


Figura 1 - Schema statico di riferimento per la singola maglia di rinforzo CAM[®]

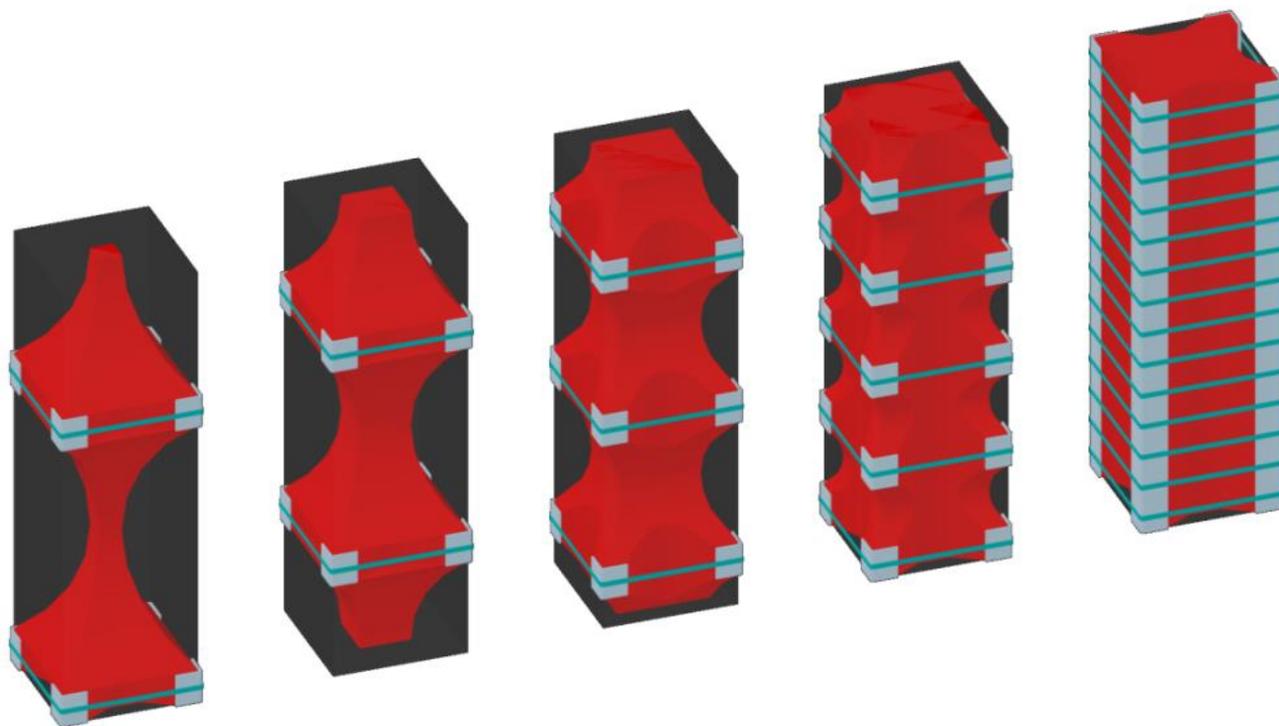


Figura 2 – Schema statico elementare di riferimento

b_n = larghezza singolo nastro = 19mm

t_{ns} = spessore singolo nastro = 0.90mm

n°_{nastri} = numero nastri sovrapposti

$t_{ft} = t_{ns} \times n_{str}$ = spessore totale nastri

s = passo verticale dei nastri

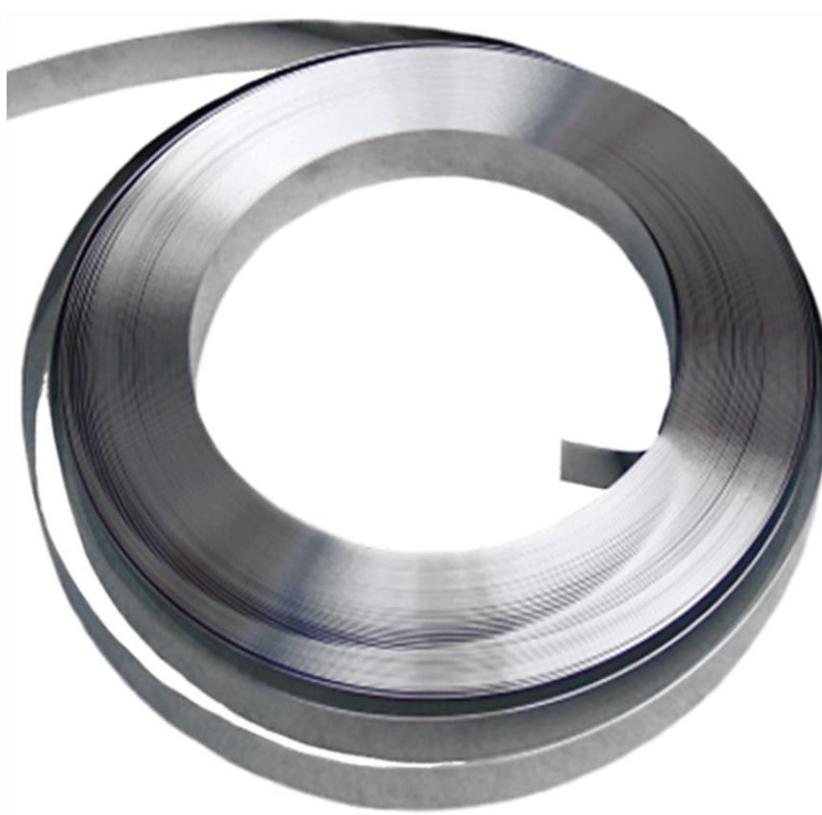
L_{ang} = larghezza ala angolari

t_{ang} = spessore ala angolari

L'elemento forza del Sistema a marchio CAM[®] è la sua semplicità, facilità e velocità di applicazione, grazie in parte alla componentistica minima di cui si compone.

Il Sistema infatti si compone di 4 elementi base:

- Nastro in acciaio INOX di dimensioni estremamente ridotte (19x0.90 mm) da disporre in configurazione di anello chiuso che può essere posto anche in sovrapposizione
- Il sigillo, elemento di chiusura del singolo anello di nastro
- Angolari in acciaio tipo S355 con lavorazione interna bugnata da disporre in corrispondenza degli spigoli degli elementi per ripartire il carico
- La piastra imbutita, anch'esso elemento ripartitore, da applicare in corrispondenza degli eventuali fori da realizzarsi su travi e pilastri.



**Figura 4 - Il nastro in acciaio inossidabile:
in ciascuna bobina sono racchiusi km di nastro**



**Figura 3 - L'angolare con lavorazione
interna mandrolata**

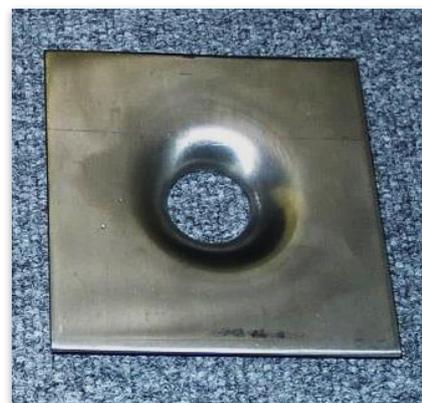


Figura 5 - La piastra imbutita

In generale le strutture intelaiate in CA se non correttamente dimensionate, o realizzate in epoche in cui poca importanza si dava ad alcune “regole” oggi ben consolidate e note, presentano una forte carenza in termini di resistenza e ancor di più di duttilità intesa come capacità di plasticizzazione e dissipazione dell’energia sismica trasmessa.

Il *Sistema delle cuciture attive a marchio CAM[®]* interviene efficacemente nel miglioramento di entrambi gli aspetti sopra esposti.

Nel consolidamento di elementi in CA, il Sistema risulta inoltre vincente grazie alla flessibilità, ai ridotti spessori e di certificata e veloce applicazione anche in circostanze particolari.

Una volta rimosso l’intonaco, in corrispondenza di ciascuno spigolo viene posto in opera l’angolare posato con malta tipo EMACO R955M; per tale motivo non sono necessari ulteriori trattamenti superficiali dell’elemento da consolidare.

Gli angolari sono elementi pressopiegati la cui superficie interna è opportunamente lavorata per migliorare l’aderenza con il supporto in calcestruzzo e superficie esterna liscia per consentire un pretensionamento uniforme dei nastri.

Successivamente si procede al taglio dei nastri ‘a misura’ e alla disposizione intorno all’elemento da consolidare.

Tramite una apposita macchina ‘certificata’ viene effettuato il ‘tiro’ e il ‘crimpaggio’ del nastro.

Il sistema di rinforzo permette di ottenere i seguenti miglioramenti:

- Aumento di resistenza e duttilità a compressione centrata mediante l’effetto del confinamento attivo;
- Aumento di duttilità a compressione del CLS con aumento della rotazione ultima della sezione a presso-flessione o flessione semplice;
- Aumento del Taglio resistente grazie alla aggiunta di armatura a taglio (staffatura dei nastri);
- Aumento di armatura a trazione e dunque del Momento Resistente nel caso in cui gli angolari vengano opportunamente ‘ancorati’ nelle sezioni d’estremità

I recenti eventi sismici che hanno colpito l’Emilia hanno invece portato alla ribalta problematiche proprie degli edifici industriali in cui la carenza non è tanto in termini resistenti quanto più in termini di vincolo tra macroelementi quali pilastri, travi, tegoli e pannelli.

A seguito della richiesta del mercato, la società si è quindi trovata a proporre soluzioni volte all'eliminazione di tali carenze. Grazie alla versatilità del Sistema si è pertanto potuto procedere all'ipotesi di intervento che si è rivelata poi vincente su altre tecniche 'tradizionali'.

6.1 PERCHÉ APPLICARE IL SISTEMA CAM[®]

Il sistema CAM[®] risulta essere vincente su altre tecnologie essenzialmente per gli aspetti descritti di seguito:

- È un Sistema di CONSOLIDAMENTO ATTIVO: il nastro è messo in tensione e l'elemento risulta rinforzato già per i carichi gravanti su di esso nella fase d'esercizio della struttura
- NON incrementa MASSA NÉ varia la distribuzione delle RIGIDEZZE
- È un sistema leggero e a MINIMO INGOMBRO
- Impiega materiali CERTIFICATI
- Impiega acciaio INOSSIDABILE
- È un Sistema FLESSIBILE
- È un Sistema facilmente REVERSIBILE
- È VELOCE
- È un cantiere A 'SECCO'
- È messo in opera da MAESTRANZE QUALIFICATE

Le immagini nel paragrafo successivo descriveranno dettagliatamente i punti essenziali di forza del Sistema.

6.2 CAMPI DI APPLICAZIONE DEL SISTEMA CAM[®] SU EDIFICI IN CA

6.2.1 CONSOLIDAMENTO DEI PILASTRI

Nei pilastri le legature CAM[®] vengono disposte trasversalmente all'asse longitudinale dell'elemento. Ciò che tali anelli realizzano è una staffatura esterna della sezione e come tale contribuiscono nello scongiurare la rottura fragile a schiacciamento e taglio dell'elemento.

Il nastro deve essere disposto in maniera ortogonale all'angolare. Laddove la sezione sia a sviluppo variabile sarà necessario o qualora si voglia realizzare un rinforzo con 'staffatura a più braccia' o nel caso in cui si voglia massimizzare l'efficienza per confinamento, si realizzeranno delle forature intermedie. Grazie ai ridotti spessori in gioco e alla versatilità del Sistema si possono superare agevolmente numerose situazioni 'particolari'.



Figura 6 – Edil CAM SISTEMI: rinforzo pilastri in corrispondenza di un giunto strutturale



Figura 7 - Edil CAM SISTEMI: Pilastro con 'staffatura' a più braccia



Figura 8 - Edil CAM SISTEMI: Pilastro con 'staffatura' maggiorata nelle zone critiche



Figura 9 – Edil CAM SISTEMI:
*Pilastro in corrispondenza di
pannelli perimetrali non rimossi*



Figura 10 – Edil CAM SISTEMI:
*Pilastro circolare rinforzato in
un centro commerciale senza
interruzione dell'attività*



Figura 11 – Edil CAM SISTEMI:
*Pilastro in corrispondenza di infissi
senza prevederne la rimozione*



Figura 12 – Pilastro di dimensione variabile durante le fasi di applicazione di posa e tesatura del nastro

Laddove si voglia considerare il contributo dell'angolare nel meccanismo resistente a flessione va garantita la continuità d'armatura laddove l'angolare si interrompe.

Ciò può essere realizzato in maniera estremamente semplice impiegando normali barre da CA, saldate all'angolare e inghisate in fondazione o nel nucleo interno del pilastro stesso, oppure possono attraversare il solaio e connettersi all'elemento superiore.

Si rimanda ai paragrafi successivi, agli schemi grafici e ai dettagli del calcolo del solo rinforzo a taglio e per garantire il rinforzo a flessione e taglio.

6.2.2 CONSOLIDAMENTO DELLE TRAVI

Nelle travi le legature possono essere realizzate in totale avvolgimento dell'elemento, quindi forando il solaio in corrispondenza del passo scelto, oppure, laddove non si possa intaccare il pavimento del solaio superiore può essere cerchiata la porzione estradossata di trave, forando quindi la trave stessa immediatamente al di sotto dell'orizzontamento.

In corrispondenza dello spigolo a livello di solaio, l'angolare lascia il posto ad un piatto oppure alle piastre imbutite.

Anche per le travi, vale quanto descritto per il pilastro: le legature sono armatura aggiuntiva a taglio (staffe) mentre gli angolari offrono il loro contributo resistente a flessione in mezzera dell'elemento trattato. Laddove la carenza flessionale fosse riscontrata alle estremità va realizzata la continuità d'armatura.



**Figura 13 –
Rinforzo della
trave in completo
avvolgimento:
angolari continui
all'intradosso**



**Figura 14 –
Rinforzo della
trave in completo
avvolgimento:
piastre imbutite
all'estradosso**



**Figura 15 –
Rinforzo della
trave in completo
avvolgimento:
piatti
all'estradosso**



**Figura 16 –
Rinforzo della
trave in parziale
avvolgimento: in
corrispondenza
dell'intradosso
trave sono
disposti angolari,
in corrispondenza
del foro trave
sono disposte
delle piastre
imbutite.**



Figura 17 – Vista all'intradosso di una trave alta: si possono realizzare fori intermedi nella trave per andare a costituire staffe a più braccia (principalmente nel caso di travi a spessore) o per incrementare il confinamento della sezione.

Si rimanda ai paragrafi successivi, agli schemi grafici e ai dettagli del calcolo del solo rinforzo a taglio e per garantire il rinforzo a flessione e taglio.

6.2.3 CONSOLIDAMENTO DEI NODI TRAVE- PILASTRO NELLE STRUTTURE INTELAIATE

Altro meccanismo fragile che va scongiurato negli edifici intelaiati è la rottura del pannello nodale, in quanto il nodo trave-pilastro è l'elemento atto al trasferimento degli sforzi tra i due elementi.

Molto spesso gli edifici esistenti mancano del dettaglio costruttivo delle staffe che nel pilastro proseguono, attraversando il nucleo di intersezione con la trave.

Ciò che si realizza applicando uno o più ricorsi nell'altezza libera di trave al di sotto del solaio e disponendo più nastri in sovrapposizione altro non è che una staffa disposta nel nodo a posteriori.

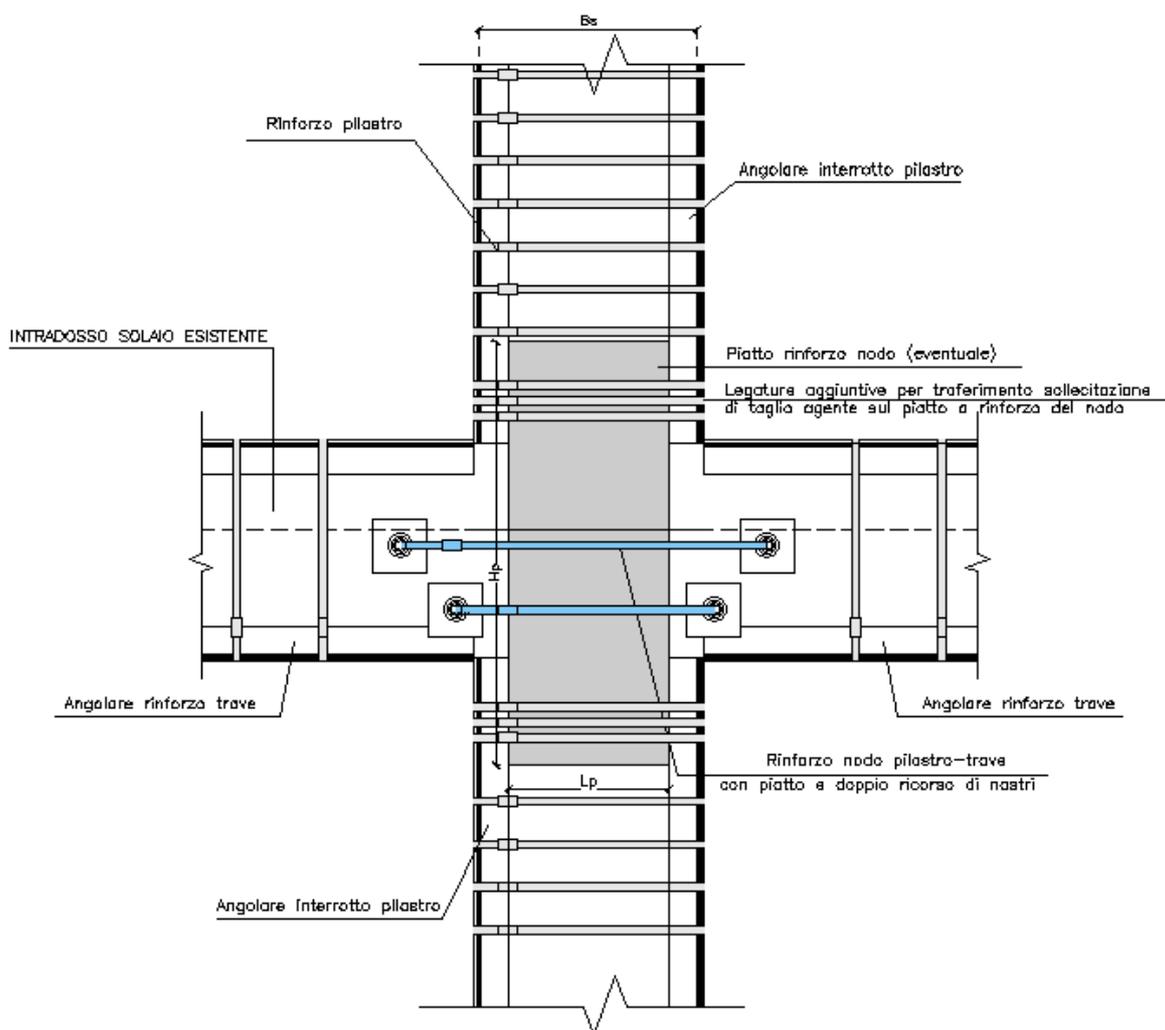


Figura 18 – Tipologico di intervento su nodo: in azzurro evidenziate le staffe CAM[®] aggiuntive

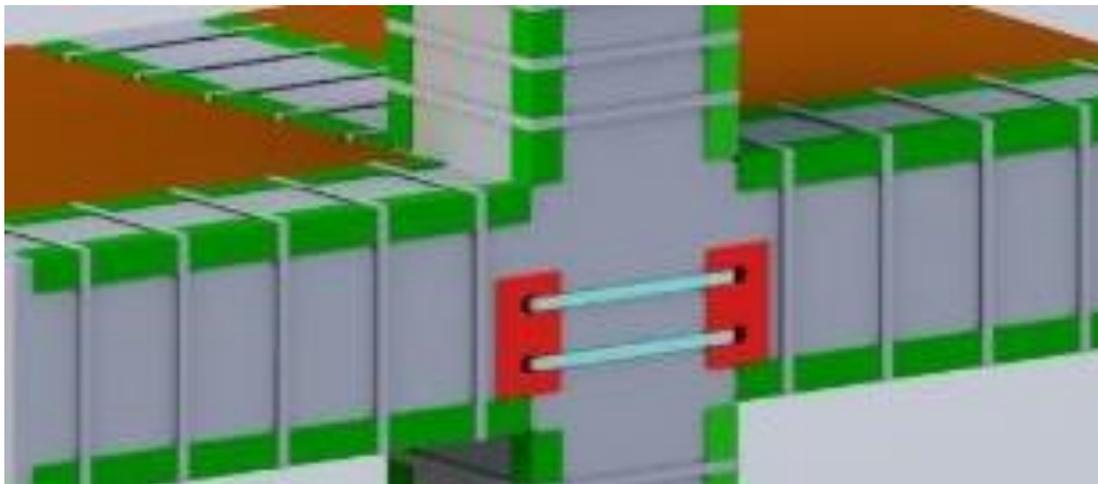


Figura 19 – Edil CAM SISTEMI: Dettaglio di rinforzo di nodo eseguiti

6.2.4 CONSOLIDAMENTO DEI SOLAI

Il SOL-CAM è un sistema di consolidamento dei travetti di solaio che consente il contemporaneo consolidamento a taglio e flessione del solaio.

Il sistema SOL-CAM prevede il posizionamento all'intradosso dei travetti di un piatto metallico reso solidale al travetto mediante maglie staffanti il travetto realizzate con nastri inox anche in sovrapposizione (realizzate attraverso semplici forature sulla soletta a preferibilmente a 45° dalla verticale).

Tale configurazione permette contemporaneamente di intervenire per le carenze a taglio del travetto (nastri come ferri piegati) e a flessione (il piatto è armatura resa aderente dal sistema di nastri inclinati senza necessità di incollaggio).

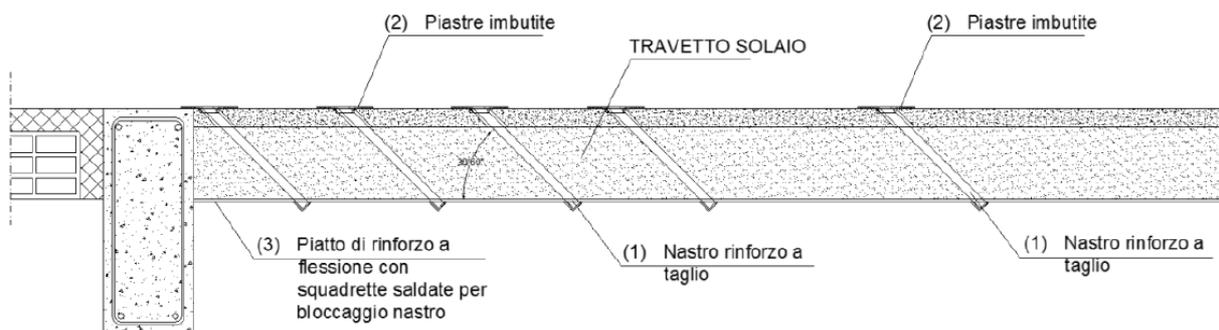


Figura 20 – Schema di rinforzo del SOL-CAM



Figura 21 - Edil CAM SISTEMI: vista intradosso rinforzo di solaio



Figura 22 – Edil CAM SISTEMI: vista rinforzo estradosso solaio

6.2.5 REALIZZAZIONE DEI VINCOLI TRA MACROELEMENTI NEGLI EDIFICI INDUSTRIALI

L'assenza di vincolo tra macroelementi negli edifici industriali può facilmente essere risolta studiando dei sistemi di connessione in cui fondamentalmente lo sfilamento è impedito da legature atte ad assorbire l'azione orizzontale sismica calcolata sulla base delle masse in gioco sul singolo elemento.

L'intervento più semplice, rappresentato dall'applicazione di carpenteria metallica imbullonata agli elementi da vincolare, in realtà in moltissime applicazioni risulta irrealizzabile o scarsamente conveniente. La carpenteria è preforata, pertanto la posizione dei perni da inghisare tramite ancoranti chimici è fissata. Come spesso accade tuttavia l'inghisaggio può risultare estremamente difficoltoso a causa della presenza di numerose armature negli elementi da connettere. È quindi necessario un rilievo estremamente dettagliato delle armature esistenti per tutti i nodi da trattare e quindi la specializzazione della carpenteria per ciascun caso di applicazione.



Figura 23 – Carpenteria metallica per realizzazione dei vincoli

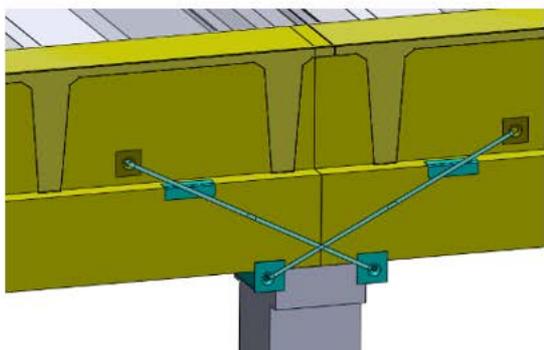


Figura 24 – Situazione impiantistica negli stabilimenti di produzione.

Il vantaggio relativo all'applicazione del Sistema a marchio CAM® è soprattutto legato a due sue peculiarità:

- I ridotti spessori del rinforzo a fronte di grandi prestazioni meccaniche. Il sistema riesce in maniera agevole ad evitare lo smontaggio di tubazioni o impiantistica in generale, di pannelli perimetrali o macchinari.
- La versatilità. La posizione delle forature può essere decisa direttamente in cantiere e quindi non si hanno delle posizioni fisse che poi, a causa della presenza di armatura negli elementi non può essere montata.

Schema 3D



Schema 2D

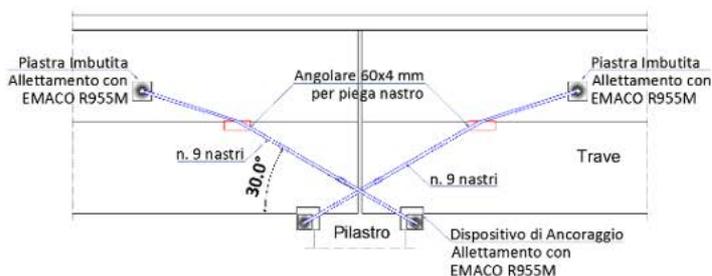


Figura 25 – Tipologico di intervento di connessione pilastro-trave.

Il Sistema come si nota nello schema grafico è estremamente semplice. Ciascun anello inclinato offre il contrasto allo sfilamento in una direzione.

L'elemento posto a contrasto sul pilastro che realizza il vincolo puntuale è fondamentalmente uno scatolare con imbutitura estrema per accompagnare i nastri nel cambio direzione.

Il secondo vincolo puntuale è in corrispondenza della trave dove viene realizzato un foro che ne attraversa lo spessore, in posizione che può essere decisa direttamente in cantiere sulla base delle esigenze riscontrate.

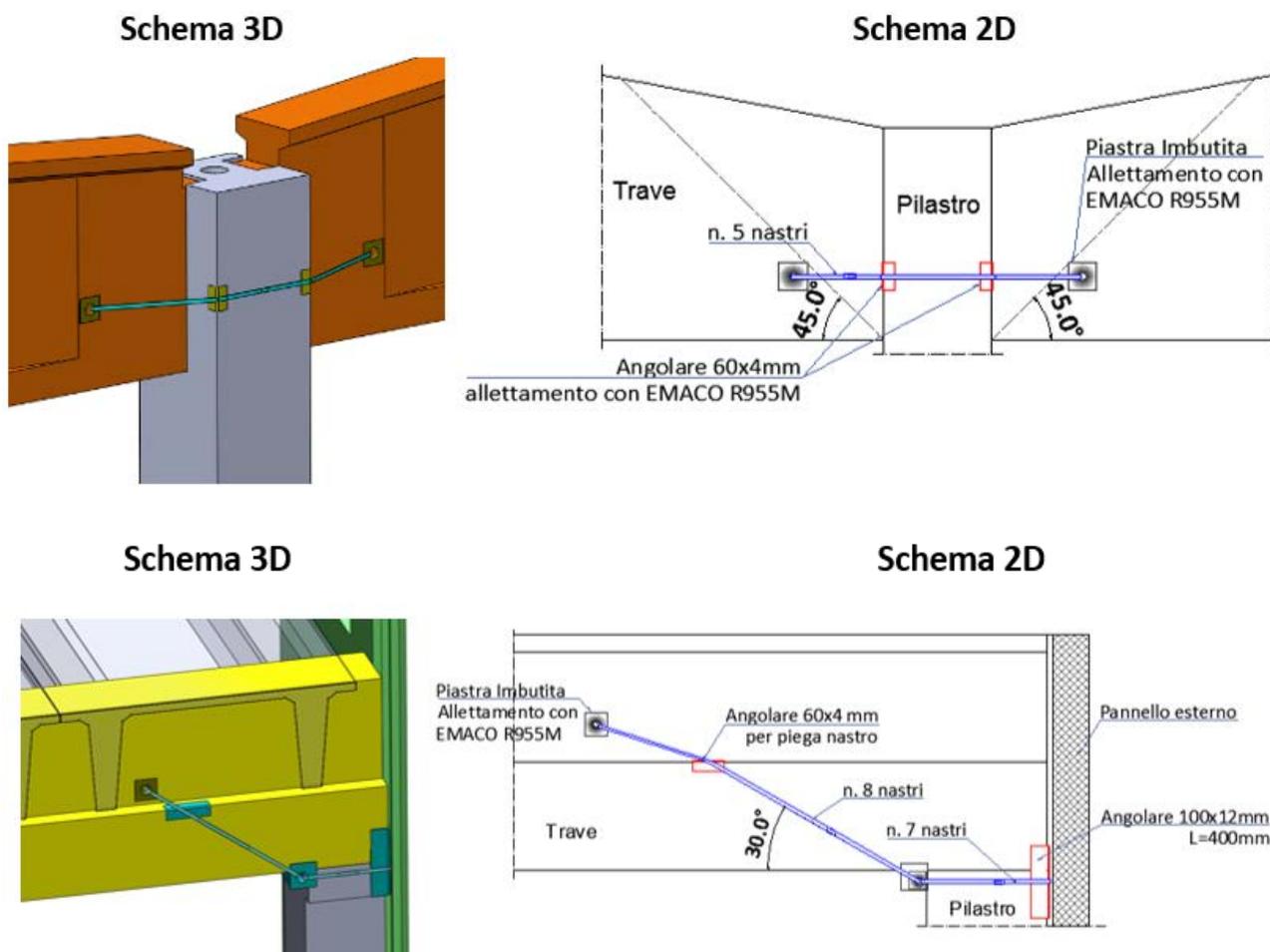


Figura 26 – Schemi di intervento di connessione pilastro-trave.



Figura 27 – Edil CAM SISTEMI: generale e dettaglio di interventi di connessione pilastro-trave



Figura 28 – Edil CAM SISTEMI: interventi di connessione pilastro-trave



Figura 29 – Edil CAM SISTEMI: interventi di connessione pilastro-trave

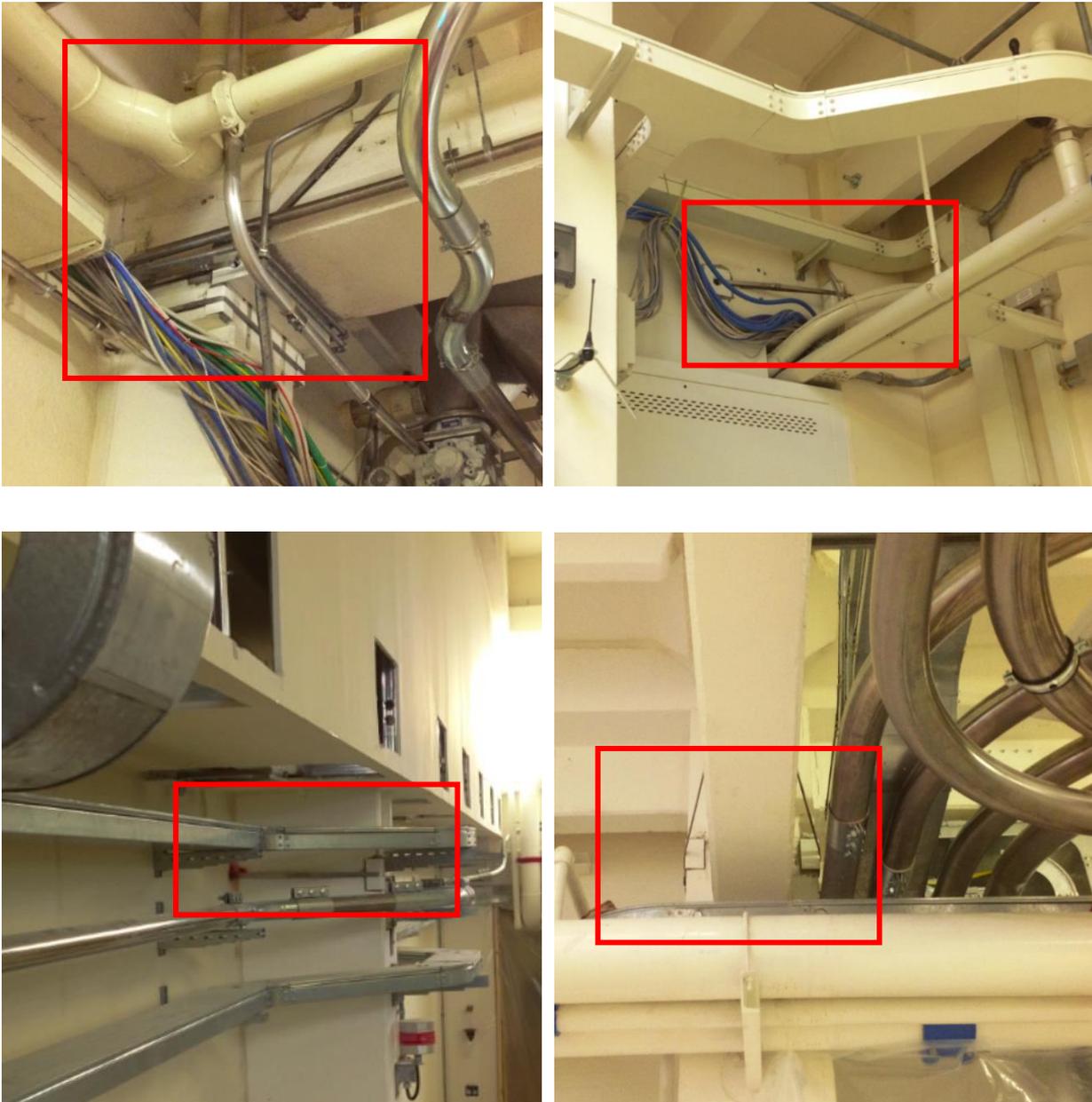


Figura 30 – Edil CAM SISTEMI: intervento di connessione pilastro-trave



Figura 31 – Edil CAM SISTEMI: intervento di connessione pilastro-trave

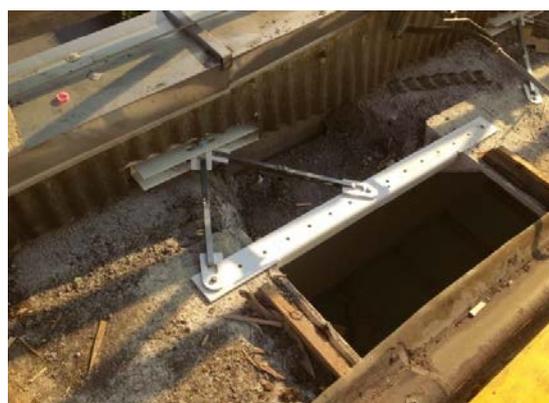
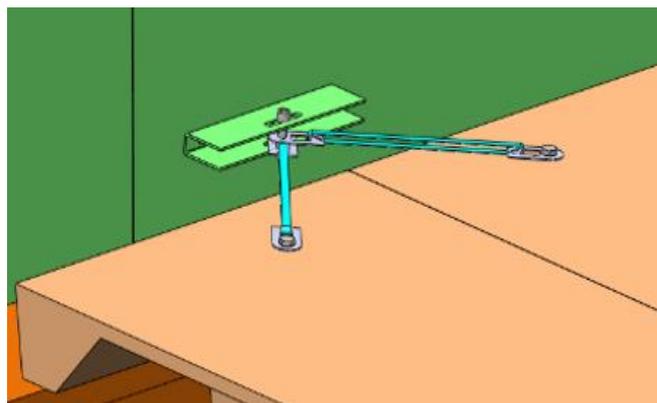
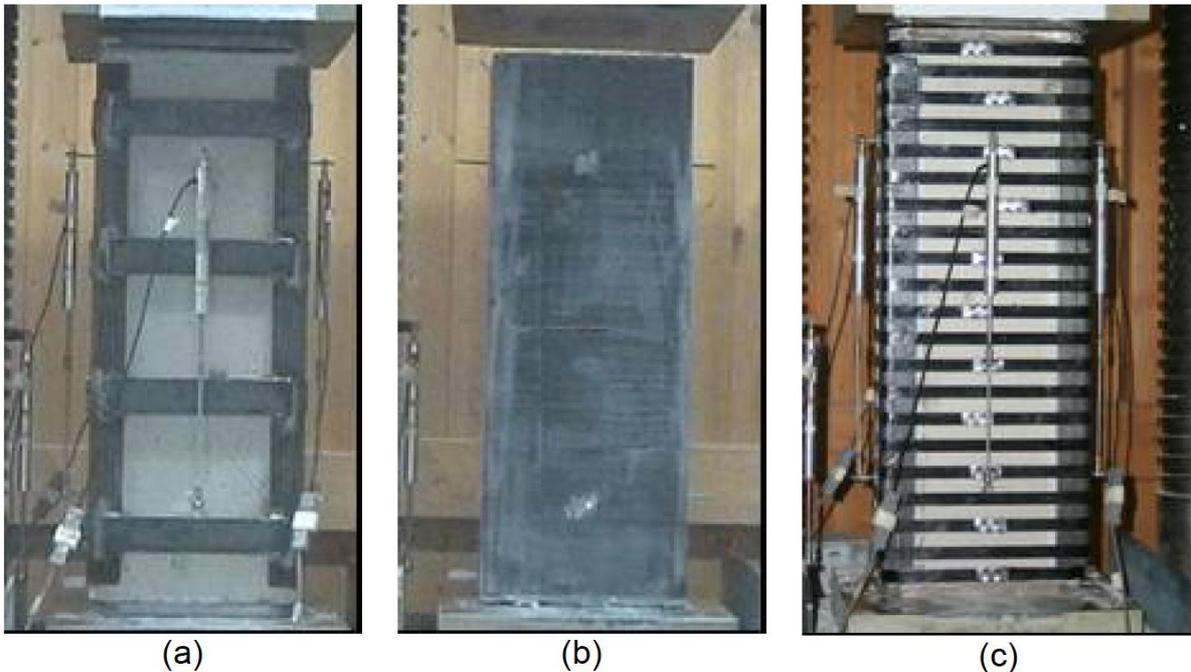


Figura 32 – Edil CAM SISTEMI: intervento di connessione tegolo-pannello

6.3 IL RINFORZO 'ATTIVO': L'EFFETTO DELLA PRESOLLECITAZIONE DEI NASTRI

Per intuire l'effetto della presollecitazione dei nastri è utile analizzare le prove condotte dall'Università della Basilicata, comparative rispetto alle altre tecniche definibili 'passive' se confrontate con la tecnologia CAM[®] 'attiva'.

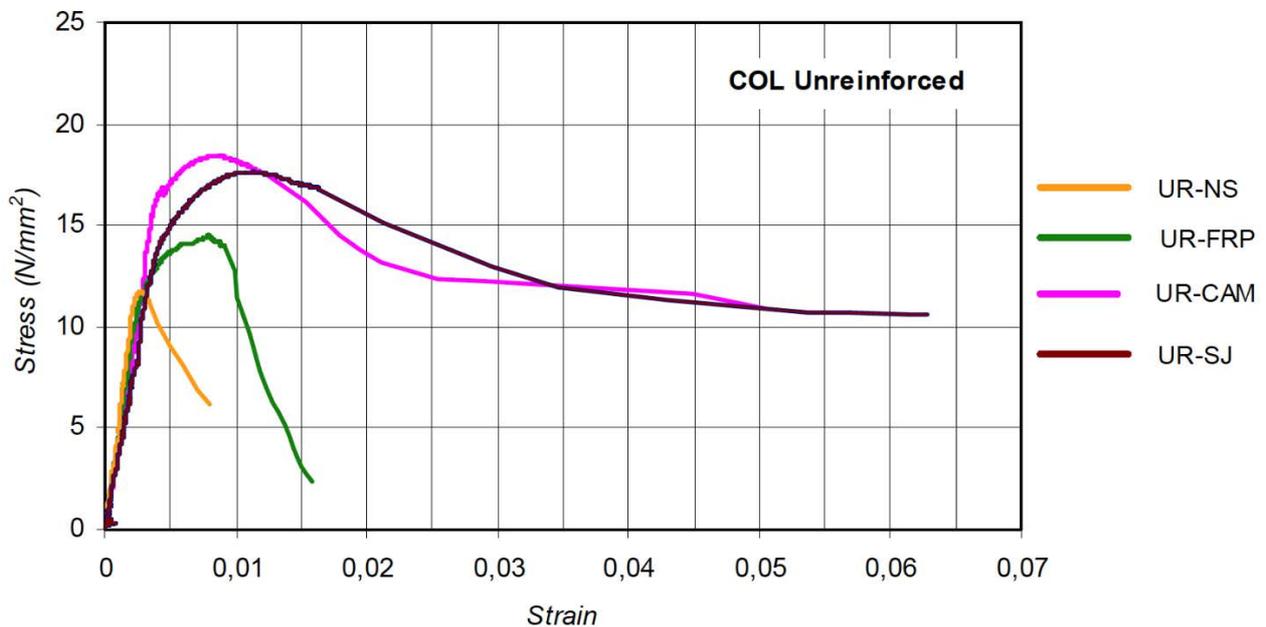


Tre tecnologie di confinamento a confronto: (a) calastrelli (b) FRP (c) Sistema CAM[®]

Calastrelli in acciaio, fasciatura in FRP e Sistema CAM[®] vennero testati su provino di riferimento (pilastro in calcestruzzo non armato) soggetto a prova di schiacciamento. Prescindendo dal materiale impiegato per la costruzione del provino (calcestruzzo non armato) si ritiene utile l'analisi delle prove condotte per la valutazione dell'effetto di confinamento delle tre diverse tecnologie.

Il dimensionamento dell'intervento si è svolto in equivalenza di incremento resistente ultimo a compressione e l'azione assiale applicata centrata ai provini e di tipo monotona crescente.

Nel grafico di seguito: comportamento di riferimento del pilastro nudo di campione (curva in giallo) confinamento realizzato con fibre (verde), confinamento realizzato con calastrelli (bordò) e confinamento effettuato con Sistema CAM[®] (fucsia).



Curve relative alle prove eseguite dall'Università della Basilicata

Il comportamento a rottura del pilastro nudo è di tipo fragile (in quanto la sezione è non armata) con picco intorno ai 12 MPa (resistenza a compressione del calcestruzzo), con brusco decadimento della resistenza a valle del picco. Anche il provino confinato con FRP è caratterizzato da comportamento post-picco di tipo fragile che, al di là del valore resistente raggiunto, ha andamento degradante (delaminazione della fibra – meccanismo fragile).

Il provino rinforzato con Sistema CAM[®] (fucsia) e quello con sistema a calastrelli hanno incrementi in resistenza e in duttilità assolutamente paragonabili, distinguendo dopo il picco di resistenza un comportamento plastico (asintotico). Vale però l'occasione di soffermarsi su alcuni aspetti che la coazione impressa all'elemento con le legature CAM[®] comporta.

Analizzando il tratto iniziale, ovvero elastico della prova si nota che la curva relativa alla prova CAM[®] prosegue con pendenza rettilinea oltre il limite di resistenza a compressione del calcestruzzo, mentre negli altri provini si assiste ad un cambio di pendenza della curva superati i 12 MPa di resistenza del calcestruzzo. Questa variazione di pendenza è sintomo di una variazione di rigidezza del Sistema, di fatti, il calcestruzzo all'interno della 'camicia' risulta frantumato e da quel dato valore di carico in poi ciò che resiste è unicamente la camicia esterna per effetto delle grandi deformazioni indotte. Nella curva CAM[®] tale cambio di pendenza avviene ad un valore decisamente maggiore di

carico. Ciò vuol dire che se la prova si fosse interrotta al valore di carico corrispondente alla tensione di 12MPa e avessimo tagliato i nastri CAM[®], avremmo osservato il calcestruzzo ancora integro.

Il pretensionamento introduce uno stato tensione trasversale che per effetto Poisson si traduce in un 'allungamento' del provino. Il carico necessario per riportare l'elemento alla configurazione indeformata corrisponde all'incremento di carico portato in regime elastico. Il provino cerchiato con Sistema CAM[®] quindi, a quel dato livello di carico che prima ne avrebbe comportato la rottura, risulta ancora integro.

La prova è stata poi condotta fino ad evidenziare la crisi ultima delle sezioni rinforzate.



Provini a fine prova

L'effetto della presollecitazione dei nastri non entra nel calcolo diretto a rottura dell'elemento, mentre il suo contributo può essere stimato nel caso transitorio (fase d'esercizio o fase di applicazione del carico).

In generale, uno stato di tensione definito dal tensore degli sforzi (sistema che descrive lo stato tensionale secondo i tre assi) può sempre essere scomposto in due tensori, uno di tipo sferico (composto dalle sole tre tensioni principali, uguali nelle tre direzioni) ed uno di tipo deviatorico (matrice completa di tutte le componenti, sbilanciate nelle tre direzioni).

Lo sferico produce deformazioni di tipo volumetrico (stato di tensione idrostatica) che normalmente, se non per elevati valori della pressione applicata, non producono fenomeni di collasso del corpo.

Il deviatorico produce uno stato deformativo che modifica la forma del corpo, introducendo scorrimenti e rotazioni. Questa parte del tensore degli sforzi è quella a cui normalmente sono associati gli stati di collasso, che potranno essere di taglio, di torsione o di flessione.

I pannelli murari sono normalmente sottoposti a compressione e presentano, in condizioni non sismiche, uno stato tensionale prevalentemente monoassiale di compressione verticale. Il confinamento mediante il Sistema CAM permette l'instaurarsi di una componente sferica nello stato tensionale del pannello riducendo contemporaneamente la componente deviatorica dello stato tensionale iniziale.

Per chiarire meglio il concetto si può configurare la seguente situazione.

Immaginiamo un pilastro completamente scarico, cui applichiamo un sistema di nastri a confinarlo in coazione: la sollecitazione e dunque la deformata radiale (strizione della sezione trasversale) che si instaura sarà direttamente proporzionale ad un carico assiale e dunque ad un allungamento in asse dell'elemento che può essere calcolato attraverso il coefficiente di Poisson ν .

$$\varepsilon_x = -\nu \cdot \varepsilon_z$$

All'applicazione del carico assiale l'elemento, confinato attivamente, fintanto che l'azione non sarà tale da riportarlo alla condizione indeformata ($\varepsilon_z=0$), non "sentirà" alcun incremento di sollecitazione. Il carico che riporta l'elemento alla condizione indeformata corrisponde esattamente all'incremento di resistenza in condizione di esercizio, che fornirà dunque una misura dell'incremento di resistenza in elasticità (non in condizioni ultime quindi) che la parte attiva del rinforzo con CAM[®] fornisce.

Al superamento di tale valore il pilastro si deformerà radialmente per effetto Poisson e le legature continueranno a fornire una azione trasversale via via crescente simile a quanto fornito dalle altre tecniche di confinamento passivo.

In buona sostanza il comportamento del pilastro presenterà un ampliamento del dominio elastico per effetto della presollecitazione del Sistema di rinforzo, ampliamento che potrà essere sfruttato fin dalla fase di applicazione del rinforzo.

7 CRITERI DI CALCOLO PER IL RINFORZO DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A. MEDIANTE IL SISTEMA CAM[®]

7.1 RESISTENZE DI CALCOLO DEI MATERIALI

7.1.1 CALCESTRUZZO

Nelle NTC 2008 viene specificato come ricavare i valori di resistenza da utilizzare per le verifiche. In particolare nel Cap. 8.7.2 è riportato:

Per il calcolo della capacità di elementi/meccanismi duttili o fragili si impiegano le proprietà dei materiali esistenti, determinate secondo le modalità indicate al punto 8.5.3, divise per i fattori di confidenza in relazione al livello di conoscenza raggiunto. Tali valori vanno di norma ridotti mediante i Fattori di Confidenza definiti al capitolo C8A.1.A.4 della Circolare e riportati schematicamente nella tabella C8A.1.1 in funzione del Livello di Conoscenza raggiunto. Per il calcolo della capacità di resistenza degli elementi fragili primari, le resistenze dei materiali si dividono per i corrispondenti coefficienti parziali e per i fattori di confidenza in relazione al livello di conoscenza raggiunto.

Nella Circolare Applicativa n.617/2009 al capitolo C.8.7.2.4 tale descrizione viene maggiormente dettagliata modificandola in funzione del tipo di analisi sismica svolta. In particolare:

Nel caso di **analisi elastica o dinamica modale con spettro di progetto** e con fattore di struttura q (q compreso tra 1.5 e 3.0) si ha:

- Nel caso di uso del fattore di struttura, tutti gli elementi strutturali duttili devono soddisfare la condizione che la sollecitazione indotta dall'azione sismica ridotta del fattore 'q' sia inferiore o uguale alla corrispondente resistenza. Tutti gli elementi strutturali "fragili" devono, invece, soddisfare la condizione che la sollecitazione indotta **dall'azione sismica ridotta per $q = 1,5$** sia inferiore o uguale alla corrispondente resistenza.
- Per il calcolo della resistenza di elementi/meccanismi duttili, si impiegano le proprietà dei materiali esistenti direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza. Per il calcolo della resistenza di elementi/meccanismi fragili, si impiegano le proprietà dei materiali esistenti direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza e per i corrispondenti coefficienti parziali. Per i materiali nuovi o aggiunti si impiegano le proprietà nominali.

Nel caso di analisi non lineare statica (Push-over) o dinamica (integrazione al passo) si ha:

- La verifica degli elementi duttili viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di deformazioni con i rispettivi limiti di deformazione. La verifica degli elementi fragili viene eseguita confrontando gli effetti indotti dalle azioni sismiche in termini di forze con le rispettive resistenze.
- Per il calcolo della capacità di elementi/meccanismi duttili si impiegano le proprietà dei materiali esistenti direttamente ottenute da prove in sito e da eventuali informazioni aggiuntive, divise per i fattori di confidenza. Per il calcolo della capacità di resistenza degli elementi fragili primari, le resistenze dei materiali si dividono per i corrispondenti coefficienti parziali e per i fattori di confidenza. Per i materiali nuovi o aggiunti si impiegano le proprietà nominali.

Gli elementi ed i meccanismi resistenti sono classificati in:

- “duttile”: travi, pilastri e pareti inflesse con e senza sforzo normale;
- “fragile”: meccanismi di taglio in travi, pilastri, pareti e nodi;

In caso di pilastri soggetti a valori di sforzo normale particolarmente elevato va presa in considerazione la possibilità di comportamento fragile.

In sintesi ponendo:

f_{cm} = resistenza media ottenuta da prove si ha:

RESISTENZA DI CALCOLO f_{cd} PER STRUTTURE ESISTENTI IN C.A.	Meccanismi Duttile o Fragile		Meccanismi “Fragile” primari	
	Fattore di Struttura q	Resistenza del materiale	Fattore di Struttura q	Resistenza del materiale
Analisi Lineare Statica o Dinamica modale con fattore q	$q = 1.5 - 3$	$f_{cd} = f_{cm} / FC$	$q = 1.5$	$f_{cd} = f_{cm} / (\gamma_M \times FC)$
Analisi non Lineare	-	$f_{cd} = f_{cm} / FC$	-	$f_{cd} = f_{cm} / (\gamma_M \times FC)$

7.1.2 I MATERIALI DEL SISTEMA CAM[®]

Tutti i materiali sono marcati CE. Nella tabella a seguire vengono riepilogati i materiali impiegati per ogni componente e per tipologia di applicazione.

Tutti i componenti, a meno del nastro e del sigillo, sono zincati a caldo.

Componente	Dimensione (mm)	Normativa	SIGLA	f _{tk} (MPa)	f _{yk} (MPa)	A ₃₀ (%)
Piatto imbutito	125x125x4(*)	UNI EN 10025-2	S235	≥ 360	≥ 235	24
Angolare continuo – lavorazione mandrolata	≠ 6/8/10 (*)	UNI EN 10025-2	S355	≥ 470	≥ 355	20
Nastro	19x0.90	UNI EN 10088-4	1.431 2H-C1000	≥ 1000	≥ 650	15
Sigillo	45x55x1 (0.90)	UNI EN 10088-4	1.4301 - 1.4318 - 1.4307	≥ 520	≥ 220	45

(*) ove necessario possono essere prodotti pezzi speciali con dimensione personalizzata.

Come descritto sopra, i nastri posseggono le seguenti caratteristiche meccaniche:

- spessore 0.90 mm e larghezza 19 mm
- resistenze a rottura caratteristica $f_{tk} \geq 1000 \text{ N/mm}^2$
- resistenze a snervamento caratteristica $f_{yk} \geq 650 \text{ N/mm}^2$
- allungamento a rottura almeno pari al 15%.

Per la resistenza del nastro, la resistenza di calcolo a trazione $N_{t,Rd}$ è assunta pari al minore fra $N_{pl,RD}$ resistenza plastica della sezione lorda A e la resistenza $N_{u,Rd}$ a rottura della sezione netta A_{net} in corrispondenza della giunzione per la quale è garantita una resistenza minima pari al 70% della resistenza del nastro stesso.

$$f_{yd} = \min \left\{ \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}, \frac{0.7 \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} \right\}$$

dove $\gamma_{M0} = 1,10$ e $\gamma_{M2} = 1,25$

Si considera quindi una tensione di calcolo pari a

$$f_{yd} = \frac{0.7 \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = 560 \text{ N/mm}^2$$

7.2 RINFORZO PER CONFINAMENTO DELLA SEZIONE IN C.A. MEDIANTE SISTEMA CAM[®]

La verifica di elementi strutturali confinati viene condotta valutando l'azione esercitata dalla fasciatura in funzione della geometria della sezione secondo quanto riportato per le NTC2008 nella circolare al punto C8A.7.2.2, per le NTC2018 al punto della Circolare C8.7.4.2.2.

La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

$$N_{Sd} \leq N_{Rcc,d}$$

essendo N_{Sd} il valore di progetto dell'azione assiale agente (da valutarsi, per le diverse combinazioni di carico prevedibili, come prescritto dalla Normativa vigente) e $N_{Rcc,d}$ il valore di progetto della resistenza della colonna in CA confinata.

La resistenza assiale di progetto, $N_{Rcc,d}$, è definita come segue:

$$N_{Rcc,d} = A_c \cdot f_{ccd} + A_f \cdot f_{yd} \geq A_c \cdot f_{cd} + A_f \cdot f_{yd}$$

Dove:

f_{cd} è la resistenza a compressione del calcestruzzo non confinato (calcolata come riportato per i meccanismi di rottura fragili);

f_{ccd} è la resistenza a compressione del calcestruzzo confinato;

A_c è l'area della sezione trasversale del calcestruzzo confinato.

Il rinforzo per confinamento della sezione avviene disponendo nastri in direzione trasversale rispetto all'asse longitudinale dell'elemento.

Il confinamento effettuato con il CAM[®] aumenta la capacità resistente a compressione centrata dell'elemento e ne aumenta anche la deformazione ultima migliorandone la duttilità a compressione.

7.2.1 CALCOLO DELL'AUMENTO DI RESISTENZA A COMPRESSIONE CENTRATA DEL CALCESTRUZZO CONFINATO MEDIANTE IL CAM[®]

La resistenza a compressione dell'elemento confinato soggetto alla pressione di confinamento può calcolarsi con la seguente formulazione della Circolare C8A.7.6 nelle NTC2008 e la medesima formula nelle NTC2018 si riscontra al punto della Circolare C8.7.4.2.2:

$$f_{cc} = f_c \left[1 + 3.7 \left(\frac{0.5 \cdot \alpha_n \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot f_y}{f_c} \right)^{0.86} \right]$$

Dove

b e h le dimensioni della sezione

ρ_s rapporto volumetrico di armatura trasversale;

$$\rho_s = \frac{2 \cdot A_s \cdot (b + h)}{(b \cdot h \cdot s)}$$

A_s è l'area trasversale dei nastri ovvero pari al numero di nastri sovrapposti per l'area del singolo nastro $A_s = n^{\circ}_{\text{nastri}} \times b_n \times t_n$

s è il passo verticale dei nastri

α_n è il fattore di efficienza del confinamento nella sezione;

$$\alpha_n = 1 - \frac{(b-2R)^2 + (h-2R)^2}{3bh} \quad (\text{C8.7.4.7a})$$

In cui R è il raggio di arrotondamento degli spigoli del supporto che nel caso specifico coincide con il raggio di arrotondamento dell'angolare pressopiegato [$R = \min(L_{\text{ang}}; 5 \times t_{\text{ang}})$], normalmente pari a 30 mm.

α_s è il fattore di efficienza del confinamento lungo l'elemento;

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s-h_s}{2b} \right) \left(1 - \frac{s-h_s}{2h} \right) \quad (\text{C8.7.4.7b})$$

h_s è l'altezza della striscia di rinforzo pari a b_n

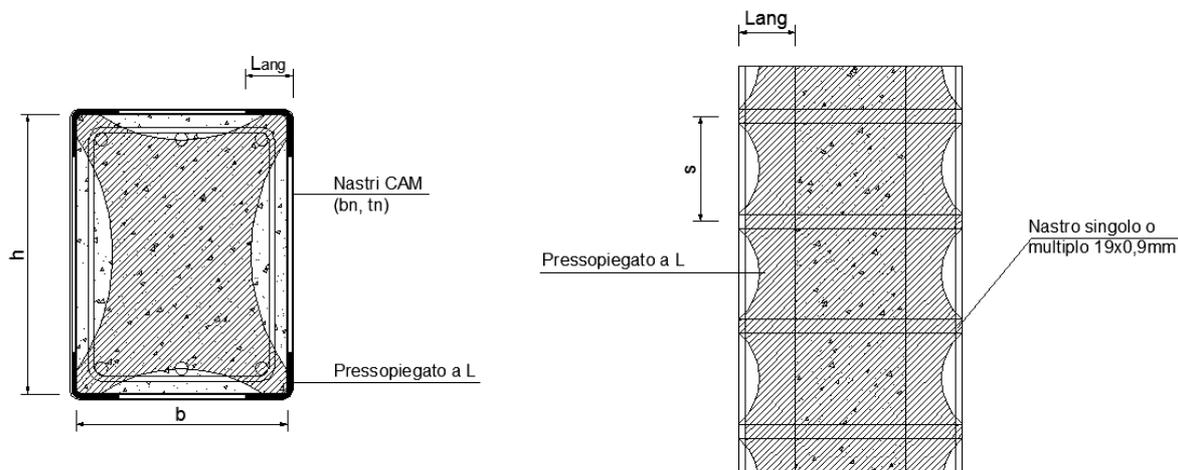


Figura 33 – Schema di riferimento per il confinamento dell'elemento in C.A.

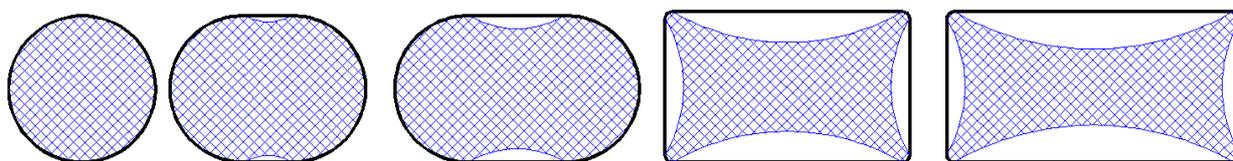


Figura 34 – Influenza della geometria della sezione confinata

La superficie del supporto in C.A. non necessita di trattamenti superficiali preventivi rispetto all'applicazione del Sistema (eccetto la rimozione dell'intonaco), infatti il nastro si posa direttamente sugli angolari che lo 'accompagnano' nel cambio direzione.

Vale la pena specificare che la formula sopra riportata:

- Nelle NTC2018 viene precisato che deve essere impiegato per il calcestruzzo esistente f_c è la resistenza ottenuta come media da prove diviso il FC quindi sembra riferita al meccanismo duttile di collasso. Nel caso di verifiche fragili, intese come verifiche a schiacciamento, si suggerisce comunque di dividere ulteriormente il valore ottenuto per il coefficiente di sicurezza sul materiale. Nel caso di impiego nelle verifiche a taglio si suggerisce di non impiegare maggiorazioni per effetto del confinamento.
- Nel caso di colonne circolari, considerando $b=h=D=2R$, con R in questo caso pari al raggio della colonna, porta al valore $\alpha_n = 1$ in linea con quanto riportato su altri riferimenti normativi per le colonne circolari, in quanto massima è in quel caso l'efficienza geometrica della sezione.

- Nel caso di colonne ellittiche, come riportato nella **figura 36**, R è ancora il raggio di curvatura della colonna e pertanto l'efficienza di questa geometria sarà maggiore dell'equivalente sezione rettangolare.

7.2.2 CALCOLO DELL'AUMENTO DI DUTTILITÀ A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO CONFINATO MEDIANTE IL CAM[®]

Nei medesimi punti normativi (formulazione Circolare NTC2008 al punto C8A.7.6, formulazione Circolare NTC2018 al punto C8.7.4.2.2) viene descritto il miglioramento in termini di duttilità espresso mediante l'incremento della deformazione ultima a compressione attraverso la seguente espressione (nelle NTC2018 la formulazione viene coerentemente aggiornata impostando il valore di partenza in deformazione al 3.5‰):

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.5 \cdot \frac{0.5 \cdot \alpha_n \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot f_y}{f_{cc}}$$

Anche la deformazione al limite elastico aumenta e può essere posta:

$$\varepsilon_{cc2} = \varepsilon_{c2} \cdot \left[1 + 5 \cdot \left(\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} - 1 \right) \right] \quad (\text{EN 1998-3:2005})$$

7.2.3 EFFETTO DEL CONFINAMENTO INDOTTO

Il primo effetto legato al simultaneo incremento della resistenza e della deformabilità, comporta l'ampliamento del diagramma costitutivo del calcestruzzo come da figura seguente.

Per tutte le formulazioni di calcolo e verifica della sezione si potrà pertanto far riferimento a tali valori. La tensione di calcolo f_{cd} , come previsto da normativa, sarà calcolata a partire dalla tensione caratteristica (o media da prove per gli esistenti) diviso per il fattore di confidenza nel caso delle verifiche duttili, mentre per il fattore di confidenza e per il fattore del materiale nel caso dei meccanismi fragili primari (es. a taglio).

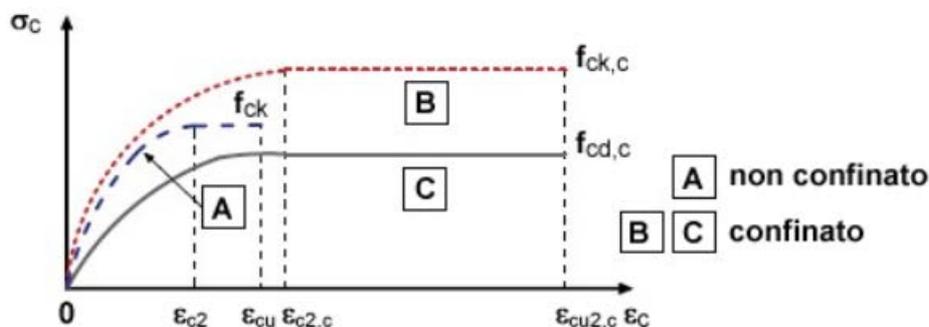


Figura 35 – Diagramma costitutivo del calcestruzzo confinato

Il diagramma sopra riportato è esplicito dell'incremento in duttilità a livello di 'materiale'.

Dalla duttilità di 'materiale' si passa quindi alla duttilità di 'sezione' ovvero alla maggior capacità dell'elemento confinato di sopportare maggiori spostamenti e rotazioni.

L'incremento in termini di rotazione ultima della sezione può essere stimato secondo le formulazioni riportate in al punto C8A.6.1 per le NTC2008, al punto C8.7.2.3.2 per le NTC2018.

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 \cdot (0.3) \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} \cdot f_c \right]^{0.225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(a \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} 1.25^{(100 \rho_d)} \quad (C8.7.2.1)$$

$$\theta_y = \phi_Y + 0.0013 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + 0.13 \phi_Y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (C8.7.2.7a)$$

Va da sé che dall'incremento di duttilità locale del singolo elemento, il sistema di rinforzo, opportunamente distribuito su più elementi, comporterà un aumento di duttilità globale della struttura.

Nei riguardi del confinamento nelle NTC2018 viene introdotta la possibilità di considerare il contributo delle staffe (punto 4.1.2.1.2.1); si consiglia data l'incertezza sulle armature esistenti di non considerare tale contributo.

7.3 RINFORZO A TAGLIO DELLA SEZIONE IN C.A. MEDIANTE SISTEMA CAM[®]

Di seguito verranno riportate le formulazioni di dettaglio impiegate nel calcolo.

Con l'uscita delle NTC2018 la valutazione della resistenza a taglio della sezione in CA si articola sotto molteplici aspetti.

Sostanzialmente la resistenza risulta influenzata dal comportamento sotto azioni cicliche. In particolare va valutata la perdita di resistenza per effetto delle medesime.

In via generale può dirsi che quando aumenta la richiesta in duttilità per l'elemento, aumentano di conseguenza i cicli di carico cui la cerniera plastica sarà sottoposta e di conseguenza la prestazione a taglio va mantenuta per sviluppare tutta la duttilità richiesta.

Nel proseguo sarà quindi dettagliato il calcolo per elementi non armati a taglio: il meccanismo cosiddetto ad 'arco o a pettine' è il primario meccanismo resistente a taglio fino alla formazione

delle prime fessurazioni nel calcestruzzo. Successivamente alla formazione delle lesioni, se la sezione presenta armature trasversali, si instaura il meccanismo a traliccio di Morsch. L'azione ciclica ripetuta comporta una progressiva perdita di resistenza della sezione.

7.3.1 VALUTAZIONE RESISTENZA A TAGLIO PER ELEMENTI IN CA SENZA ARMATURA TRASVERSALE

Secondo le NTC 2008 al punto 4.1.2.1.3.1 (e analogamente riportato al punto 4.1.2.3.5.1 delle NTC2018), la resistenza a taglio di un elemento in assenza di armatura trasversale è calcolata secondo lo schema resistente "ad arco o a pettine".

Il modello a pettine nasce dall'osservazione che una trave fessurata può vedersi costituita da un corrente compresso, corrispondente alla costola di un pettine, e dagli elementi compresi tra le lesioni, corrispondenti ai denti del pettine, inclinati a 45° rispetto alla costola.

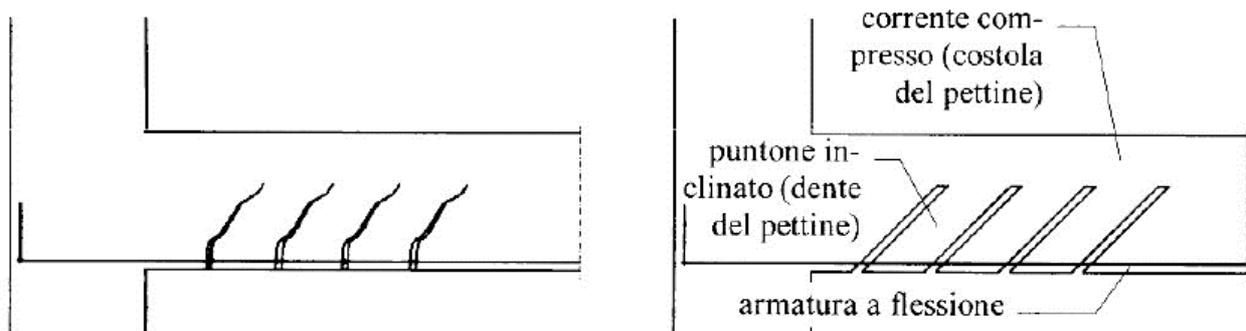


Figura 36 – Modello a pettine

La resistenza a taglio è data da 3 contributi:

- Ingranamento degli inerti (V_a)
- Effetto spinotto (V_d)
- Effetto dovuto allo sforzo assiale (V_c)

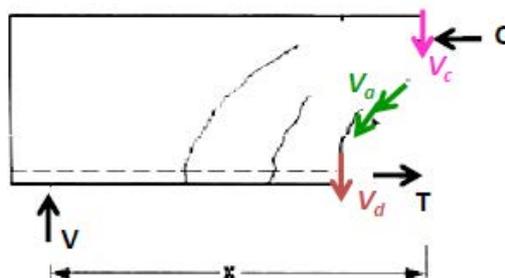
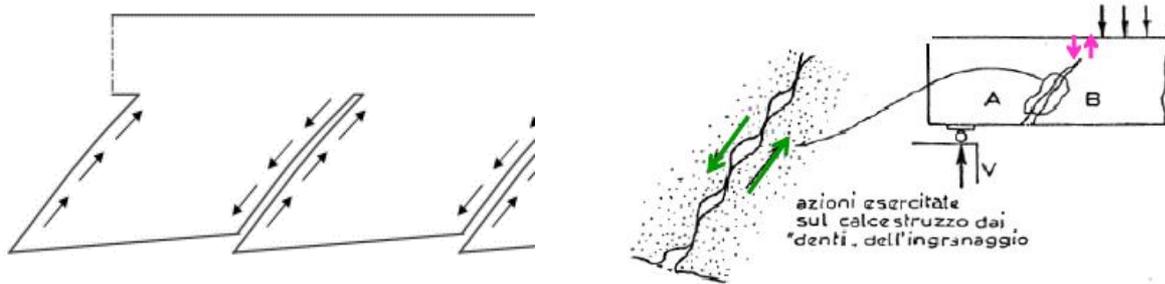
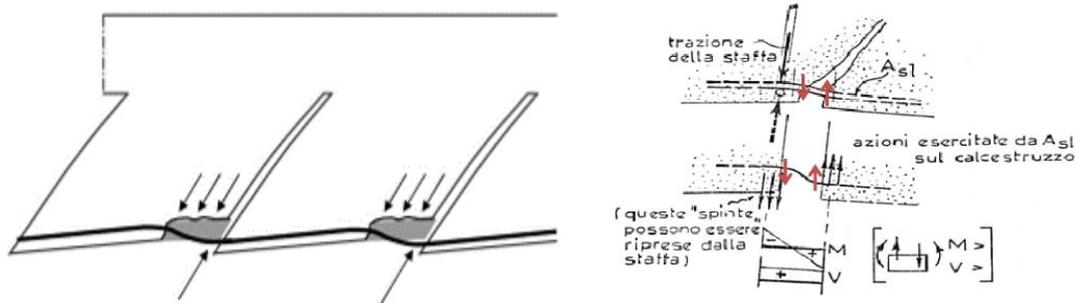


Figura 37 – Resistenza a taglio in assenza di armatura trasversale


Figura 38 – Il contributo 'adesivo'

Figura 39 – Il contributo 'spinotto'

La resistenza a taglio è fornita dalla seguente espressione:

$$V_{Rd} = \max \left[\left(\frac{0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot d; (v_{min} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right]$$

In cui sono presenti i 3 termini elencati precedentemente $V_{Rd} = V_c + V_{ay} + V_d$

Dove:

- $k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$ effetto ingranamento degli inerti
- $(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}$ effetto spinotto delle armature longitudinali e rifollamento copriferro
- $\rho_l = \frac{A_l}{b_w \cdot d} \leq 0,02$ è il rapporto geometrico di armatura longitudinale,
- b_w la larghezza minima e d l'altezza utile della sezione

- A_i è l'area delle armature tese. Nelle NTC2018 viene meglio esplicitato che l'armatura da considerare è quella ancorata e orientativamente quella che si estende per una lunghezza almeno pari a $(l_{db}+d)$
- $0,15 \cdot \sigma_{cp} \cdot b_w \cdot d$ effetto dello sforzo assiale
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0,2 \cdot f_{cd}$ tensione media di compressione sulla sezione intera di calcestruzzo
- $v_{min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ resistenza a taglio minima in assenza di effetto spinotto

Nelle NTC2018 al paragrafo 4.1.11 viene inoltre dettagliata la formulazione per elementi in calcestruzzo a bassa percentuale di armatura o non armato.

7.3.2 VALUTAZIONE RESISTENZA A TAGLIO PER ELEMENTI IN CA CON ARMATURA TRASVERSALE

Per la valutazione della resistenza a taglio degli elementi armati in fabbricati esistenti la norma impone la verifica anche per azioni cicliche. La resistenza a taglio della sezione quindi si modifica rispetto a quanto prima riportato nelle NTC2008. Il valore resistente dipende dalla domanda in duttilità e funzione di essa può assumere diversi valori.

Le formulazioni di riferimento rimangono:

- La resistenza a taglio nel funzionamento a traliccio di Mörsch - V_{tral}
- La resistenza a taglio per decadimento sotto azioni cicliche - V_{cicl}

Sarà quindi di seguito dettagliato il calcolo dei due meccanismi per definire infine la resistenza a taglio sulla base della richiesta in duttilità.

7.3.2.1 FORMULAZIONE PER CALCOLO DELLA RESISTENZA A TAGLIO - TRALICCIO AD INCLINAZIONE VARIABILE

Nel caso in cui siano presenti armature di parete (staffe e/o piegati) ai tre contributi precedenti si somma la sollecitazione applicata ai bracci delle staffe che attraversano le fessure:

$$V_{Rd} = V_c + V_{ay} + V_d + V_s$$

L'armatura nel modello a pettine richiede dunque le azioni migliorando il comportamento di tutte le componenti di resistenza del calcestruzzo:

- Aumenta l'ingranamento degli inerti
- Confina il calcestruzzo nella zona compressa aumentandone di resistenza
- Contribuisce ad evitare l'espulsione del copriferro e dunque aumenta l'efficienza dell'effetto spinotto

Il dente del modello a "pettine" funziona da puntone diagonale del modello a "traliccio" in cui si può schematizzare il comportamento.

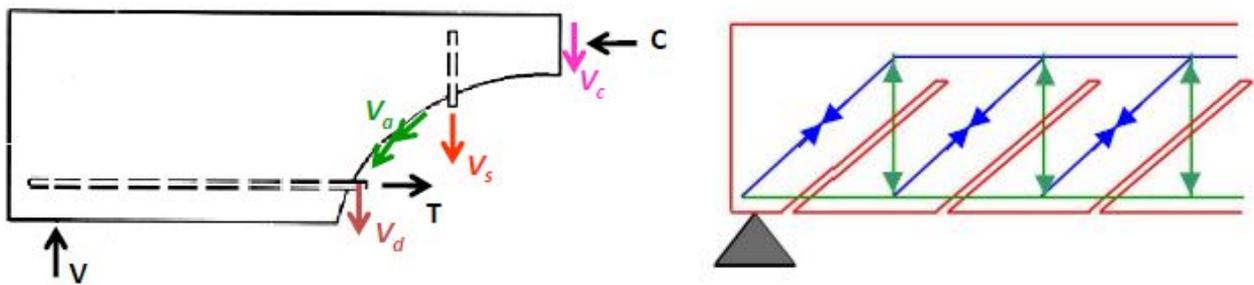


Figura 40 – Modello a traliccio

Il modello a traliccio utilizzato nelle NTC2008 e 2018 è quello ad inclinazione variabile per il quale il collasso può avvenire per:

- **Taglio-Compressione:** quando il puntone compresso collassa prima di raggiungere la resistenza a snervamento delle staffe. In questo caso il puntone (dente del pettine) che è incastrato al corrente compresso, risulta essere sollecitato da sola compressione pertanto il puntone collassa per schiacciamento (V_{Rcd});
- **Taglio-Trazione:** quando le staffe raggiungono lo snervamento permettono deformazioni e spostamenti notevoli ed il puntone di cls risulta essere sollecitato da presso-flessione. Il valore della resistenza a taglio-trazione non è pertanto una resistenza a rottura ma è la resistenza che porta a snervamento l'acciaio. Il collasso avviene comunque nel puntone ma è dovuto alle deformazioni consentite dallo snervamento dell'acciaio (V_{Rsd}).

Il metodo di inclinazione variabile del traliccio consiste nell'analizzare un modello di traliccio isostatico generalizzazione di quello di Morsch, nel quale si considera una inclinazione generica θ del puntone compresso ed una inclinazione α (compresa tra 45° e 90°) dell'armatura a taglio.

In questo metodo nella resistenza del puntone compresso viene inglobata la resistenza per "ingranamento" la quale producendo una azione tangenziale sulla prima fessura a 45° non fa altro che inclinare l'azione risultante del puntone di un angolo minore di 45° .

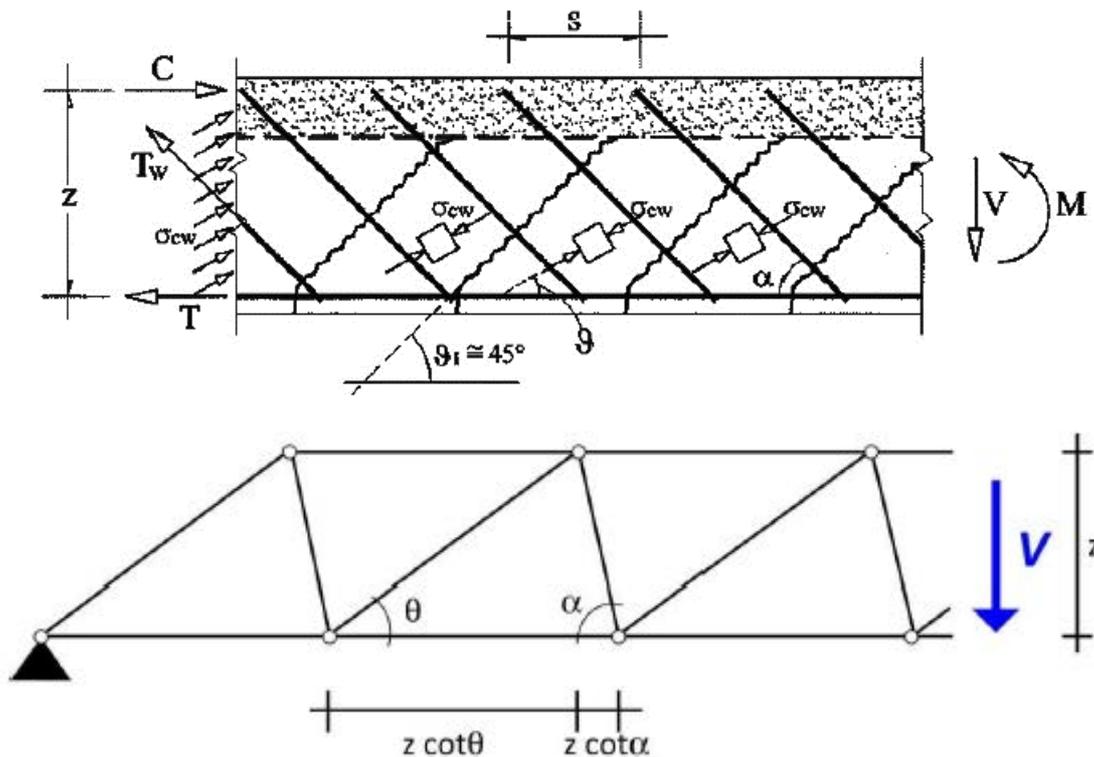


Figura 41 – Il traliccio di Morsch

Le formulazioni fornite dalle NTC (al 4.1.2.1.3.2 per le NTC2008 e al 4.12.3.5.2 per le NTC2018) sono dunque le seguenti:

TAGLIO COMPRESIONE

Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di calcolo a taglio-compressione si calcola con:

$$V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{(ctg\alpha + ctg\theta)}{1 + ctg\theta^2}$$

TAGLIO TRAZIONE

Con riferimento all'armatura trasversale la resistenza di calcolo a taglio-trazione si calcola con:

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) \cdot sen\alpha$$

Dove:

d è l'altezza utile della sezione;

b_w è la larghezza della sezione resistente a taglio;

A_{sw} , è l'area totale dell'armatura trasversale;

s è l'interasse tra due armature trasversali consecutive;

α è l'angolo di inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave.

Si rammenta che qualora siano presenti dei ferri piegati (o staffe a spirale) il loro contributo può essere assunto solo per la quota parte di azione relativa ai carichi gravitazionali e non a quella sismica data la possibilità di inversione dell'azione. Di seguito pertanto la semplificazione con $\alpha=90^\circ$

θ è l'angolo di inclinazione della biella compressa rispetto all'asse della trave (inclinazione variabile: $1 \leq ctg\theta \leq 2.5$)

f_{ywd} tensione di calcolo dell'acciaio delle staffe esistenti

f'_{cd} , è la resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima (= $0,50 f_{cd}$)

α_c è il coefficiente maggiorativo dovuto alla compressione che è pari a:

$$\begin{aligned} 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} & \quad 0 \leq \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd} \\ 1,25 & \quad 0,25 \leq \sigma_{cp} \leq 0,50 \cdot f_{cd} \\ 2,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) & \quad 0,50 \leq \sigma_{cp} \leq f_{cd} \end{aligned}$$

La resistenza a taglio del sistema è il minore tra le due precedenti

$$V_{Rd} = \min(V_{Rcd}, V_{Rsd})$$

Il valore precedente può essere ottenuto fissando un valore di θ , oppure con il cosiddetto metodo a 'cotangente variabile'.

Al variare di θ cambiano in maniera inversa V_{Rcd} e V_{Rsd} . Al diminuire di θ aumenta V_{Rsd} e diminuisce V_{Rcd} .

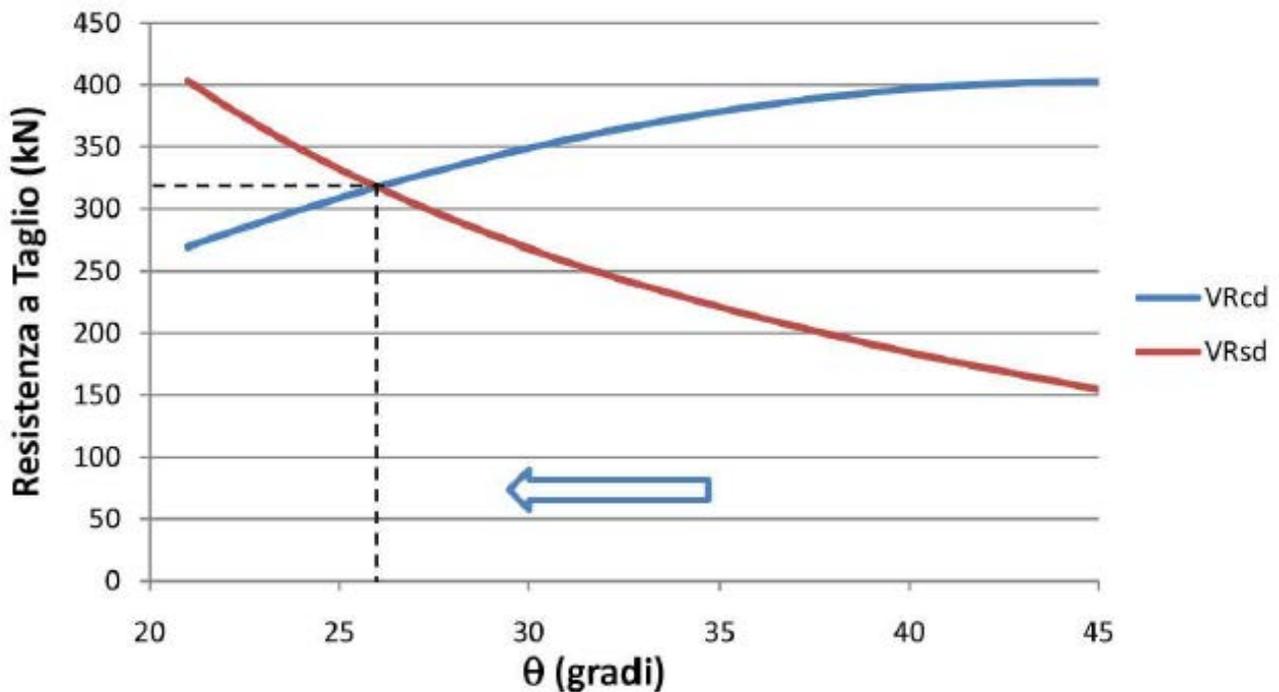


Figura 42 – Andamento della resistenza a taglio in funzione di θ

La resistenza ultima si attinge per quel valore di θ che rende uguali la resistenza a taglio trazione V_{Rsd} con quella a taglio compressione V_{Rcd} .

Il valore di $ctg\theta$, è possibile ottenerlo uguagliando la formule della resistenza a **“taglio-trazione”** con quella a **“taglio-compressione”**, che nel caso di sole staffe porta all’uguaglianza:

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{2 \cdot A_s}{s} \cdot f_{yd} \cdot ctg\theta = V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{ctg\theta}{1 + ctg\theta^2}$$

Ottenendo:

$$ctg\theta_o = \sqrt{\frac{b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd}}{2 \cdot A_s \cdot f_{yd}} - 1}$$

Naturalmente il valore ottenuto con la formulazione precedente per $ctg\theta$ può dare risultati inammissibili e dunque si avrà:

$$ctg\theta = \begin{cases} se & ctg\theta_o < 1 \Rightarrow & ctg\theta = 1 \\ se & ctg\theta > 2.5 \Rightarrow & ctg\theta = 2.5 \\ se & 1 \leq ctg\theta_o \leq 2.5 \Rightarrow & ctg\theta = ctg\theta_o \end{cases}$$

Va in oltre aggiunto un ulteriore controllo ovvero che la resistenza appena calcolata non sia inferiore a quella ottenuta mediante il semplice meccanismo a pettine di trave non armata a taglio. Spesso in effetti per elementi poco armati a taglio è possibile ottenere una resistenza inferiore al considerare la trave affatto armata a taglio.

Tale incongruenza si risolve ponendo:

$$V_{Rd} = \max(V_{Rcd0}, \min(V_{Rcd}, V_{Rsd}))$$

La resistenza così valutata verrà di seguito ripresa come resistenza nel funzionamento a traliccio $V_{r, \text{tral}}$; questa formulazione può essere adottata solo per le verifiche statiche o per quegli elementi per cui la richiesta in duttilità è estremamente bassa come indicato nelle NTC2018. La resistenza a taglio dell'elemento armato viene quindi corretta considerando il degrado ciclico di resistenza per effetto delle azioni dinamiche, in funzione della richiesta in duttilità.

7.3.2.2 FORMULAZIONE PER CALCOLO DELLA RESISTENZA A TAGLIO – CONDIZIONI CICLICHE

I tre contributi, ingranamento, armatura longitudinale (spinotto) e armatura trasversale si leggono chiaramente nella formulazione riportata al punto C8.7.2.3.5 in cui si tiene in considerazione il degrado in termini di resistenza per effetto delle azioni cicliche.

Diversamente da quanto si può pensare, tale formulazione è sì riportata nel capitolo inerente le verifiche dei fabbricati esistenti, tuttavia tale modalità di rottura prematura risulta indicata anche al punto C7.4.4 per le strutture di nuova realizzazione, progettate secondo criteri sismici.

La resistenza a taglio per azioni cicliche è valutata ancora come somma di tre contributi: l'ingranamento, l'effetto spinotto delle armature longitudinali, la presenza di armature trasversali.

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0.55A_c f_c) + (1 - 0.05 \min(5; \mu_{\Delta, pl})) \left[0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right]$$

Si sottolinea che tale formulazione va impiegata con le unità di misura impiegando MN e m.

Dove:

$\gamma_{el}=1.15$ per gli elementi primari ed 1.0 per gli elementi secondari (come definiti al punto 7.2.3) è l'altezza utile della sezione;

- h è l'altezza totale della sezione;
- x è l'altezza della zona compressa della sezione (profondità dell'asse neutro) che in assenza di specifiche valutazioni può stimarsi con la relazione
- $$x/h = 0,25 + 0,85N/(A_c \cdot f_c) \leq 1 ;$$
- N è lo sforzo normale di compressione (pari a 0 se di trazione);
- L_v è la luce di taglio;
- A_c è l'area della sezione pari a $(b \cdot d)$ per sezioni rettangolari e $\pi D_c^2/4$ per quelle circolari, dove $D_c = D - 2c - d_{bw}$ in cui D è il diametro della sezione, c il copriferro e d_{bw} il diametro delle staffe);
- f_c è la resistenza a compressione del calcestruzzo ottenuta come media delle prove eseguite in sito, eventualmente corretta sulla base di fonti aggiuntive, divisa per il fattore di confidenza appropriato in relazione al Livello di Conoscenza raggiunto; per gli elementi sismici primari il valore di f_c deve essere ulteriormente diviso per il relativo coefficiente parziale;
- $\mu_{\Delta,pl}$ rappresenta la parte plastica della domanda di duttilità ed è espressa dalla relazione $\mu_{\Delta,pl} = \mu_{\Delta} - 1$, dove μ_{Δ} è la domanda di duttilità espressa come rapporto tra la rotazione massima θ_m per il livello di azione sismica considerato e la rotazione di prima plasticizzazione θ_y .
- ρ_{tot} è la percentuale geometrica totale di armatura longitudinale;
- V_w è il contributo dell'armatura trasversale per la resistenza a taglio definito come segue
- sezioni rettangolari $V_w = \rho_{sx} b_w z f_y$, con z braccio delle forze interne
 - sezioni circolari $V_w = \frac{\pi A_{sx}}{2s} f_{yw} (D - 2c)$

Si specifica che nella formula il membro $'1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta,pl})'$ è stato corretto seguendo quanto descritto nel riportato nelle EC8 parte 3 al punto A3.3.1, correttamente limitando a 5 il valore di $\mu_{\Delta,pl}$.

Tale valore non può essere comunque maggiore della resistenza a taglio compressione in condizioni statiche: $V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{(ctg\alpha + ctg\theta)}{1 + ctg\theta^2}$ assumendo $\theta = 45^\circ$ e $f_{cd} = \frac{f_{cm}}{FC \gamma_m}$.

7.3.2.3 CALCOLO DELLA RESISTENZA A TAGLIO

Il calcolo della resistenza a taglio dipende dalla richiesta in duttilità μ_{Δ} calcolata.

Di seguito verrà indicato con $V_{r, \text{tral}}$ il valore resistente calcolato come descritto al paragrafo §6.3.2.1, V_{na} il valore resistente per le sezioni non armate a taglio come indicato nel §6.3.1 e con $V_{r, \text{cicl}}$ il valore resistente calcolato come descritto al paragrafo §6.3.2.2.

Si distinguono i seguenti casi:

COMBINAZIONI STATICHE O IN GENERALE COMBINAZIONI IN CUI $\mu_{\Delta} < 1$

$$V_r = \max(V_{na}; V_{r, \text{tral}}; V_{r, \text{cicl}})^*$$

COMBINAZIONI IN CUI $1 < \mu_{\Delta} < 2$

$$V_r = \max(V_{r, \text{tral}}; V_{r, \text{cicl}})$$

COMBINAZIONI IN CUI $\mu_{\Delta} > 3$

$$V_r = V_{r, \text{cicl}}$$

COMBINAZIONI IN CUI $2 \leq \mu_{\Delta} \leq 3$

$V_r =$ interpolazione lineare tra $V_r (\mu_{\Delta} = 2)$ e $V_r (\mu_{\Delta} = 3)$

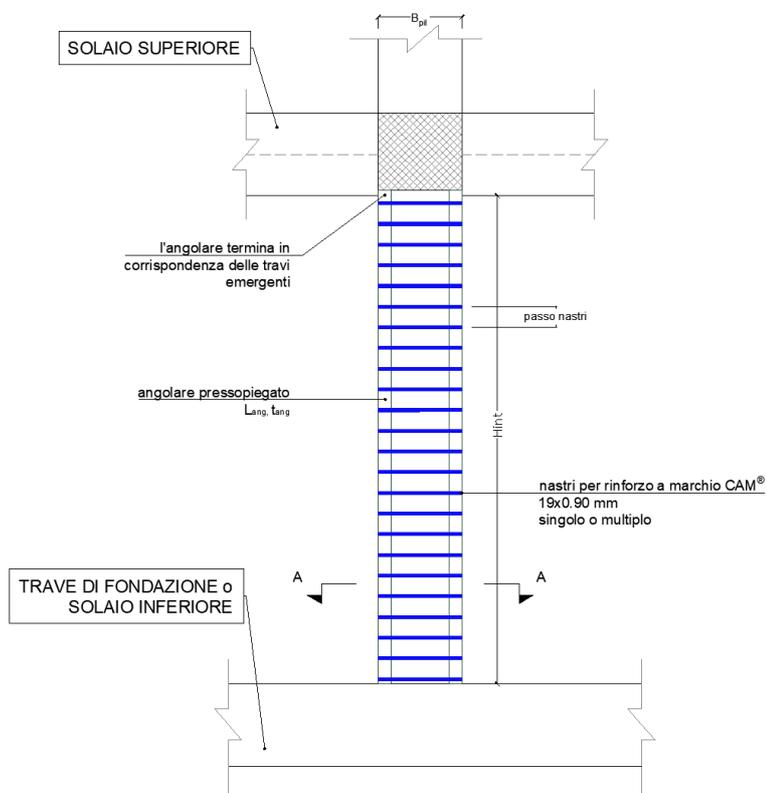
Nel caso in cui risulti $*V_r = V_{na}$ va verificato che per l'azione considerata la domanda a flessione o pressoflessione non superi la corrispondente capacità al limite elastico.

Si specifica che quindi la logica seguita è quella descritta a principio ovvero in cui il primario meccanismo resistente (per i carichi gravitazionali o nel caso in cui non si superi il meccanismo di prima fessurazione) sia quello ad arco resistente. Al crescere della richiesta in duttilità si ha un decadimento della resistenza a taglio per effetto di azioni cicliche.

7.3.3 VALUTAZIONE RESISTENZA A TAGLIO PER ELEMENTI RINFORZATI MEDIANTE IL SISTEMA CAM[®]

L'intervento di rinforzo a taglio avviene fasciando l'elemento con i ricorsi realizzati anche da più nastri in sovrapposizione e disposti ad un passo $p_{n, \text{CAM}}$. Il contributo resistente della staffatura aggiuntiva così realizzata si somma a quello delle armature trasversali esistenti. Il passo delle legature e il numero dei nastri sovrapposti vengono dimensionati per raggiungere il valore di taglio resistente di progetto.

Nelle figure di seguito un esempio della disposizione del rinforzo su pilastri e travi.



SEZIONE A-A



FASI OPERATIVE:

1. demolizione dei tramezzi in adiacenza al pilastro da trattare per circa 5cm
2. rimozione dell'intonaco
3. allettamento degli angolari con malta tipo Master EMACO S950 (circa 0.5 cm)
4. posa degli angolari in corrispondenza degli spigoli del pilastro e disposizione di alcune legature per tenere in posizione l'elemento fino alla completa maturazione della malta
5. taglio del nastro a misura (perimetro + lunghezza di sfrido)
6. inserimento del sigillo
7. disposizione del nastro in posizione (passo previsto a progetto)
8. posizionamento della macchina crimpatrice, tesatura del nastro e sigillatura
9. ripetizione dell'operazione 7 e 8 fino al completamento dell'opera prevista a progetto
10. sbruffatura della superficie trattata con Sistema a marchio CAM® mediante spruzzo di malta tipo Master EMACO S950
11. ripristino della parte demolita di tramezzo
12. ripristino dell'intonaco

Figura 43 – Tipologico di rinforzo a taglio (e confinamento) del pilastro

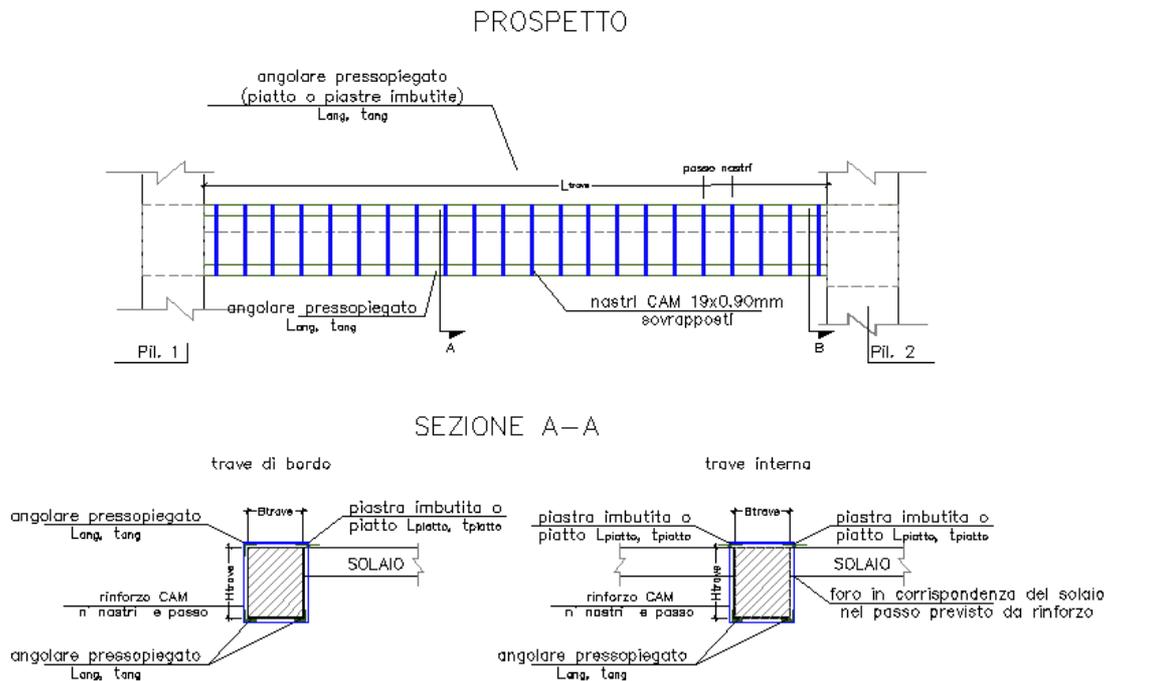


Figura 44 – Tipologico di rinforzo a taglio sulla trave – i nastri attraversano il solaio

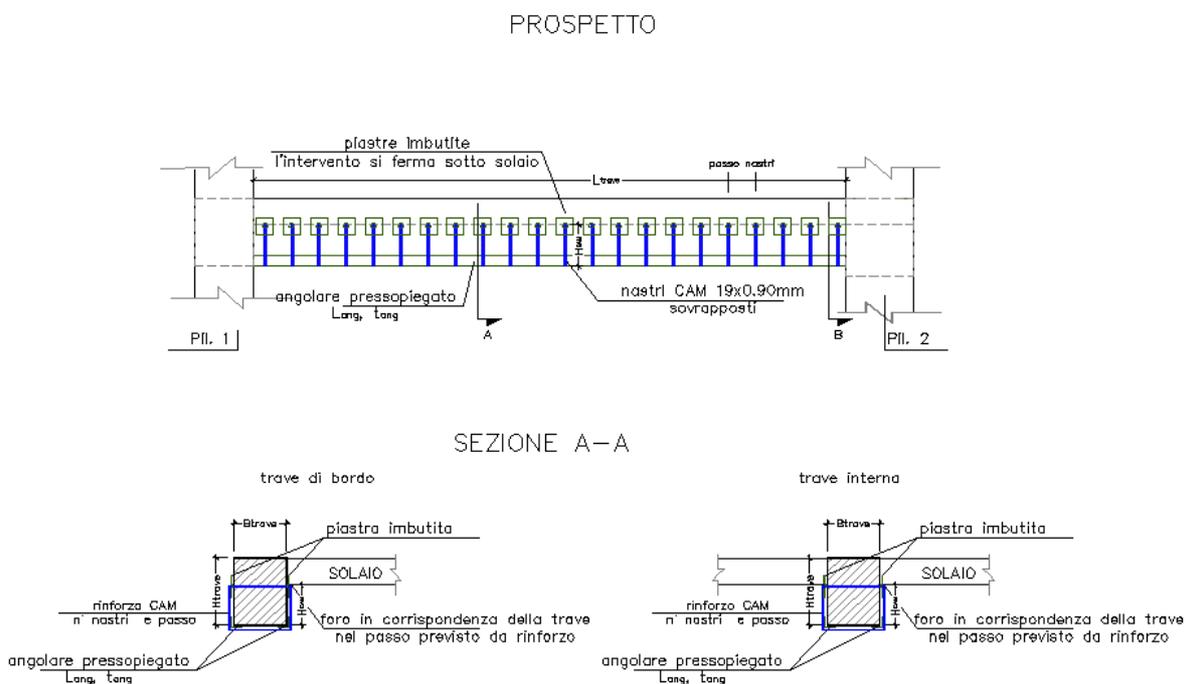


Figura 45 – Tipologico di rinforzo a taglio sull'altezza parziale di trave – i nastri non attraversano il solaio

Per valutare l'incremento di resistenza a taglio offerto dall'intervento di rinforzo mediante il Sistema CAM®, si considerano le formulazioni riportate in normativa per l'incamiciatura in acciaio (rispettivamente punto C8A.7.2.1 delle NTC2008 e punto C8.7.4.2.2 delle NTC2018):

“Il contributo della camicia alla resistenza a taglio può essere considerato aggiuntivo alla resistenza preesistente purché la camicia rimanga interamente in campo elastico. Tale condizione è necessaria affinché essa limiti l'ampiezza delle fessure e assicuri l'integrità del conglomerato, consentendo il funzionamento del meccanismo resistente dell'elemento preesistente.

Se la tensione nella camicia è limitata al 50% del valore di snervamento l'espressione della resistenza a taglio aggiuntiva offerta dalla camicia vale:....”

Si valuta quindi l'effetto dell'incamiciatura analogamente a quanto riportato per il calcolo del contributo delle staffe in una sezione armata in C.A. ma applicando il fattore riduttivo alla resistenza dei nastri CAM®:

$$V_{Rsd,CAM} = 0.5 \cdot \frac{2 \cdot t_j}{s} \cdot b \cdot f_{yw} \cdot 0.9 \cdot d \cdot ctg\theta = 0.5 \cdot \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{p_{n,CAM}} \cdot f_{yw,CAM} \cdot 0.9 \cdot d \cdot ctg\theta$$

dove

$d = d_{CAM}$	altezza (utile) di trattamento CAM®
$n_{br,CAM}$	numero di 'braccia' resistenti del trattamento CAM®
$t_j = t_{nt}$	è lo spessore totale del rinforzo CAM®, quindi pari al numero di nastri CAM® in sovrapposizione per lo spessore del singolo nastro ($t_{1nastro} = 0.90$ mm)
$b = b_n$	è la larghezza del nastro CAM® pari a 19mm
$s = p_{n,CAM}$	passo delle legature CAM®
$f_{yw} = f_{yw,CAM}$	pari a 560 N/mm ² tensione di calcolo dell'acciaio dei nastri CAM®
θ	inclinazione delle fessure per taglio
$\alpha = 90^\circ$	staffatura CAM® ortogonale all'asse longitudinale dell'elemento (nei casi in cui la geometria della sezione sia variabile e quindi il nastro non possa passare ortogonalmente è necessario forare a livello intermedio la sezione per evitare lo scivolamento del nastro)

Nella formulazione, la riduzione del 50% circa la tensione di lavoro della 'camicia' è legata alla apertura delle fessure.

All'atto dell'apertura della fessura la staffa, annegata nel getto di calcestruzzo, e il rinforzo esterno a fasciare l'intera sezione, lavorano su due lunghezze deformabili differenti.

La staffa preesistente subirà una deformazione pari al rapporto tra la dimensione dell'apertura della fessura e la lunghezza deformabile legata alla lunghezza di aderenza. Il cerchiaggio esterno su una lunghezza maggiore. Pertanto per garantire la congruenza delle deformazioni (affinché il rinforzo lavori in parallelo rispetto alla staffa preesistente e possa quindi valere la formula additiva) in maniera fittizia la norma impone una riduzione alla tensione di lavoro della camicia.

Nel caso di cerchiaggi 'attivi' con il Sistema CAM[®] la limitazione dell'ampiezza delle fessure e l'integrità del conglomerato sono sicuramente più controllate rispetto ai cerchiaggi passivi cui si riferisce la normativa poiché il pretensionamento applicato permette di rendere già tesa la nastratura che, per esplicitare la sua massima resistenza, necessiterà di una deformazione della sezione (e dunque di una apertura della fessura) minore di quella necessaria per sistemi passivi; in favore di sicurezza si mantiene comunque nella formulazione tale parametro limitativo.

A parità di prestazione a taglio del rinforzo è preferibile disporre nastri ad interasse minore e in minor sovrapposizione affinché si ottenga il massimo incremento per confinamento della sezione (ad esempio nei pilastri disporre 3 nastri sovrapposti a passo 15 cm equivale, per incremento resistente a taglio a disporre 2 a passo 10 cm o 1 nastro a passo 5 cm. Delle tre configurazioni quella che porta la massima prestazione per confinamento è la terza).

Per le travi invece è preferibile non impiegare un passo $p_{n,CAM}$ inferiore a 15-20cm onde evitare di indebolire eccessivamente la sezione di attacco del solaio. In tal caso si dispongono per ciascuna legatura più nastri in sovrapposizione fino al raggiungimento del target richiesto di rinforzo.

Il rinforzo sulle travi deve essere di norma eseguito abbracciando l'intera sezione di trave (i nastri attraversano il solaio – Fig.43) ovvero, qualora per impedimenti architettonici questo non sia possibile, può essere eseguita confinandone solo la parte estradossata (viene praticato un foro sulla trave – Fig. 44).

Il valore d_{CAM} sarà quindi:

- per nastri che attraversano il solaio pari all'altezza utile della sezione $d_{CAM} = d$
- per nastri che si fermano sotto il solaio pari all'altezza di trattamento $d_{CAM} = H_{CAM} - c$

Il rinforzo delle travi a spessore di solaio deve essere realizzato necessariamente in avvolgimento completo. Può esservi la necessità, come spesso accade per questi elementi, di realizzare una staffatura a più braccia, come da figura di seguito.

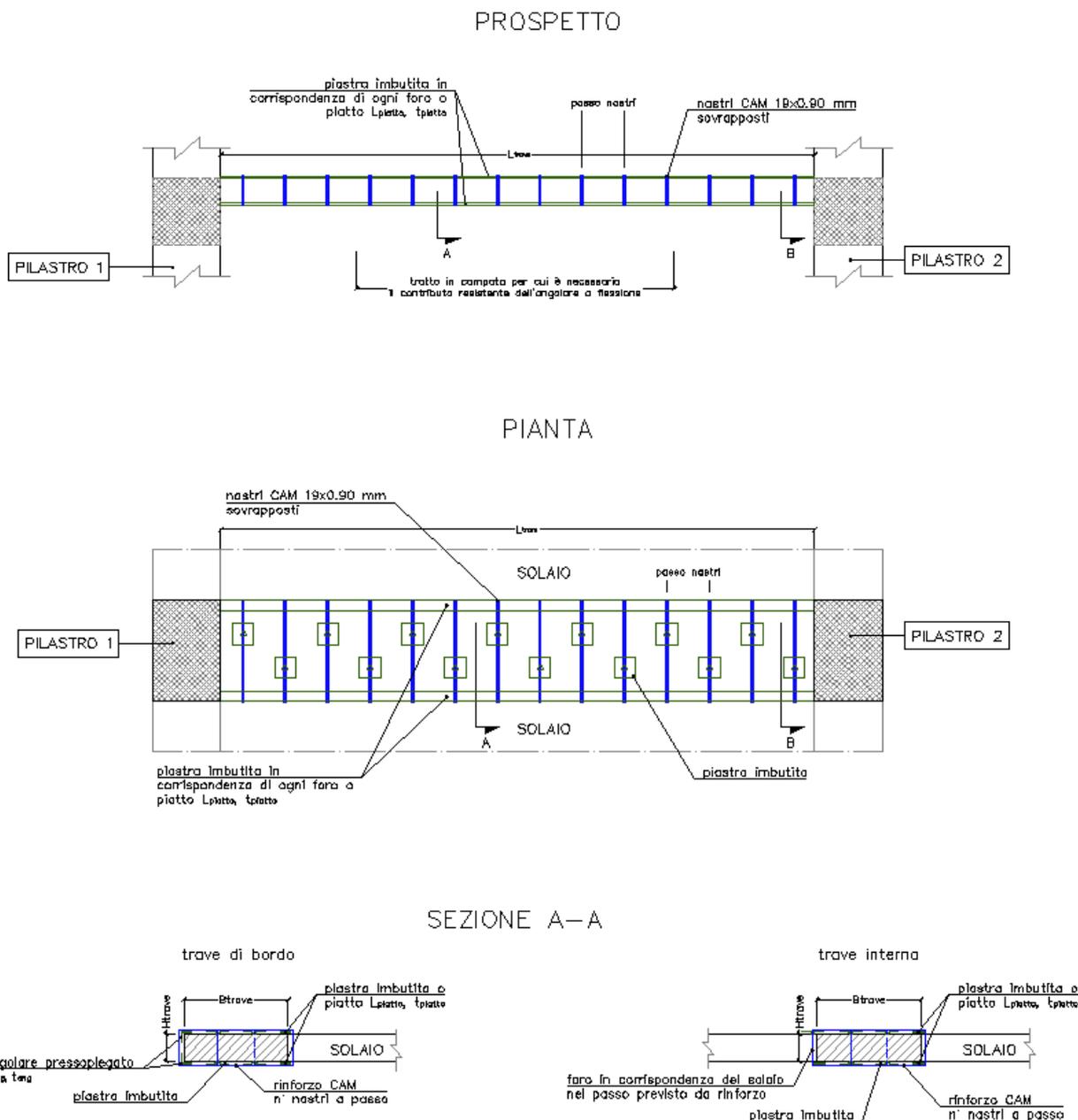


Figura 46 – Tipologico di rinforzo a taglio su trave a spessore di solaio con staffatura a più braccia

In maniera analoga, nei pilastri a sezione rettangolare molto allungata si possono realizzare fori intermedi sul lato lungo dell'elemento.

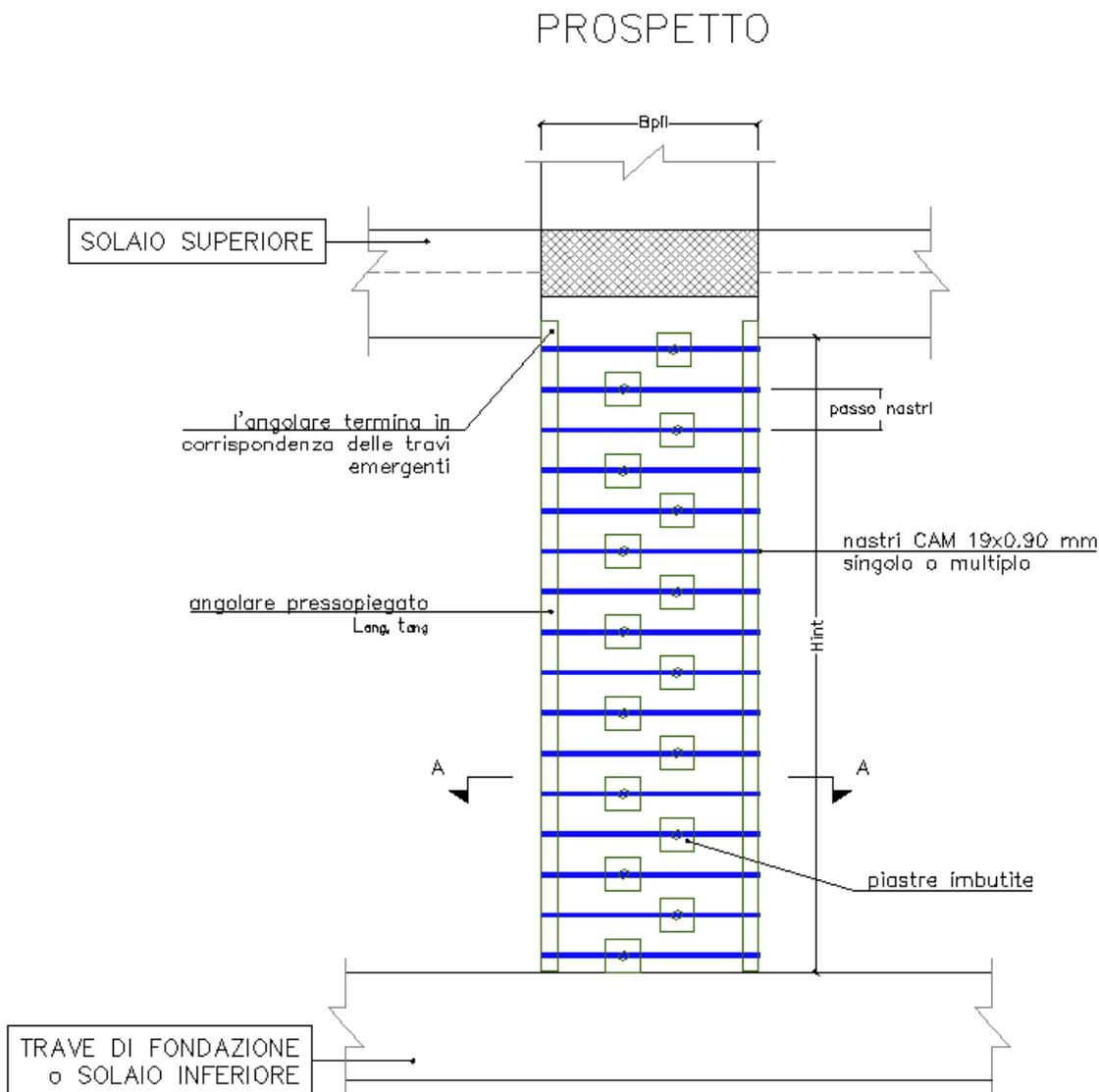


Figura 47 – Tipologico di rinforzo del pilastro con sezione allungata

In accordo a quanto la logica impone nella progettazione del passo delle staffe, sia per elementi trave che per elementi pilastro il passo massimo delle legature non deve eccedere la dimensione dell'elemento da trattare così da permettere la formazione del meccanismo a traliccio. Tale limitazione va tenuta a mente in particolare per il rinforzo delle travi a spessore.

Per ciascuna direzione dell'elemento, il contributo dei nastri CAM[®] si va a sommare a quello delle staffe preesistenti.

Come già descritto per la verifica degli elementi non rinforzati con Sistema CAM[®], anche nel caso di elemento rinforzato si procede attraverso il calcolo della resistenza secondo i differenti meccanismi di collasso. Il valore resistente dipende dalla domanda in duttilità e funzione di essa può assumere diversi valori.

Le formulazioni di riferimento rimangono:

- La resistenza a taglio nel funzionamento a traliccio di Mörsch - $V_{\text{tral,CAM}}$
- La resistenza a taglio per decadimento sotto azioni cicliche - $V_{\text{cicl,CAM}}$

Sarà quindi di seguito dettagliato il calcolo dei due meccanismi per definire infine la resistenza a taglio sulla base della richiesta in duttilità.

7.3.3.1 FORMULAZIONE PER CALCOLO DELLA RESISTENZA A TAGLIO - TRALICCIO AD INCLINAZIONE VARIABILE

Per ciascuna direzione dell'elemento, il contributo dei nastri CAM[®] si va a sommare a quello delle staffe preesistenti:

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta + 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_{CAM} \cdot \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{p_{n,CAM}} \cdot f_{yw,CAM} \cdot ctg\theta$$

Analogamente a quanto si calcola usualmente per la sezione armata con sole staffe la Normativa impone che:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rcd}, V_{Rsd})$$

Anche in presenza di nastri CAM[®] la resistenza ultima si può calcolare per quel valore di θ che rende uguali la resistenza a taglio trazione V_{Rsd} con quella a taglio compressione V_{Rcd} .

Analogamente a quanto già descritto il valore di $ctg\theta$ è possibile ottenerlo uguagliando le formule della resistenza a **"taglio-trazione"** con quella a **"taglio-compressione"**:

$$V_{Rsd} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{2 \cdot A_s}{s} \cdot f_{yd} \cdot ctg\theta + 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_{CAM} \cdot \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{p_{n,CAM}} \cdot f_{yw,CAM} \cdot ctg\theta =$$

$$= V_{Rcd} = 0.9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot \frac{ctg\theta}{1+ctg\theta^2}$$

Ottenendo:

$$ctg\theta_o = \sqrt{\frac{b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd}}{d_{CAM} \cdot n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n \cdot f_{yw,CAM} + \frac{2 \cdot A_s \cdot f_{yd}}{s}} - 1}$$

Naturalmente il valore ottenuto con la formulazione precedente per $ctg\theta$ può dare risultati inammissibili e dunque si avrà:

$$ctg\theta = \begin{cases} se & ctg\theta_o < 1 \Rightarrow & ctg\theta = 1 \\ se & ctg\theta_o > 2.5 \Rightarrow & ctg\theta = 2.5 \\ se & 1 \leq ctg\theta_o \leq 2.5 \Rightarrow & ctg\theta = ctg\theta_o \end{cases}$$

In funzione della staffatura presente nell'elemento da rinforzare è utile verificare quanto sia possibile rinforzare l'elemento stesso.

7.3.3.2 FORMULAZIONE PER CALCOLO DELLA RESISTENZA A TAGLIO - CONDIZIONI CICLICHE

Nella formulazione di seguito

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0.55A_c f_c) + (1 - 0.05 \min(5; \mu_{\Delta,pl})) \left[0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right]$$

Il contributo delle legature CAM[®] si somma alla sola parte di V_w quindi:

$$V_{w,tot} = \rho_{sx} b_w z f_y + 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_{CAM} \cdot \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{p_{n,CAM}} \cdot f_{yw,CAM}$$

In cui:

$$\rho_{sx} = \frac{A_{sw}}{b_w s}$$

percentuale geometrica di armatura a taglio e avendo espresso tale percentuale, riferita al contributo del Sistema CAM[®], come:

$$\rho_{sx,CAM} = \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{b_w \cdot p_{n,CAM}}$$

percentuale geometrica di armatura CAM[®] a taglio

$$z = 0.9d_{CAM}$$

braccio delle forze interne calcolato in via semplificata pari a $0.9d_{CAM}$

Si riporta per completezza la formulazione della resistenza a taglio in condizioni cicliche con l'aggiunta del contributo delle legature a marchio CAM®

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0.55A_c f_c) + (1 - 0.05 \min(5; \mu_{\Delta,pl})) \left[0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) (1 - 0.16 \min(5; \frac{L_v}{h})) \sqrt{f_c} A_c + \rho_{sx} b_w z f_y + 0.5 \cdot 0.9 \cdot d_{CAM} \cdot \frac{n_{br,CAM} \cdot t_{nt} \cdot b_n}{p_{n,CAM}} \cdot f_{yw,CAM} \right] \right]$$

7.3.3.3 CALCOLO DELLA RESISTENZA A TAGLIO

Il calcolo della resistenza a taglio dipende dalla richiesta in duttilità μ_{Δ} calcolata.

Si evidenzia che tale valore può subire variazioni laddove l'intervento previsto sia anche di incremento di armatura longitudinale per l'elemento nella sezione di verifica.

Di seguito verrà indicato con $V_{r,tral,CAM}$ il valore resistente calcolato come descritto al paragrafo §6.3.3.1, V_{na} il valore resistente per le sezioni non armate a taglio come indicato nel §6.3.1 e con $V_{r,cicl,CAM}$ il valore resistente calcolato come descritto al paragrafo §6.3.3.2.

Si distinguono i seguenti casi:

COMBINAZIONI STATICHE O IN GENERALE COMBINAZIONI IN CUI $\mu_{\Delta} < 1$

$$V_r = \max(V_{na}^*; V_{r,tral,CAM}; V_{r,cicl,CAM})$$

COMBINAZIONI IN CUI $1 < \mu_{\Delta} < 2$

$$V_r = \max(V_{r,tral,CAM}; V_{r,cicl,CAM})$$

COMBINAZIONI IN CUI $\mu_{\Delta} > 3$

$$V = V_{r,cicl,CAM}$$

COMBINAZIONI IN CUI $2 \leq \mu_{\Delta} \leq 3$

$$V_r = \text{interpolazione lineare tra } V_r(\mu_{\Delta} = 2) \text{ e } V_r(\mu_{\Delta} = 3)$$

Osservazioni conclusive:

- Nel caso in cui risultati $V_r = V_{na}^*$ va verificato che per l'azione considerata la domanda a flessione o pressoflessione non superi la corrispondente capacità al limite elastico.
- Nel caso in cui il taglio resistente sia limitato dalla resistenza a compressione della biella in calcestruzzo ($V_r = V_{tral} = V_{rcd}$) il Sistema di rinforzo non produce incrementi resistenti a meno di non incrementare il μ_{Δ} . A stato limite ultimo (SLU o SLV) il valore di f'_{cd} non deve tener conto dell'effetto confinamento fornito dai nastri CAM[®], questo perché le legature svolgono il ruolo di armature aggiuntive e non di elementi confinanti in particolare per la biella in calcestruzzo.
- L'armatura aggiuntiva disposta nel caso di rinforzo contemporaneo a flessione e taglio va coerentemente portata in conto nelle formulazioni suddetta del $V_{cicl,CAM}$. Va conteggiata coerentemente il solo quantitativo di armatura longitudinale effettivamente ancorata (e non l'intera geometria dell'angolare disposto).

7.4 RINFORZO A PRESSOFLESSIONE DELLA SEZIONE IN C.A. MEDIANTE SISTEMA CAM[®]

La verifica a pressoflessione degli elementi in CA può essere eseguita sia con analisi lineare che non lineare. Nel caso di verifica non lineare è fondamentale la scelta del diagramma tensione-deformazione. Le tensioni nel calcestruzzo e nell'armatura si dedurranno, a partire dalle deformazioni, utilizzando i rispettivi diagrammi tensione-deformazione.

7.4.1 DIAGRAMMI DI CALCOLO TENSIONE-DEFORMAZIONE

CALCESTRUZZO

Per il diagramma tensione-deformazione del calcestruzzo è possibile adottare opportuni modelli rappresentativi del reale comportamento del materiale, modelli definiti in base alla resistenza di calcolo f_{cd} ed alla deformazione ultima ϵ_{cu}

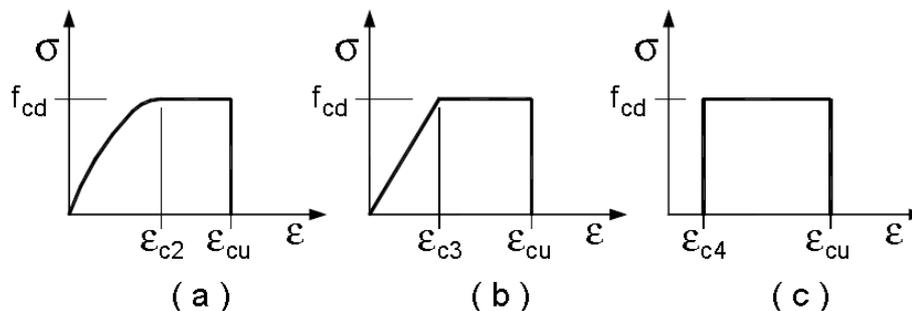


Figura 48 – Modelli σ - ϵ per il calcestruzzo: (a) parabola-rettangolo; (b) triangolo-rettangolo; (c) rettangolo (stress block).

In particolare, per le classi di resistenza pari o inferiore a C50/60 si può porre:

$$\epsilon_{c2}=0,20\% \quad \epsilon_{cu}=0,35\%$$

$$\epsilon_{c3}=0,175\% \quad \epsilon_{c4}=0,07\%$$

Per le classi di resistenza superiore a C50/60 si può porre:

$$\epsilon_{c2}=0,20\% + 0,0085\% (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad \epsilon_{cu}=0,26\% + 3,5\% [(90 - f_{ck})/100]^4$$

$$\epsilon_{c3}=0,175\% + 0,055\% [(f_{ck} - 50)/40] \quad \epsilon_{c4}=0,2 \cdot \epsilon_{cu}$$

CALCESTRUZZO CONFINATO

Nel caso di calcestruzzo confinato si adottano i diagrammi tensioni-deformazioni precedenti la tensione di calcolo può essere posta pari a f_{ccd} riportata al §6.2.1, mentre per la deformazione ultima si assume pari a ε_{ccu} e la deformazione al picco di resistenza pari a ε_{cc2} riportate al § 6.2.2.

ACCIAIO

Per il diagramma tensione-deformazione dell'acciaio è possibile adottare opportuni modelli rappresentativi del reale comportamento del materiale, modelli definiti in base al valore di calcolo $\varepsilon_{ud} = 0,9\varepsilon_{uk}$ ($\varepsilon_{uk} = (A_{gt})_k$) della deformazione uniforme ultima, al valore di calcolo della tensione di snervamento f_{yd} ed al rapporto di sovrarresistenza $k = (f_t / f_y)_k$.

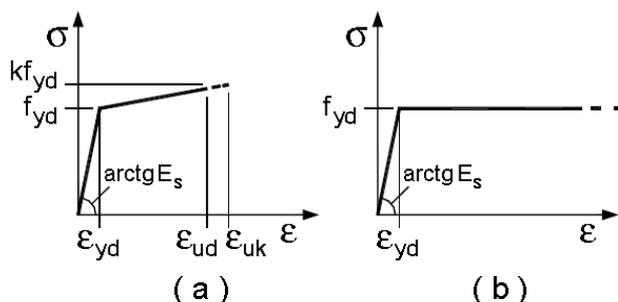


Figura 49 – Modelli costitutivi per l'acciaio: (a) bilineare finito con incrudimento; (b) elastico-perfettamente plastico indefinito.

7.4.2 CRITERI DI VERIFICA A PRESSOFLESSIONE DEVIATA

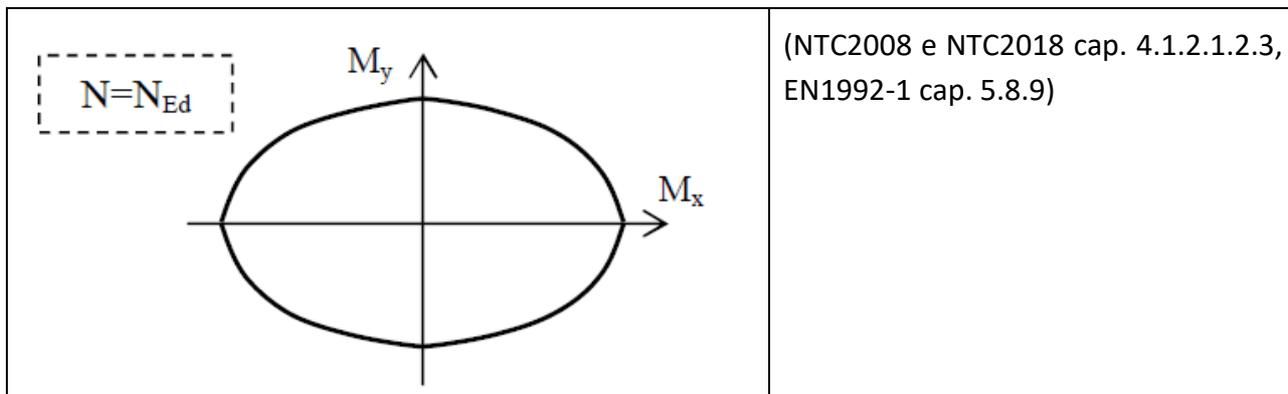
Il calcolo della sezione generica in C.A. a pressoflessione deviata può essere condotto secondo diversi approcci riportati in diverse normative.

Per brevità si citeranno due metodi e se ne analizzeranno pregi e difetti.

Stante la validità di tutti, ciò che varia è l'approssimazione nella forma del dominio resistente.

7.4.2.1 VERIFICA SECONDO NTC2008, NTC2018 E EN1992-1

La formulazione presente sia nelle norme tecniche che negli Eurocodici per la verifica di una sezione a flessione deviata anche in presenza di sforzo assiale è la seguente:



$$\left(\frac{M_{Sd,x}}{M_{Rd,x}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}}\right)^{\alpha} \leq 1$$

In cui:

$M_{Sd,x/y}$

è il momento sollecitante nella direzione x o y

$M_{Rd,x/y}$

è il momento resistente calcolato in regime di pressoflessione semplice nella direzione x o y con applicato lo sforzo normale N_{Sd} .

α

esponente della formula è indicato nelle NTC per il cui valore si rimanda alle EN1992-1 al cap. 5.8.9

N_{Ed} / N_{Rd}	0.1	0.7	1
α	1	1.5	2

Tale formulazione, derivata dalla formulazione di Bresler denominata LC (Load Contour method), è fortemente conservativa sia per sforzi normali applicati mediamente elevati che per sforzi normali piccoli o di trazione.

In questo caso specifico infatti il dominio resistente da ellittico degenera a romboidale rendendo il dominio estremamente limitato soprattutto in ragione delle evidenze sperimentali note in letteratura.

Tale criterio pertanto risulta troppo conservativo ed il suo utilizzo produce, nella pratica progettuale, forti sovradimensionamenti.

Nella bibliografia scientifica sono presenti svariate formulazioni alternative a quelle riportate nelle norme, che possono essere considerate di "comprovata validità".

Tra queste una formulazione molto interessante e che tiene conto in maniera molto più accurata dell'effetto dello sforzo normale applicato è quella di HSU (1998).

7.4.2.2 VERIFICA SECONDO METODO HSU

Tale formulazione calibra il metodo LC aggiungendo un nuovo termine, in modo da tenere direttamente in conto l'importante influenza dello sforzo normale; l'esponente α è posto costantemente pari a 1.5.

La verifica della sezione sottoposta a pressoflessione deviata è soddisfatta se:

$$\frac{(N_{Sd} - N_{b\alpha})}{(N_0 - N_{b\alpha})} + \left(\frac{M_{Sdx}}{M_{bx}}\right)^{1.5} + \left(\frac{M_{Sdy}}{M_{by}}\right)^{1.5} \leq 1$$

In cui:

N_{Sd} , $M_{Sd,x}$, $M_{Sd,y}$

$M_{b,x}$, $M_{b,y}$ ed $N_{b,x}$, $N_{b,y}$

$N_{b,\alpha}$

N_0

costituiscono la terna sollecitante.

sono le resistenze calcolate nel caso di rottura bilanciata (deformazione dell'acciaio al limite elastico e cls alla massima deformazione a compressione)

è lo sforzo normale in corrispondenza della direzione data dall'angolo associato alla risultante di $M_{Sd,x}$ e $M_{Sd,y}$ calcolabile attraverso interpolazione lineare.

$N_{b,\alpha}$ può essere calcolato agevolmente ponendo:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{M_{Sd,y}}{M_{Sd,x}}\right)$$

ed interpolando tra i valori di $N_{b,x}$ e $N_{b,y}$ ovvero:

$$N_{b,\alpha} = \frac{(N_{b,y} - N_{b,x})}{\pi/2} \cdot \alpha$$

assume i seguenti valori:

$$N_0 = \begin{cases} N_{Rd,min} & \text{se } N_{Sd} < N_{b\alpha} \\ 0 & \text{se } N_{Sd} = N_{b\alpha} \\ N_{Rd,max} & \text{se } N_{Sd} > N_{b\alpha} \end{cases}$$

A questo metodo è bene comunque aggiungere due ulteriori limitazioni che porterebbe la verifica a pressoflessione deviata in alcuni casi a sovrastimare la resistenza.

Tali limitazioni corrispondono a confrontare i valori dei singoli momenti sollecitanti nelle due direzioni alle corrispondenti resistenze in regime di pressoflessione semplice.

In conclusione il metodo HSU può essere espresso attraverso le seguenti tre espressioni:

$$\frac{(N_{Sd} - N_{b\alpha})}{(N_0 - N_{b\alpha})} + \left(\frac{M_{Sdx}}{M_{bx}}\right)^{1.5} + \left(\frac{M_{Sdy}}{M_{by}}\right)^{1.5} \leq 1$$
$$M_{Sd,x} < M_{Rd,x}$$
$$M_{Sd,y} < M_{Rd,y}$$

Tale criterio confrontato anche con software molto più evoluti e di uso comune a molti professionisti quale VcaSlu del Prof. Piero Gelfi, fornisce risultati confrontabili in molte condizioni.

Tra i due metodi, quello proposto dalle NTC2008/NTC2018 e quello HSU, è assolutamente preferibile il secondo poiché garantisce una verifica che risulta comunque leggermente sottostimare le reali prestazioni della sezione ma in maniera molto più limitata rispetto a quello delle norme e dunque consente di non sovradimensionare in particolare eventuali interventi di rinforzo.

Tale formulazione è quella implementata nei fogli di calcolo elaborati dalla EdilCAM Sistemi Srl e disponibili sul nostro sito.

7.4.3 VALUTAZIONE DELL'INCREMENTO RESISTENTE PER ELEMENTI RINFORZATI MEDIANTE IL SISTEMA CAM[®]

Il contributo dato dall'incremento in resistenza e duttilità offerto dal confinamento è sempre considerabile ma esso rappresenta una piccola aliquota.

Laddove si voglia considerare l'angolare disposto in corrispondenza degli spigoli come armatura aggiuntiva a flessione esso va disposto continuo e se l'integrazione d'armatura deve considerarsi nella sezione di interruzione dell'angolare (ad esempio nei pilastri in testa e al piede dove l'angolare si interrompe in corrispondenza della trave e dove è massima la sollecitazione flettente) è fondamentale garantire la continuità di armatura.

Generalmente essa si realizza impiegando barre da CA che vengono saldate ai pressopiegati e inghisate all'interno del nucleo di calcestruzzo o in fondazione oppure, se due elementi contigui

sono entrambi trattati con il Sistema CAM[®], la barra collega, attraversando il solaio i due pressopiegati disposti sui pilastri posti a quote differenti.

Se tale particolare costruttivo non viene considerato, nelle sezioni di estremità può essere considerato nel calcolo del momento ultimo unicamente il contributo resistente dato dall'incremento in resistenza e duttilità offerto dal confinamento.

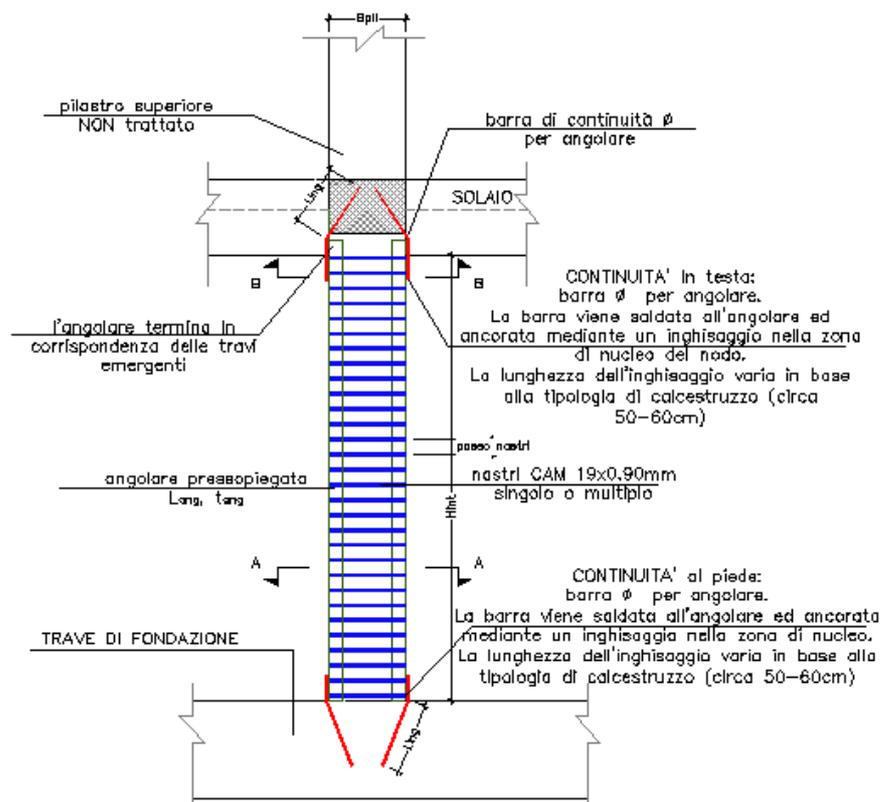
Si sottolinea il contributo dell'angolare come armatura aggiuntiva a flessione può essere unicamente considerato nella zona tesa (**armatura CAM[®] a compressione INEFFICACE**).

Ulteriori considerazioni da svolgere:

- la forza da trasferire per aderenza al supporto è sempre legata alle legature CAM[®] che tengono in posizione l'angolare. Ne risulta quindi che ad un forte intervento di incremento di armatura longitudinale deve sempre associarsi un forte intervento di legature trasversali.
- Va sempre eseguito il controllo in termini di percentuale di armatura; l'armatura longitudinale preesistente e quella di continuità del rinforzo non deve eccedere la percentuale indicata in normativa rispetto alle dimensioni della sezione. Si ricorda infatti che per alte percentuali di armatura sono da ricondurre a rotture fragili pur nel meccanismo di flessione e pressoflessione.

Rinforzo Pilastro
(Taglio, Confinamento ed
Integrazione di Armatura a flessione)

PROSPETTO



SEZIONE A-A



SEZIONE B-B

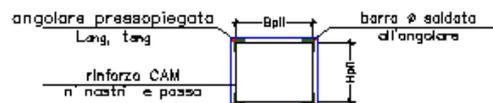
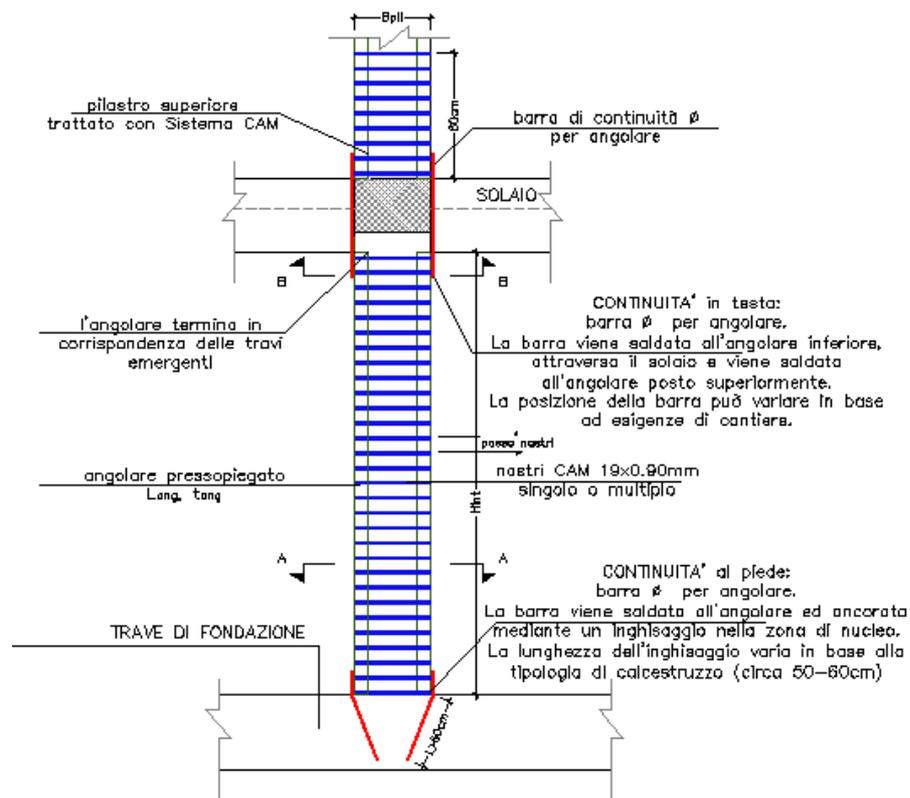


Figura 50 – Tipologico di rinforzo a flessione e taglio sul pilastro – il pilastro superiore non è trattato

Rinforzo Pilastro
(Taglio, Confinamento ed
Integrazione di Armatura a flessione)

PROSPETTO



SEZIONE A-A



SEZIONE B-B

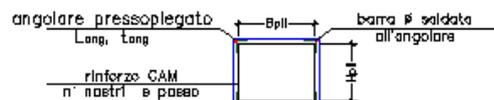


Figura 51 – Tipologico di rinforzo a flessione e taglio sul pilastro – il pilastro superiore è trattato con Sistema CAM®

Nelle travi, nella maggior parte dei casi, l'armatura esistente risulta insufficiente per soddisfare le verifiche sismiche in cui si ha l'inversione del momento flettente alle estremità. Analogamente andrà prevista la continuità d'armatura laddove necessaria.

Rinforzo Trave : Taglio, Confinamento ed Integrazione di Armatura a flessione all'appoggio (M⁻)

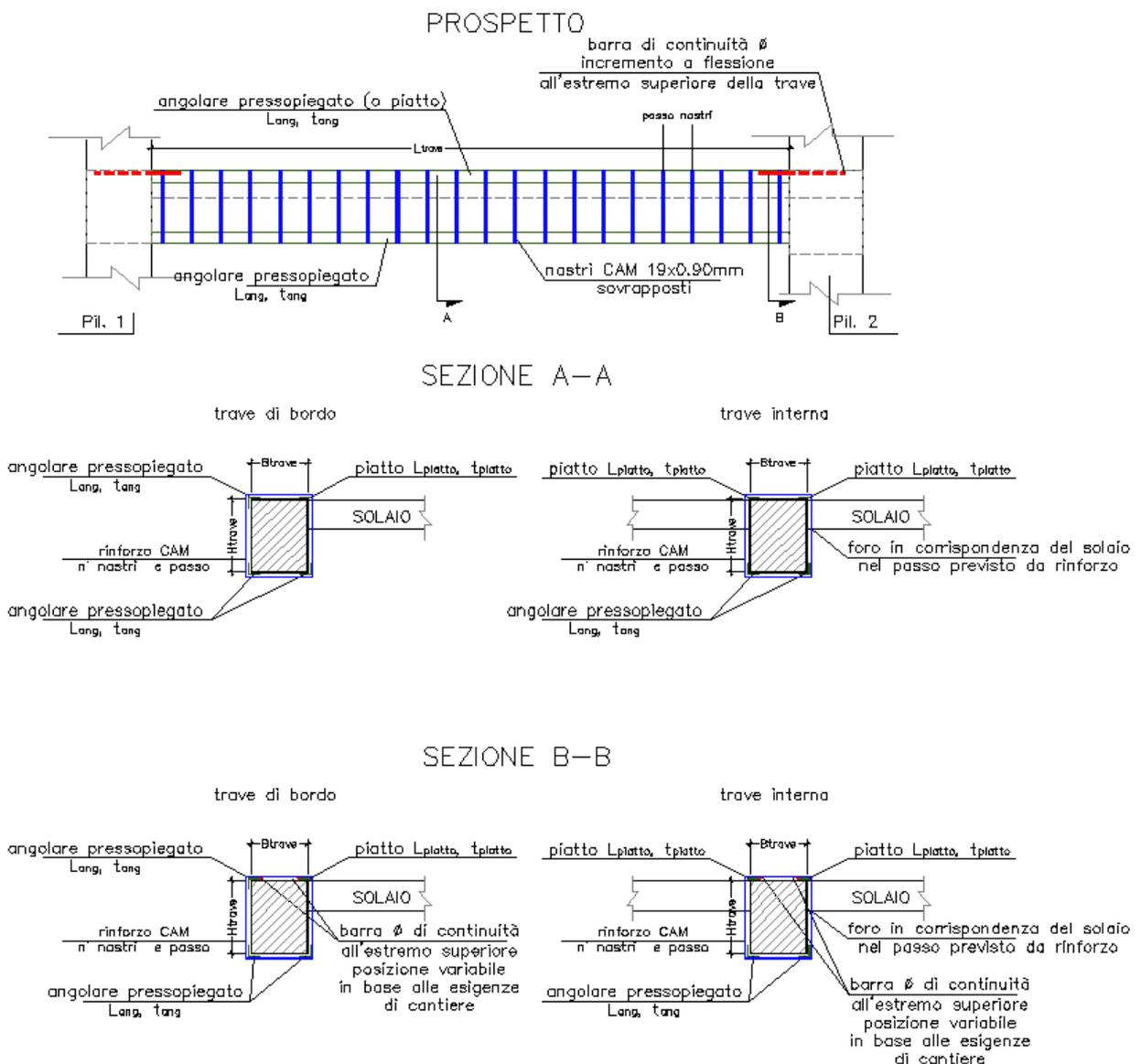


Figura 52 – Dettaglio intervento di rinforzo della trave a flessione nella sezione di appoggio. Integrazione armatura per momento flettente negativo (armature superiori insufficienti)

Una valida alternativa che si presta ad evitare cattivi comportamenti in termini di gerarchia di rottura è quella di considerare in via preventiva nel modello di calcolo la cernierizzazione delle travi in corrispondenza del raggiungimento del proprio momento resistente.

In tal modo si può indirizzare il comportamento strutturale verso meccanismi duttili in cui si predilige la cernierizzazione delle travi a fronte di quella dei pilastri (gerarchia di rottura a pilastro forte-trave debole).

Nel caso in cui la carenza sia per carichi statici, l'angolare disposto inferiormente può essere considerato come armatura flessionale solo nel caso in cui sia garantita la lunghezza d'ancoraggio.

Le legature trasversali tengono in posizione l'angolare e permettono il trasferimento degli sforzi da supporto ad angolare: la lunghezza minima tale per cui si sviluppi l'aderenza dipenderà pertanto anche dal numero di nastri, dal loro passo e dalle caratteristiche meccaniche del supporto. Essa deve essere garantita come dimensione minima nella zona d'ancoraggio.

Rinforzo Trave : Taglio, Confinamento ed
Integrazione di Armatura a flessione in mezzeria

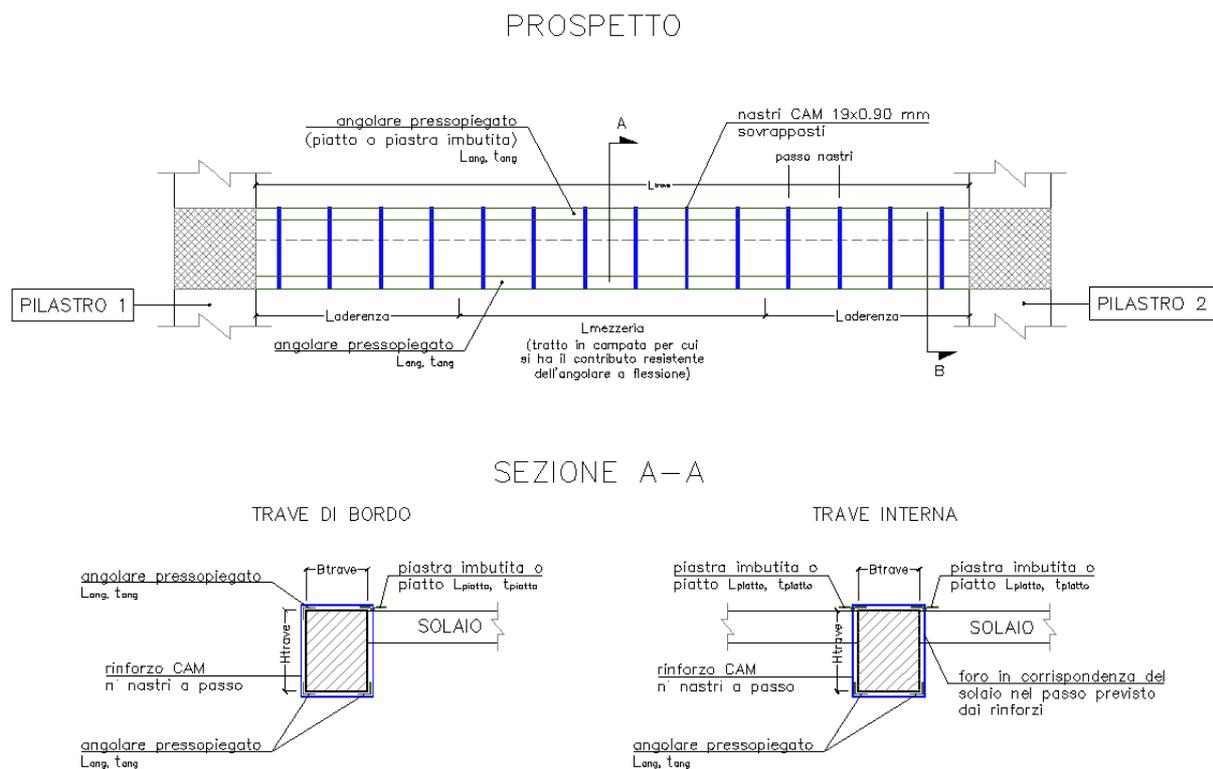


Fig. 51- Dettaglio intervento di rinforzo della trave a flessione nella sezione di mezzeria.

Laddove la continuità d'armatura venga realizzata con barra saldata ed inghisata, sarà necessario effettuare le verifiche richieste.

7.5 IL RINFORZO DEL NODO TRAVE-PILASTRO MEDIANTE IL SISTEMA CAM[®]

Ulteriore meccanismo fragile da evitare nelle strutture intelaiate in CA è quello di rottura a taglio del pannello di nodo.

Tale elemento, necessario al trasferimento degli sforzi, spesso negli edifici esistenti manca del dettaglio costruttivo di staffe che proseguono nel pilastro in corrispondenza dell'intersezione con le travi ad esso convergenti.

Attraverso un sistema di legature realizzate con più nastri in sovrapposizione si possono realizzare quindi delle staffe chiuse aggiunte a posteriori.

Il Sistema CAM[®] è l'unico sistema che permette la realizzazione di staffe chiuse senza l'aggiunta di massa (l'unica alternativa per la realizzazione di tali elementi è infatti il ringrosso del nodo attraverso un getto in CA).

L'iter per il calcolo del rinforzo CAM[®] è analogamente ad altro elemento strutturale, la verifica dello stato di fatto dell'elemento e il calcolo dell'incremento necessario che l'intervento di rinforzo dovrà fornire.

7.5.1 INDIVIDUAZIONE DELLA GEOMETRIA

Coerentemente con quanto indicato al punto 7.4.4.3.1, la geometria del nodo da considerare non è semplicemente la minima area in pianta individuata dall'intersezione trave-pilastro.

Si definiscono:

- Altezza effettiva del nodo: h_{jc} = la distanza tra le giaciture più esterne di armatura del pilastro
- Larghezza effettiva del nodo, b_j come la minore tra:
 - La maggiore tra le larghezze della sezione del pilastro e della sezione della trave
 - La minore tra le larghezze della sezione del pilastro e della trave ambedue aumentate di metà altezza della sezione del pilastro.

- Il copriferro c

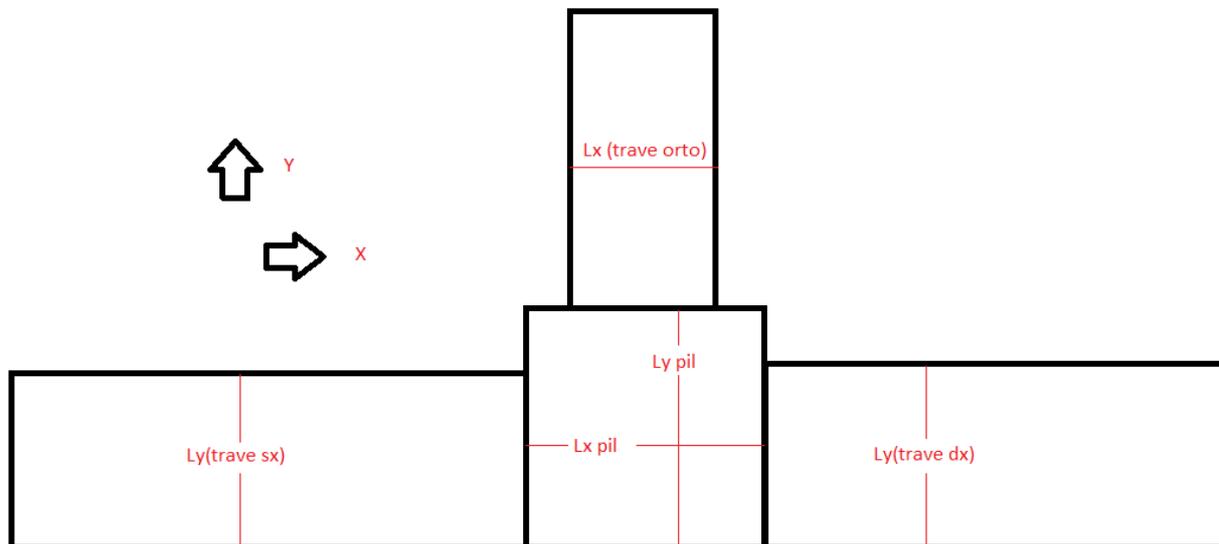


Figura 53 – Geometria generica del nodo

L'area da considerare per la verifica del nodo che interessa le travi disposte in direzione X è

$$A_{gx} = h_{jc,x} * b_{j,x}$$

$$h_{jc,x} = L_{x\ pil} - 2c$$

$$b_{j,x} = \min[\max(L_{y\ trave\ sx}; L_{y\ trave\ dx}; L_{y\ pil}); \min(L_{y\ trave\ sx} + \frac{1}{2} L_{x\ pil}; L_{y\ trave\ dx} + \frac{1}{2} L_{x\ pil}; L_{y\ pil} + \frac{1}{2} L_{x\ pil})]$$

L'area da considerare per la verifica del nodo che interessa la trave disposta in direzione Y è

$$A_{gy} = h_{jc,y} * b_{j,y}$$

$$h_{jc,y} = L_{y\ pil} - 2c$$

$$b_{j,y} = \min[\max(L_{x\ trave\ orto}; L_{x\ pil}); \min(L_{x\ trave\ orto} + \frac{1}{2} L_{y\ pil}; L_{x\ pil} + \frac{1}{2} L_{y\ pil})]$$

7.5.2 CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI AL NODO

La resistenza del nodo deve essere tale da assicurare che non pervenga alla rottura prima della zona della trave e del pilastro ad esso adiacenti. Il taglio agente in direzione orizzontale in un nodo deve essere calcolato tenendo conto delle sollecitazioni più gravose che, per effetto dell'azione sismica, si possono verificare negli elementi che vi confluiscono.

Gli sforzi sul nodo possono essere calcolati in funzione della trazione esercitata dalle barre longitudinali delle travi e dal taglio agente sul nodo, secondo il seguente schema:

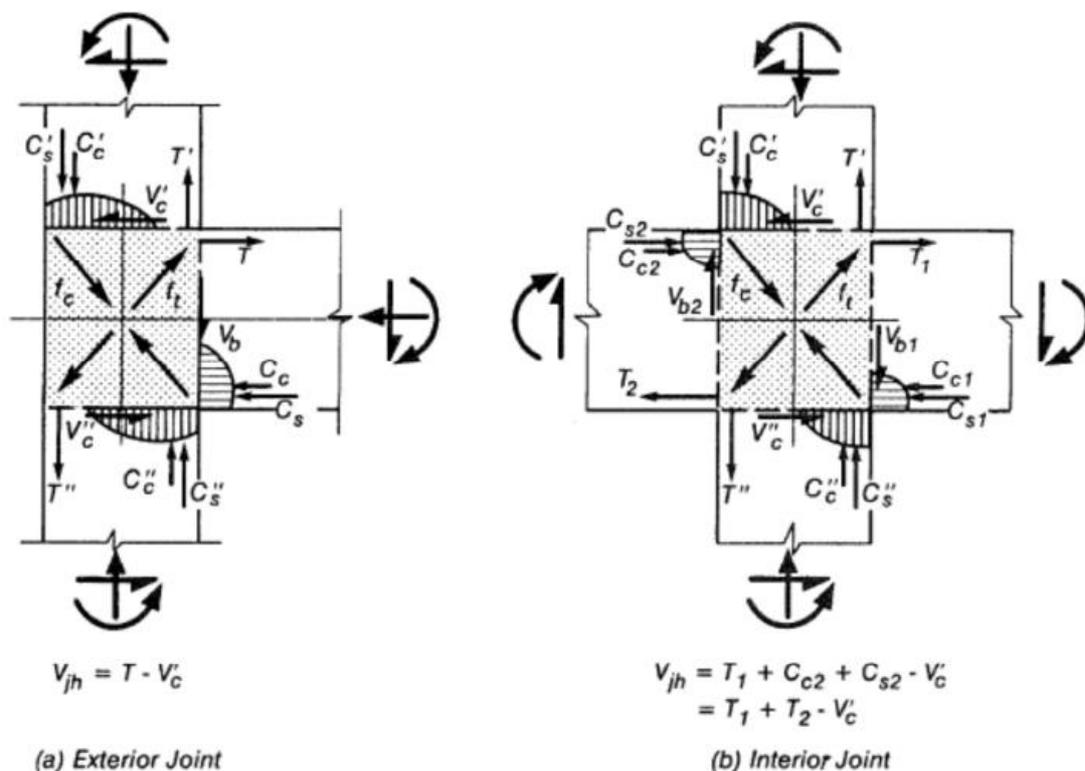


Figura 54 – Sollecitazioni al nodo

Sulla base di quanto riportato in normativa (C8.7.2.5 nelle NTC2008 e nel 7.4.4.3.1 nelle NTC2018) il taglio totale agente al nodo può essere calcolato a partire dal taglio sollecitante alla base del pilastro superiore e dalla sollecitazione di trazione presente nell'armatura longitudinale della trave.

Tale valore di tensione dell'armatura può coincidere con la massima tensione di snervamento dell'acciaio dell'armatura esistente ovvero può anche essere inferiore se il momento flettente agente sulla sezione di trave è inferiore al valore limite elastico. Altresì può verificarsi che la combinazione di verifica più gravosa per il nodo non sia la combinazione che porti a snervamento le armature nelle travi.

Considerare il valore limite resistente (f_{yd}) anziché il valore di tensione effettivamente agente sull'armatura ($\sigma_{sd} < f_{yd}$) può portare a valori molto differenti in termini di taglio agente al nodo.

Analizziamo nel dettaglio la formula:

$$V_{jbd} = \gamma_{rd} \cdot (A_{s1} + A_{s2}) \cdot f_{yd} - V_c \quad \text{per nodi interni}$$

$$V_{jbd} = \gamma_{rd} \cdot A_{s1} \cdot f_{yd} - V_c \quad \text{per nodi esterni}$$

In cui:

- il termine γ_{rd} trattandosi di fabbricato esistente, a meno che non sia esplicitamente richiesto anche per tali tipologie di progetto una verifica in gerarchia, può porsi pari a 1
- la sommatoria $A_{s1} + A_{s2}$ è da intendersi come la massima somma possibile concomitante per l'equilibrio al nodo. Normalmente si pone:

$$\max (A_{sup, trave, dx} + A_{inf, trave, sx}; A_{inf, trave, dx} + A_{sup, trave, sx})$$

- V_c è la forza di taglio nel pilastro agente al di sopra del nodo

Per semplicità generalmente i software impiegano la formulazione “*in RESISTENZA*” basandosi sul massimo di armatura agente, piuttosto che su un approccio “*in SOLLECITAZIONE*”.

Esplicitando meglio si ha che nel caso di approccio “*in SOLLECITAZIONE*”:

$$V_n = T_1 + T_2 - V_c$$

con

$$T_1 = A_{sup} \sigma_{sup} = A_{sup} \frac{M_1}{I} n(d - x_c)$$

$$T_2 = A_{inf} \sigma_{inf} = A_{inf} \frac{M_2}{I} n(d - x_c)$$

Dove:

- I momento di inerzia della sezione fessurata
- n modulo di omogeneizzazione (E_a/E_c a tempo ∞)
- x_c posizione dell'asse neutro

7.5.3 VERIFICA DEL NODO NELLO STATO DI FATTO

Per i nodi esistenti la verifica da eseguirsi è riportata al punto normativo C8.7.2.5 per le NTC2008 e C8.7.2.3.5 per le NTC2018.

La verifica del nodo consiste nello scongiurare la rottura a trazione e compressione della diagonale del pannello nodale.

La tensione principale σ_1 è la tensione a compressione e deve essere inferiore alla massima compressione ammessa.

La tensione σ_2 è la minima e non deve eccedere la resistenza limite a trazione.

Il massimo valore di trazione è pari a $0.3\sqrt{f_c}$, la massima tensione di compressione è pari a $0.5f_c$.

$$\sigma_{jt} = \left| \frac{N}{2A_j} - \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j}\right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j}\right)^2} \right| \leq 0.3 \cdot \sqrt{f_c} \quad \text{verifica 'lato trazione'}$$

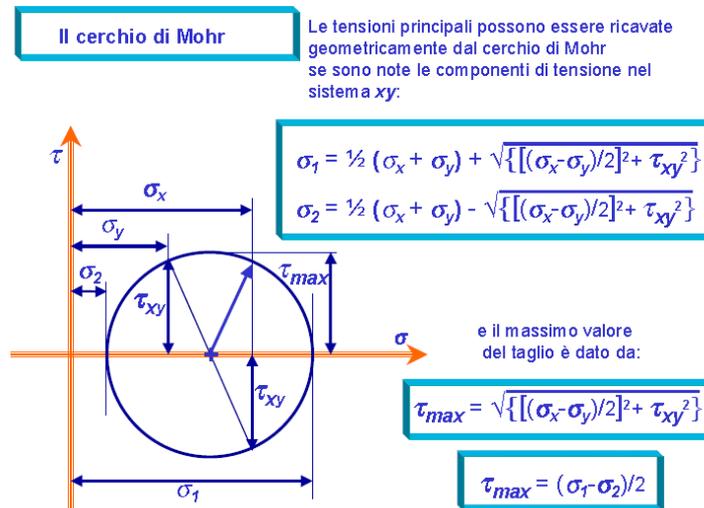
$$\sigma_{jc} = \left(\frac{N}{2A_j}\right) + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_j}\right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j}\right)^2} \leq 0.5 \cdot f_c \quad \text{verifica 'lato compressione'}$$

In cui:

- A_j indica la geometria del nodo (per ciascuna direzione come precedentemente descritto)
- N è lo sforzo assiale presente nel pilastro superiore
- V_j è il taglio totale agente sul nodo ottenuto come somma algebrica del taglio trasmesso dal pilastro superiore e dagli sforzi orizzontali trasmessi "dalle parti superiori delle travi". Mancando esplicitazione circa la parte virgolettata suddetta si mantiene valido il calcolo svolto per il V_{jbd} già esplicitato in precedenza.

Le formulazioni hanno alla base la teoria dei cerchi di Mohr.

Tramite la figura seguente si può facilmente verificare la formula proposta in normativa.


Figura 55 – Cerchi di Mohr

Tale formulazione appare coerente con l'ipotesi di **nodo non fessurato**, ipotesi abbastanza restrittiva per gli edifici esistenti e inoltre tale verifica non contempla la possibilità di staffe esistenti nel nodo. Nella maggior parte dei casi progettuali tale ipotesi è verificata, ma risulta difficile ammettere che il regime tensionale sia tale da non avere la formazione delle fessure.

In alternativa alla suddetta, nel caso di staffe esistenti o nel caso di rinforzi applicati, potrebbero applicarsi le formulazioni riportate in normativa per edifici di nuova costruzione, tuttavia essendo il riferimento esplicito per le strutture esistenti si ammette che laddove tale verifica non sia soddisfatta si debba necessariamente intervenire sul nodo.

7.5.4 IL RINFORZO CAM[®]

Il consolidamento del nodo tramite Sistema CAM[®] avviene tramite legature disposte ad abbracciare il nucleo di calcestruzzo di nodo. I nastri metallici pretesi possono essere disposti in sovrapposizione e su uno o più ricorsi. E' buona norma, per una maggiore diffusione della tensione indotta disporre, a parità di numero di nastri necessari, che essi siano disposti su più ricorsi, compatibilmente con la geometria del nodo su cui si opera.

Appare di immediata comprensione il fatto che le legature, essendo fondamentalmente delle staffature aggiuntive, vadano ovviamente a favore della verifica 'lato trazione'.

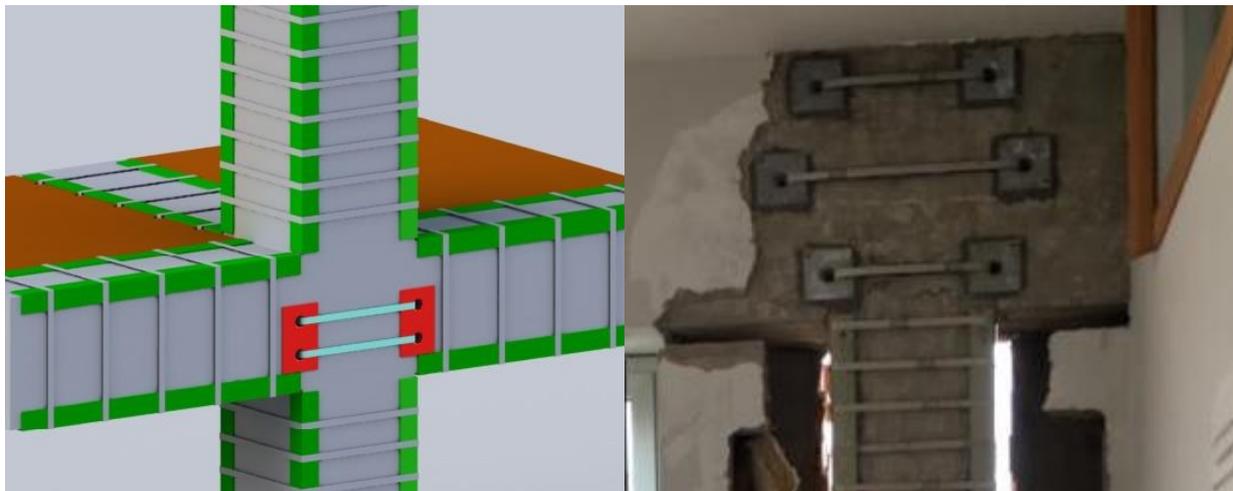


Figura 56 – Interventi di NODO mediante Sistema CAM[®]

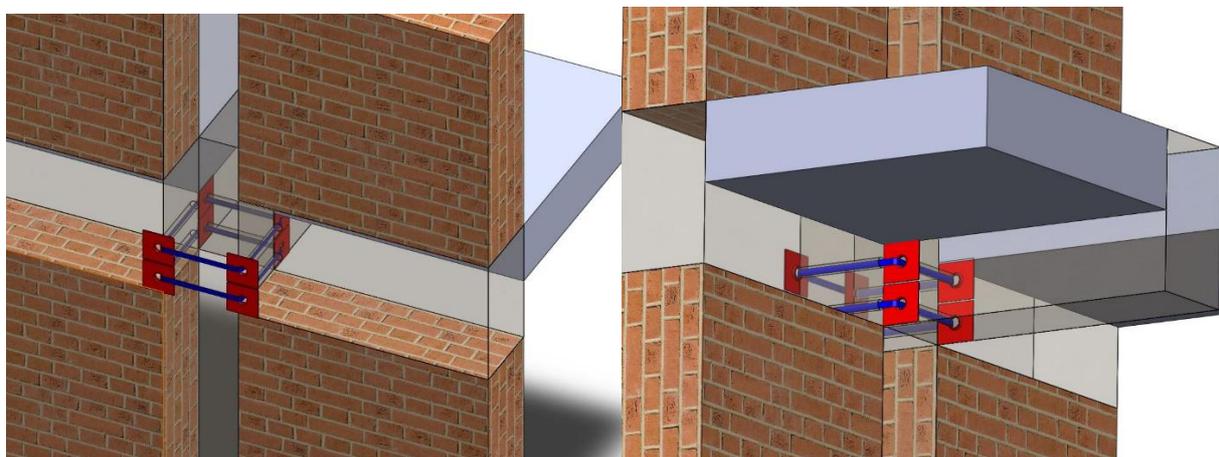


Figura 57 – Interventi di NODO di facciata mediante Sistema CAM[®]

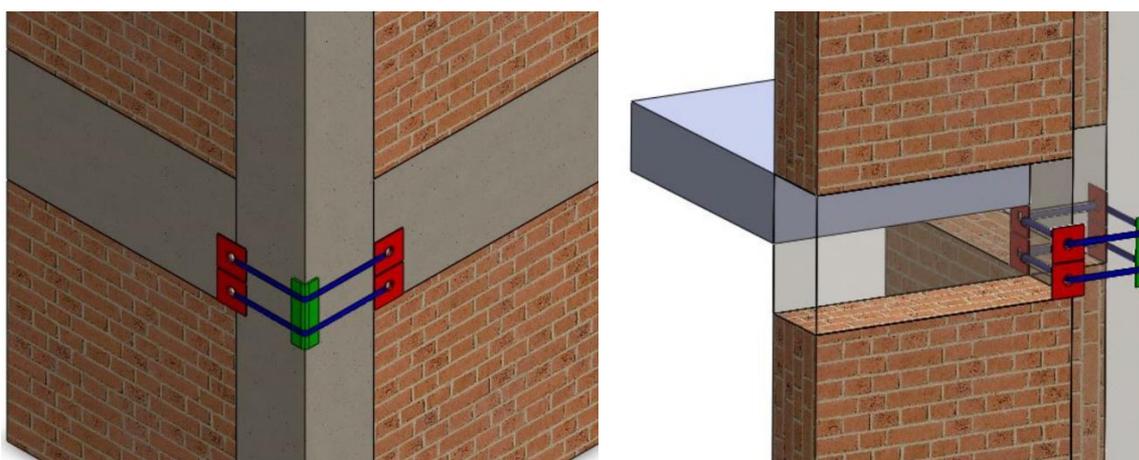


Figura 58 – Interventi di NODO d'angolo mediante Sistema CAM[®]

Il calcolo del rinforzo, non meglio esplicitato in nessun punto della normativa verrà eseguito seguendo la regola del buon senso e della scienza delle costruzioni.

Il Sistema CAM[®] essendo pretensionato all'atto dell'applicazione funzionerà come 'elemento' atto ad evitare l'apertura delle fessure prima della formazione delle stesse (nodo in regime elastico; verifica a nodo non fessurato). A seguito dell'apertura delle fessure il sistema di legature realizzate con più nastri in sovrapposizione saranno a tutti gli effetti armatura aggiuntiva, calcolate come staffe (verifica a nodo fessurato).

Nel dettaglio di seguito viene descritto, la verifica del nodo rinforzato secondo i due differenti approcci.

7.5.4.1 VERIFICA DEL NODO NON FESSURATO

VERIFICA LATO COMPRESSIONE

Coerentemente con le condizioni di 'non fessurazione' la verifica lato compressione può essere svolta solo coerentemente impiegando la formula:

$$\sigma_{nc} = \left(\frac{N}{2A_g} + \frac{\sigma_{or}}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{N}{2A_g} - \frac{\sigma_{or}}{2} \right)^2 + \left(\frac{V_{jbd}}{A_g} \right)^2} \leq 0.5 \cdot f_{cd}$$

Vale la pena sottolineare che, l'effetto delle legature va ad essere favorevole nella verifica a 'trazione', in quanto la tensione minima agente al nodo aumenta, ma va ad introdurre un contributo aggiuntivo lato 'compressione'. In una situazione quindi limite in cui la verifica a compressione del nodo risultasse al limite pari all'unità, l'introduzione delle legature CAM[®] porterebbe ad un valore inferiore nello stato di progetto del rinforzo rispetto allo stato di fatto.

VERIFICA LATO TRAZIONE

Le legature disposte orizzontalmente introducono una tensione orizzontale σ_{or} il cui effetto è quello di spostare il cerchio di Mohr facendolo traslare lungo l'asse delle compressioni.

Nel calcolo secondo tale formulazione, ovvero supponendo che non sia ancora intervenuta l'apertura di alcuna fessura nel nodo, l'unico contributo offerto è quello indotto dalla pretensione dei nastri.

Solo all'atto dell'apertura della fessura, quindi laddove si possa considerare una variazione di lunghezza del nastro e quindi una conseguente variazione di tensione, si può considerare l'effettiva tensione di 'lavoro' del nastro e quindi, nel calcolo a stato limite ultimo, la tensione massima di calcolo.

La verifica a NODO NON FESSURATO rinforzato tramite Sistema CAM[®] può effettuarsi alternativamente attraverso la specializzazione della formula riportata nel precedente 6.5.3, aggiungendo il contributo della tensione orizzontale indotta dalle legature CAM[®]:

$$\sigma_{jt} = \left| \sqrt{\left(\frac{N_j}{2A_j} - \frac{\sigma_{or}}{2}\right)^2 + \left(\frac{V_j}{A_j}\right)^2} - \left(\frac{N_j}{2A_j} + \frac{\sigma_{or}}{2}\right) \right| \leq 0.3 \cdot \sqrt{f_c}$$

oppure in diversa forma ma medesima sostanza secondo quanto riportato (7.4.4.3.1 delle NTC2018):

$$\frac{A_{sh} \cdot f_{ywd}}{b_j \cdot h_{jw}} \geq \frac{\left[\frac{V_{jbd}}{(b_j \cdot h_{jc})} \right]^2}{f_{ctd} + V_d \cdot f_{cd}} - f_{ctd}$$

Considerando, in via cautelativa, una tensione 'residua' di pretensionamento f_p e considerando che si realizza sempre una staffa chiusa ($n_{braccia} = 2$) si ha che:

$$\sigma_{or} = \frac{A_{nastri} f_p}{A_j} = \frac{n_{braccia} n_{nastri} b_{nastro} t_{nastro} f_p}{A_j}$$

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} = A_{nastri} f_p = n_{braccia} n_{nastri} b_{nastro} t_{nastro} f_p$$

Tali formulazioni sono di fatti equivalenti assumendo in luogo della massima tensione prevista, la tensione di pretensione dei nastri.

Si specifica tuttavia che appare una certa incongruenza nelle formulazioni in quanto dovrebbe contemporaneamente realizzarsi lo snervamento delle armature e la massima trazione nel calcestruzzo. In tal senso si ritiene possa trattarsi di 'fessurazione incipiente'. L'effetto della pretensione risulta comunque un contributo estremamente favorevole nel funzionamento.

Se tale verifica non risulta soddisfatta, il nodo si fessura e quindi si procede alla verifica dello stesso secondo la formulazione riportata nel paragrafo seguente.

7.5.4.2 VERIFICA DEL NODO FESSURATO

Al punto normativo 7.4.4.3.1 si descrive che “la capacità a taglio del nodo è fornita da un meccanismo a traliccio che, a seguito della fessurazione diagonale, vede operare contemporaneamente un meccanismo di taglio compressione ed un meccanismo di taglio trazione”.

VERIFICA LATO COMPRESSIONE

“La **compressione** diagonale indotta dal meccanismo a traliccio non deve eccedere la resistenza a compressione del calcestruzzo:

$$V_{jbd} \leq \eta \cdot f_{cd} \cdot b_j \cdot h_{jc} \cdot \sqrt{1 - \frac{v_d}{\eta}}$$

Con:

$$\eta = \alpha_j \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

con f_{ck} in MPa

$$\alpha_j = 0.6$$

per nodi interni,

$$\alpha_j = 0.48$$

per nodi esterni

$$v_d = \frac{N_{ed}}{l_{x,pil} \cdot l_{y,pil} \cdot f_{cd}}$$

lo sforzo assiale agente normalizzato rispetto alla resistenza a compressione della sezione di solo calcestruzzo

Tale formula non ammette soluzione per un valore di $\eta = v_d$

Considerando gli usuali valori per f_{ck} , il parametro η dipende dal valore assunto per α_j e quindi tale restrizione equivale a limitare la massima compressione agente a circa il 50% del valore ultimo agente sulla sezione (considerando l'area lorda) del pilastro.

VERIFICA LATO TRAZIONE

“In alternativa, l'integrità del nodo a seguito della fessurazione diagonale può essere garantita integralmente dalle staffe orizzontali se:

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} \geq \gamma_{rd} \cdot (A_{s1} + A_{s2}) \cdot f_{yb} \cdot (1 - 0.8v_d) \quad \text{per nodi interni}$$

$$A_{sh} \cdot f_{ywd} \geq \gamma_{rd} \cdot A_{s2} \cdot f_{yb} \cdot (1 - 0.8v_d) \quad \text{per nodi esterni}$$

Nella verifica non appare esplicitamente il valore sollecitante V_{jbd} , tuttavia i secondi membri delle espressioni sembrano assimilabili. Analogamente a quanto detto per il γ_{rd} il valore consigliato è di 1,2. Volendo riportare tale formulazione alla verifica di un nodo esistente, appare coerente considerare un valore per $\gamma_{rd} = 1$.

Nella verifica a trazione le legature CAM[®] possono essere considerate armatura a tutti gli effetti ed essere al primo membro, sommandole ad eventuali staffe esistenti.

A_{sh} è l'area totale dei nastri considerando ambo le braccia del rinforzo, f_{ywd} è l'effettiva tensione di lavoro dei nastri $f_{y,d,n}$.

Impiegando il materiale tipico che si dispone a consolidamento dei manufatti in C.A. la tensione di calcolo dei nastri è assunta pari a 560 MPa.

7.5.4.3 EVENTUALE CARENZA 'LATO COMPRESSIONE' NELLA VERIFICA DEL NODO

Laddove la carenza del nodo sia 'lato compressione' le uniche possibilità di intervento sono:

- La redistribuzione di massa e rigidezza nell'intera struttura in modo da de-sollecitare alcuni elementi
- L'aumento della geometria della sezione del nodo
- L'inserimento di elementi che de-sollecitino localmente il nodo

Nell'ambito della tecnologia a marchio CAM[®] a consolidamento dei nodi è possibile l'inserimento di un piatto metallico che può, se adeguatamente connesso, essere considerato un elemento atto a de-sollecitare il nodo in CA. Di fatti il taglio agente sul nodo si ripartisce tra i due elementi, supporti lavoranti in parallelo, secondo la loro mutua rigidezza.

Nel caso in cui venga disposto un piatto metallico sul nodo si potrà considerare un taglio globalmente sollecitante minore, in quanto al V_{jbd} agente si sottrae la parte 'assorbita' dal piatto ($V_{jbd,p}$).

$$V_{jbd}' = V_{jbd} - V_{jbd,p} = V_{jbd} - V_{jbd} \frac{k_{piatto}}{k_{piatto} + k_{nodo}}$$

Si sottolinea che:

- nel calcolo completo e corretto la rigidezza del piatto è da valutarsi sia in termini di deformata per flessione che per taglio $\frac{1}{k_{tot}} = \frac{1}{k_{flex}} + \frac{1}{k_{tg}}$

- la rigidezza a taglio del piatto è funzione del modulo elastico del materiale (G), l'area a taglio dell'elemento, la lunghezza deformabile del piatto ($l_{0,p}$).

Per il piatto $k_{piatto,tg} = G_{acciaio} * A_{tg} / l_{0,p}$; per il nodo $k_{nodo,tg} = G * b_j * h_j / l_{0,p}$

- la rigidezza a flessione dipende dalle condizioni di 'vincolo' che si devono garantire. Supponendo il piatto 'incastato' tra piede del pilastro superiore e testa del pilastro inferiore, la rigidezza flessionale può porsi $k_{piatto,flex} = 12 E_{acciaio} * J / (l_{0,p})^3$

- nella verifica a nodo fessurato potrebbe tenersi in conto un modulo elastico del calcestruzzo ridotto (al massimo del 50% coerentemente con le ipotesi progettuali).

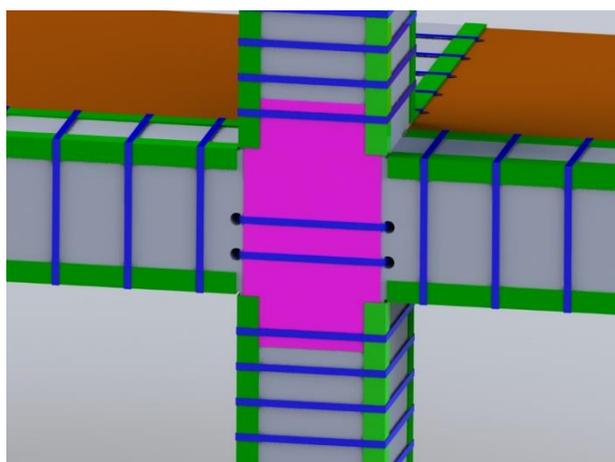
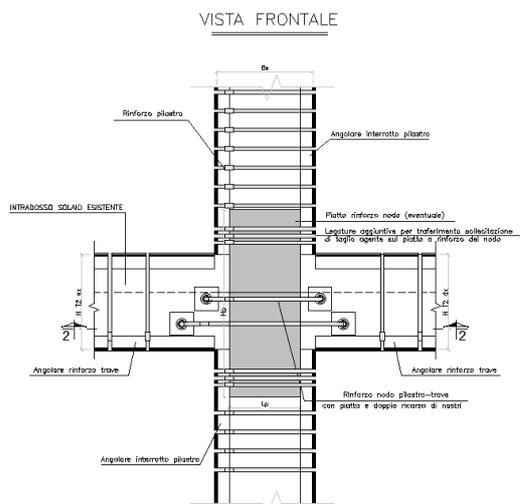


Figura 59 – Interventi di NODO con inserimento di piatto

Il contributo massimo del piatto è limitato e assorbe tra il 10% e il 20% della sollecitazione al nodo.

L'elemento metallico si intende "adeguatamente connesso" qualora vengano svolte tutte le verifiche circa la connessione del piatto.

A titolo esemplificativo ma non esaustivo si indicano come verifiche ad esso connesse:

- La verifica del piatto nei confronti della sollecitazione combinata flessione e taglio nella sezione di 'incastro'
- La verifica della saldatura del piatto agli angolari soggetta a taglio (t_{\perp}), sforzo normale equilibrante il momento esterno (t_{\parallel}), flessione 'parassita' dovuta all'eccentricità delle azioni rispetto al baricentro geometrico della saldatura (farfalla di t_{\perp})
- La verifica nei confronti del numero aggiuntivo di nastri per assorbire l'azione di allontanamento dell'angolare dal pilastro per effetto della flessione 'parassita' dovuta all'eccentricità delle azioni rispetto al baricentro geometrico della saldatura

In ultimo ma di prioritaria importanza si specifica che il piatto non è 'armatura' per il nodo (in quanto non connesso tramite perni direttamente al supporto o non incollato come per altre tecniche di intervento).

7.5.4.4 VERIFICA DEL NODO SECONDO DETTAGLI COSTRUTTIVI

Viene di seguito riportato l'approccio alla verifica del nodo per le strutture progettate in CD "B" a garanzia del minimo quantitativo di armatura trasversale da disporre secondo dettaglio costruttivo come riportato al punto 7.4.6.2.3 delle NTC2008. Tale approccio seppur abbandonato dalle NTC2018 in quanto si prescrive la sola verifica con le formulazioni sopra descritte, viene riproposto in quanto può essere un utile strumento per un dimensionamento preliminare del rinforzo necessario.

La formulazione semplificata, ormai in disuso, descriveva:

$$\frac{n_{st} \cdot A_{st}}{i \cdot b_j} \geq 0.05 \frac{f_{ck}}{f_{yk}}$$

In cui:

- n_{st} e A_{st} sono le staffe CAM[®] oggetto di predimensionamento
 i è l'interasse delle staffe CAM[®]
 b_j è la larghezza utile del nodo.

8 LA MODELLAZIONE DEL SISTEMA CAM[®]

Quando ci si appropria al consolidamento degli edifici esistenti è di fondamentale importanza la conoscenza della struttura, delle sue carenze, dei vizi propri relativi alla tipologia costruttiva e all'epoca di costruzione.

Fondamentale è tuttavia anche avere sempre a mente quale sia il comportamento 'ottimale' della struttura che su cui si deve intervenire.

Il comportamento ottimale di qualsiasi struttura è un comportamento che possiamo definire 'duatile' ovvero in cui si ha il maggior numero di elementi possibili che lavorando in parallelo, permettano la massima dissipazione di energia sismica.

Tale meccanismo si attiva quando si evitano rotture fragili a livello di singolo componente strutturale e a livello globale quando si eviti la formazione di un piano 'pilotis' o analoghi in cui la cernierizzazione dei pilastri avviene prima di quella delle travi.

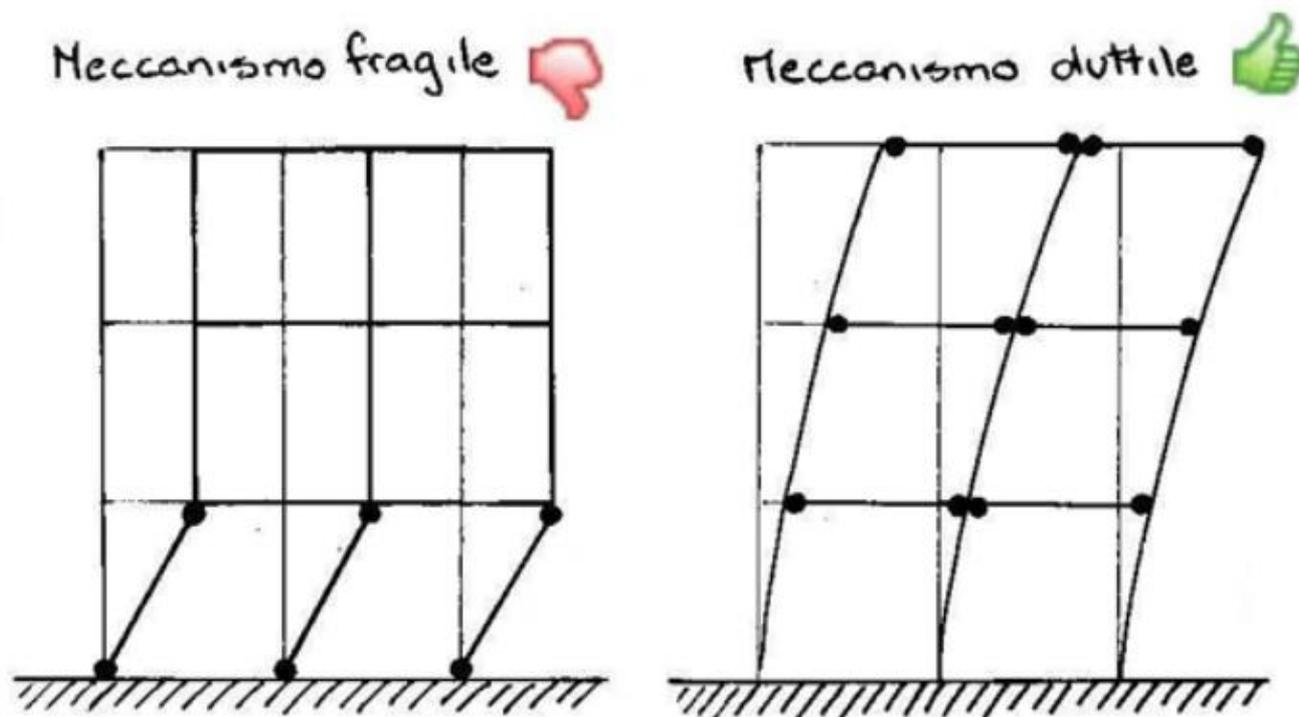


Figura 60 – Meccanismi di collasso degli edifici intelaiati in CA

Tali concetti sono ben noti al tecnico nel progetto delle nuove costruzioni, in cui, nel rispetto della gerarchia delle resistenze, si dà preferenza al meccanismo di rottura duttile degli elementi a flessione/pressoflessione rispetto alla rottura fragile a taglio e si predilige la cernierizzazione delle travi ai pilastri (trave debole-pilastro forte).

Anche negli edifici esistenti il raggiungimento del comportamento 'duttile' è l'obiettivo che va perseguito.

Il Sistema CAM[®] non altera la distribuzione di massa e rigidità sulla struttura pertanto, per allineare eventuali disassamenti tra centri di massa e rigidità, potrebbe essere necessario intervenire con altre tecniche.

Attraverso lo studio dei principali modi di vibrare della struttura si possono individuare le posizioni che consentono di limitare effetti torsionali sull'edificio.

Il Sistema CAM[®] essendo fondamentalmente staffatura aggiuntiva, in primis interviene nello scongiurare i meccanismi fragili di collasso e quindi consente nella maggior parte dei casi di gerarchizzare la rottura nei confronti flessione-taglio.

Contestualmente al rinforzo a taglio, si incrementa anche la duttilità dell'elemento per effetto del confinamento indotto.

Ulteriori meccanismi fragili che facilmente possono essere scongiurati, realizzando staffe chiuse aggiunte a posteriori, sono tutti i meccanismi di collasso del nodo trave-pilastro.

Conseguita quindi, per quanto possibile intervenendo sull'esistente, la gerarchia di rottura a favore dei meccanismi duttili di collasso del singolo elemento, si deve cercare di favorire la formazione del meccanismo duttile strutturale, attraverso interventi atti a conseguire il comportamento cosiddetto a 'pilastro forte-trave debole'. Si può quindi intervenire sui pilastri attraverso un ulteriore incremento in resistenza anche flessionale (considerando gli angolari pressopiegati come armatura aggiuntiva) e rinforzando le travi in duttilità, ovvero conferendo per effetto del confinamento indotto un aumento di capacità rotazionale della sezione e quindi un incremento in capacità alla cerniera plastica.

9 PRINCIPALI LAVORI EDIL CAM SISTEMI SRL

9.1 EDIFICIO SCOLASTICO

Località Torino (TO)
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2017
Importo lavori tra i 150'000 e i 350'000 euro

L'edificio scolastico è a sei livelli e presenta la peculiarità di una facciata continua di infissi che non è stata rimossa per l'applicazione del rinforzo CAM[®] su pilastri, travi e nodi necessaria al raggiungimento del miglioramento sismico richiesto dalla committenza.



Il minimo ingombro della componentistica strutturale ha permesso che fosse sufficiente lo spazio d'aria derivante dalla sola demolizione dell'intonaco negli intorni dell'infisso perché le travi e i pilastri potessero essere cerchiati efficacemente dal nastro. l'intervento così inserito unitamente alle necessità di una veloce applicazione che permettesse la fruibilità degli ambienti scolastici nel più breve tempo possibile ha permesso alla tecnologia CAM® di risultare vincente rispetto alle altre proposte.





EDIL CAM® Sistemi Srl

Via dei Genieri n. 39 - 00143 Roma
Tel. +39.06.5073602 +39.06.50512918 +39.06.5070046 Fax +39.06.60507041
P.IVA: 06262521005 Registro Imprese Roma al n. 2000/06262521005
R.E.A. 956541 Capitale Sociale €114.000,00 Codice Univoco ODNX4GR
info@edilcamsistemi.com edilcamsistemi@pec.it www.edilcamsistemi.com



ISO 9001:2015

ISO 14001:2015

ISO 45001:2018



0273



UNI EN ISO 3834-2

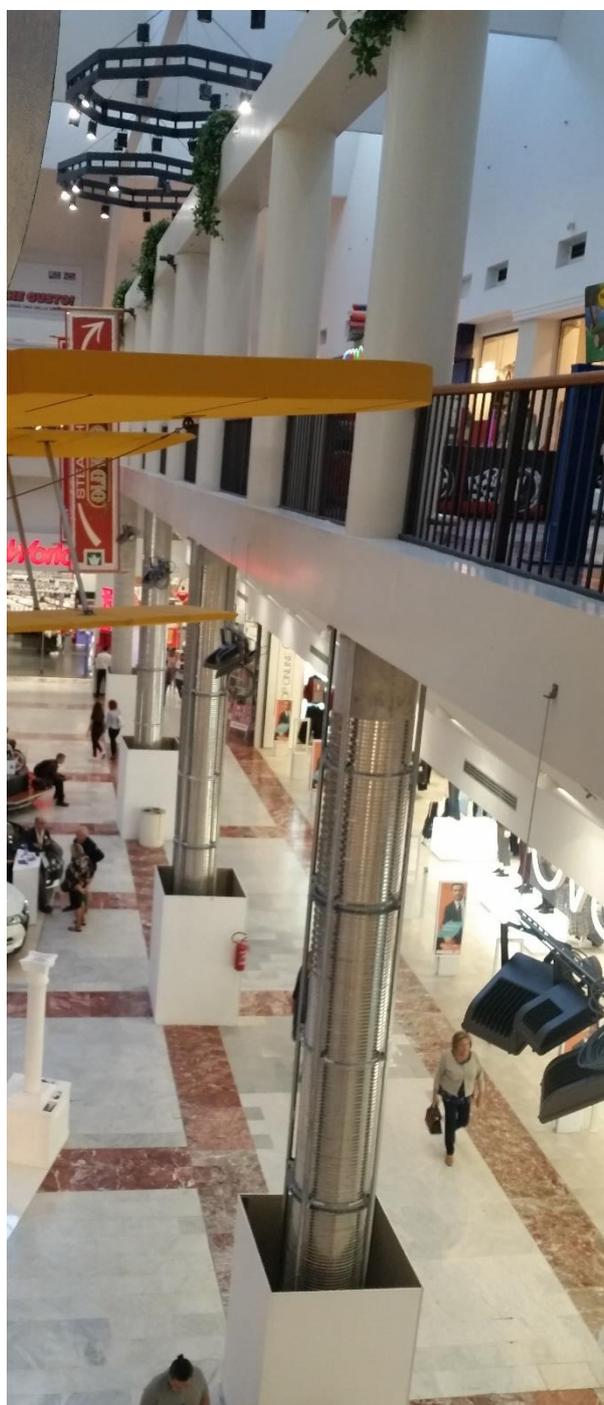
9.2 CENTRO COMMERCIALE "I GIGLI"

Località Campi Bisenzio (FI)
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2017
Importo lavori fino a 150'000 euro

L'edificio oggetto dell'intervento è un centro commerciale. In corrispondenza della zona in cui trovavano sito le scale mobili di connessione tra i due livelli fuori terra del centro commerciale si rendeva necessario un ampliamento del solaio superiore con conseguente incremento di carico per le colonne preesistenti. L'intervento di cerchiatura CAM[®] realizzato, data la geometria circolare, applicando direttamente le nastre sulla superficie delle colonne, ha permesso di raggiungere incrementi di resistenza a compressione per confinamento del 60%.

Il cantiere CAM[®] è stato quindi completamente A SECCO. Il centro commerciale con ampi orari di apertura al pubblico ha mantenuto la piena operatività delle attività grazie alle ridotte aree di cantiere necessarie per l'installazione del Sistema e all'intervento realizzato esclusivamente in orario notturno. La VELOCE applicazione del Sistema CAM[®] ha permesso con una sola squadra costituita da MAESTRANZE QUALIFICATE di intervenire sulle 12 colonne alte oltre 750 cm, fasciate con 2 nastri sovrapposti a passo 3 cm per un totale di oltre 14 Km di nastri CAM[®] messi in opera in soli 13 notti lavorative.





9.3 EDIFICIO SCOLASTICO

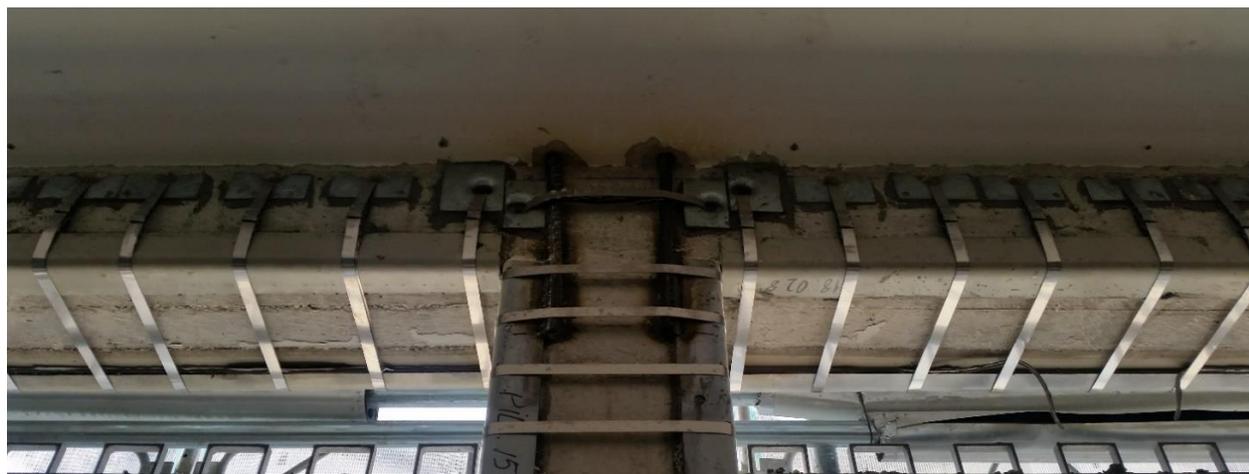
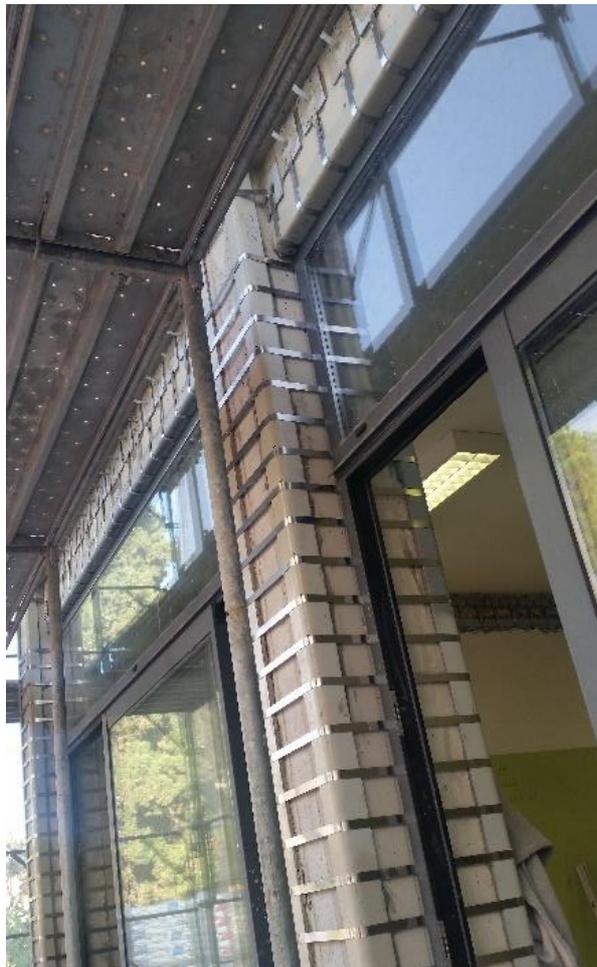
Località Nereto (TE)
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2018
Importo lavori tra i 150'000 e i 350'000 euro

Il complesso scolastico si articola in sette differenti corpi di fabbrica. L'intervento CAM[®] ha interessato i principali cinque di questi.

La cerchiatura di pilastri, travi e nodi ha permesso di incrementare la resistenza a taglio e flessione degli elementi, modulando gli interventi secondo le necessità progettuali.

Il Sistema NON INVASIVO e FLESSIBILE CAM[®] ha permesso di limitare al minimo le demolizioni delle tamponature in prossimità degli elementi trattati, mentre gli infissi non sono stati rimossi limitando quindi al minimo le lavorazioni accessorie rispetto alle strutturali.







9.4 UFFICI 'ENEL OPEN FIBER'

Località Roma
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2019
Importo lavori tra i 150'000 e i 350'000 euro

L'oggetto del rinforzo è un edificio in cemento armato sede di un'importante società di telecomunicazioni, in cui il solaio del piano seminterrato presenta carenze strutturali. Il solaio è di tipo gettato in opera, costituito da travetti e una doppia soletta superiore ed inferiore con blocco di alleggerimento interposto tra le due.



Il rinforzo CAM[®] è stato applicato ai travetti, disponendo piatti superiormente ed inferiormente e nastri a fasciare l'intera sezione del travetto, ottenendo in questo modo un incremento di resistenza a taglio. In corrispondenza degli appoggi, laddove fosse necessario il rinforzo a flessione, è stato disposto il piatto

continuo per garantire continuità di armatura longitudinale. L'intervento CAM® così disposto ha permesso il rinforzo del solaio evitando la demolizione dell'impalcato.



9.5 EDIFICIO SCOLASTICO

Località Lesina (FG)
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2019
Importo lavori tra i 150'000 e i 350'000 euro

Il complesso edilizio è composto da due corpi di fabbrica in cemento armato separati da un giunto strutturale. Le principali carenze della struttura sono da attribuire alla mancanza dei dettagli costruttivi (staffatura dei nodi, infittimento di staffe alle estremità dell'elemento) che determinano la formazione di meccanismi fragili, in luogo del buon comportamento duttile atteso per le strutture in zona sismica.

L'intervento di rinforzo CAM[®] è disposto in maniera diffusa su tutti gli elementi travi, pilastri e nodi dell'edificio conferendo incrementi di resistenza a taglio e flessione ed incremento di duttilità alla struttura.

La flessibilità e i ridotti ingombri del sistema hanno permesso di rendere minime le demolizioni delle tamponature e limitare la rimozione di impianti e infissi.



9.6 EDIFICIO SCOLASTICO

Località Lesina (FG)
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2019
Importo lavori tra i 150'000 e i 350'000 euro

L'edificio scolastico è composto da tre corpi di fabbrica costituiti da un struttura in cemento armato. L'applicazione del sistema CAM[®] viene realizzata nel corpo B del complesso edilizio, eseguendo in maniera estesa il rinforzo sugli elementi trave, pilastro e nodo, che conferisce incrementi di resistenze a taglio e flessione e aumento di duttilità. Gli spessori minimi dei materiali e degli elementi costituenti il sistema CAM[®] hanno consentito di evitare lo smontaggio degli infissi e di limitare al massimo i lavori di ripristino e di finitura.





9.7 STUDENTATO 'CEUR'

Località Roma
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2019
Importo lavori tra i 550'000 e i 750'000 euro

L'edificio in oggetto è un edificio in cemento armato disposto su sette livelli in cui è previsto l'intervento di adeguamento della struttura. La particolarità della struttura sono le grandi luci delle campate che risultano molto grandi pari a circa 9 m.

L'applicazione del rinforzo CAM[®] è stata prevista per gli elementi trave, disponendo fasciature con nastri inox e profilati metallici agli angoli degli elementi, quest'ultimi adeguatamente bloccati alle estremità per garantire la continuità dell'armatura longitudinale. In questo modo si riesce a fornire l'incremento di resistenza a taglio e a flessione necessario a raggiungere l'adeguamento della struttura.





9.8 EX SEDE BNL

Località Roma
Tipo fabbricato: CA
Anno: 2019
Importo lavori tra i i 750'000 e 1'000'000 euro

L'edificio in oggetto è parte del fabbricato sede storica della banca BNL a ridosso di Via Veneto.



Oggetto di intervento CAM® è la parte in cemento armato: è previsto l'intervento di adeguamento della struttura mediante confinamento di pilastri, travi e nodi.



La struttura presentava numerose situazioni singolari, come travi curve, accoppiate, di geometria non regolare, oltre alla peculiarità della struttura ovvero la presenza di forti discontinuità in elevazioni con rastremazioni e sistemi di travature nelle due direzioni senza convergenza al nodo di pilastro.



