

A simplified method for shear capacity assessment of circular RC cross-sections

Metodo semplificato per la valutazione della resistenza a taglio di una sezione circolare in c.a.

E. Cosenza^{1,3}, G. Maddaloni^{2,3}, G. Cuomo¹

¹ *Department of Structures for Engineering & Architecture, University of Naples Federico II, Naples, Italy*

² *Department of Engineering, University of Sannio, Benevento, Italy*

³ *Construction Technologies Institute, National Research Council (CNR), San Giuliano Milanese, Milan, Italy*

ABSTRACT: Reinforced concrete (RC) members with circular cross-section are widely used in structural and geotechnical engineering (e.g. columns in frame structures, foundation piles). Generally, for such members, the analysis is more complex than for rectangular cross-section and the problem is not sufficiently investigated in literature. Circular shape and uniform distribution of reinforcement along the perimeter cause some difficulties for a simple assessment of bending moment and shear capacity. In this study, for RC members with circular cross-section, an alternative method for the evaluation of shear capacity is presented. / Gli elementi in calcestruzzo armato con sezione circolare sono ampiamente utilizzati nel campo dell'ingegneria strutturale e geotecnica. Generalmente però, la valutazione della resistenza è più complessa rispetto a quella delle sezioni rettangolari. La forma circolare e l'uniforme distribuzione in punti discreti delle barre di acciaio lungo il perimetro, comporta alcune difficoltà per una semplice valutazione della capacità della sezione sia a flessione che a taglio. Nel presente lavoro è proposta una formula semplificata per la valutazione della capacità tagliante di una sezione circolare in calcestruzzo armato.

KEYWORDS: circular cross-section, shear resistance, simplified formulation / sezione circolare, resistenza a taglio, formule semplificate.

1. INTRODUZIONE

Per la valutazione della resistenza di elementi strutturali in calcestruzzo armato aventi sezione trasversale di forma circolare, la normativa europea [1] e quella italiana [2] non forniscono molte indicazioni. Secondo le NTC [2] per esempio, la capacità resistente a taglio V_{Rd} , di “*Elementi con armature trasversali resistenti al taglio*” (di sezione qualsiasi), è assunta pari al valore minimo tra la resistenza del calcestruzzo e quella dell'armatura trasversale, calcolate con il metodo del traliccio ad inclinazione variabile. Tuttavia, a causa della particolare forma della sezione e della posizione delle armature distribuite lungo il perimetro, non sempre è possibile applicare a elementi a sezione circolare, delle formule validate su sezioni di forma rettangolare o quadrata.

Nella letteratura tecnica [3-13], si osserva una generale consuetudine nel considerare, per la valutazione della resistenza a taglio di un elemento in c.a. dotato di staffe, anche per le sezioni circolari,

la schematizzazione con il traliccio di Mörsh o con il traliccio ad inclinazione variabile.

Più dettagliatamente, in Ang et al. [3] la resistenza a taglio di elementi in c.a. a sezione circolare viene determinata assumendo snervate tutte le staffe che attraversano un'ipotetica fessura trasversale inclinata a 45° ed effettuando una media integrale per la valutazione della componente verticale dello sforzo in ogni singola staffa.

Nel 1993 Clarke e Birjandi [4], sulla base dei risultati di test effettuati a Camberley in Gran Bretagna presso la British Cement Association, suggeriscono di utilizzare anche per le sezioni circolari, le stesse formule proposte dal British Codes of Practice [14] per le sezioni rettangolari, ma assumendo l'altezza utile come la distanza tra il lembo superiore e il baricentro delle barre di armatura in zona tesa.

Priestley et al. nel 1994 [5] modificano il metodo proposto da Ang et al. [3] introducendo un ulteriore termine nella formula per il calcolo della resistenza a taglio, per portare in conto gli effetti della compressione assiale sul meccanismo ad arco.

Successivamente Kowalsky e Priestley [6] introducono un'ulteriore variazione al metodo

proposto da Ang et al. [3] sulla base dell'assunzione che nella zona compressa le fessure sono assenti per definizione e portando in conto gli effetti della luce di taglio e della percentuale di armatura longitudinale.

Dancygier nel 2001 [7] ha dimostrato come la formulazione di Ang et al., è efficace solo per gli elementi con diametro della sezione almeno pari a quattro volte il passo delle staffe. Per tutti gli altri rapporti la formula restituisce dei valori non conservativi con errori anche superiori al 50%.

Kim e Mander [8], sulla base della stessa critica fatta da Dancygier nei confronti di Ang et al., propongono un fattore riduttivo della resistenza a taglio da applicare nel caso in cui il numero di staffe attraversate da una fessura sia superiore a 5.

Merta [9-10] nel 2006 propone un approccio analitico per la valutazione della resistenza a taglio in membrature con sezione circolare, portando in conto per la prima volta anche i contributi resistenti che nascono per effetto della curvatura delle staffe, sia in termini di componenti di forza (radiale e tangenziale) che di confinamento e scorrimento.

In Fiore et al. [13] la resistenza a taglio è valutata a partire dai risultati dei dati sperimentali di prove di laboratorio presenti in letteratura e applicando metodi di regressione numerica. Sono proposte 5 formule aventi una struttura abbastanza complessa in quanto caratterizzate dalla presenza di numerosi coefficienti correttivi.

Lo scopo del presente lavoro, è quello di proporre una formulazione semplice che porti in conto i fenomeni specifici che caratterizzano la dinamica di rottura di tali elementi, suggerendo quindi un metodo alternativo al tradizionale meccanismo a traliccio, più efficace per membrature con sezione rettangolare o quadrata.

2. ANALISI DELLA SEZIONE CIRCOLARE IN C.A.

Come noto, negli elementi in c.a., i contributi resistenti come l'effetto spinotto, l'ingranamento degli inerti, l'effetto pettine etc. forniscono una capacità resistente a taglio anche alle membrature non dotate di specifica armatura.

Come si evince dalla Figura 1, in una sezione circolare, il contributo per l'effetto spinotto (dowel action) delle armature longitudinali, risulta incrementato rispetto a quello di una sezione rettangolare: la disposizione delle armature lungo l'altezza della sezione consente una più efficace opposizione del calcestruzzo all'espulsione delle barre di armatura.

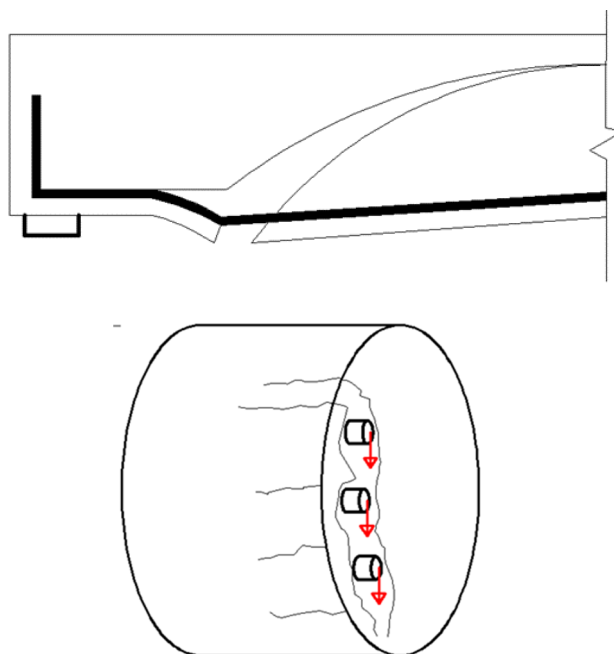


Figura 1. Contributo delle armature sub-verticali all'incremento dell'effetto spinotto.

Inoltre, la presenza delle armature sub-verticali, consente anche di limitare l'ampiezza nell'apertura delle fessure da taglio, cucendo le lesioni nella parte centrale della sezione (Figura 2).

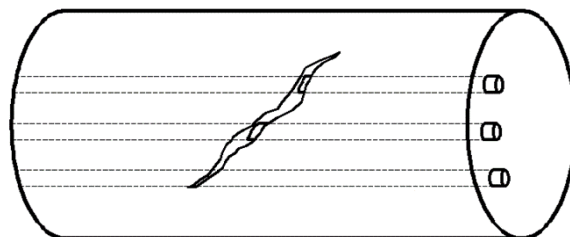


Figura 2. Effetto benefico delle armature sub-verticali sull'apertura delle fessure.

Dunque il contributo della resistenza a taglio dell'armatura longitudinale risulta molto più efficace di quello delle usuali sezioni rettangolari. Inoltre il quantitativo di armature longitudinali, distribuito in genere uniformemente e con percentuali spesso maggiori di quelle delle corrispondenti sezioni rettangolari, rende elevata la resistenza delle sezioni circolari senza specifica armatura trasversale.

3. METODO PROPOSTO

Negli ultimi anni, al fine di proporre formulazioni semplificate ed efficaci per la determinazione della resistenza a taglio di membrature in c.a. con sezione circolare, diversi gruppi di ricerca hanno eseguito prove sperimentali. Una ricerca in letteratura ha permesso di trovare un totale di 85 test eseguiti su elementi in c.a. con sezione circolare. In particolare,

si riportano nel seguito le tabelle riepilogative dei risultati di 35 prove effettuate su elementi non armati a taglio (Tabella 1) e di 50 prove effettuate su elementi dotati di staffe (Tabella 2). Le caratteristiche geometriche e meccaniche dei provini testati e i valori di resistenza ottenuti, sono indicati in Tabella 1 e Tabella 2 con la seguente simbologia:

D = diametro della sezione circolare

$f'c$ = resistenza cilindrica del calcestruzzo

f_{yl}
= resistenza allo snervamento armatura longitudinale

f_{yw}
= resistenza allo snervamento armatura trasversale

ρ_l = percentuale geometrica armatura longitudinale

ρ_w = percentuale geometrica armatura trasversale

s = passo delle staffe

V_R^{test} = valore sperimentale del taglio resistente

Il database è stato ricavato dalle seguenti sperimentazioni: Capon e de Cossio (1965) [15], Clarke e Birjandi (1993) [4], Kim (2000), pubblicato da Collins et al. nel 2002 [16]. I provini considerati presentano un diametro variabile da un minimo di 150 mm ad un massimo di 500 mm, una resistenza media del calcestruzzo compresa tra 13 MPa e 50 MPa, una percentuale di armatura longitudinale compresa tra 0.9% e 5.6% e trasversale tra 0.1% 0.45%.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di proporre una formulazione semplice per la valutazione della resistenza a taglio delle membrature in c.a., che, partendo dall'analisi dei contributi resistenti di elementi non armati a taglio, possa essere estesa anche al calcolo della capacità tagliante di elementi aventi specifica armatura.

3.1 Elementi non armati a taglio

Secondo quanto proposto dalla normativa italiana NTC 2008 [2] e dall'Eurocodice 2 [1] per una sezione generica in c.a. non armata a taglio ed in assenza di sforzo normale, i contributi resistenti possono essere valutati con la seguente formula:

$$V_{Rd}^{non\ arm} = \left[\frac{0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}}}{\gamma_c} \right] \cdot b \cdot d \quad (1)$$

con

d = altezza utile della sezione

b = larghezza della sezione

f_{ck} = resistenza cilindrica caratteristica del cls

$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b \cdot d}$ rapporto geometrico dell'armatura

longitudinale,

γ_c = coefficiente di sicurezza sul cls

Tale formula tiene conto dell'interazione fra calcestruzzo e barre in acciaio, tanto in termini di dowel effect, in cui interviene la resistenza e la deformabilità del calcestruzzo, quanto dell'effetto scala mediante il coefficiente k . Il primo contributo rimane concettualmente identico anche per le sezioni circolari se pur più elevato per il notevole quantitativo di barre e per la maggior efficienza dell'interazione, ma anche leggermente ridotto da "effetti di gruppo". L'effetto scala si può ritenere poco rilevante per la grande efficienza locale del dowel effect e dell'ingranamento degli inerti. Pertanto tale formula può essere estesa al calcolo del valore della resistenza a taglio per elementi con sezione circolare nel seguente modo:

$$V_R^{non\ arm} = \alpha \cdot \left[(100 \cdot \rho_l \cdot f'c)^{\frac{1}{3}} \cdot A_c \right] \quad (2)$$

con A_c pari all'area della sezione circolare, ρ_l rapporto geometrico dell'armatura longitudinale pari a $\frac{A_{sl}}{A_c}$ e α coefficiente che tiene conto della maggiore efficacia dei contributi resistenti a taglio (in particolare dell'effetto spinotto) per le sezioni circolari.

Il coefficiente α è stato ricavato dal fitting dei risultati sperimentale ed è risultato pari a 0.293.

Pertanto la formulazione proposta per la determinazione del contributo resistente a taglio di membrature non armate è:

$$V_R^{non\ arm} = 0.232 \cdot D^2 \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f'c)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

3.2 Elementi armati a taglio

Si è già descritta la grande rilevanza del contributo dell'armatura longitudinale alla resistenza a taglio. Le percentuali di armatura trasversale che si utilizzano, viceversa non danno, spesso, un elevato contributo aggiuntivo, se confrontato con le usuali sezioni rettangolari. Pertanto si ritiene che, invece di fare una classica valutazione della resistenza mediante meccanismi tirante-puntone, sia sufficiente amplificare il contributo della sola armatura longitudinale mediante un coefficiente correttivo.

Tabella 1. Dati geometrici e meccanici relativi alle sperimentazioni su provini senza armatura a taglio.

<i>Riferimenti</i>	#	<i>D</i> mm	<i>f_c</i> Mpa	<i>f_{yl}</i> Mpa	<i>ρ_l</i> %	<i>V_R^{test}</i> KN
	1	300	22.7	500	0.89	65
	2	300	22.8	500	2.28	91
	3	300	22.8	500	2.28	97
	4	300	44	500	2.28	129
	5	300	44	500	2.28	109
	6	300	26.7	500	5.56	148
	7	300	26.7	500	5.56	130
	8	300	43.6	500	5.56	152
	9	300	43.6	500	5.56	148
	10	300	31.2	500	3.56	86
Clarke & BirJandi, 1993 [4]	11	300	29.7	500	3.56	90
	12	300	20.9	500	3.56	98
	13	300	21.6	500	5.56	116
	14	300	34.8	500	5.56	125
	15	300	37.7	500	5.56	125
	16	300	34.9	500	5.56	136
	17	500	34	500	2.56	236
	18	500	33.5	500	2.56	234
	19	500	33.5	500	2.56	222
	20	500	29.4	500	3.84	234
	21	500	30.6	500	3.84	281
	22	247	25.6	400	2.12	46.5
	23	246	29.2	400	2.14	49
	24	252	46.1	400	3.06	71.6
	25	251	44.4	400	3.08	67.7
	26	251	29.6	400	3.08	70
	27	252	30.6	400	3.06	77
Capon & de Cossio, 1965 [15]	28	251	13.4	400	3.08	47.5
	29	252	23.7	400	3.06	45.8
	30	251	24.8	400	3.08	47
	31	252	24.9	400	3.06	56.8
	32	251	28.7	400	3.08	53
	33	251	13.7	400	3.08	59
	34	252	20.7	400	1.18	50.5
Kim, 2000 [16]	35	445	30.8	460	3.86	212

Tabella 2. Dati geometrici e meccanici relativi alle sperimentazioni su provini con armatura a taglio.

<i>Riferimenti</i>	#	D [mm]	f'_c [MPa]	f_{yl} [MPa]	ρ_l [%]	f_{yw} [MPa]	ρ_w [%]	s [mm]	V_R^{test} [kN]
	1	152	28	500	2.2	300	0.37	100	45
	2	152	28	500	2.2	300	0.37	100	46
	3	152	28	500	2.2	300	0.37	100	38
	4	300	24.1	500	5.6	300	0.22	150	186
	5	300	24.1	500	5.6	300	0.22	150	188
	6	300	23.8	500	5.6	300	0.45	75	211
	7	300	23.8	500	5.6	300	0.45	75	239
	8	300	48.4	500	5.6	300	0.22	150	227
	9	300	48.4	500	5.6	300	0.22	150	228
	10	300	50.5	500	5.6	300	0.45	75	279
	11	300	50.5	500	5.6	300	0.45	75	288
	12	300	24.3	500	3.6	300	0.22	150	145
	13	300	24.3	500	3.6	300	0.22	150	148
	14	300	46.7	500	3.6	300	0.22	150	185
	15	300	46.7	500	3.6	300	0.22	150	186
	16	300	23.7	500	2.3	300	0.13	150	117
	17	300	23.7	500	2.3	300	0.13	150	115
	18	300	26.6	500	3.6	300	0.13	150	113
	19	300	26.6	500	3.6	300	0.13	150	129
	20	300	49.3	500	3.6	300	0.13	150	149
	21	300	49.3	500	3.6	300	0.13	150	137
Clarke & Birjandi, 1993 [4]	22	300	22.2	500	5.6	300	0.13	150	131
	23	300	22.2	500	5.6	300	0.13	150	151
	24	300	45.5	500	5.6	300	0.13	150	163
	25	300	45.5	500	5.6	300	0.13	150	164
	26	300	25.1	500	2.3	300	0.13	150	101
	27	300	25.1	500	2.3	300	0.13	150	113
	28	300	48.9	500	2.3	300	0.13	150	114
	29	300	48.9	500	2.3	300	0.13	150	128
	30	300	24.3	500	3.6	300	0.13	150	98
	31	300	24.3	500	3.6	300	0.13	150	122
	32	300	47.1	500	3.6	300	0.13	150	114
	33	300	47.1	500	3.6	300	0.13	150	150
	34	300	22.8	500	5.6	300	0.13	150	125
	35	300	22.8	500	5.6	300	0.13	150	134
	36	300	45.3	500	5.6	300	0.13	150	158
	37	300	45.3	500	5.6	300	0.13	150	175
	38	300	43.9	500	5.6	300	0.22	150	218
	39	300	36.1	500	5.6	300	0.22	150	206
	40	300	36.3	500	5.6	300	0.22	150	197
	41	300	34.1	500	5.6	300	0.22	150	183
	42	500	37.8	500	2.6	300	0.14	140	313
	43	500	37.8	500	2.6	300	0.14	140	366
	44	500	32.9	500	2.6	300	0.14	140	301
	45	500	32.9	500	2.6	300	0.14	140	329
Capon & de Cossio, 1965 [15]	46	251	13.2	400	3.08	250	0.1	250	59.5
	47	251	13.1	400	3.08	250	0.2	125	82
	48	445	40.4	460	3.86	445	0.16	200	323
Kim, 2000 [16]	49	445	36	460	3.86	445	0.21	150	411
	50	445	36	460	3.86	445	0.32	100	479

La valutazione della resistenza tagliante di membrature aventi specifiche armature è pertanto fatta a partire dalla formula riportata in Eq. (3), semplicemente amplificando il contributo calcolato con la stessa, così come indicato nella formula seguente:

$$V_R^{arm} = V_R^{non\ arm} \cdot (1 + \beta \cdot \rho_w) \quad (4)$$

dove ρ_w è il rapporto geometrico dell'armatura trasversale calcolato come $\frac{A_{sw}}{s \cdot D}$ dove A_{sw} è l'area dell'armatura trasversale, ovvero l'area della sezione della staffa moltiplicata per il numero di bracci, mentre β è un coefficiente numerico che è stato ricavato dal fitting con i risultati sperimentali e risulta pari a 245.

Dunque, la formula proposta per il calcolo della resistenza a taglio di elementi in c.a. con sezione circolare e armata trasversalmente, è la seguente:

$$V_R^{arm} = V_R^{non\ arm} \cdot (1 + 245 \cdot \rho_w) \quad (5)$$

4. VALIDAZIONE DELLE FORMULAZIONI PROPOSTE

Le formule proposte nel paragrafo precedente e relative alla determinazione della resistenza a taglio su membrature con e senza specifiche armatura a taglio, sono utilizzate per calcolare una resistenza "teorica" dei provini testati in laboratorio. Nelle Figure 3 e 4, si riportano in ascissa i valori sperimentali di resistenza a taglio ed in ordinata quelli teorici, rispettivamente per i 35 elementi non armati a taglio e per i 50 elementi dotati di staffe.

Le Tabelle 3 e 4 riportano gli indici statistici dei rapporti tra le resistenze teoriche e sperimentali. Come è possibile notare, i valori ottenuti, sia in termini di media che degli altri indicatori statistici, consentono di asserire che la formulazione proposta coglie molto bene i risultati sperimentali.

Viene di seguito presentato anche il confronto, per elementi non armati a taglio, tra valori di resistenza sperimentali e teorici utilizzando la formula proposta da Merta in [9] che in assenza di sforzo normale propone:

$$V_c = \xi \cdot [3.7 \cdot \rho_l + 0.18] \cdot k \cdot \sqrt{f'_c} \cdot 0.7 \cdot A_g \quad (6)$$

dove A_g rappresenta l'area della sezione trasversale, ρ_l il rapporto geometrico dell'armatura longitudinale, f'_c la resistenza cilindrica del calcestruzzo e k dipende dal rapporto $\frac{a}{D}$ tra la luce di taglio a ed il diametro della sezione e viene

assunto pari a 1.25 per elementi tozzi ($\frac{a}{D} < 2.5$) e 1 per elementi snelli.

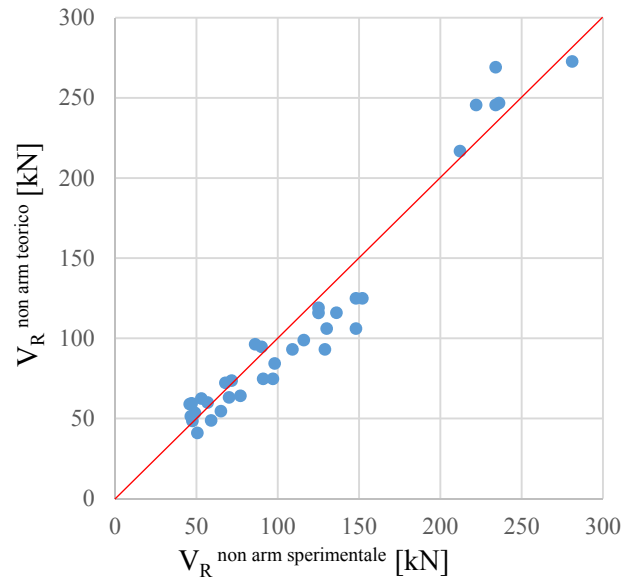


Figura 3. Elementi non armati a taglio: confronto tra resistenza sperimentale e teorica calcolati con la formula (3).

Infine ξ è un termine che porta in conto l'effetto scala e viene determinato come segue:

$$\xi = \frac{1 + \sqrt{\frac{5.08}{d_a}}}{\sqrt{1 + \frac{d}{(25 \cdot d_a)}}} \quad (7)$$

dove d rappresenta l'altezza utile della sezione e d_a la dimensione massima degli aggregati.

Tabella 3. Indicatori statistici dei rapporti resistenza teorica/sperimentale relativi al grafico di Figura 3 e alla formula proposta da Merta [9].

	Formula proposta	Merta [9]
Valor medio μ	1.000	1.010
Deviazione standard σ	0.154	0.129
Coefficiente di variazione CoV	0.154	0.128
Coefficiente di determinazione R^2	0.943	0.958

Per elementi dotati di specifica armatura a taglio, il confronto tra valori di resistenza sperimentali e teorici è stato anche fatto utilizzando le formule proposte da Fiore et al. in [13] e da Merta in [9]. La formula di Fiore et al. è quella delle 5 proposte in [13], con tre parametri valutati numericamente con riferimento a tre diversi contributi meccanici, che ha dato i migliori risultati in termini di indicatori statistici:

$$V_R^{Fiore} = 0,98243d \frac{A_{sh}}{s} f_{yw} + 0.086185Dd\sqrt{f'_c} \cdot \left(1 + 56.2 \frac{A_{sl}}{Dd}\right) \quad (8)$$

dove A_{sl} ed A_{sh} rappresentano rispettivamente l'area di armatura longitudinale e trasversale della sezione, D il diametro della sezione, f_{yw} la resistenza allo snervamento dell'armatura trasversale, f'_c la resistenza cilindrica del calcestruzzo, s il passo delle staffe, d altezza utile della sezione.

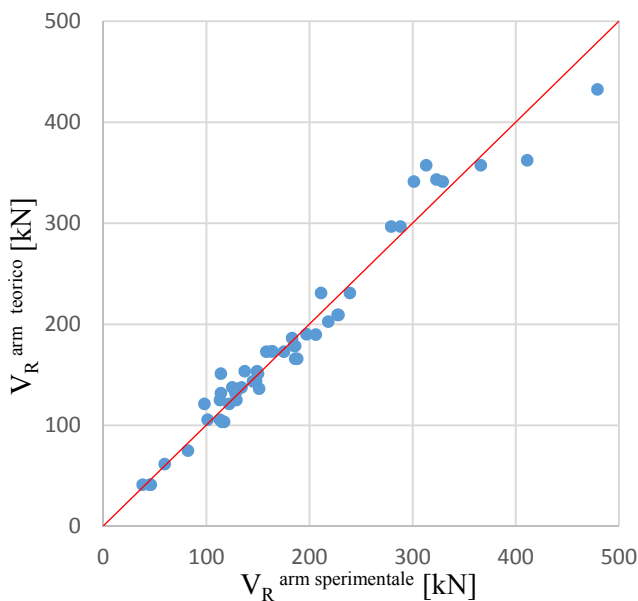


Figura 4. Elementi armati a taglio: confronto tra resistenza sperimentale e teorica calcolata con la formula (4).

La formula proposta da Merta [9] per la determinazione della resistenza a taglio di elementi aventi specifica armatura, non è altro che la stessa proposta per le sezioni non armate, alla quale viene aggiunto il contributo resistente delle armature trasversali V_s :

$$V_s = A_{sh} \cdot f_{yw} \cdot (1.8 \cdot n_t + \lambda \cdot n_d + 1) \quad (9)$$

dove n_t , λ e n_d sono parametri da determinare in base allo spessore del copriferro, all'angolo ϑ di inclinazione della biella compressa nel meccanismo a traliccio ed in funzione di altre variabili. Per la determinazione di questi parametri si rimanda all'articolo di Merta [9]. La Tabella 4 riporta gli indicatori statistici dei risultati ottenuti.

Al fine di investigare ulteriormente l'adeguatezza della formula proposta per la valutazione della resistenza a taglio per elementi con specifica armatura, è stata implementata una campagna di simulazioni, facendo variare i parametri geometrici e meccanici di un elemento in c.a. con sezione circolare, così come riportato nella Tabella 5. Sono stati così generati un totale di 520 casi.

Tabella 4. Indicatori statistici dei rapporti resistenza teorica/sperimentale relativi al grafico di Figura 4, alla formula proposta da Fiore et al. [13] ed alla formula proposta da Merta [9].

	Formula proposta	Fiore et al. [10]	Merta [9]
Valor medio μ	1.000	1.017	1.041
Deviazione standard σ	0.098	0.119	0.119
Coefficiente di variazione CoV	0.098	0.117	0.115
Coefficiente di determinazione R^2	0.959	0.962	0.941

Tabella 5. Elenco dei valori assunti dalle variabili per le simulazioni.

D	cm	30-40-50-60-70-80-90-100-110-120-130-140-150
f'_c	MPa	20-30
s	mm	100-200
ρ_l	%	0.3-0.6-1-2-4
f_{yl}	MPa	450
f_{yw}	MPa	450
Diametro staffe	mm	8

In Figura 5 per i 520 casi generati, si riporta il confronto tra i valori di resistenza a taglio, stimati con la formula proposta in (Eq. 4), con quelli valutati con la formula di Fiore et al. [13] riportata in Eq. (8).

La Tabella 6 riporta gli indicatori statistici dei risultati ottenuti.

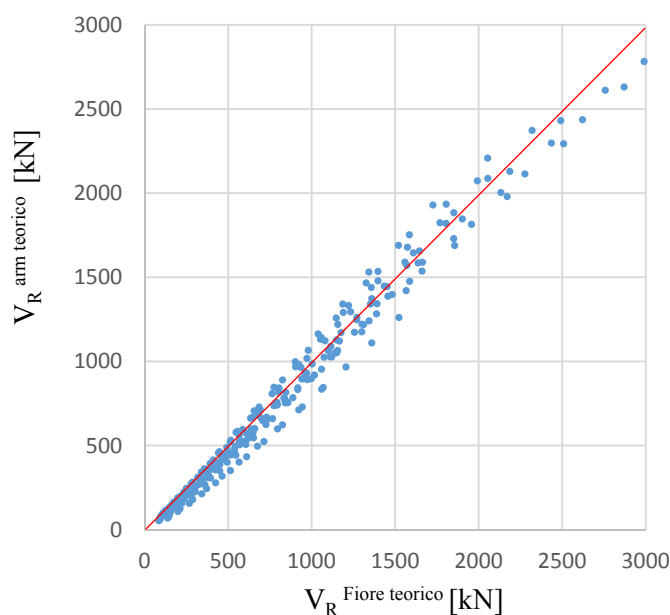


Figura 5. Confronto tra resistenza teorica valutata secondo la formula proposta (Eq. 4) e quella valutata con la formula di Fiore et al. [13] riportata in Eq. (8).

Tabella 6. Indicatori statistici dei rapporti di resistenza teorica relativi al grafico di Figura 5.

<i>Valor medio μ</i>	<i>0.908</i>
<i>Deviazione standard σ</i>	<i>0.124</i>
<i>Coefficiente di variazione CoV</i>	<i>0.136</i>
<i>Coefficiente di determinazione R^2</i>	<i>0.983</i>

Come si può notare, la formula proposta consente di ottenere un valore medio della resistenza molto simile a quello ottenuto con la formula di Fiore et al. [13]. Analogamente, anche i valori della deviazione standard σ , del coefficiente di variazione CoV e del coefficiente di determinazione R^2 confermano la bontà della formulazione proposta.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro viene proposta una nuova formulazione per la valutazione della capacità resistente a taglio per elementi in calcestruzzo armato a sezione circolare con e senza specifica armatura a taglio.

Le formule si basano sul considerare l'importante contributo resistente a taglio che nasce per effetto della particolare tipologia di sezione. La disposizione delle armature sul contorno della sezione ed in particolare la presenza di armature a giacitura sub-verticali, assimilabili ad armature di parete, presenti in percentuale rilevante nelle sezioni circolari, consentono di ottenere un contributo di resistenza a taglio rilevante rispetto alla sezione rettangolare.

Poiché il contributo resistente aggiuntivo legato alla posizione di queste armature longitudinali si sviluppa sia negli elementi armati che non armati a taglio, le formule proposte rappresentano anche un tentativo di unificazione del metodo di calcolo, partendo dalla resistenza di elementi non armati e portando in conto il contributo dell'armatura trasversale attraverso un coefficiente determinato numericamente.

Per il controllo dell'affidabilità delle formulazioni proposte, è stata valutata la resistenza a taglio di elementi in c.a. a sezione circolare testati in laboratorio e presenti in letteratura. Le formule proposte consentono di ottenere valori estremamente affidabili sia per elementi armati che non armati a taglio.

In particolare, per gli elementi non armati si riscontra un rapporto tra la resistenza teorica e quella sperimentale con uno scarto quadratico

medio del 16% circa ed un coefficiente di determinazione R^2 pari al 94%.

Per gli elementi aventi specifiche armature a taglio si riscontra uno scarto quadratico medio inferiore al 10% ed un coefficiente di determinazione R^2 pari al 96%.

Un riscontro ancora più oggettivo sull'affidabilità delle formulazioni proposte ed in particolare di quella utilizzata per gli elementi con specifica armatura a taglio, è stato fatto attraverso il confronto con i valori di resistenza ottenuti utilizzando una formula di letteratura a più parametri proposta da Fiore et al. [13]. Su una popolazione di valori di resistenza di circa 500 casi simulati, si ottiene una media dei rapporti delle due resistenze circa pari a 0,91 ed un coefficiente di determinazione molto prossimo all'unità ($R^2=0,98$), confermando quindi la validità della formulazione proposta.

Le formulazioni proposte possono quindi ritenersi attendibili e soprattutto estremamente semplici, perché costituite da pochi parametri.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Eurocode 2, "Design of Concrete Structures: ENV 1992-1-1: Part 1.1: General rules and rules for buildings, CEN" 2004.
2. Norme tecniche per le costruzioni - D.M. 14 Gennaio 2008, Italia.
3. Ang, B.G., Priestley, M.J.N., Paulay, T. "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns", ACI Structural Journal, ACI, V. 86, No.1, Jan.-Feb. 1989.
4. Clarke, J.L., Birjandi, F.K. "The Behaviour of Reinforced Concrete Circular Sections in Shear", The Structural Engineer, Institution of Structural Engineers, V. 71, No. 5, March 1993.
5. Priestley, M.J.N., Verma, R., Xiao, Y., "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns", Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 120, No.8, , pp. 2310-2329. Aug.1994.
6. Kowalsky, M.J., Priestley, M.J.N., "Improved Analytical Model for Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns in Seismic Regions", Structural Journal, ACI, V. 97, No.3, May 2000.
7. Dancygier, A., "Shear Carried by Transverse Reinforcement in Circular RC Elements", Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 127, No.1, Jan. 2001.
8. Kim, J.H., Mander, J.B., "Theoretical Shear Strength of Concrete Columns Due to Transverse Steel", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. I, January 2005.
9. Merta I., "Analytical Shear Capacity Model of RC Circular Cross-Section Members under Monotonic

Load". *Doctoral Thesis*. University of technology, Vienna 2006.

10. Merta, I., "Shear Strength of Reinforced Concrete Circular Cross Section Members", Poster presentation: 5th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Vail, Colorado, USA; 12.-16. April 2004.
11. Merta, I., Bedenik, B.S., Sparowitz, L., "Shear Strength Investigation of Reinforced Concrete Circular Cross Section Members", *Gradbeni Vestnik (Slovenian Civil Engineer Journal)*, 4, pp. 81 - 86. 2003.
12. Merta, I., Kolbitsch, A., "Analytical Evaluation of the Effective Area of Reinforced Concrete Circular Sections under Shear", *Proceedings of the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC-10*, Bangkok, Thailand, 3-5 August 2006.
13. Fiore A., Marano G.C., Laucelli D. and Monaco P., "Evolutionary Modeling to Evaluate the Shear Behavior of Circular Reinforced Concrete Columns," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2014, Article ID 684256, 14 pages,. doi:10.1155/2014/684256. 2014.
14. BS 8110-1:1997 "Structural use of concrete. Code of practice for design and construction".
15. Capon, M.J.F., de Cossio, R.D. 1965. Diagonal Tension in Concrete Members of Circular Section. *Ingenieria*, Mexico, April, pp. 257-280, (Translation by Portland Cement Association, Foreign Literature Study No. 466. 1966.
16. Collins, M.P., Bentz, E.C, Kim, Y.J., "Shear Strength of Circular Reinforced Columns", Published in s.M. Uzumeri Symposium: Behavior and Design of Concrete Structures for Seismic Performance, ACI Fall Convention in Toronto, October 16, 2000, American Concrete Institut, Farmington Hills, Michigan, ISBN 0-87031-072-0, pp. 45-86.