POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Studio della vulnerabilità di edifici in muratura in zone a rischio di caduta massi



Relatori:

prof.ssa Monica Barbero prof.ssa Marta Castelli prof. Valerio De Biagi prof.ssa Maria Lia Napoli

Candidato:

Beverly Almendra Castro Yabar

Ottobre 2017

Indice

	Intr	oduzio	ne	1
1	Le f	rane da	a crollo: caratteri generali del fenomeno	3
	1.1	Introduzione		
	1.2	Fenor	meni franosi: aspetti generali	4
		1.2.1	Classificazione delle frane	4
			1.2.1.1 Tipologie di movimento	5
			1.2.1.2 Materiali coinvolti nei fenomeni franosi	11
		1.2.2	Stato di attività, distribuzione e stile di attività delle frane	12
		1.2.3	Intensità dei fenomeni franosi	15
	1.3	La ca	duta massi	17
		1.3.1	Dinamica del movimento ed evoluzione del fenomeno	
		1.3.2	Metodi di analisi della caduta massi	
			1.3.2.1 Metodi lumped mass	
			1.3.2.2 Metodi rigorosi	24
			1.3.2.3 Osservazioni	
2	Ana	lisi del	rischio e vulnerabilità	

T۵	A	:	~	~
111	u	1	υ	e

	2.1	Introduzione	29	
	2.2	2 Terminologia		
	2.3	Analisi del rischio	32	
		2.3.1 Descrizione dello stato della natura	32	
		2.3.2 Valutazione dell'intensità	32	
		2.3.3 Valutazione della pericolosità	34	
		2.3.4 Valutazione degli elementi a rischio	35	
		2.3.5 Valutazione della vulnerabilità	36	
		2.3.6 Valutazione del rischio	37	
		2.3.7 Gestione del rischio	38	
	2.4	Vulnerabilità	42	
		2.4.1 Il problema della definizione	42	
		2.4.2 Inventario degli elementi a rischio	43	
		2.4.3 Approcci per la valutazione della vulnerabilità	44	
		2.4.3.1 Approccio euristico	44	
		2.4.3.2 Approccio economico	45	
		2.4.3.3 Approccio empirico	46	
		2.4.3.4 Approccio analitico	49	
		2.4.3.5 Approccio probabilistico	52	
		2.4.3.6 Incertezze nella valutazione della vulnerabilità	53	
3	Cor	nportamento delle murature	55	
	3.1	Introduzione	55	
	3.2	Materiali e caratteristiche tipologiche	56	
		3.2.1 Malte	56	
		3.2.2 Elementi resistenti in muratura	56	
		3.2.3 Murature	57	
	3.3	Caratteristiche meccaniche	57	
		3.3.1 Edifici di nuova realizzazione	58	
		3.3.2 Edifici esistenti	60	
		3.3.2.1 Determinazione dei parametri meccanici della muratura	60	
		3.3.2.2 Livelli di conoscenza e fattori di confidenza	62	
	3.4	Modalità di rottura locali	63	
		3.4.1 Modalità di rottura locali per il pannello murario	64	
		3.4.1.1 Rottura per punzonamento	64	
		3.4.1.2 Rotture per flessione verticale	66	

			3.4.1.3	Meccanismi ad arco	69
			3.4.1.4	Legge di contatto per la muratura	73
		3.4.2	Altre mo	odalità di rottura locali	74
	3.5	Moda	lità di ro	ttura globali	75
4	Valu	itazion	e quanti	tativa della vulnerabilità dei pannelli murari	79
	4.1	Intro	duzione.		79
	4.2	Schee	la di rilie	VO	
	4.3	Calco	lo delle o	curve di fragilità per i meccanismi di rottura sul pannello murario	
		4.3.1	Assunz	ioni generali	
		4.3.2	Punzor	namento	
			4.3.2.1	Assunzioni	
			4.3.2.2	Analisi	
		4.3.3	Flession	ne verticale	
			4.3.3.1	Assunzioni	
			4.3.3.2	Analisi	
		4.3.4	Meccar	ismi ad arco	
			4.3.4.1	Assunzioni	
			4.3.4.2	Analisi	121
	Con	clusion	ni		127
	Bibl	iografi	a e sitog	rafia	131
	App	endice	e A - Sim	bologia utilizzata	
	Арр	endice	e B - Ana	ilisi di simulazione per il punzonamento	
	App	endice	e C - Ana	ilisi di simulazione per la flessione verticale	
	App	endice	e D - An	alisi di simulazione per il meccanismo ad arco	179

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 -	Classificazione dei fenomeni franosi [5]5
Tabella 1.2 -	Scala di intensità dei fenomeni franosi [4]16
Tabella 1.3 -	Classificazione delle barriere paramassi [18]
Tabella 2.1 -	Scala dell'intensità delle frane in base alla velocità [4][30]33
Tabella 2.2 -	Velocità delle frane (riferita alle classi proposte da Cruden e Varnes, 1996 [4], vedi Tabella 2.1) in base alla tipologia del movimento, al materiale coinvolto e allo stato di attività. N = neoformazione; R = riattivazione [29]
Tabella 2.3 -	Classi generali per la zonazione del rischio prescritti dalla DRM [40]40
Tabella 2.4 -	Valori soglia di rischio accettabile in funzione di decessi/anno [42][43][44][45]40
Tabella 2.5 -	Categorie di elementi a rischio (per strutture e infrastrutture) [60]45
Tabella 2.6 -	Vulnerabilità espressa come danno atteso per gli elementi a rischio. A = danno superficiale (estetico, minore); F = danno funzionale (medio); S = danno strutturale (totale). Per le categorie di elementi a rischio vedere Tabella 2.5 [60]45
Tabella 2.7 -	Livelli di danno con relative energie di impatto, DI, zona di impatto e descrizione del danno [75]
Tabella 3.1 -	Classi di malte a prestazione garantita (Tabella 11.10.II di [83])56
Tabella 3.2 -	Valori di f_{k} per murature in elementi artificiali pieni e semipieni (valori in N/mm ²) (Tabella 11.10.V di [83])

Tabella 3.3 -	Valori di f_k per murature in elementi naturali di pietra squadrata (valori in N/mm ²) (Tabella 11.10.VI di [83])
Tabella 3.4 -	Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferite alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte (Tabella C8A.2.1 di [85])
Tabella 3.5 -	Valori dei parametri meccanici da assumere per ogni tipologia muraria in funzione del livello di conoscenza acquisito (i valori tabellati si riferiscono alla Tabella 3.4) [85]
Tabella 4.1 -	Valori selezionati per i parametri meccanici f_k (f_m), E e per il peso specifico γ (w) [Tabella C8A.2.1 della Circolare n. 617 del 2009][85]
Tabella 4.2 -	Valori adottati nell'analisi per i parametri meccanici f_k , E e per il peso specifico γ 85
Tabella 4.3 -	Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione dell'elemento resistente fbk per i blocchi in cemento e il laterizio
Tabella 4.4 -	Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione dell'elemento resistente <i>f</i> _{bk} per la pietra
Tabella 4.5 -	Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione della muratura f_k al variare dello stato di conservazione
Tabella 4.6 -	Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione dell'elemento fc al variare dello stato di conservazione
Tabella 4.7 -	Valori di riferimento adottati nell'analisi per il meccanismo di punzonamento87
Tabella 4.8 -	Variabili considerate nell'analisi per il meccanismo di punzonamento
Tabella 4.9 -	Calcolo dell'energia di impatto per cui si verifica il punzonamento per una muratura in laterizio, in buono stato di conservazione e spessa 0,30 m
Tabella 4.10 -	Energia di impatto per innescare il punzonamento in una muratura al variare dello spessore
Tabella 4.11 -	Valori di riferimento adottati nell'analisi per il meccanismo di flessione verticale93
Tabella 4.12 -	Carico a m ² per un solaio interpiano in legno leggero
Tabella 4.13 -	Carico a m ² per un solaio interpiano in legno pesante96
Tabella 4.14 -	Carico a m ² per un solaio interpiano in c.a97
Tabella 4.15 -	Carico a m ² per una copertura in legno leggero97
Tabella 4.16 -	Carico a m ² per una copertura in legno pesante
Tabella 4.17 -	Carico a m ² per una copertura in c.a98
Tabella 4.18 -	Variabili considerate nell'analisi per il meccanismo di flessione verticale 100
Tabella 4.19 -	Calcolo dell'energia di impatto per cui si verifica la flessione verticale per una muratura al piano primo di un fabbricato costituito da 3 piani fuori terra, con luce del solaio pari a 3 m, con la copertura a spinta eliminata, con l'orditura del solaio tale per cui il carico agisce sulla muratura esposta a monte, con il solaio interpiano e di copertura in legno leggero, con la muratura costituita da laterizio e spessa 0,30 m 101

Tabella 4.20 -	Energ	gie di impatto disposte in ordine crescente	105
Tabella 4.21 -	Incre da 3 a	ementi minimi e massimi per il frattile 90% dell'energia di impatto al p a 4 piani fuori terra	assaggio 106
Tabella 4.22 -	Energ pietra	gia di impatto al frattile 90% minima e massima per la muratura in late a e in blocchi cemento	erizio, in 108
Tabella 4.23 -	Incre dello	ementi minimi e massimi per il frattile 90% dell'energia di impatto all'au spessore della parete	mentare 110
Tabella 4.24 -	Decretipo o quella	rementi minimi e massimi per il frattile 90% dell'energia di impatto al va di orditura: dal caso per cui il solaio scarica sulla muratura esposta a a in cui scarica sulle pareti ortogonali	riare del monte a 112
Tabella 4.25 -	Energ solaic	gia di impatto al frattile 90% minima e massima per la muratura in o in legno leggero, legno pesante e in c.a	caso di 114
Tabella 4.26 -	Incre luce c	ementi minimi e massimi per il frattile 90% dell'energia di impatto al vari del solaio	are della 116
Tabella 4.27 -	Energ coper	gia di impatto al frattile 90% minima e massima per la muratura in rtura a spinta eliminata, poco spingente o spingente	caso di 118
Tabella 4.28 -	Valor	ri di riferimento adottati nell'analisi per il meccanismo ad arco	120
Tabella 4.29 -	Varia	ibili considerate nell'analisi per il meccanismo ad arco	121
Tabella 4.30-	Calco mura	olo dell'energia di impatto per cui si verifica il meccanismo ad arco atura in laterizio, in buono stato di conservazione e spessa 0,30 m	per una 123
Tabella 4.31 -	Energ blocc	gia di impatto minima e massima per la muratura in laterizio, in pie chi cemento	etra e in 124
Tabella 4.32 -	Scost variaz	tamento minimo e massimo dal valore medio del decremento dov zione dello stato di conservazione	uto alla 125
Tabella 4.33 -	Incre	emento minimo e massimo all'aumentare dello spessore della muratura	125
Tabella A.B1 -	- (Codifica variabili considerate nel meccanismo di punzonamento	145
Tabella A.B2 -	- (Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare del tipo di e resistente e dello stato di conservazione	lemento 146
Tabella A.C1 -	- (Codifica variabili considerate nel meccanismo di flessione verticale	150
Tabella A.C2.1	1 - (Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al pia al variare del numero di piani fuori terra	no terra 151
Tabella A.C2.2	2-1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al pian al variare del numero di piani fuori terra	o primo 152
Tabella A.C2.2	2-2 - 9	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al pian al variare del numero di piani fuori terra	o primo 153
Tabella A.C3.1	1 - 6	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al pia al variare della tipologia di elemento resistente	no terra 154
Tabella A.C3.2	2-1 - 9	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al pian al variare della tipologia di elemento resistente	o primo 155

Tabella A.C3.2-2 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di elemento resistente
Tabella A.C3.2-3 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di elemento resistente
Tabella A.C4.1-1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dello spessore della parete
Tabella A.C4.1-2 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dello spessore della parete
Tabella A.C4.2-1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete
Tabella A.C4.2-2 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete
Tabella A.C4.2-3 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete
Tabella A.C4.2-4 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete
Tabella A.C4.2-5 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete
Tabella A.C5.1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dell'orditura del solaio
Tabella A.C5.2-1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dell'orditura del solaio
Tabella A.C5.2-2 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dell'orditura del solaio
Tabella A.C5.2-3 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dell'orditura del solaio
Tabella A.C6.1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della tipologia di solaio
Tabella A.C6.2-1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di solaio
Tabella A.C6.2-2 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di solaio
Tabella A.C7.1-1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio
Tabella A.C7.1-2 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio
Tabella A.C7.2-1 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio
Tabella A.C7.2-2 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio

Tabella A.C7.2-3 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio
Tabella A.C7.2-4 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio
Tabella A.C8 -	Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della spinta della copertura
Tabella A.D1 -	Codifica variabili considerate nel meccanismo ad arco 180
Tabella A.D2 -	Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare del tipo di elemento resistente
Tabella A.D3 -	Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare dello stato di conservazione
Tabella A.D4 -	Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare dello spessore della parete

Indice delle figure

Figura 1.1 -	Schemi di frane da crollo in rocce lapidee [6]6
Figura 1.2 -	Frane da ribaltamento in rocce lapidee (a) e in materiali sciolti (b) [6]7
Figura 1.3 -	Frana da scorrimento rotazionale di roccia [6]8
Figura 1.4 -	Frana da scorrimento traslativo in roccia in blocco [7]9
Figura 1.5 -	Espansione laterale in rocce lapidee [6]9
Figura 1.6 -	Esempi schematici di colamenti in rocce lapidee [6]10
Figura 1.7 -	Colamenti in materiale prevalentemente fine da saturo a secco (a, b, c) [6]11
Figura 1.8 –	Spostamenti di una frana nei diversi stati di attività [4]13
Figura 1.9 –	Sezioni di frane rappresentanti diverse distribuzioni di attività. 1) avanzante, 2) retrogressiva, 3) multi-direzionale, 4) in diminuzione, 5) confinata. Nei diagrammi da 1) a 4) la sezione 2 mostra la pendenza dopo il movimento sulla superficie di rottura indicato dalla freccia taglio in sezione [4]
Figura 1.10 -	- Sezioni di frane rappresentanti diversi stili di attività. 1) complessa, 2) composita, 3) successiva, 4) singola [4]15
Figura 1.11 -	- Masso caduto sulla strada a Pontedassio il 21 novembre 2016 [3*]17
Figura 1.12 -	- Esempio di inviluppo delle altezze di rimbalzo25
Figura 1.13 -	- Esempio di inviluppo dell'energia cinetica traslazionale25
Figura 1.14 -	- Esempio di inviluppo della velocità traslazionale26

Figura 1.15 -	Esempio di distribuzione cumulata di frequenza dell'energia cinetica traslazionale26
Figura 1.16 -	Esempio di applicazione delle barriere paramassi a rete in Sils im Domleschg (Svizzera) - Sistema RXE-1000 (Geobrugg) [4*]28
Figura 2.1 –	Andamento della probabilità di impatto, vulnerabilità e37 rischio specifico in funzione dell'intensità [36]37
Figura 2.2 –	Diagramma Rt/WL e curve di accettabilità [36]
Figura 2.3 –	Esempi di curve e funzioni di fragilità (linea tratteggiata) tra l'altezza della colata di detriti e la vulnerabilità [65]47
Figura 2.4 –	Funzioni di vulnerabilità sintetiche proposte in funzione dell'altezza della colata di detriti (a) e in base alla pressione di impatto (b) [68]48
Figura 2.5 –	Curve di vulnerabilità per blocchi con velocità u pari a 2 m/s [75]51
Figura 2.6 –	Andamento teorico della vulnerabilità al variare dell'intensità per diversi valori di resistenza R [79]
Figura 2.7 -	Curve di fragilità proposte per edifici in calcestruzzo composti da uno o due piani, osservati in Valtellina, Italia [80]
Figura 3.1 -	Esempio di suddivisione in macroaree del fronte esposto di un edificio in muratura.63
Figura 3.2 -	Modello di penetrazione a due fasi per il punzonamento [87]64
Figura 3.3 -	Sviluppo del meccanismo di punzonamento con individuazione della superficie di controllo [90]
Figura 3.4 -	Schema di calcolo per il meccanismo di flessione verticale
Figura 3.5 -	Schema di calcolo per il meccanismo ad arco [93]70
Figura 3.6 -	Schema di calcolo per metà parete: a) con specificazione dell'area su cui agisce P ; b) con passaggio a una forza concentrata applicata in mezzeria dell'altezza della muratura [92][93]71
Figura 3.7 -	Diagramma della geometria del muro [93]73
Figura 3.8 -	Legame forza-indentazione (F-δ)
Figura 3.9 -	Modalità di rottura quando il blocco impatta la muratura in corrispondenza di un solaio in c.a
Figura 3.10 -	Schema ad albero dei possibili scenari di rottura globale dovuto all'impatto di un blocco di roccia
Figura 4.1 -	Scheda di rilievo speditivo; parte (1) in verde, parte (2) in azzurro (è riportata solo la sezione relativa alla tecnologia costruttiva "muratura"), parte (3) in arancione, parte (4) in rosso
Figura 4.2 -	Scheda di rilievo speditivo con i parametri considerati per l'analisi
Figura 4.3 -	Confronto impatto su area centrale e su area in prossimità del solaio (a), definizione dell'area in prossimità del solaio (b), caso limite di meccanismo di punzonamento con nuova superficie di riferimento (c)
Figura 4.4 -	Curva di fragilità di una muratura in laterizio, in buono stato di conservazione, spessa 0,30 m per punzonamento90
Figura 4.5 -	Curve di fragilità di una muratura per punzonamento al variare dello spessore92

Figura 4.6 -	Energia di impatto di rottura per punzonamento al variare dello spessore della muratura
Figura 4.7 -	Assunzioni per l'angolo tra la falda e l'orizzontale e per la sporgenza della copertura dal filo esterno della muratura
Figura 4.8 -	Scomposizione del carico di copertura in caso questa sia spingente94
Figura 4.9 -	Punti considerati per l'impatto (in rosso)
Figura 4.10 -	Volume interessato dal meccanismo di flessione verticale
Figura 4.11 -	Schema delle strutture assunte per l'analisi
Figura 4.12 -	Assunzioni per il calcolo della lunghezza della singola falda
Figura 4.13 -	Forza che causa la rottura per flessione verticale lungo l'altezza della muratura 104
Figura 4.14 -	Curva di fragilità di una muratura al primo piano di un fabbricato costituito da 3 piani fuori terra, con luce del solaio pari a 3 m, con la copertura a spinta eliminata, con l'orditura del solaio tale per cui il carico agisce sulla muratura esposta a monte, con il solaio interpiano e di copertura in legno leggero, con la muratura costituita da laterizio, spessa 0,30 m per flessione verticale
Figura 4.15 -	Incremento minimo per la muratura al piano terra al passaggio da 3 a 4 piani f.t 107
Figura 4.16 -	Incremento massimo per la muratura al piano terra al passaggio da 3 a 4 piani f.t 107
Figura 4.17 -	Incremento minimo per la muratura al piano primo al passaggio da 3 a 4 piani f.t 107
Figura 4.18 -	Incremento massimo per la muratura al piano primo al passaggio da 3 a 4 piani f.t. 108
Figura 4.19 -	Valori minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare del tipo di muratura (M-L, M-P e M-BC)
Figura 4.20 -	Valori minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare del tipo di muratura (M-L, M-P e M-BC)
Figura 4.21 -	Incremento minimo per la muratura al piano terra all'aumento dello spessore 110
Figura 4.22 -	Incremento massimo per la muratura al piano terra all'aumento dello spessore 111
Figura 4.23 -	Incremento minimo per la muratura al piano primo all'aumento dello spessore 111
Figura 4.24 -	Incremento massimo per la muratura al piano primo all'aumento dello spessore 111
Figura 4.25 -	Decremento minimo per la muratura al piano terra al variare dell'orditura 112
Figura 4.26 -	Decremento massimo per la muratura al piano terra al variare dell'orditura 113
Figura 4.27 -	Decremento minimo per la muratura al piano primo al variare dell'orditura 113
Figura 4.28 -	Decremento massimo per la muratura al piano primo al variare dell'orditura113
Figura 4.29 -	Valori minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare del tipo di solaio (S-LL, S-LP e S-CA)
Figura 4.30 -	Valori minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare del tipo di solaio (S-LL, S-LP e S-CA)
Figura 4.31 -	Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio da 3 m a 4 m
Figura 4.32 -	Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio da 4 m a 5 m

 Figura 4.34 - Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio da 4 m a 5 m	Figura 4.33 -	Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio da 3 m a 4 m 117
 Figura 4.35 - Valori minimi e massimi per la muratura al piano primo di un edifcio con 3 piani f.t. al variare della spinta della copertura (C-nSp, C-pSp e C-Sp)	Figura 4.34 -	Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio da 4 m a 5 m
Figura 4.36 - Volume interessato dal meccanismo ad arco	Figura 4.35 -	Valori minimi e massimi per la muratura al piano primo di un edifcio con 3 piani f.t. al variare della spinta della copertura (C-nSp, C-pSp e C-Sp)
 Figura 4.37 - Curva di fragilità di una muratura in laterizio, in buono stato di conservazione, spessa 0,30 m per meccanismo ad arco	Figura 4.36 -	Volume interessato dal meccanismo ad arco 120
Figura 4.38 - Valori minimi e massimi per la muratura al variare del tipo di muratura (M-L, M-P e M-BC) 124 Figura 4.39 - Incremento minimo al crescere dello spessore della muratura 125 Figura 4.40 - Incremento massimo al crescere dello spessore della muratura 126	Figura 4.37 -	Curva di fragilità di una muratura in laterizio, in buono stato di conservazione, spessa 0,30 m per meccanismo ad arco
Figura 4.39 - Incremento minimo al crescere dello spessore della muratura	Figura 4.38 -	Valori minimi e massimi per la muratura al variare del tipo di muratura (M-L, M-P e M-BC)
Figura 4.40 - Incremento massimo al crescere dello spessore della muratura	Figura 4.39 -	Incremento minimo al crescere dello spessore della muratura
	Figura 4.40 -	Incremento massimo al crescere dello spessore della muratura

Introduzione

La caduta massi, ossia il distacco di porzioni rocciose dai versanti, rappresenta uno dei maggiori pericoli ai quali sono esposte le infrastrutture presenti in ambito montano. Tra gli aspetti analizzati nell'analisi del rischio gioca un ruolo importante la vulnerabilità, ossia il grado di perdita di un elemento esposto al rischio, determinato dall'occorrenza di un fenomeno potenzialmente distruttivo, poiché dalle informazioni che si ricavano derivano processi di pianificazione delle misure di mitigazione e delle strategie di gestione dell'emergenza. Le metodologie esistenti per l'analisi della vulnerabilità sono poche e principalmente empiriche. Per questo motivo nel presente lavoro di tesi è stata sviluppata una procedura speditiva per ottenere una valutazione quantitativa della vulnerabilità degli edifici per caduta massi. In particolare è stata analizzata nel dettaglio la risposta dei fabbricati in muratura, perché sono una tipologia di edifici molto comune nelle zone di montagna.

Inizialmente sono presentate le diverse tipologie di frane e le loro caratteristiche, fornendo una descrizione più dettagliata sulla caduta massi e sui metodi di analisi esistenti (Capitolo 1).

0 - Introduzione

Nel Capitolo 2 è illustrata la procedura generale per l'analisi del rischio da frana, in cui si pone particolare attenzione alla valutazione della vulnerabilità, evidenziando la complessità del problema e studiando i diversi approcci che possono essere considerati.

Successivamente vi è una descrizione dei materiali costituenti gli edifici in muratura e delle loro caratteristiche tipologiche e meccaniche, distinguendo tra edifici di nuova realizzazione e esistenti. Sono analizzate nel dettaglio le modalità di rottura locali sui pannelli murari e in modo qualitativo quelle legate alle restanti aree di impatto della facciata esposta a monte (le aperture, le aree in corrispondenza dei solai e degli spigoli verticali e le zone in prossimità dei muri di spina). Inoltre, vengono riportate delle considerazioni generali sulle modalità di rottura globali, ossia sulla propagazione del danno locale all'intero fabbricato (Capitolo 3).

Nell'ultimo Capitolo si illustra la metodologia sviluppata per la valutazione quantitativa della vulnerabilità. A partire da una scheda di rilievo speditivo, prodotto di un progetto in collaborazione tra Politecnico di Torino e Regione Valle d'Aosta, si individuano le variabili significative per l'analisi dei meccanismi di rottura locali, le approssimazioni necessarie a rendere i calcoli sistematici e si sviluppa un'analisi di simulazione completa legata ai pannelli murari impattati da un blocco di roccia. Si arriva quindi alla valutazione quantitativa della vulnerabilità in termini di curve di fragilità, che esprimono la probabilità di rottura in funzione del contenuto energetico dell'impatto.

Capitolo 1

Le frane da crollo: caratteri generali del fenomeno

1.1 Introduzione

L'Italia è un paese dove l'esposizione al rischio di catastrofi idrogeologiche è particolarmente elevata. Le frane, estremamente diffuse sul territorio nazionale, sono le calamità naturali che si ripetono con maggiore frequenza e, dopo i terremoti, causano il maggior numero di vittime e di danni a centri abitati, infrastrutture, beni ambientali, storici e culturali [1][2].

La banca dati del Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), realizzato dal Servizio Geologico d'Italia, Dipartimento Difesa del Suolo dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e dalle Province Autonome, ha censito 614.799 frane che interessano un'area di circa 20.500 km², pari al 6,8% dell'intero territorio naziona-le¹. Il numero elevato di fenomeni franosi è legato principalmente all'assetto morfologico del paese (orografia giovane e rilievi in via di sollevamento), per circa il 75% costituito da territorio montano-collinare e alle caratteristiche meccaniche delle rocce affioranti.

¹ Dati aggiornati al 2015 per le regioni Calabria, Friuli Venezia Giulia, Piemonte, Sicilia, Toscana, Valle d'Aosta e per la Provincia Autonoma di Bolzano; al 2014 per le Regioni Liguria, Emilia Romagna e Basilicata; per le restanti regioni i dati sono aggiornati al 2007 [1*].

Tuttavia, il rischio idrogeologico è stato fortemente condizionato dalla crescente antropizzazione del territorio, con un'espansione del tessuto urbano spesso in aree instabili [1*].

Il continuo verificarsi di questi episodi ha portato a intraprendere, promuovere e finanziare numerosi studi scientifici volti all'approfondimento del fenomeno e alla definizione più puntuale delle condizioni di rischio.

Viene presentata di seguito una descrizione generale sui diversi fenomeni franosi e sulle loro principali caratteristiche, con una particolare attenzione alla caduta massi e ai contenuti energetici coinvolti.

1.2 Fenomeni franosi: aspetti generali

Il fenomeno franoso è il movimento di una massa di roccia, detrito o terra lungo un pendio, sotto l'azione della gravità, attraverso il quale si manifesta la tendenza al raggiungimento di un minimo di energia potenziale [3][4][5].

Le cause che predispongono e determinano i processi di instabilizzazione sono molteplici, complesse e spesso combinate tra loro [2*]: in un primo gruppo vi sono le cause esterne che aumentano gli sforzi di taglio, come cambiamenti della geometria, scarichi, carichi statici e dinamici, modifiche del livello della falda acquifera, variazioni delle pressioni interstiziali e cambiamenti delle condizioni di vegetazione (disboscamenti, ecc.); nel secondo gruppo sono presenti le cause interne che riducono la resistenza a taglio del materiale costituente il versante, in particolare si osservano variazioni della struttura interna per filtrazione, mutamenti delle caratteristiche di resistenza e alterazioni del materiale. Si aggiunge, inoltre, che l'innesco e l'evoluzione delle frane sono strettamente legati a fattori antropici, meteorologici e di origine tettonica.

1.2.1 Classificazione delle frane

Le frane costituiscono dei complessi fenomeni geologici e geomorfologici la cui classificazione è spesso controversa per i molteplici fattori che condizionano, favoriscono o determinano gli eventi franosi. Il sistema più usualmente adottato è quello proposto da Varnes nel 1978 [5]. Questa classificazione (Tabella 1.1) è basata su due parametri principali: la tipologia del movimento (§1.2.1.1) e la tipologia del materiale coinvolto (§1.2.1.2). Il primo parametro indica il movimento principale che caratterizza la frana, di cui si distinguono cinque classi principali (crollo, ribaltamento, scorrimento, espandimento, colamento) e una classe aggiuntiva (frane complesse) data dalla combinazione di due o più movimenti principali, mentre il secondo si riferisce a una differenziazione tra rocce e materiali granulari, a loro volta suddivisi in detriti e terre.

		Tipo di materiale			
		Dessis	Terreno		
		Roccia	Detrito	Terra	
Tipo di movimento	Crollo (Fall)	Crollo in roccia (Rock fall)	Crollo di detrito <i>(Debris fall)</i>	Crollo di terra <i>(Earth fall)</i>	
	Ribaltamento <i>(Topping)</i>	Ribaltamento in roccia (Rock topple)	Ribaltamento di detrito <i>(Debris topple)</i>	Ribaltamento di terra (Earth topple)	
	Scorrimento (Slide)	Scorrimento in roccia (Rock slide)	Scorrimento di detrito (Debris slide)	Scorrimento di terra (Earth slide)	
	Espandimento <i>(Spreading)</i>	Espandimento in roccia <i>(Rock spread)</i>	Espandimento di detrito <i>(Debris spread)</i>	Espandimento di terra <i>(Earth spread)</i>	
	Colata (Flow)	Colata in roccia (Rock flow)	Colata di detrito <i>(Debris flow)</i>	Colata di terra (Earth flow)	
	Frane complesse <i>(Complex)</i>	Combinazione di due o più tipi di movimento nello spazio e/o nel tempo			

Tabella 1.1 - Classificazione dei fenomeni franosi [5]

1.2.1.1 Tipologie di movimento

Le frane si differenziano tra loro secondo i fattori di volta in volta considerati: tipo e cause del movimento, durata e ripetitività del movimento, tipo e proprietà meccaniche del materiale interessato, caratteristiche e preesistenza o meno della superficie di distacco o di scorrimento [2*].

• Crollo (Fall)

Il termine "crollo" si riferisce a una massa di terreno o di roccia che si stacca da un versante molto acclive o aggettante e che si muove per caduta libera con rotolamenti e/o rimbalzi (Figura 1.1). Durante il movimento la massa rocciosa può essere frantumata e quindi cambiare forma e volume. Generalmente i crolli avvengono in pareti rocciose a elevata inclinazione, interessati da preesistenti discontinuità strutturali lungo le quali avvengono i distacchi. Sono fenomeni improvvisi e la velocità di spostamento del materiale è elevata.

Tra le cause determinanti si ricordano: le escursioni termiche, il gelo e disgelo, le azioni erosive delle acque superficiali alla base dei versanti, le sollecitazioni sismiche, l'effetto destabilizzante degli apparati radicali, le azioni antropiche [6].

La caduta massi, crollo di elementi lapidei da pareti rocciose o per rimobilitizzazione di massi da versante, sarà trattata più approfonditamente nel §1.3.



Figura 1.1 - Schemi di frane da crollo in rocce lapidee [6]

• Ribaltamento (Topple)

Questo tipo di frane è caratterizzato dal ribaltamento frontale del materiale che ruota intorno ad un punto situato sotto il baricentro della massa (Figura 1.2). In seguito il fenomeno può evolvere in crollo o scorrimento. Tali fenomeni sono più diffusi in corrispondenza di ammassi rocciosi che presentano elevata pendenza dei versanti, in special modo se interessati da fenomeni di intensa erosione che asportano le coperture e determinano incrementi dell'acclività.

Le cause predisponenti sono quasi sempre di tipo strutturale; tali fenomeni sono frequenti in ammassi rocciosi interessati da un andamento verticale delle fratturazioni o dei giunti di stratificazione. Le cause determinanti sono analoghe a quelle che possono intervenire nelle frane da crollo [6].



Figura 1.2 - Frane da ribaltamento in rocce lapidee (a) e in materiali sciolti (b) [6]

• Scorrimento (Slide)

Gli scorrimenti sono movimenti del terreno caratterizzati da deformazione di taglio e spostamento lungo una o più superfici di rottura localizzate a diversa profondità nel terreno. La massa dislocata si muove lungo questa superficie che rappresenta quindi il limite tra la zona instabile e quella stabile.

Secondo la morfologia della superficie di separazione, si possono distinguere due tipi di scorrimenti: rotazionali o traslazionali.

Gli scorrimenti rotazionali sono movimenti di rotazione che avvengono intorno ad un punto esterno al versante e al di sopra del baricentro della massa in movimento. La forma delle superfici di scorrimento è, di solito, arcuata e con la concavità verso l'alto (Figura 1.3). Le cause determinanti tali fenomeni sono da ricercare prevalentemente nelle acque di infiltrazione provenienti da eventi meteorici o da rotture di reti idriche o di smaltimento di rifiuti liquidi; inoltre, l'azione diretta e indiretta dei sismi può innescare tali fenomeni, anche per l'incremento delle pressioni interstiziali, derivato dal progressivo sollevamento delle superfici libere delle falde sotterranee conseguente al sisma. Tra i principali fattori sono da ricordare anche le azioni antropiche quali sbancamenti, scavi di trincee, appesantimenti dei versanti, riporti sul lato a valle di spianamenti orizzontali, ecc.

Negli scorrimenti traslativi lo scivolamento avviene per riduzione della resistenza di attrito lungo una superficie di discontinuità poco scabra e preesistente (Figura 1.4). Condizione predisponente indispensabile è che la superficie di discontinuità sia disposta con la stessa immersione del versante e con un'inclinazione uguale o minore a quella del pendio. Il movimento avviene, generalmente, con discreta velocità e nella direzione della linea di massima pendenza della superficie di discontinuità. Come per gli scorrimenti rotazionali, le cause sono tutte quelle che portano a un decremento delle resistenze di attrito lungo le superfici di discontinuità, oppure quelle che determinano improvvisi incrementi degli sforzi di taglio avviando lo scivolamento [6].



Figura 1.3 - Frana da scorrimento rotazionale di roccia [6]



Figura 1.4 - Frana da scorrimento traslativo in roccia in blocco [7]

• Espandimento (Spreading)

Queste frane si innescano prevalentemente quando una massa rocciosa lapidea e fratturata è sovrapposta a una roccia dal comportamento molto plastico. Si può verificare, allora, la mobilitazione dei blocchi rigidi sovrastanti che seguono e, nello stesso tempo, provocano le deformazioni nelle sottostanti porzioni plastiche (Figura 1.5). La velocità del fenomeno è generalmente ridotta, ma può aumentare in relazione alla pendenza della superficie di separazione dei due mezzi a comportamento diverso. Tra le cause determinanti si possono ricordare gli incrementi delle pressioni interstiziali nel substrato plastico o del carico piezometrico nelle soprastanti rocce rigide [6].



Figura 1.5 - Espansione laterale in rocce lapidee [6]

• Colamento (Flow)

I colamenti sono deformazioni plastiche che coinvolgono uno spessore estremamente variabile di terreno che scorre su una banda di scorrimento che non è possibile definire dall'esterno e che può presentare spessore variabile e discontinuità spaziale.

I colamenti delle rocce lapidee avvengono mediante spostamenti lenti e con conseguenti deformazioni plastiche e differenziali dei versanti (Figura 1.6). La velocità, generalmente bassa, varia in relazione al contenuto d'acqua, che rappresenta la causa determinante prioritaria. Le superfici di discontinuità tendono a frazionare la massa rocciosa, agevolando i movimenti differenziali che producono così rigonfiamenti e piegamenti nel materiale in movimento.

I colamenti in terreni sciolti sono caratterizzati da movimenti plastici che presentano velocità variabile da punto a punto dell'area in frana in relazione alle condizioni di saturazione (Figura 1.7) [6].



Figura 1.6 - Esempi schematici di colamenti in rocce lapidee [6]



Figura 1.7 - Colamenti in materiale prevalentemente fine da saturo a secco (a, b, c) [6]

• Frane complesse (Complex)

Sono fenomeni in cui il movimento è dato dalla combinazione di due o più tipi di frane precedentemente illustrati; spesso un tipo di fenomeno prevale sugli altri [6].

1.2.1.2 Materiali coinvolti nei fenomeni franosi

Il materiale coinvolto in una frana è distinto tra materiale lapideo e materiale sciolto, a sua volta suddiviso in terra e detrito.

La roccia è un materiale naturale dotato di elevata coesione anche dopo prolungata immersione in acqua. Quando si considera la roccia in sito con le proprie discontinuità si parla di ammasso roccioso. Il terreno è un materiale naturale formato da aggregati di granuli non legati tra loro, oppure che possono essere separati con modeste sollecitazioni o mediante contatto con l'acqua.

Le terre hanno una percentuale in peso di particelle con diametro medio dei grani minore di 2 mm pari o superiore all'80%; i detriti, al contrario, sono caratterizzati da una percentuale di particelle con diametro medio dei grani maggiore di 2 mm compresa tra il 20% e l'80%, mentre la restante parte ha diametro medio minore di 2 mm.

1.2.2 Stato di attività, distribuzione e stile di attività delle frane

Si può approfondire la classifica proposta da Varnes nel 1978 [5] evidenziando lo *stato di attività* delle frane, la *distribuzione dell'attività* e lo *stile dell'attività*. Per le definizioni di seguito riportate si fa riferimento a quanto stabilito nel 1990 dal *Working Party on World Landslide Inventory* [8] e riproposto da Cruden e Varnes nel 1996 [4].

Per descrivere lo <u>stato di attività</u> (Figura 1.8), ossia fornire le informazioni sul tempo in cui si è verificato il movimento, si possono definire i seguenti termini:

- *attiva (active)*: frana attualmente in movimento;
- *sospesa (suspended)*: frana attualmente non in movimento, ma che si è mossa nel corso dell'ultimo ciclo stagionale;
- *riattivata (reactivated)*: frana nuovamente attiva dopo uno stato di inattività che si muove generalmente su superfici di taglio preesistenti;
- *inattiva (inactive)*: frana la cui la fase di attività è antecedente l'ultimo ciclo stagionale. Le frane inattive possono essere ulteriormente suddivise in:
 - *quiescenti (dormant)*: frane in cui è possibile una riattivazione in condizioni simili alle attuali;
 - *stabilizzate*: frane in cui non si ritiene possibile una riattivazione. Possono essere *naturalmente stabilizzate (abandoned)* o *artificialmente stabilizzate (stabilized)*;
 - *relitte (relict)*: frane in cui è possibile una riattivazione in condizioni climatiche e geomorfologiche diverse da quelle attuali.



Figura 1.8 – Spostamenti di una frana nei diversi stati di attività [4]

La <u>distribuzione di attività</u> (Figura 1.9) descrive invece la direzione di movimento e permette di prevedere l'evoluzione nello spazio del fenomeno franoso. Si distinguono i seguenti casi:

- *avanzante,* se la superficie di rottura si estende nella direzione del movimento, andando a coinvolgere aree sempre maggiori verso valle;
- *retrogressiva,* se la superficie di rottura si sposta nella direzione opposta al senso del movimento, tendendo a coinvolgere aree sempre maggiori verso monte e arretrando la scarpata principale;
- *multi-direzionale,* se la superficie di rottura si estende in più direzioni;
- *in diminuzione,* se il materiale spostato diminuisce nel tempo;
- *confinata*, se è presente una scarpata, ma non è visibile la superficie di scorrimento al piede della massa spostata;
- *costante*, se il materiale spostato continua a muoversi senza variazioni apprezzabili del volume di materiale coinvolto e della superficie di rottura; il movimento avviene con gradualità e costantemente nel tempo;
- *in allargamento*, se la superficie di rottura si estende su uno o su entrambi i lati della frana.



Figura 1.9 – Sezioni di frane rappresentanti diverse distribuzioni di attività. 1) avanzante, 2) retrogressiva, 3) multi-direzionale, 4) in diminuzione, 5) confinata. Nei diagrammi da 1) a 4) la sezione 2 mostra la pendenza dopo il movimento sulla superficie di rottura indicato dalla freccia taglio in sezione [4]

Lo <u>stile di attività</u> (Figura 1.10) indica come i diversi tipi di movimento contribuiscono al fenomeno franoso. Una frana può definirsi:

- *complessa:* caratterizzata da più movimenti successivi;
- composita: combinazione simultanea di più movimenti diversi;
- *successiva:* caratterizzata da movimenti successivi dello stesso tipo e i materiali coinvolti e le superfici di rottura rimangono distinti;
- *singola:* quando la dislocazione avviene con la mobilizzazione di un ammasso unico e secondo un'unica tipologia di movimento;
- *multipla:* quando lo stesso tipo di movimento si ripete più volte, coinvolgendo masse già dislocate in precedenza.



Figura 1.10 – Sezioni di frane rappresentanti diversi stili di attività. 1) complessa, 2) composita, 3) successiva, 4) singola [4]

1.2.3 Intensità dei fenomeni franosi

La determinazione dell'intensità di un fenomeno esistente o potenziale costituisce un aspetto di fondamentale importanza, al fine di prevedere in modo adeguato gli effetti indotti sugli elementi esposti. L'intensità dell'evento franoso si traduce in energia di impatto E, per cui essa è funzione della velocità v e della massa m secondo la relazione riportata di seguito:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Secondo l'approccio proposto da Cruden e Varnes [4], si individuano 7 classi di intensità (Tabella 1.2), in cui questa è associata alla velocità della massa in movimento. In particolare, le classi sono limitate da valori di velocità e caratterizzate da una descrizione del danno osservabile: le prime due sono caratterizzate da significativi danni alle strutture; per le classi 3 e 4 sono possibili lavori di rinforzo e di stabilizzazione del pendio e infine per le classi da 5

a 7 gli edifici subiscono notevoli danni e la stessa vita umana è messa in pericolo. Ne consegue che in questi ultimi casi è necessario attuare interventi di salvaguardia dell'incolumità delle persone.

La velocità che una determinata frana può raggiungere dipende da una serie di fattori legati alla morfologia del pendio, alla geometria dell'eventuale superficie di scorrimento, alle proprietà e al comportamento del materiale (fragilità, deformabilità, condizioni di drenaggio). Un fenomeno franoso può muoversi in un ampio intervallo di velocità, in funzione delle differenze di inclinazione del versante, del contenuto in acqua del materiale trasportato e della presenza di ostacoli quali la copertura boschiva.

Classe Descrizione		Danni osservabili	Velocità
7	Estremamente rapida	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	> 5 m/s
6	Molto rapida	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	3 m/min ÷ 5 m/s
5	Rapida	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	1,8 m/ora÷ 3 m/min
4	Moderata	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	13 m/mese ÷ 1,8 m/ora
3	Lenta	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	1,6 m/anno ÷ 13 m/mese
2	Molto lenta	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	16 mm/anno ÷ 1,6 m/anno
1	Estremamente lenta	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni.	< 16 mm/anno

Tabella 1.2 - Scala di intensità dei fenomeni franosi [4]

1.3 La caduta massi



Figura 1.11 – Masso caduto sulla strada a Pontedassio il 21 novembre 2016 [3*]

Tra i fenomeni di instabilità lungo i versanti rocciosi, la caduta massi è particolarmente rilevante in quanto comporta una grande variabilità in termini di ricorrenza e intensità legata al contenuto energetico.

La caduta massi è una caratterizzazione del fenomeno di crollo quando i volumi coinvolti sono elementi lapidei, che muovendosi sul versante, possono raggiungere grandi energie cinetiche con velocità che possono arrivare fino a 40 m/s. Il fenomeno può coinvolgere un unico blocco o più blocchi con interazione reciproca trascurabile [9]. La caduta massi rappresenta uno dei rischi più frequenti nel territorio nazionale, in particolar modo negli ambienti montani, con gravi conseguenze sulla percorribilità dei tratti viari, sulle infrastrutture, e conseguenti gravi disagi ai centri abitati (Figura 1.11).

Come avviene per numerosi fenomeni franosi, è possibile suddividere la caduta massi nelle tre aree in cui si manifesta il fenomeno: zona di *innesco*, zona di *propagazione (run-out)* e zona di *arresto*. Per la caduta massi tale suddivisione risulta più complessa rispetto agli altri fenomeni di instabilità, in quanto i confini tra innesco, propagazione e arresto non sono ben definiti, poiché durante il crollo vi è una continua sovrapposizione di aree di innesco e di zone di arresto parziale dei volumi rocciosi, con ripresa del movimento in seguito ad urti e incrementi delle pendenze [10].

- <u>Zona di innesco</u>: area in cui avviene il distacco per scorrimento traslazionale lungo una o più superfici, o per ribaltamento o per distacco puro. Quest'area viene definita nicchia di distacco e può essere localizzata se il fenomeno riguarda un singolo cuneo di roccia delimitato dalle discontinuità, o diffusa, se la caduta massi è relativa a un'area che presenta numerose fratture che individuano blocchi instabili. Il distacco dei blocchi da un versante è fortemente influenzato dalle condizioni strutturali dell'ammasso (famiglie di discontinuità, persistenza, spaziatura), dalle caratteristiche meccaniche dell'ammasso (resistenza a taglio delle discontinuità, resistenza a trazione di eventuali ponti di roccia) e da eventuali sollecitazioni esterne (presenza di acqua in pressione nelle discontinuità, sismi, ecc.).
- <u>Zona di run-out</u>: area localizzata tra il distacco del blocco e l'area di arresto. Durante la propagazione il blocco percorre traiettorie aeree tra rimbalzi successivi e interagisce con il pendio attraverso scivolamenti, rotolamenti e rimbalzi (§1.3.1).
- <u>Zona di arresto</u>: area in cui il materiale si deposita in seguito alla dissipazione della sua energia cinetica.

1.3.1 Dinamica del movimento ed evoluzione del fenomeno

Una volta avvenuto il distacco dalla parete, il fenomeno è controllato dalla forza di gravità che, a prescindere dalla dimensione del blocco, lo conduce verso una zona con potenziale cinetico minore [10].

La discesa a valle si verifica attraverso le due seguenti modalità:

• Traiettorie aeree

Il blocco, tra rimbalzi successivi, può muoversi seguendo un cinematismo di **caduta a gittata** o di **caduta libera**. Il primo tipo di moto avviene quando il blocco ha una velocità iniziale non nulla dovuta alle sollecitazioni quali spinta idraulica, sollecitazioni sismiche, ecc. La caduta libera è equivalente alla caduta a gittata con la componente orizzontale della velocità iniziale nulla. Il moto è descritto da traiettorie di tipo parabolico ed è caratterizzato da velocità elevate [10].

• Interazioni blocco-pendio

Durante il run-out il blocco interagisce con il pendio disperdendo energia tramite scivolamenti, rotolamenti, rimbalzi e frantumazione. Per studiare tali interazioni risulta fondamentale conoscere il peso, la forma e la dimensione del blocco, che possono variare dopo ogni impatto, la topografia del pendio, la natura e le caratteristiche meccaniche dei materiali a contatto, compresa la vegetazione presente sul pendio [10].

Lo **scivolamento** lungo un pendio avviene con velocità angolare del blocco nulla e con velocità di traslazione funzione dell'attrito dinamico e dell'inclinazione del piano. Tale moto si manifesta generalmente ai piedi della parete rocciosa o in tutti quei siti in cui i fenomeni di arresto/deposito prevalgono sui moti di accelerazione, ha luogo su corte distanze, è caratterizzato da basse velocità e da una considerevole dissipazione di energia per attrito.

Il **rotolamento** si osserva solo in blocchi di forma sferica, ovale o cilindrica, quando il versante presenta superfici pseudo piane, a bassa inclinazione e scarsa rugosità delle superfici. Durante il moto il blocco possiede velocità angolare non nulla, al contempo, si ha una riduzione della velocità di traslazione e il masso può percorrere una distanza di run-out maggiore, legata, quindi, a una minor perdita di energia rispetto allo scivolamento.

I moti di scivolamento e rotolamento possono essere combinati individuando la rototraslazione.

Il **rimbalzo** costituisce un momento di collisione tra il blocco e il pendio, durante il quale generalmente il masso, o i frammenti generati dalla sua frantumazione, perdono gran parte dell'energia cinetica attraverso le deformazioni della superficie di impatto e possono cambiare direzione. Durante l'urto le forze esterne, ossia gravità e attrito, sono trascurabili rispetto alle forze interne impulsive che si scambiano i corpi. Le forze interne non modificano la quantità di moto totale del sistema, quindi il moto è ricavato nell'ipotesi di validità del principio di conservazione della quantità di moto e dell'energia totale.

La complessità dell'interazione tra il blocco e il pendio, dipendente dalla forma del blocco, ha portato numerosi autori [11][12][13] a proporre un approccio semplificato ricorrendo a un parametro, chiamato coefficiente di restituzione, per descrivere l'azione dinamica del rimbalzo.

Il **coefficiente di restituzione** esprime la perdita di energia cinetica durante la collisione come rapporto tra i valori di velocità dopo e prima dell'impatto:

$$R = \frac{V'_1}{V_1}$$

Dove:

 V'_1 è la velocità del blocco dopo il rimbalzo

 V_1 è la velocità del blocco prima del rimbalzo

Analisi sperimentali hanno evidenziato che si ottengono risultati migliori separando gli effetti delle componenti della velocità normale (pedice n) e tangenziale (pedice t) al pendio:

$$R_n = \frac{V'_{1n}}{V_{1n}} \qquad \qquad R_t = \frac{V'_{1t}}{V_{1t}}$$

Per ricavare i valori dei coefficienti di restituzione è possibile:

- ricorrere a prove di caduta massi in sito in modo da ottenere i parametri cercati dalle velocità misurate. Si tratta, però, di prove poco sostenibili a causa dei costi e della complessità;
- utilizzare tabelle fornite da diversi autori [12][14], in cui i parametri sono espressi in funzione del materiale e della vegetazione costituente il pendio. Tuttavia, il confronto dei coefficienti suggeriti evidenzia incongruenze causate dall'imprecisione delle definizioni;
- far riferimento a *back analysis*, ossia ad analisi a ritroso di fenomeni simili avvenuti in passato in quello stesso versante, per cui si conoscono le innumerevoli variabili tra cui forma e dimensione del blocco, zona percorsa dal blocco in caduta, area di arresto, stima del contenuto energetico, ecc. ed è possibile creare un modello che li rappresenti "tarando" opportunamente i parametri cinematici e fisici in modo tale da adattarli alle condizioni reali riscontrate in sito.

In generale, i valori dei coefficienti di restituzione sono caratterizzati da un'incertezza molto elevata, dovuta al fatto che la dissipazione energetica è funzione di diversi fattori combinati in modo aleatorio. Per questo motivo è necessario tenere conto della variabilità statistica dei parametri in gioco.

1.3.2 Metodi di analisi della caduta massi

Le frane da crollo in roccia rappresentano fenomeni di dissesto complessi per la loro modellazione, in quanto entrano in gioco aspetti molto diversi, dalla valutazione dell'equilibrio geostatico dei blocchi alla previsione delle traiettorie di propagazione dei massi. Il processo
è schematizzabile in modo semplice per quanto riguarda i meccanismi che lo governano, ma risulta complicato dal fatto che la definizione dei parametri che controllano i fenomeni di rottura ed evoluzione risente di un grado elevato di incertezza; inoltre, l'ampia estensione delle aree coinvolte rende difficile raccogliere informazioni sufficienti per condurre analisi dettagliate. Anche la traiettoria di un masso in caduta dipende da una serie di fattori, quali la localizzazione dell'area di distacco, le condizioni strutturali dell'ammasso in tale area, la geometria del masso, le proprietà meccaniche della roccia e del versante, la topografia, difficili da verificare sul terreno e che non possono essere determinati con esattezza [15].

Negli anni le conoscenze sui processi di crollo, in particolare gli studi sulla propagazione dei massi, sono stati approfonditi con approcci di diversa natura [10][16][17].

I metodi di calcolo oggi più utilizzati sono distinti in:

- *lumped mass:* modelli che considerano il blocco puntiforme e la massa concentrata in un punto;
- *metodi rigorosi:* modelli che tengono conto della forma e della dimensione del blocco.

È possibile combinarli ottenendo un *metodo ibrido* che considera il metodo *lumped mass* per il volo nell'aria e il *metodo rigoroso* per il moto sul versante.

Esiste poi un'importante distinzione tra i software che ricostruiscono il moto in tre dimensioni e quelli che operano su sezioni bidimensionali, nel qual caso l'analisi è svolta in generale seguendo il profilo di massima pendenza del pendio.

La maggior parte dei metodi permette di costruire un modello rappresentativo del fenomeno franoso ricorrendo a valutazioni probabilistiche, in altre parole assegnando una distribuzione statistica ai parametri ed eseguendo un elevato numero di simulazioni. Per ogni analisi i valori dei parametri sono estratti casualmente all'interno della relativa distribuzione statistica tramite metodi di estrazione random (per esempio il metodo Monte Carlo).

La validità di ogni modello è funzione della descrizione dei diversi fenomeni fisici e dell'affidabilità dei parametri di input scelti. In particolare per eseguire l'analisi occorre svolgere le seguenti fasi:

- definizione del profilo del versante (in 2D) o della superficie (in 3D);
- individuazione della nicchia di distacco;
- individuazione delle dimensioni del blocco e calcolo della massa;

- scelta della velocità iniziale del blocco;
- scelta dei parametri di restituzione dei materiali costituenti il versante;
- definizione dei parametri di resistenza dei materiali costituenti il versante;
- scelta del numero di simulazioni.

Nelle analisi bidimensionali la definizione del profilo del versante percorso dai blocchi è funzione della morfologia e delle condizioni delle superfici del versante, delle caratteristiche meccaniche del suolo e del blocco, del cinematismo che in ogni tratto di versante possiede il blocco. Inoltre, la scelta della sezione del versante deve considerare anche l'ubicazione delle opere a rischio. Per tener conto di tutti questi fattori è possibile assegnare una distribuzione normale alle coordinate dei vertici che determinano il profilo della sezione, in modo che il codice di calcolo possa estrarre in modo casuale i valori delle coordinate ogni volta che si esegue una simulazione. In 3D occorre un Modello Digitale del Terreno (DTM), i cui vertici possono essere trattati statisticamente.

Per individuare la nicchia di distacco è possibile far riferimento a fenomeni avvenuti nel passato, ad osservazioni sulla morfologia del versante, in modo da evidenziare i tratti di parete a maggiore inclinazione, e a osservazioni della parete per eventuali segni indicatori di volumi di roccia distaccatisi. Si può indicare nel codice di calcolo un'area, oppure nel caso bidimensionale una linea, definita dalle coordinate dei vertici, da cui è possibile il distacco del blocco. Per ogni simulazione sarà estratto in modo casuale, dalla linea/area di distacco, un punto rappresentante l'inncesco del movimento.

Per individuare le dimensioni del blocco si considerano eventi avvenuti in passato, eventuali blocchi presenti al piede del versante, distaccatisi in precedenti crolli, analisi dei sistemi di discontinuità che interessano il versante. Si calcola la massa del blocco in base al peso per unità di volume stimato per la roccia costituente l'ammasso. Nei codici di calcolo, per tener conto dell'incertezza nella determinazione del volume caratteristico, è possibile assegnare alla massa del blocco una distribuzione statistica.

La scelta della velocità iniziale del blocco dipende dalla causa scatenante il distacco e dalla tipologia dell'eventuale cinematismo cui è soggetto il blocco prima di giungere nella posizione indicata nel modello come nicchia. L'incertezza legata alla definizione della velocità può essere valutata applicando una distribuzione statistica. Per la scelta dei parametri di restituzione, come descritto nel §1.3.1, si fa riferimento a: prove in sito, valori tabellati presenti in letteratura e *back analysis*. Anche per i parametri di restituzione è possibile associare una distribuzione statistica all'interno dei codici di calcolo.

Tra i principali parametri di resistenza dei materiali costituenti il versante si considerano l'angolo di attrito e la scabrezza della superficie del versante. Entrambi i parametri sono caratterizzati da elevata incertezza nella determinazione, in quanto l'angolo di attrito è funzione di come si assimila il blocco, mentre per la scabrezza la valutazione è particolarmente difficile. Per tener conto di queste variabili è possibile assegnare una distribuzione statistica.

Il numero di simulazioni da effettuare nel caso di analisi di stabilità per caduta massi deve essere sufficientemente elevato. Le norme ETAG 27 [18] suggeriscono un numero minimo di 1000 simulazioni, ma questo aspetto dovrebbe essere oggetto di studio preliminare.

1.3.2.1 Metodi *lumped mass*

Il blocco, considerato come un punto con massa m e velocità iniziale V_0 dovuta al meccanismo di innesco, percorre un primo tratto con traiettoria balistica (in genere si trascura la resistenza dell'aria) e successivamente il moto è costituito da una serie di rimbalzi lungo una superficie topografica. A ogni urto col terreno, le componenti normale e tangenziale della velocità, in riferimento al piano di impatto, subiscono una variazione dovuta a una perdita di energia per deformazioni elastoplastiche. Si adotta come parametro il coefficiente di restituzione, definito dal rapporto tra la velocità del masso dopo e prima dell'impatto.

I metodi *lumped mass*, considerando la massa concentrata in un punto, non permettono di trasferire i momenti traslazionali in rotazionali e viceversa in corrispondenza degli impatti. Pertanto, alcune procedure introducono un nuovo parametro, denominato coefficiente di rotolamento equivalente, che consente di passare da movimenti di rimbalzo a movimenti di rotolamento.

Tra i modelli *lumped mass* si ricordano: ROTOMAP [13], codice di calcolo tridimensionale che permette di considerare traiettorie di caduta massi condizionate solo dalla topografia e dai materiali attribuiti al versante.

1.3.2.2 Metodi rigorosi

I *metodi rigorosi* assegnano al blocco una particolare forma geometrica, tramite analisi statistiche su eventi già avvenuti, e studiano l'impatto blocco-terreno imponendo la conservazione del momento della quantità di moto. Quando il baricentro non coincide con il punto di impatto, quest'ultimo diviene punto di rotazione del blocco e può avvenire un cambiamento del meccanismo da movimenti per rimbalzi a movimenti rotatori.

Un esempio di metodo rigoroso è quello usato nel codice di calcolo *CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program)* messo a punto da Pfeiffer e Bowen nel 1989 [12][19]. In particolare si modella il moto di caduta di blocchi aventi la forma di sfere, cilindri o dischi, con sezione circolare nel piano verticale del movimento. Tale metodo analizza le traiettorie di caduta massi e fornisce analisi statistiche della velocità, dell'energia cinetica e dell'altezza dei rimbalzi in diversi punti della scarpata. I parametri fisici richiesti dal software per modellare il fenomeno di impatto sono: coefficienti di restituzione normale e tangenziale al pendio, rugosità del versante e dimensione dei blocchi.

Un altro codice di calcolo che adotta il metodo rigoroso è Rockyfor3D [20]. Questo programma, oltre a essere un modello probabilistico che utilizza un DTM per rappresentare la superficie e mappe raster per l'inserimento dei parametri, permette di tenere conto della presenza degli alberi durante il crollo di roccia.

1.3.2.3 Osservazioni

Le finalità dei modelli di calcolo riguardano la delimitazione delle aree esposte al rischio di caduta massi, tramite analisi delle possibili conseguenze di un ipotetico crollo, e la conseguente scelta e il dimensionamento delle opere di protezione paramassi [21].

Esistono numerosi software in grado di effettuare simulazioni di caduta massi servendosi dei modelli di calcolo sopra citati. Ad esempio il software *RocFall* [22] assiste gli ingegneri tramite simulazioni probabilistiche della caduta massi, per il progetto degli interventi di difesa e per testarne la loro efficacia. In particolare il programma applica un modello di calcolo bidimensionale e permette di eseguire le analisi scegliendo tra il metodo *lumped mass*, il *metodo rigoroso* e il *metodo ibrido*.

Come già precedentemente illustrato, per tener conto del problema della definizione dei parametri, si assegna ad essi una distribuzione statistica tramite diverse funzioni, tra cui la più caratteristica è quella gaussiana. I risultati principali che si ottengono dall'analisi sono forniti in termini statistici: andamento delle altezze di rimbalzo, delle energie cinetiche e delle velocità del masso per i punti del profilo scelti dall'utente. Inoltre, è possibile estrapolare l'inviluppo dato dai valori massimi in ciascun punto del profilo (Figure 1.12, 1.13 e 1.14) e ricavare di conseguenza distribuzioni cumulate di frequenza (Figura 1.15).



Figura 1.12 – Esempio di inviluppo delle altezze di rimbalzo



Figura 1.13 – Esempio di inviluppo dell'energia cinetica traslazionale



Figura 1.14 – Esempio di inviluppo della velocità traslazionale



Figura 1.15 – Esempio di distribuzione cumulata di frequenza dell'energia cinetica traslazionale

La rilevanza delle simulazioni è relativa prevalentemente alla stima dell'impatto tra il masso e le abitazioni esistenti.

Per avere un'indicazione sull'ordine di grandezza dei contenuti energetici in gioco nei fenomeni di caduta massi si può fare riferimento ai valori limite relativi alla classificazione dei livelli di energia, definita dalle norme riguardanti gli interventi di protezione, quale ad esempio la norma europea ETAG 27 [18], richiamata di seguito.

Secondo la classificazione più diffusa in merito alle diverse tipologie di intervento per la protezione si distinguono:

- interventi di stabilizzazione: intervengono all'origine del problema impedendo il distacco degli elementi lapidei dal versante;
- opere di difesa: intercettano o deviano i massi che si siano mobilizzati con interventi localizzati prevalentemente alla base dei pendii o delle pareti rocciose. Tali opere consentono il verificarsi del fenomeno, ma lo arrestano durante la sua dinamica prima che impatti un elemento a rischio.

In particolare le opere di difesa possono essere distinte in barriere paramassi a rete, reti in aderenza e rilevati paramassi.

Le barriere paramassi a rete più diffuse (Figura 1.16) hanno una capacità di assorbimento dell'energia compresa tra 100 e 5000 kJ. Ad oggi, la migliore rete prodotta può ricevere fino a 8000 kJ, pari a un peso di 20 t lanciato a oltre 100 km/h [4*]. La norma europea ETAG 27 [18] descrive le procedure e le prove da realizzare sulle barriere paramassi a rete utilizzate per l'arresto di blocchi rocciosi su di un pendio, e fornisce una classificazione delle stesse in funzione dei contenuti energetici assorbibili. In particolare, la norma definisce due differenti livelli energetici:

- SEL (*Service Energy Level*), definito come l'energia cinetica di un blocco omogeneo e regolare che impatta la rete della barriera considerata, consente di verificare che il sistema di intercettazione sia in grado di intervenire efficacemente anche per controllare eventi di minore entità rispetto a quelli indotti dal blocco di progetto, ma con maggior frequenza di accadimento, senza che sia necessario, realizzare, tra un evento e l'altro, importanti interventi di ripristino o di manutenzione;
- MEL *(Maximum Energy Level)*, definito come l'energia cinetica di un blocco omogeneo e regolare che impatta la barriera con un'energia superiore o pari a 3 volte SEL.

1 - Le frane da crollo: caratteri generali del fenomeno

La classificazione dei livelli di energia considera per SEL valori variabili da 85 kJ a valori superiori i 1.500 kJ, per MEL valori variabili da 100 kJ a valori superiori i 4.500 kJ (Tabella 1.3).

Bisogna tuttavia tenere presente che nei casi reali si possono raggiungere valori anche molto più alti di quelli individuati dalla norma ETAG 27. In questo caso l'opera di difesa dovrà essere diversa.



Figura 1.16 – Esempio di applicazione delle barriere paramassi a rete in Sils im Domleschg (Svizzera) - Sistema RXE-1000 (Geobrugg) [4*]

Classificazione livello di energia	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

	Tabella 1.3 - Classificazione	delle barriere	paramassi	[18]	ſ
--	-------------------------------	----------------	-----------	------	---

Capitolo 2

Analisi del rischio e vulnerabilità

2.1 Introduzione

I crolli sono processi molto frequenti nelle aree montane e costituiscono un'importante causa di danni e vittime. La valutazione della pericolosità derivante dai crolli è pertanto un tema di grande interesse per tecnici, amministratori e pianificatori locali [23]. I motivi della crescente attenzione riguardante le frane sono duplici: in primo luogo vi è una maggiore consapevolezza del significato socio-economico del fenomeno franoso, in secondo luogo vi è l'aumento della pressione di sviluppo e di urbanizzazione sull'ambiente [24].

L'analisi e la valutazione del rischio presentano una notevole complessità essendo dipendenti da diverse caratteristiche del territorio quali gli aspetti culturali, gli aspetti legislativi, l'organizzazione delle autorità e delle amministrazioni, la ricchezza e la densità della popolazione, l'interazione tra l'ambiente naturale, l'ambiente umano, l'ambiente costruito, ecc. [25].

Gli studi relativi a questi argomenti si sono moltiplicati, spaziando dall'analisi della cinematica vera e propria, allo studio della pericolosità con zonazione del rischio, alla progettazione delle opere di difesa più idonee. Nel presente capitolo sarà illustrata la procedura generale per la valutazione del rischio da frana, con particolare attenzione al ruolo giocato dalla vulnerabilità.

2.2 Terminologia

La maggior parte della letteratura disponibile è basata sulla terminologia tecnica introdotta da Varnes e IAEG nel 1984 [26] e su piccole variazioni proposte da altri autori [4][27][28]. Per una maggiore e univoca comprensione dei concetti espressi nel seguito, si riportano le definizioni degli elementi legati alla valutazione del rischio.

Danno atteso (D): Entità delle perdite potenziali nel caso di un evento con una certa intensità. Convenzionalmente, D è espresso come il prodotto del valore dell'elemento a rischio (E) per la vulnerabilità (V). L'unità di misura con cui si indica il danno dipende dall'unità di misura utilizzata per indicare il valore.

$$D = E \times V$$

Elemento a rischio (E): entità (popolazione, proprietà, attività economiche, ecc.) esposte a rischio in una data area.

Esposizione al rischio (E_s) : probabilità (P) che un elemento (E) sia esposto al rischio all'occorrenza di un fenomeno di una certa intensità, in un certo momento e in un certo luogo. È, quindi, la probabilità che un certo elemento sia soggetto a una certa pericolosità.

$$E_s = P(E)$$
 $E = E(x, y, z, t)$

Intensità (*Magnitude*): misura dell'intensità del fenomeno, espressa in termini di energia, severità geometrica e meccanica. Può essere espressa in una scala relativa oppure in termini di una o più grandezze caratteristiche del fenomeno (volume, velocità, energia, ecc.).

Pericolo (*Danger***)**: fenomeno naturale caratterizzato dal punto di vista geometrico e meccanico, che può produrre effetti negativi per l'uomo e per l'ambiente. Il pericolo è rappresentato dall'intensità del processo e dall'area coinvolta.

Pericolosità (Hazard) (H): probabilità (P) di occorrenza di un fenomeno (F) potenzialmente dannoso in un determinato intervallo di tempo e in una certa area. La pericolosità include condizioni latenti rappresentanti una futura minaccia per l'uomo e l'ambiente e generalmente è espressa in termini di probabilità annua.

$$H = P(F)$$
$$F = F(x, y, z, t)$$

Rischio (R): probabilità che si verifichino conseguenze negative (per la vita umana, per i beni e le risorse, per le attività economiche o per l'ambiente) derivanti dall'interazione tra l'evoluzione di eventi naturali e le aree antropizzate. Convenzionalmente R è espresso come moltiplicazione della pericolosità (H) per il danno atteso (D).

$$R = H \times D$$

Rischio accettabile: rischio che, per ragioni di vita o di lavoro, la società è pronta ad accettare così com'è senza alcun riguardo alla sua gestione. Generalmente la società considera come non giustificabili le spese necessarie all'ulteriore riduzione di tale rischio.

Rischio residuo (R_r): livello di rischio ancora presente a seguito degli interventi di mitigazione e prevenzione adottati, che producono una variazione del livello di rischio (ΔR).

$$R_r = R_t - \Delta R$$

Rischio specifico (R_s) : grado di perdita atteso dovuto a un particolare evento naturale potenzialmente distruttivo. È espresso dal prodotto tra la pericolosità (H), la vulnerabilità (V) e l'esposizione al rischio (E_s) .

$$R_s = H \times V \times E_s$$

Rischio totale (R_t) : numero atteso di vittime, feriti, danno alle proprietà, distruzione di attività economiche, dovuti a un particolare fenomeno. È espresso dal prodotto del rischio specifico (R_s) per il valore degli elementi a rischio (W), e rappresenta l'insieme dei danni derivanti dall'evento franoso.

$$R_t = H \times V \times E_s \times W$$

Suscettibilità: probabilità che in una determinata area si verifichi un evento naturale potenzialmente distruttivo.

Valore dell'elemento a rischio (W): valore economico o numero di unità relativo a ognuno degli elementi a rischio.

Vulnerabilità (V): grado di perdita prodotto da un fenomeno potenzialmente distruttivo di data intensità, su un dato elemento a rischio; il suo valore varia da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale).

2.3 Analisi del rischio

La valutazione e la gestione del rischio da frana comprendono la stima del livello di rischio, stabilendo se esso sia accettabile o meno e, in caso non sia accettabile, si individuano le adeguate strategie di mitigazione.

La valutazione del rischio, al di là delle problematiche specifiche legate ai differenti fenomeni pericolosi, richiede in generale una procedura sviluppata su più livelli:

- 1) descrizione dello stato della natura;
- 2) valutazione dell'intensità;
- 3) valutazione della pericolosità;
- 4) valutazione degli elementi a rischio;
- 5) valutazione della vulnerabilità;
- 6) valutazione del rischio;
- 7) gestione del rischio.

2.3.1 Descrizione dello stato della natura

Per eseguire una valutazione del rischio occorre conoscere:

- la tipologia del fenomeno potenzialmente pericoloso ed eventi passati e presenti avvenuti nell'area in esame. Si può fare riferimento a carte inventario, dati storici, dati geotecnici, geomeccanici, morfometrici, dati di monitoraggio;
- fattori di controllo del fenomeno potenzialmente pericoloso. Ci si può riferire a: topografia e geomorfologia, geologia (litologia, caratteristiche geostrutturali, dati sismici, ecc.), vegetazione e uso del suolo, idrologia (precipitazioni, temperature, drenaggi, ecc.).

L'operazione di raccolta di informazioni, spesso gravosa per la difficoltà di reperimento dei dati, è diventata più semplice e veloce con l'ausilio di sistemi informativi geografici (GIS).

2.3.2 Valutazione dell'intensità

Per le frane è preferibile definire la severità del fenomeno a priori rispetto alle conseguenze attese in base alle sole caratteristiche geometriche, cinematiche e meccaniche [29].

Si distinguono tre approcci per la valutazione dell'intensità: mono-parametrico, multiparametrico e integrato con valutazione delle conseguenze del fenomeno.

- <u>Approccio mono-parametrico</u>: la valutazione dell'intensità è eseguita misurando o stimando uno dei parametri legati all'intensità:
 - si può considerare come fattore la velocità del movimento di frana, assumendo che le frane siano tanto più severe quanto più sono veloci (Tabella 2.1) [4][30], oppure in base alla tipologia dell'evento franoso, al materiale coinvolto e al suo stato di attività [29] (Tabella 2.2);
 - per quantificare l'intensità dei fenomeni franosi si può adottare come criterio la dimensione della massa coinvolta, considerando una frana tanto più severa quanto più è estesa [31];
 - infine, un altro parametro può essere l'energia cinetica sviluppata dalla frana, da cui si ottiene l'intensità come prodotto dell'area di frana per il quadrato della velocità, quantità proporzionale all'energia cinetica sviluppata.

	Hungr (1981)			
Classe	Descrizione	Velocità	Velocità [mm/s]	Velocità [mm/s]
7	Estremamente rapida	5 m/s	5×10^{3}	1,1×10 ³
6	Molto rapida	3 m/min	50	
5	Rapida	1,8 m/ora	0,5	
4	Moderata	13 m/mese	5×10-3	3,5×10-3
3	Lenta	1,6 m/anno	5×10-5	3,5×10-5
2	Molto lenta	16 mm/anno	0,5×10-6	
1	Estremamente lenta			

Tabella 2.1 - Scala dell'intensità delle frane in base alla velocità [4][30]

Tipologia	Crollo			Scivolamento	Colamento				
Materiale	roccia	roccia		detrito	ter	rra	roccia	detrito	terra
Stato di attività	-	Ν	R	-	Ν	R	-	-	-
Classe di velocità	6-7	5-6	1-5	1-6	5-6	1-5	1-2	1-7	1-4

Tabella 2.2 - Velocità delle frane (riferita alle classi proposte da Cruden e Varnes, 1996 [4], vedi Tabella 2.1) in base alla tipologia del movimento, al materiale coinvolto e allo stato di attività. N = neoformazione; R = riattivazione [29]

<u>Approccio multi-parametrico</u>: nella valutazione si esamina l'influenza di più parametri contemporaneamente. Le stime possono essere euristiche, assegnando a priori dei punteggi ai parametri in base al loro peso, o deterministiche, utilizzando modelli fisici e meccanici finalizzati al calcolo dell'energia in gioco che permettono di ottenere un valore finale quantitativo. <u>Approccio integrato con valutazione delle conseguenze del fenomeno</u>: si valuta l'intensità tenendo conto implicitamente della vulnerabilità degli elementi a rischio. La stima è eseguita in base alle dimensioni fisiche del fenomeno, a possibili conseguenze sull'incolumità umana e sui costi economici per la mitigazione del fenomeno.

2.3.3 Valutazione della pericolosità

La valutazione della pericolosità consiste nella caratterizzazione dell'imprevedibilità di un fenomeno franoso di determinate caratteristiche. Tale valutazione è generalmente complessa e richiede la quantificazione, sia a livello spaziale sia temporale, della probabilità di occorrenza dell'evento.

I metodi per la valutazione della pericolosità possono essere euristici (stime soggettive e qualitative), statistici (studiano le relazioni statistiche tra fattori di controllo e pericolosità) e deterministici (modellazione della pericolosità in base alle leggi fisico-meccaniche).

Per una stima completa della pericolosità bisogna seguire i seguenti passi [32]:

- a) previsione spaziale (detta anche "zonazione"): previsione di dove, entro una data area, si può verificare una frana. La finalità della zonazione è quella di rappresentare graficamente la distribuzione della pericolosità nello spazio, mediante carte di stabilità dei versanti. L'approccio metodologico e il tipo di analisi da adottare sono influenzati rispettivamente dalla scelta della scala di lavoro e dalla scelta dell'*unità territoriale di base,* ossia del dominio territoriale spazialmente omogeneo, cartografabile con criteri sufficientemente oggettivi e differenziabile dalle unità adiacenti da cui deve essere separabile attraverso limiti netti [33];
- b) previsione temporale: previsione di quando uno specifico fenomeno franoso può avvenire in un determinato versante; in genere la pericolosità è espressa in termini di probabilità annua, secondo la seguente relazione:

$$H(N) = 1 - (1 - P)^{N}$$
 $P_{annua} = \frac{1}{T(anni)}$

Dove:

N è il periodo temporale considerato in anni $(1 - P)^N$ è la probabilità di non occorrenza di un determinato evento in N anni

c) previsione tipologica: previsione del tipo di frana che può verificarsi nell'area considerata e che influenza sia la valutazione previsionale dell'intensità sia la vulnerabilità del territorio. In base alla tipologia del fenomeno, i fattori di controllo per l'innesco e la propagazione sono diversi e, di conseguenza, cambiano i modelli utilizzati per la previsione;

- d) previsione dell'intensità: previsione della velocità, delle dimensioni o dell'energia del fenomeno franoso;
- e) previsione dell'evoluzione: previsione della distanza di propagazione, dei limiti di retrogressione o di espansione laterale. È particolarmente importante per i movimenti franosi caratterizzati da elevata velocità e notevole distanza di espandimento. L'evoluzione spaziale del fenomeno è regolata da leggi che tengono conto di parametri fisici (massa, densità, ecc.), meccanici (coesione, resistenza al taglio, ecc.) e geometrici (forma dei blocchi, ecc.) dei materiali. Inoltre, numerosi fattori esterni influiscono sulla propagazione dei fenomeni, quali la topografia, la rugosità della superficie, la vegetazione, la presenza di strutture antropiche.

2.3.4 Valutazione degli elementi a rischio

Occorre identificare gli elementi a rischio, descriverli e attribuirne ad essi un valore.

Gli elementi a rischio sono i beni e le attività presenti nell'area esposta al pericolo e che possono subire danni dallo stesso: persone, strutture, infrastrutture, attività economiche, beni ambientali, ecc. [34]. I beni a rischio possono essere di tipo statico o dinamico. La mobilità degli elementi, come ad esempio veicoli e persone, comporta alcuni problemi nella fase di identificazione poiché non è possibile conoscere in modo deterministico quali e quanti elementi sono presenti nell'area considerata e la loro variabilità nel tempo. A tal proposito, è importante considerare nella fase di identificazione degli elementi a rischio l'esposizione. Infatti, ogni elemento è esposto al rischio in ogni punto dello spazio in funzione del tempo trascorso in quel punto. In genere si considerano probabilità annue. Per elementi immobili, come strutture, l'esposizione è pari a 1 (sempre esposto); mentre, se l'evento è già avvenuto o è molto lento, l'esposizione dipende dalla reazione dell'elemento al pericolo.

Il valore degli elementi a rischio è calcolato moltiplicando il valore del singolo elemento per il numero di elementi presenti. Per il calcolo del valore è possibile seguire diversi approcci:

 calcolo di un valore discreto: spesso si ricorre a espressioni di tipo monetario che permettono di quantificare elementi di difficile parametrizzazione, di confrontare tipologie diverse di elementi e, infine, di stimare un valore assoluto complessivo;

- utilizzo di una funzione di utilità: ogni elemento a rischio è caratterizzato da una funzione matematica che esprime il costo sociale o individuale in caso di perdita dello stesso elemento;
- utilizzo di formule empiriche: il valore può essere calcolato con l'utilizzo di formule empiriche in cui il valore totale di un elemento è definito dalla somma, eventualmente pesata, dei diversi fattori che lo compongono;
- stima qualitativa complessiva: valutazione adatta per aree particolarmente ampie, nelle quali è complicato analizzare il valore dei singoli elementi.

2.3.5 Valutazione della vulnerabilità

La vulnerabilità esprime il grado di perdita prodotto su un elemento a rischio e, pertanto, essa dipende sia dal tipo di elemento a rischio sia dall'intensità del fenomeno franoso. In particolare, la determinazione della vulnerabilità è resa particolarmente ardua per la difficoltà nel parametrizzare i numerosi fattori coinvolti, quali la costituzione e la struttura dell'elemento, la posizione dell'elemento rispetto al fenomeno, la presenza di eventuali protezioni e l'intensità del fenomeno.

Un metodo unificato per la classificazione e la valutazione della vulnerabilità degli elementi a rischio per le diverse tipologie di frane non esiste [35], ma si possono individuare due approcci principali: quello quantitativo e quello euristico.

Nell'approccio quantitativo si calcola un valore numerico della vulnerabilità compreso tra 0 e 1, tenendo presenti le seguenti variabili: l'intensità del fenomeno, la costituzione e la struttura dell'elemento a rischio, la posizione dell'elemento rispetto al fenomeno e la presenza di eventuali protezioni.

Nell'approccio euristico si stima qualitativamente o semi-quantitativamente la vulnerabilità, secondo stime soggettive o utilizzando apposite matrici. In genere, il prodotto è espresso con categorie di vulnerabilità dei beni e delle attività. In tale approccio si distingue tra la vulnerabilità sociale, riferita alle vite umane, e quella riguardante i beni economici. La vulnerabilità sociale è data dalla probabilità che vi siano vittime, feriti o senzatetto dopo un evento franoso; per la vulnerabilità economica si considerano i danni ai beni materiali e alle attività.

Una trattazione più dettagliata sulla vulnerabilità e sulla sua valutazione sarà esposta al §2.4.

2.3.6 Valutazione del rischio

Occorre distinguere tra rischio specifico e rischio totale.

Il rischio specifico (R_s) è il grado di perdita atteso legato a un impatto avente una certa probabilità e una determinata intensità. È espresso dal prodotto tra la pericolosità (H), la vulnerabilità (V) e l'esposizione dell'elemento al rischio (E_s) :

$$R_s = H \times V \times E_s = p_i \times V$$

Dove:

 p_i è la probabilità di impatto

Sia la probabilità di impatto sia la vulnerabilità sono dipendenti dall'intensità, per cui anche il rischio specifico è funzione dell'intensità del fenomeno. La probabilità di impatto è funzione della pericolosità e dell'esposizione, che al variare dell'intensità hanno rispettivamente un andamento decrescente e crescente. In particolare, l'esposizione ha un andamento crescente, in quanto un evento di maggiore intensità occupa un'area più grande e dà minori possibilità di fuga all'elemento a rischio. La vulnerabilità tende ad avere un andamento sempre crescente con l'intensità. Dalle precedenti valutazioni si ricava che la curva del rischio specifico (Figura 2.1) non ha un andamento che è possibile prevedere a priori.



Figura 2.1 – Andamento della probabilità di impatto, vulnerabilità e rischio specifico in funzione dell'intensità [36]

Il rischio totale (R_t) è dato dal rischio specifico (R_s) moltiplicato per il valore dell'elemento a rischio (W):

$$R_t = R_s \times W = p_i \times W_L$$

Dove:

 W_L è il valore potenziale delle perdite

Per rappresentare il rischio totale si può adottare il diagramma in scala logaritmica, riportato in Figura 2.2, in cui sono presenti le soglie di accettabilità del rischio: *limite* (quello superiore) e *obiettivo* (quello inferiore) (si veda il §2.3.7). Per un certo valore soglia R_{t0} si può esprimere la funzione soglia con la seguente espressione:

$$p_i = \frac{R_{t0}}{W_L}$$

Per ottenere questo tipo di rappresentazione sono necessari i valori numerici della pericolosità, dell'esposizione e della vulnerabilità, ossia devono essere svolte stime quantitative. Nella maggior parte dei casi le stime sono di tipo qualitativo e, quindi, risulta impossibile la costruzione di tale diagramma.



Figura 2.2 – Diagramma Rt/WL e curve di accettabilità [36]

2.3.7 Gestione del rischio

Si valuta il livello di rischio accettabile e la conseguente predisposizione di azioni di mitigazione sulla pericolosità e sulla vulnerabilità, in modo tale da avere il rischio residuo inferiore al rischio accettabile.

a) Individuazione del rischio accettabile

Per individuare il rischio accettabile bisogna considerare il quadro socio-economico del territorio analizzato e l'opinione pubblica. Dei principi generali [37][38] per determina-re il rischio accettabile sono:

- il rischio derivante da un evento franoso su di un elemento non deve essere significativo rispetto ad altri rischi a cui una persona è esposta nella vita di ogni giorno;
- il rischio, quando è ragionevolmente possibile, deve essere ridotto (As Low As Reasonably Practicable - ALARP);

- se la possibilità di perdita di vite dovuto a una frana è elevata, il rischio che l'incidente possa verificarsi dovrebbe essere basso;
- le persone nella società tollereranno rischi più elevati di quelli che considerano accettabili, quando non sono in grado di controllare o ridurre il rischio a causa di limitazioni economiche o di altro genere;
- l'opinione pubblica tollera maggiormente i rischi da versanti naturali rispetto a quelli da pendii artificiali, e i rischi relativi a persone che lavorano in settori a rischio (per es. miniere) rispetto a quelli che colpiscono l'intera società;
- se un versante naturale è monitorato, la tollerabilità è pari a quella relativa ai versanti artificiali.

Nella valutazione del rischio accettabile, si devono specificare due livelli di rischio (Figura 2.2): il livello superiore, detto *limite* e quello inferiore, detto *obiettivo*. I rischi più alti del limite non sono accettabili, quelli più bassi dell'obiettivo sono accettabili, mentre quelli nel mezzo fanno parte della zona ALARP, area nella quale è necessario operare strategie di riduzione atte a limitare il rischio il più possibile, ove ragionevolmente praticabile. In tale zona, quindi, i rischi sono inferiori al limite di accettabilità, ma possono essere tollerati solo nel caso in cui la riduzione del rischio non è in concreto fattibile o se i suoi costi sono sproporzionati rispetto ai miglioramenti conseguibili [39].

Le soglie di rischio accettabile possono essere definite in termini di: rischio totale, rischio specifico e probabilità di rottura.

Un esempio di valutazione in termini di rischio totale è quello fornito dalla *Délégation aux Risque Majeurs* (DRM) [40] che stabilisce una suddivisione del territorio in tre classi di rischio e pone come soglia di rischio accettabile il costo delle misure di prevenzione pari al 10% del valore dell'elemento a rischio (Tabella 2.3).

Le soglie di rischio accettabile espresse in termini di rischio specifico sono valori indicativi riportati in letteratura ed espressi in termini di probabilità di perdita di vite umane in un anno a seguito di un particolare fenomeno di data intensità (Tabella 2.4).

La probabilità di rottura accettabile non si riferisce a un periodo di tempo definito, ma indica la probabilità che il fattore di sicurezza di una frana o di una struttura superi il valore limite. Un esempio di definizione dell'accettabilità del rischio basata sulla probabilità di rottura accettabile è quella illustrata dalla *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA) [41], che propone l'utilizzo di tre criteri: - <u>criterio sociale:</u> $P_{a(s)} = K_s \frac{n_d}{1000 n_r}$ (%)

Dove:

 K_s è una costante che dipende dal tipo di opera e dal suo utilizzo sociale

 n_d è il tempo di servizio del sistema

 n_r è il numero di persone esposte al rischio nel tempo n_d

- criterio economico:
$$P_{a(e)} = 100 \frac{b}{2,3 \ C E_i}$$
 (%)

Dove:

- *b* è una costante che dipende dal tenore di vita della popolazione
- E_i è il costo iniziale in dollari della costruzione
- *C* è un coefficiente che esprime il costo delle conseguenze di una rottura in rapporto al costo iniziale dell'opera

- criterio socio-economico:
$$P_{a(se)} = 100 \ b \frac{K_s}{2,3 \ q \ n_d^2}$$
 (%)

Dove:

q è il valore medio in dollari fissato dalle assicurazioni per la vita umana

Classe	Descrizione	Misure di prevenzione
Zona rossa	Esposta a fenomeni franosi di eleva- ta intensità e con elevata probabilità di occorrenza	Non sono impiegabili metodologie di protezione e in cui l'espansione urbanistica è interdetta
Zona blu	Esposta a fenomeni franosi con in- tensità e probabilità di occorrenza moderate	Possono essere intraprese misure di prevenzione del rischio per i beni esistenti prima della pubblicazione del Piano; que- ste non devono prevedere un costo superiore al 10% del valore monetario dei beni
Zona bianca	Senza pericolosità prevedibile in cui non è adottata alcuna prescrizione	Non sono necessarie misure di prevenzione

R _{accet} [decessi/anno]	Fonte
10-6	Starr, 1969
10 ⁻⁶ ÷10 ⁻⁸	Ale, 1991
<10-4	Morgan et al., 1992
10-2÷10-4 (*)	Finlay et al., 1997
10 ⁻⁵ ÷10 ⁻⁶ (**)	Finlay et al., 1997
^(*) per rischio volontario	
(**) per rischio involontario	

Tabella 2.4 - Valori soglia di rischio accettabile in funzione di decessi/anno [42][43][44][45]

b) Mitigazione del rischio

Il rischio può essere mitigato secondo due strategie: aumento delle soglie di rischio accettabile e riduzione del rischio [29].

La prima strategia si realizza attraverso l'informazione (per es. installazione di segnaletica di allarme, uso dei mezzi di comunicazione di massa); risulta, infatti, che le soglie di rischio consapevole (volontario) tollerato sono in genere molto più elevate rispetto a quelle di rischio involontario.

La seconda strategia è realizzabile attraverso attività di prevenzione delle conseguenze dei fenomeni franosi e può essere attuata secondo le seguenti quattro strategie:

- (1) <u>Riduzione della pericolosità</u>: si interviene sui fattori di innesco (tramite bonifiche, sistemazioni idrogeologiche del territorio, ecc.) o sul fenomeno stesso (con interventi di stabilizzazione che riducono le forze instabilizzanti o incrementano quelle resistenti) al fine di prevenire la riattivazione o limitarne l'evoluzione.
- (2) <u>Riduzione dell'esposizione degli elementi a rischio</u>: si può intervenire attraverso la pianificazione (evacuazione da aree definite pericolose, divieti di accesso alle aree soggette a rischio, trasferimento dei centri abitati, ecc.) e i sistemi di emergenza (sistemi di monitoraggio, sistemi di allarme, ecc.).
- (3) <u>Riduzione della vulnerabilità</u>: si può intervenire direttamente sugli elementi a rischio, in modo da diminuire il grado di danno degli elementi esposti al rischio (per es. consolidamento degli edifici con conseguente riduzione dell'entità di danneggiamento dell'elemento interessato dalla frana, costruzione di vie di fuga per gli abitanti, ecc.), o tramite interventi sociali sulla popolazione (per es. educazione al rischio, piani di emergenza, ecc.).
- (4) <u>Riduzione del valore degli elementi a rischio</u>: attraverso un'adeguata attività di pianificazione (per es. modifica del sistema viario, cambiamento della destinazione d'uso di alcuni edifici, ecc.).

La scelta della strategia di mitigazione può basarsi su un'analisi costi-benefici, osservando la riduzione del valore di rischio totale a seguito di un intervento avente un certo costo [39].

c) Rischio residuo

L'obiettivo della gestione del rischio è ottenere un rischio residuo inferiore al livello di rischio accettabile ottimizzando i costi di mitigazione.

2.4 Vulnerabilità

La valutazione della vulnerabilità gioca un ruolo fondamentale poiché permette il passaggio dalla valutazione della pericolosità alla valutazione del rischio e, inoltre, fornisce le informazioni che conducono a processi di pianificazione delle misure di mitigazione e delle strategie di gestione dell'emergenza.

Le difficoltà nel valutare la vulnerabilità sono dovute a: la mancanza di dati riguardanti eventi passati, la difficoltà nella raccolta delle caratteristiche intrinseche degli elementi a rischio e della loro esposizione spaziale e temporale ai pericoli, la complessità del meccanismo di danneggiamento per ciascuna dimensione del sistema studiato. Pertanto, è indubbio che sia necessario un approccio multi-disciplinare nella valutazione della vulnerabilità [46].

2.4.1 Il problema della definizione

La vulnerabilità è un termine che presenta diverse connotazioni in funzione del campo di applicazione. Una revisione delle più recenti definizioni dimostra che esistono almeno due diverse prospettive: una legata all'ingegneria e alle scienze naturali; e un'altra relativa a un approccio sociale [46]. Entrambe sono fortemente dipendenti dalle seguenti componenti della vulnerabilità:

- <u>dimensione fisica/funzionale</u>, relativa alla predisposizione di una struttura o di un servizio a essere danneggiato a causa del verificarsi di uno specifico evento pericoloso;
- <u>dimensione economica</u>, inerente alla stabilità economica di una regione che potrebbe essere messa a rischio da una diminuzione del reddito a causa di un calo nella produzione, nella distribuzione e nel consumo di beni;
- <u>dimensione socio-culturale</u>, legata all'esposizione degli esseri umani a certi pericoli e alla loro capacità di reazione in caso di disastri;
- <u>dimensione ecologica/ambientale</u>, relativa all'interazione tra diversi ecosistemi/ambienti naturali e alla loro capacità di affrontare e riprendersi da diversi eventi pericolosi [47] e di tollerare sollecitazioni nel tempo e nello spazio [48];
- <u>dimensione politico-istituzionale</u>, riguardante le questioni mirate a prevenire le conseguenze dannose di un evento pericoloso e a ridurre gli effetti negativi attraverso azioni politiche e istituzionali.

Dal punto di vista ingegneristico e delle scienze naturali la vulnerabilità è il grado di perdita di un dato elemento o insieme di elementi esposti al rischio derivante dal verificarsi di un evento pericoloso di una certa intensità in una data area [26]. In genere, è espressa come percentuale di perdita (0 = nessuna perdita, 1 = perdita totale) dovuta a un evento pericoloso. Esistono anche studi in cui si afferma che i valori della vulnerabilità potrebbero teoricamente essere maggiori di 1, nel caso in cui per riparare o ricostruire l'edificio danneggiato i costi siano maggiori della costruzione di una nuova struttura [49].

Tra gli scienziati sociali, ci sono opinioni concordanti tra coloro che definiscono la vulnerabilità in termini di variazione di esposizione ai rischi [50] e tra quelli che la esprimono in termini di variazione delle capacità delle persone a far fronte agli eventi pericolosi [51]. Le definizioni di vulnerabilità tendono, quindi, a dividersi in due grandi categorie che si occupano della vulnerabilità in termini di danni causati a un sistema da un particolare pericolo o evento legato al clima o in termini di "vulnerabilità intrinseca", intesa come la proprietà intrinseca di un sistema (comunità) nell'affrontare l'evento pericoloso [46].

Alcuni autori hanno cercato di unire tutte le definizioni richiamate in precedenza in modo da ottenere una definizione unica, esaustiva e completa. Si definisce, ad esempio, la vulne-rabilità come "il grado di fragilità di una persona, di un gruppo, di una comunità o di un'a-rea nei confronti dei rischi definiti" [52], oppure si afferma che "la vulnerabilità è una funzione del carattere, dell'intensità, e del tasso di variazione climatica e, inoltre, dipende dal sistema di esposizione, dalla sua sensibilità e dalla capacità di adattamento" [53][54].

Infine, la vulnerabilità dipende dall'obiettivo dello studio e dalla scala temporale e spaziale delle analisi.

2.4.2 Inventario degli elementi a rischio

L'identificazione e la mappatura degli elementi a rischio sono operazioni fondamentali per la valutazione della vulnerabilità e, inoltre, forniscono uno dei principali dati spaziali richiesti per il calcolo del rischio totale [55]. In termini generali, gli elementi a rischio, già richiamati nel §2.3.4, sono la popolazione, le proprietà, le attività economiche, i beni ambientali presenti nell'area esposta al pericolo e che possono subire danni dallo stesso. In base all'obiettivo dello studio e alla scala di lavoro adottata, si devono perseguire diversi livelli di dettaglio e precisione durante la raccolta e archiviazione dei dati.

2.4.3 Approcci per la valutazione della vulnerabilità

La vulnerabilità può essere misurata e/o quantificata su scala metrica o su una scala non numerica (basata su valori sociali o su percezioni e stime) [56]. Il tipo di scala è strettamente correlato al tipo di danno, riferito a perdite materiali o non materiali. Le prime riguardano le dimensioni fisica/funzionale ed economica della vulnerabilità; le seconde si riferiscono alle dimensioni socio-culturale, ecologica/ambientale e politico-istituzionale.

Riguardo alle <u>perdite materiali</u> è possibile seguire approcci metodologici diversi: euristico ($\S2.4.3.1$), economico ($\S2.4.3.2$), empirico ($\S2.4.3.3$), analitico ($\S2.4.3.4$) e probabilistico ($\S2.4.3.5$).

Anche le <u>perdite immateriali</u> (il degrado ambientale, i disagi sociali e culturali, l'instabilità politico-istituzionale e le conseguenze psicologiche derivanti dai disastri ambientali) devono essere contabilizzate, anche se non possono essere misurate/quantificate facilmente o trasformate in un equivalente monetario [57].

Le differenze tra le perdite materiali e quelle immateriali fanno sì che la loro aggregazione in un unico indice sia praticamente impossibile [46]. In aggiunta, il verificarsi di un evento pericoloso può generare cambiamenti nel comportamento delle persone (per es. evitare aree a rischio) e lo stesso rischio può essere percepito in modo diverso dalle persone.

La vita umana rappresenta un caso particolare in quanto il suo valore intrinseco nel momento in cui si sente minacciato è incalcolabile [58]. Tuttavia, in alcuni casi, sono stati fatti tentativi per quantificare la vita umana in termini monetari [59], soprattutto per il calcolo delle assicurazioni sulla vita, sollevando molte questioni etiche.

2.4.3.1 Approccio euristico

L'approccio euristico esprime la vulnerabilità delle strutture e delle infrastrutture in termini qualitativi e descrive il livello di danno come estetico, funzionale e strutturale. Per il danno *estetico* (il minore), si assume che la funzionalità dell'elemento a rischio non sia compromessa del tutto e che il danno possa essere riparato rapidamente e in modo economico. Per il danno *funzionale* (medio), la funzionalità dell'elemento interessato è compromessa e per riparare i danni è necessario del tempo e grandi risorse economiche. Infine, per il danno *strutturale* (totale), l'elemento a rischio è gravemente o completamente danneggiato e per rimediare ai danni sono richiesti lavori estesi, lunghi tempi, e grandi risorse economiche [60][61].

Un esempio di approccio euristico è quello applicato da Cardinali et al. nel 2002 [60]: essi stimano qualitativamente la vulnerabilità degli edifici esposti alla caduta massi in Umbria, per le diverse intensità del fenomeno e per le diverse tipologie strutturali dell'area basandosi sul danno che le frane hanno causato sugli edifici (Tabella 2.5 e 2.6).

Code	Frequency	Code	Frequency
HD	Built-up areas with high population density	Q	Quarries
LD	Built-up areas with low population density	MR	Main roads, motorways, highways
	and scattered houses	SR	Secondary roads
IN	Industries	FR	Farm and minor roads
FA	Animal farms	RW	Railway lines
SP	Sports facilities	С	Cemeteries

Tabella 2.5 - Categorie di elementi a rischio (per strutture e infrastrutture) [60]

Landslid	le Intensity								Elem	ents a	t Risk				
					Str	ucture	s and	infrast	ofrastructures				Population		
				Build	ings				Ro	ads		Others			
		HD	LD	IN	FA	SP	С	MR	SR	FR	RW	Q	Direct	Indirect	Homeless
	Rock fall	A	Α	Α	Α	Α	Α	A	Α	Α	Α	Α	No	No	No
Light	Debris flow	A	Α	Α	Α	Α	Α	A	F	F	Α	A	No	No	No
	Slide	A	Α	Α	A	Α	Α	A	F	S	Α	A	No	No	No
	Rock fall	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Yes	Yes	Yes
Medium	Debris flow	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	Yes	Yes	Yes
	Slide	F	F	F	F	F	F	F	S	S	F	F	No	Yes	No
	Rock fall	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
High	Debris flow	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
	Slide	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	No	Yes	Yes
Very high	Rock fall	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
	Debris flow	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	Yes	Yes	Yes
	Slide	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	No	Yes	Yes

Tabella 2.6 - Vulnerabilità espressa come danno atteso per gli elementi a rischio. A = danno superficiale (estetico, minore); F = danno funzionale (medio); S = danno strutturale (totale). Per le categorie di elementi a rischio vedere Tabella 2.5 [60]

2.4.3.2 Approccio economico

Esprime le conseguenze del disastro in termini di costo economico del danno. Il grado di perdita degli elementi a rischio, quando è espresso economicamente, può essere definito [58][62][63] in termini di:

- valore monetario, definito come il prezzo o valore corrente del bene, o il costo per ricostruire o sostituirlo con un bene simile o identico, in caso sia totalmente distrutto;
- valore intrinseco, definito come la misura in cui un bene è considerato importante e insostituibile;
- valore utilitaristico, definito come l'utilità di una determinata attività o il valore monetario del suo utilizzo mediato su un periodo di tempo specifico.

2.4.3.3 Approccio empirico

L'interazione tra i pericoli e gli elementi a rischio può essere analizzata usando curve di fragilità per numerose tipologie di rischio. Questo approccio è basato principalmente su dati ricavati da casi studio ben documentati. Usando questo metodo, il grado di perdita è espresso in forma di matrice di probabilità del danno o in termini economici. Nel primo caso, si calcola la probabilità che un edificio di un certo tipo subisca un certo livello di danno, come risultato di un evento di particolare intensità. Nel secondo caso, la vulnerabilità è calcolata usando un approccio economico ed è definita come il rapporto tra il valore della perdita e il valore della ricostruzione del bene studiato [46].

Un esempio di applicazione dell'approccio empirico è quello proposto da Fuchs et al. nel 2007 [64]. Essi hanno ricavato una funzione di vulnerabilità empirica (Figura 2.3) analizzando i dati di una colata di detriti ben documentata, avvenuta nel 1997 sulle Alpi Austriache, collegando le intensità dei fenomeni a valori obiettivi di vulnerabilità. Gli elementi a rischio erano rappresentati da edifici in muratura e in calcestruzzo. La vulnerabilità è stata calcolata in termini di rapporto di danno, che descrive la quantità di perdita in relazione al danno complessivo potenziale della struttura, e dell'intensità del fenomeno, definita come l'altezza dei depositi. La relazione proposta dagli autori presenta un coefficiente di determinazione (r^2) pari a 0,86 per colate detritiche con un'altezza dei depositi (h) minore a 2,5 m ed è definita come segue:

$$V = 0,11 h^2 - 0,02 h$$

Akbas et al. nel 2009 [65] hanno sviluppato una funzione di vulnerabilità empirica basata su osservazioni della colata di detriti avvenuta il 13 luglio 2008 in Selvetta (Valtellina, Italia). In questo studio la vulnerabilità è stata calcolata usando un approccio economico ed è definita come il rapporto tra la perdita e il valore per la ricostruzione individuale di ciascuno dei 13 edifici colpiti dall'evento franoso. I rapporti ottenuti sono stati accoppiati con le corrispondenti altezze di deposizione in modo da confrontare i risultati e da effettuare una valutazione critica delle funzioni di vulnerabilità sviluppate per le colate di detriti da altri autori [64][66][67] (Figura 2.3). La relazione proposta dagli autori presenta un coefficiente di determinazione (r^2) pari a 0,995 ed è definita come segue:

$$V = 0,17 h^2 - 0,03 h$$

Le differenze tra i valori di vulnerabilità stimati suggeriscono che vi sia la necessità di ulteriori studi con dati aggiuntivi per costruire curve empiriche che possano essere usate con un elevato livello di sicurezza.



Figura 2.3 – Esempi di curve e funzioni di fragilità (linea tratteggiata) tra l'altezza della colata di detriti e la vulnerabilità [65]

Quan Luna et al. nel 2011 [68] hanno ricostruito il fenomeno franoso che aveva colpito il paese di Selvetta con un modello numerico, tramite back-analysis. Sono state effettuate delle indagini geomorfologiche per studiare il comportamento della frana e gli aspetti legati all'intensità (come per esempio la distanza di propagazione, la velocità, la profondità) e da queste sono state ricavate delle curve di vulnerabilità fisica sintetiche in funzione dell'altezza dei depositi dei detriti e della pressione di impatto. Le funzioni rappresentative la vulnerabilità fisica sono state calcolate usando le informazioni sui danni ricavate da documenti ufficiali accoppiate a quelle ricavate dal modello. Per ogni edificio è stato dedotto un valore di ricostruzione approssimato in base al tipo e alla dimensione, utilizzando i dati forniti dal manuale DEI sui prezzi delle tipologie edilizie [69]. Si tratta di edifici in muratura o in calcestruzzo, costituiti da uno a tre piani [68]. La vulnerabilità fisica è stata definita dal rapporto tra la perdita e il valore per la ricostruzione individuale di ciascuno dei 13 edifici colpiti dall'evento franoso. I rapporti ottenuti sono stati accoppiati con i risultati della modellazione (altezze di deposizione, pressione di impatto), permettendo di sviluppare le curve che relazionano i valori di vulnerabilità degli edifici con l'intensità del fenomeno.

In particolare, sono state ricavate le altezze dei depositi di detriti per ogni edificio colpito, considerando i valori medi nelle vicinanze del muro esposto a monte [68]. In Figura 2.4a, osservando il rapporto tra la vulnerabilità e i valori dell'altezza dei depositi, si deduce che la vulnerabilità aumenta all'aumentare dell'altezza dei depositi. Le funzioni proposte dagli autori presentano un coefficiente di determinazione (r^2) pari a 0,99 per colate detritiche con un'altezza dei depositi compresa tra 0 e 3,63 m:

$$V = \frac{1,49 \times \left|\frac{h}{2,513}\right|^{\left|-1,938\right|}}{1 + \left|\frac{h}{2,513}\right|^{\left|-1,939\right|}} \qquad \text{per } h \le 3,63 \ m$$
$$V = 1 \qquad \qquad \text{per } h > 3,63 \ m$$

Dove:

h è l'altezza dei depositi nei modelli di run-out

Per definire le curve in base alla pressione di impatto è stato seguito un procedimento simile al precedente, considerando i valori nelle vicinanze del muro orientato nella direzione da cui proviene la frana. Per definire le funzioni di vulnerabilità sono state usate le massime pressioni di impatto ricavate dal modello di run-out (Figura 2.4b). Le funzioni proposte dagli autori presentano un coefficiente di determinazione (r^2) pari a 0,98 per colate detritiche con pressione di impatto inferiore a 37,5 kPa:

$$V = \frac{\frac{1,596 \times \left|\frac{P}{28,16}\right|^{|-1,808|}}{1 + \left|\frac{P}{28,16}\right|^{|-1,808|}} \quad \text{per } P \le 37,5 \ kPa$$
$$V = 1 \quad \text{per } P > 37,5 \ kPa$$

Dove:

P è la pressione di impatto nei modelli di run-out

Nell'approccio empirico, anche se la fonte di osservazione è la più realistica possibile, i dati sono spesso difficili da raccogliere a causa dell'imprecisione, dell'incoerenza e della soggettività associata alla tipologia di edificio, allo stato di danno e ai descrittori dell'intensità. Questi problemi portano ad avere una notevole dispersione dei dati, in particolare per piccoli stati di danneggiamento.



Figura 2.4 – Funzioni di vulnerabilità sintetiche proposte in funzione dell'altezza della colata di detriti (a) e in base alla pressione di impatto (b) [68]

2.4.3.4 Approccio analitico

L'approccio analitico è applicato in genere per la valutazione previsionale dei danni agli edifici, delle vittime e delle perdite economiche dovute a danni strutturali. La procedura per creare le curve di fragilità prevede la definizione degli elementi a rischio e l'intensità con cui l'evento pericoloso li colpirà. In seguito, si effettua un'analisi degli elementi a rischio tramite relazioni statistiche. I vantaggi nell'uso di questo metodo sono: (1) indipendenza da inventari di eventi passati, (2) possibilità di sviluppare le curve e le funzioni per un intervallo di intensità del fenomeno senza alcuna interpolazione o assunzione estrapolata, (3) possibilità di considerare le peculiarità degli edifici a rischio, (4) oggettività dei risultati [46].

Riguardo alla vulnerabilità fisica degli edifici, come si osserva da crolli e colate detritiche avvenuti in passato, l'impatto dovuto a un blocco di roccia può generare danni di entità variabile, da un piccolo danno non strutturale (distruzione di muri interni, porte, finestre e mobili), come nel caso della caduta massi che colpì Bildudalur (Islanda) [70], alla distruzione di soffitti e solai a causa di impatti verticali, come accadde nel 1997 nel Principato di Andorra, quando un blocco di 25 m³ attraversò i solai di un condominio, fino ad arrivare al piano interrato, ma l'edificio rimase in piedi senza ulteriori danni [71], al parziale collasso, come avvenne a Caraballeda (Vargas, Venezuela) nel 1999, quando numerosi blocchi colpirono i primi due piani di un condominio causando il suo parziale collasso [72][73], a danni molto estesi o al completo crollo dell'edificio, come per esempio successe nel 2004, quando un blocco in caduta a Fiumelatte (frazione di Varenna, LC, Italia) causò due morti e danneggiò numerose case [74], oppure come avvenne nel giugno 2008 in Grecia, quando una caduta massi indotta da un terremono causò danni estesi agli edifici nel paese di Santomeri (Peloponneso, Grecia) che portò a un'evacuazione precauzionale del paese [75].

L'assunzione dell'approccio empirico, per cui eventi di intensità simile producono livelli di danno simili, non è del tutto valida, in particolare per i crolli di roccia, poiché il danno causato da un blocco che arriva con una determinata intensità dipende sia dalla zona di impatto sia dall'intensità, che possono cambiare da un evento a un altro. L'importanza della zona di impatto è evidente per quelle strutture in cui l'estensione del danno che colpisce un elemento portante può generare instabilità e portare al progressivo collasso [76].

Una procedura analitica, che considera la zona di impatto per la valutazione della risposta strutturale dell'edificio colpito da un blocco di roccia, dovrebbe comprendere due fasi: la valutazione dei danni strutturali dovuti all'impatto su elementi chiave della struttura primaria e l'analisi della risposta dell'intero sistema strutturale. Il metodo proposto da Mavrouli e Corominas [77][75] racchiude quattro passaggi: (a) il calcolo della probabilità che un blocco colpisca un elemento chiave, (b) la valutazione della risposta di uno o più elementi strutturali quando sono colpiti, in base alle loro proprietà, (c) la valutazione della robustezza dell'intera struttura, calcolando il potenziale di collasso progressivo, in caso uno o più elementi chiave siano colpiti nel precedente passaggio, (d) il calcolo del danno usando un indice di danno equivalente al rapporto degli elementi strutturali colpiti rispetto al totale degli elementi. Un indice di vulnerabilità può essere usato per la quantificazione del rischio che tiene in conto la variazione del danno in base a dove il blocco impatta; può essere calcolato in funzione dell'intensità e della velocità del crollo [75]:

$$V(R_{ij}) = \sum_{k=1}^{k} (P_{e,k} \times RRC_k) \le 1$$

Dove:

 $V(R_{ij})$ è la vulnerabilità per un impatto di un blocco di roccia con intensità *i* e velocità *j*

 $P_{e,k}$ è la probabilità che un elemento strutturale o non strutturale k sia colpito da un blocco di intensità *i*

 RRC_k (Relative Recovery Cost) è il costo per il recupero di un elemento strutturale o non strutturale k colpito da un blocco di roccia con intensità i e velocità j. È calcolato come una funzione della struttura fisica e del danno non strutturale, tra sformato in un costo economico, per ogni punto di impatto potenziale

Si possono ricavare famiglie di curve di vulnerabilità per diverse velocità in base alle dimensioni del blocco, tenendo conto dell'incertezza della posizione di impatto.

Per ottenere le curve di vulnerabilità si può calcolare la probabilità cumulativa del livello di danno basso, moderato, alto e molto alto [75]. Il valore della probabilità cumulativa dipende dalle dimensioni dei blocchi e dalla geometria dell'edificio, ed è calcolato come la probabilità di impatto su un elemento strutturale o non strutturale. Considerando E_c il livello di energia sufficiente a provocare la distruzione di un pilastro per l'impatto di un blocco, E_k l'energia cinetica del blocco di roccia e DI l'indice di danno (*Damage Index*), i livelli di danno potenziali sono proposti come mostrato in Tabella 2.7.

Livello di danno	E _k [kJ]	Intervalli	Zona di impatto	Descrizione del danno
Basso	$E_k \leq E_c$	m≥250kg	Muri interni o pilastri	Non strutturale
Moderato	$E_c < E_k \le 2E_c$	0,0 <di<0,05< td=""><td>Un pilastro centrale</td><td>Strutturale localizzato</td></di<0,05<>	Un pilastro centrale	Strutturale localizzato
Alto	$E_c < E_k \le 2E_c$	0,05 <di<0,3< td=""><td>Un pilastro d'angolo</td><td>Parziale collasso</td></di<0,3<>	Un pilastro d'angolo	Parziale collasso
Molto alto	$E_k > 2E_c$	DI≥0,3	Più di un pilastro centrale/d'angolo	Collasso esteso o totale

Tabella 2.7 - Livelli di danno con relative energie di impatto, DI, zona di impatto e descrizione del danno [75]

Il livello di danno basso corrisponde sia agli urti sia alla distruzione di muri interni per un blocco di roccia di massa minima (qui, si considera approssimativamente una massa di 250 kg per provocare danni importanti a un muro in mattoni) o per l'impatto di un blocco di roccia su un pilastro, ma con un'energia E_k non sufficiente a causarne la distruzione $(E_k \leq E_c)$. Il livello di danno moderato si ha quando un pilastro centrale è colpito da un blocco con energia sufficiente per la distruzione dello stesso, e le travi creano un ponte evitando l'estensione del collasso. Il livello di danno alto è dovuto alla distruzione di un pilastro d'angolo colpito da un blocco con la stessa energia considerata per il livello moderato, ma, in questo caso, possono verificarsi cedimenti e il parziale collasso dell'edificio per tutta la sua altezza. Infine, il livello di danno alto si riferisce al collasso esteso all'intero edificio, dovuto a cedimenti causati dalla distruzione di due o più pilastri.

Il diagramma delle curve di vulnerabilità (Figura 2.5) fornisce la probabilità cumulativa per blocchi con velocità pari a 2 m/s, per ogni livello di danno, con l'aumentare del diametro dei blocchi stessi. Si può osservare che per un diametro del blocco maggiore di 1 m il danno basso è certo (P = 1). Per un diametro pari a 2 m, la probabilità del danno moderato e alto è, rispettivamente, leggermente superiore a 0,4 e 0,3, e per un diametro pari a 5 m il danno molto alto è estremamente probabile (P = 1). Inoltre, sono stati sviluppati analoghi diagrammi in funzione di diversi valori di velocità del blocco [75].

L'approccio appena descritto per creare le curve di vulnerabilità si concentra soprattutto sui parametri dell'intensità che possono essere visualizzati nello spazio e calcolati dalla modellazione numerica alla scala locale. Si può assumere questa come una stima approssimativa della resistenza dell'edificio a un evento esterno dannoso. Il principale obiettivo è di collegare i risultati dei modelli numerici che calcolano l'intensità dell'evento con la vulnerabilità fisica degli elementi esposti al rischio, rendendo possibile quantificarne le conseguenze.



Figura 2.5 – Curve di vulnerabilità per blocchi con velocità u pari a 2 m/s [75]

2.4.3.5 Approccio probabilistico

L'interazione tra l'evento pericoloso e gli elementi a rischio può essere espressa dalle curve di danno o vulnerabilità per numerose tipologie di rischi. Le curve di vulnerabilità descrivono la probabilità di raggiungere o superare diversi stati di danneggiamento per differenti tipi di edifici/strutture a causa della loro risposta a eventi esterni di una certa intensità. L'estensione e la gravità del danno dei componenti strutturali e non strutturali di un certo tipo di edificio possono essere descritti da uno dei cinque stati di danneggiamento: nessuno, lieve, moderato, esteso, e completo.

Applicando l'approccio probabilistico diversi autori hanno creato delle funzioni di vulnerabilità: Kaynia et al. nel 2008 [78] hanno definito quantitativamente la vulnerabilità come il prodotto dell'intensità della frana per la suscettibilità degli elementi a rischio; Li et al. nel 2010 [79] hanno proposto delle nuove funzioni per la vulnerabilità di strutture e persone basate sull'intensità I delle frane e sulla resistenza R degli elementi esposti al rischio (Figura 2.6); Akbas et al. nel 2013 [80] hanno sviluppato una metodologia per la valutazione dei danni su edifici dovuti a colate detritiche, basata su curve che esprimono lo stato di danno probabile di un elemento a rischio per un determinato livello di pericolosità (Figura 2.7).



Figura 2.6 – Andamento teorico della vulnerabilità al variare dell'intensità per diversi valori di resistenza R [79]

Figura 2.7 – Curve di fragilità proposte per edifici in calcestruzzo composti da uno o due piani, osservati in Valtellina, Italia [80]

2.4.3.6 Incertezze nella valutazione della vulnerabilità

Per la valutazione della vulnerabilità, il tipo, la disponibilità e l'accuratezza dei dati sono aspetti cruciali strettamente collegati alla scala di analisi [24]. Nonostante la fase di raccolta dei dati sia stata notevolmente migliorata con l'introduzione dei GIS e dei sistemi di gestione dei database (DBMS), questa resta una delle operazioni più gravose e costose, in quanto l'affidabilità e la precisione dei dati deve essere garantita attraverso continui aggiornamenti degli stessi [46].

Su scala locale (<1:10.000), le principali incertezze nella valutazione della vulnerabilità sono legate alle proprietà soggettive di alcuni parametri, alla mancanza di informazioni quantitative riguardanti il danno potenziale dovuto a fenomeni pericolosi sull'ambiente costruito e all'esposizione degli elementi a rischio. Gli elementi valutati devono essere sempre messi in relazione all'intensità del fenomeno, il cui calcolo è spesso caratterizzato da un alto grado di incertezza. Ad esempio, nel caso specifico della vulnerabilità per caduta massi, le incertezze sono principalmente legate all'intensità del fenomeno e alla risposta dell'edificio. Per quanto riguarda il primo, il passaggio di energia da un blocco all'elemento colpito è influenzato da numerosi parametri difficili da quantificare (forma e dimensione del blocco, rigidità del blocco e dell'elemento colpito, ecc.). Di conseguenza, il fenomeno è caratterizzato da un'e-levata incertezza. Lo stesso vale per la risposta dell'edificio che è associata alla geometria, alla dimensione degli elementi principali e alle proprietà dei materiali. Si può ottenere una misura dell'incertezza per la valutazione della vulnerabilità utilizzando tecniche stocastiche appropriate, come ad esempio le tecniche di *First-Order Second-Moment* (FOSM) [81] o le si-mulazioni di Monte Carlo.

Capitolo 3

Comportamento delle murature

3.1 Introduzione

Le tipologie strutturali più diffuse nel patrimonio edilizio nazionale sono rappresentate da edifici in muratura, edifici intelaiati in cemento armato o acciaio e edifici a struttura mista [82]: nel presente lavoro di tesi si analizzerà unicamente il comportamento dei fabbricati appartenenti alla prima categoria.

L'edificio in muratura portante deve essere concepito come una struttura tridimensionale, in cui i sistemi resistenti di pareti di muratura, gli orizzontamenti e le fondazioni devono essere collegati tra di loro in modo da resistere alle azioni verticali e orizzontali, e da assicurare un comportamento d'insieme "scatolare".

I pannelli murari svolgono sia una funzione portante, nel momento in cui sono sollecitati da azioni verticali, sia una funzione di controventamento, quando sono sollecitati da azioni orizzontali. Gli orizzontamenti, se rigidi, sono responsabili della ripartizione delle azioni orizzontali fra i muri di controventamento. Il comportamento scatolare è garantito da opportuni collegamenti tra i muri e gli orizzontamenti, tramite cordoli di piano, e tra due muri, mediante ammorsamenti lungo le intersezioni verticali [83].

3.2 Materiali e caratteristiche tipologiche

Gli elementi che concorrono alla formazione di una muratura portante sono: la malta di allettamento e i blocchi resistenti della muratura. Questi ultimi possono essere elementi artificiali o naturali.

3.2.1 Malte

Le malte per murature di nuova costruzione possono essere divise tra quelle a <u>prestazione</u> <u>garantita</u> e quelle a <u>composizione prescritta</u>. Le prime devono assicurare prestazioni adeguate al loro impiego in termini di durabilità e di prestazioni meccaniche; le seconde sono definite in base alla composizione in volume secondo la Tabella 11.10.IV del D.M. del 14 gennaio 2008 [83].

Le prestazioni meccaniche di una malta sono espresse tramite la sua resistenza media a compressione f_m . La categoria di malta è definita da una sigla costituita dalla lettera M seguita da un numero che indica la resistenza f_m espressa in N/mm² secondo la Tabella 3.1 [83].

Classe	M 2,5	М 5	M 10	M 15	M 20	M d			
Resistenza a compressione [N/mm ²]	2,5	5	10	15	20	d			
d è una resistenza a compressione maggiore di 25 N/mm ² dichiarata dal produttore									

Tabella 3.1 - Classi di malte a prestazione garantita (Tabella 11.10.II di [83])

3.2.2 Elementi resistenti in muratura

Gli elementi resistenti in muratura possono essere distinti in elementi artificiali o naturali.

Gli <u>elementi resistenti artificiali</u> possono essere il prodotto di lavorazioni e trasformazioni di materiali naturali elementari (argilla e acqua) che attraverso procedimenti tecnici di tipo termico, permettono la realizzazione di blocchi lapidei artificiali dotati di caratteristiche strutturali standardizzate e omogenee (mattoni cotti o crudi, in base al trattamento termico cui sono sottoposti). Un'altra tipologia di blocchi artificiali è quella ottenuta dalla lavorazione di conglomerati artificiali costituiti da inerti, leganti e acqua. Per questi ultimi è possibile fare una distinzione sulla base degli inerti utilizzati: inerti pesanti o leggeri, lavorati o non lavorati [82].
Gli elementi resistenti artificiali possono essere dotati di fori in direzione normale al piano di posa (foratura verticale) o in direzione parallela (foratura orizzontale). Di regola i fori sono distribuiti uniformemente sulla faccia dell'elemento.

Gli <u>elementi resistenti naturali</u> sono ricavati da materiale lapideo non friabile o sfaldabile, e resistente al gelo; essi non devono contenere in misura sensibile sostanze solubili, o residui organici e devono essere integri, senza zone alterate o rimovibili.

3.2.3 Murature

Le murature sono costituite dall'assemblaggio organizzato ed efficace di elementi resistenti e malta, e possono essere a *singolo paramento*, se la parete è priva di cavità o giunti verticali continui nel suo piano, o a *paramento doppio*. Nel caso di elementi naturali, le pietre di geometria pressoché parallelepipeda, poste in opera in strati regolari, formano le murature di *pietra squadrata*. Si parla di muratura di *pietra non squadrata* quando si impiega materiale di cava grossolanamente lavorato. Se la muratura in pietra non squadrata è intercalata, a interasse non superiore a 1,6 m, da fasce di calcestruzzo semplice o armato, oppure da ricorsi orizzontali costituiti da almeno due filari di laterizio pieno, si parla di *muratura listata* [83].

La struttura portante in muratura può essere, infine, distinta in <u>muratura semplice</u> e <u>muratura armata</u>: la prima è formata da un semplice assemblaggio di elementi resistenti con la malta, è caratterizzata da una bassa resistenza a trazione, soprattutto in direzione normale ai giunti orizzontali, e da meccanismi di collasso tendenzialmente di tipo fragile (taglio, instabilità); la seconda è costituita da elementi resistenti artificiali pieni e semipieni idonei alla realizzazione di pareti murarie incorporanti apposite armature metalliche verticali e orizzontali, annegate nella malta o nel conglomerato cementizio.

3.3 Caratteristiche meccaniche

Il comportamento delle strutture murarie è complesso poiché si tratta di materiali anisotropi, le cui caratteristiche meccaniche sono differenti da quelle dei materiali costituenti. Inoltre per le murature esistenti si aggiunge la difficoltà di conoscere la consistenza della malta e dei mattoni impiegati: la mancanza di standardizzazione, l'approvvigionamento da fornaci locali e le abitudini esecutive del luogo introducono incertezze difficilmente stimabili rispetto a quanto sia possibile fare oggi sull'attuale produzione di materiali edilizi.

3.3.1 Edifici di nuova realizzazione

Per determinare i parametri meccanici della muratura negli edifici di nuova realizzazione si fa riferimento a quanto stabilito all'interno del D.M. del 14 gennaio 2008 [83] al §4.5.3 e al §11.10.3.

Le proprietà fondamentali in base alle quali si classifica una muratura sono:

- la resistenza caratteristica a compressione f_k ;
- la resistenza caratteristica a taglio in assenza di azione assiale f_{vk0} ;
- il modulo di elasticità normale secante *E*;
- il modulo di elasticità tangenziale secante G.

Le resistenze caratteristiche f_k e f_{vk0} sono determinate o per via sperimentale su campioni di muratura o, con alcune limitazioni, in funzione delle proprietà dei componenti.

La determinazione sperimentale della resistenza caratteristica a compressione f_k è eseguita secondo le indicazioni del §11.10.3.1.1 del D.M. del 14 gennaio 2008 [83] e in particolare si basa sulla seguente relazione:

$$f_k = f_m - k s$$

Dove:

 f_m è la resistenza media

s è la stima dello scarto

k è un coefficiente funzione del numero di provini n

La resistenza caratteristica a compressione f_k può essere stimata in base alla resistenza a compressione degli elementi f_{bk} e dalla classe di appartenenza della malta tramite le Tabelle 3.2 e 3.3. La Tabella 3.2 fa riferimento alle murature formate da elementi artificiali pieni o semipieni, con giunti orizzontali e verticali riempiti di malta di spessore compreso tra 5 e 15 mm; la Tabella 3.3 riguarda le murature costituite da elementi naturali, per cui convenzionalmente si assume che la resistenza caratteristica a compressione dell'elemento f_{bk} sia pari a:

$$f_{bk} = 0,75 f_{bm}$$

Dove:

 f_{bm} è la resistenza media a compressione degli elementi in pietra squadrata

Per i valori non compresi nelle tabelle è ammessa l'interpolazione lineare.

Resistenza caratteristica a compressione <i>f_{bk}</i> dell'elemento	Tipo di malta						
N/mm ²	M15	M10	M5	M2,5			
2,0	1,2	1,2	1,2	1,2			
3,0	2,2	2,2	2,2	2,0			
5,0	3,5	3,4	3,3	3,0			
7,5	5,0	4,5	4,1	3,5			
10,0	6,2	5,3	4,7	4,1			
15,0	8,2	6,7	6,0	5,1			
20,0	9,7	8,0	7,0	6,1			
30,0	12,0	10,0	8,6	7,2			
40.0	14.3	12.0	10.4				

Tabella 3.2 - Valori di f_k per murature in elementi artificiali pieni e semipieni (valori in N/mm²) (Tabella 11.10.V di [83])

Resistenza caratteristica a compressione <i>f_{bk}</i> dell'elemento	Tipo di malta							
	M15	M10	M5	M2,5				
2,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
3,0	2,2	2,2	2,2	2,0				
5,0	3,5	3,4	3,3	3,0				
7,5	5,0	4,5	4,1	3,5				
10,0	6,2	5,3	4,7	4,1				
15,0	8,2	6,7	6,0	5,1				
20,0	9,7	8,0	7,0	6,1				
30,0	12,0	10,0	8,6	7,2				
≥ 40,0	14,3	12,0	10,4					

Tabella 3.3 - Valori di f_k per murature in elementi naturali di pietra squadrata (valori in N/mm²) (Tabella 11.10.VI di [83])

La determinazione sperimentale della resistenza caratteristica a taglio in assenza di tensioni normali f_{vk0} è eseguita secondo le indicazioni del §11.10.3.2.1 del D.M. del 14 gennaio 2008 [83], e in particolare è data dalla seguente relazione:

$$f_{vk0} = 0,7 f_{vm}$$

Dove:

 f_{vm} è la resistenza media ottenuta dai risultati delle prove

La stima della resistenza caratteristica a taglio in assenza di tensioni normali f_{vk0} in funzione delle proprietà dei componenti può essere ottenuta dalla Tabella 11.10.VII del D.M. del 14 gennaio 2008 [83] valida per le murature con giunti orizzontali e verticali riempiti di malta, le cui dimensioni sono comprese tra 5 e 15 mm.

In presenza di tensioni di compressione, la <u>resistenza caratteristica a taglio della muratura</u> f_{vk} è data dalla combinazione delle forze orizzontali e dei carichi verticali agenti nel piano del muro secondo la seguente relazione:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_n$$

Dove:

 f_{vk0} è la resistenza caratteristica a taglio in assenza di carichi verticali

 σ_n è la tensione normale media dovuta ai carichi verticali agenti nella sezione di verifica

Il <u>modulo di elasticità normale secante E</u> è valutato sperimentalmente su n muretti ($n \ge 6$), seguendo le indicazioni della norma UNI EN 1052-1:2001 [84] sia per la confezione sia per la prova.

In mancanza di determinazione sperimentale, in fase di progetto, si possono assumere i seguenti valori:

- modulo di elasticità normale secante $E = 1000 f_k$
- modulo di elasticità tangenziale secante G = 0.4 E

3.3.2 Edifici esistenti

Per costruzioni "esistenti" si intendono quelle la cui struttura è completamente realizzata alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o del progetto di intervento [85].

Eseguire delle verifiche su edifici esistenti in muratura presuppone una conoscenza geometrica e tecnologica-costruttiva della costruzione. Gli elementi di conoscenza, quali la geometria dell'organismo strutturale, i dettagli costruttivi e le proprietà meccaniche dei materiali, possono essere ottenuti attraverso analisi storico-critica, rilievo geometrico - strutturale, rilievo materico-costruttivo, indagini sperimentali e saggi [86].

Per tener conto del livello di conoscenza conseguito nelle indagini conoscitive, per gli edifici esistenti si introducono i "fattori di confidenza": essi vanno a ridurre preliminarmente i valori medi di resistenza dei materiali della struttura, per ricavare i valori da adottare [85].

3.3.2.1 Determinazione dei parametri meccanici della muratura

Per caratterizzare meccanicamente i materiali occorre conoscere i parametri di deformabilità e resistenza, necessari per la modellazione del comportamento strutturale. Per ricavare tali informazioni sono fondamentali i rilievi materici e le indagini diagnostiche.

La Circolare n. 617 del 2009 [85] propone valori di riferimento dei parametri meccanici per le principali tipologie di muratura presenti nel territorio nazionale italiano (Tabella 3.4). I valori suggeriti fanno riferimento a diverse condizioni, tra cui l'uso di malta di caratteristiche scarse, e sono adottati nelle analisi secondo quanto indicato al §3.3.2.2.

I valori degli intervalli proposti in Tabella 3.4, diversi per le varie tipologie murarie, possono essere eventualmente modificati sulla base dei coefficienti riportati in Tabella C8A.2.2 della Circolare n. 617 del 2009 [85]. Ad esempio si possono correggere i parametri di resistenza e i moduli elastici in caso di malta di buone caratteristiche, o di giunti sottili (minori a 10 mm), o in presenza di ricorsi o di elementi di collegamento trasversale tra i parametri, oppure in caso di nucleo scadente e/o ampio, o di consolidamento con iniezione di miscele leganti o con l'uso di intonaco armato.

	$f_{ m m}$	τ ₀	Е	G	w
Tipologia di muratura	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre	100	2,0	690	230	10
erratiche e irregolari)	180	3,2	1050	350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato	200	3,5	1020	340	
spessore e nucleo interno	300	5,1	1440	480	20
Muratura in piatra a gragge con buong tessitura	260	5,6	1500	500	
Muratura în pietre a spaceo con buona tessitura	380	7,4	1980	660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite,	140	2,8	900	300	11/2
ecc.)	240	4,2	1260	420	16
Muratura a blaashi lanidai aguadrati	600	9,0	2400	780	
	800	12,0	3200	940	22
Muratura in mattani niani a malta di calca	240	6,0	1200	400	
indiatura in mattorii pieri e matta di calce	400	9,2	1800	600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia	500	24	3500	875	
(es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	800	32	5600	1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura <	400	30,0	3600	1080	
45%)	600	40,0	5400	1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti	300	10,0	2700	810	
verticali a secco (perc. foratura < 45%)	400	13,0	3600	1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa	150	9,5	1200	300	
(perc. foratura tra 45% e 65%)	200	12,5	1600	400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni	300	18,0	2400	600	
(foratura < 45%)	440	24,0	3520	880	14

Tabella 3.4 - Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferite alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte (Tabella C8A.2.1 di [85])

3.3.2.2 Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

I valori medi dei parametri meccanici per ogni tipologia muraria in considerazione (Tabella 3.5) e i fattori di confidenza sono definiti in base al livello di conoscenza acquisito. Si definiscono tre livelli di conoscenza [85]:

- <u>LC1 conoscenza limitata</u>: raggiunto quando sono effettuati il rilievo geometrico, le verifiche in situ limitate sui dettagli costruttivi e le indagini in situ limitate sulle proprietà dei materiali; fattore di confidenza FC = 1,35;
- <u>LC2 conoscenza adeguata</u>: raggiunto quando sono effettuati il rilievo geometrico, le verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi e le indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali; fattore di confidenza FC = 1,2;
- <u>LC3 conoscenza accurata</u>: raggiunto quando sono effettuati il rilievo geometrico, le verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi e le indagini in situ esaustive sulle proprietà dei materiali; fattore di confidenza FC = 1. Si distinguono tre casi: a) quando sono disponibili tre o più valori sperimentali di resistenza; b) quando sono disponibili due valori sperimentali di resistenza; c) quando è disponibile un valore sperimentale di resistenza.

Livelli di conoscenza		Resistenze	Moduli elastici		
LC1		valori minimi tabellati	media dei valori tabellati		
LC2		media dei valori tabellati	media dei valori tabellati		
	caso a)	media dei risultati delle prove	media dei risultati delle prove o media dei valori tabellati		
LC3		 se la media dei risultati delle prove è compreso nell'intervallo dei valori tabellati si assume la media dei valori tabellati 			
	caso b)	 se la media dei risultati delle prove è maggiore del valore massimo tabellato si assume il valore massimo tabellato 	media dei risultati delle prove o media dei valori tabellati		
		 se la media dei risultati delle prove è minore del valore minimo tabellato si assume la media dei risultati delle prove 			
	caso c)	 se la media dei risultati delle prove è compreso nell'intervallo dei valori tabellati, o è maggiore del valore massimo tabellato, si assume la media dei valori tabellati 	media dei risultati delle prove		
	,	 se la media dei risultati delle prove è minore del valore minimo tabellato si assume la media dei risultati delle prove 	o media dei valori tabellati		

Tabella 3.5 - Valori dei parametri meccanici da assumere per ogni tipologia muraria in funzione del livello di conoscenza acquisito (i valori tabellati si riferiscono alla Tabella 3.4) [85]

3.4 Modalità di rottura locali

Per determinare i meccanismi di rottura locali che si possono verificare su una facciata impattata da un blocco di roccia occorre in primo luogo suddividere in macroaree la superficie esposta.

Si individua come possibile area di impatto quella determinata dai primi due piani fuori terra del fabbricato, in quanto su di essi vi è la maggior probabilità che si verifichi l'impatto di un blocco di roccia (§4.3.1). Come si osserva nell'esempio riportato in Figura 3.1, si evidenziano le seguenti cinque aree: i pannelli murari, le aperture, le aree in corrispondenza dei solai, gli spigoli verticali e le zone in prossimità dei muri di spina.

Nei pannelli murari i meccanismi di rottura locali dovuti all'impatto di un blocco che si possono presentare sono la rottura per punzonamento, la rottura per flessione verticale e la rottura per innesco di meccanismi ad arco; tali meccanismi sono illustrati in dettaglio nel §3.4.1.

Per le restanti aree di impatto si esegue una valutazione qualitativa dei meccanismi di rottura che si possono verificare nel §3.4.2.



Figura 3.1 - Esempio di suddivisione in macroaree del fronte esposto di un edificio in muratura

3.4.1 Modalità di rottura locali per il pannello murario

3.4.1.1 Rottura per punzonamento

Il punzonamento è quel fenomeno prodotto da una forza applicata su un'area relativamente contenuta, in una struttura bidimensionale piana. Il punzonamento provoca una rottura per taglio con traslazione, con la conseguente formazione di una porzione tronco-conica.

Tra i diversi autori che hanno sviluppato studi riguardanti il punzonamento, si evidenziano le considerazioni fatte da Yankelevsky [87] e da Arifovic [88].

Yankelevsky studia il punzonamento dovuto all'impatto a bassa velocità di detriti su lastre in calcestruzzo [87]. In particolare si considera l'impatto di un cilindro "duro" a velocità comprese tra 10 e 200 m/s. Si individuano due fasi principali del meccanismo separate da una transizione (Figura 3.2): (a) penetrazione, durante la quale l'elemento impattante penetra il mezzo senza produrre effetti sulla facciata posteriore della piastra; (b) fase di transizione, in cui l'energia di impatto si propaga e si formano le superfici di frattura curve che isolano una porzione a forma di "campana"; (c) perforazione, durante la quale l'elemento impattante spinge il volume individuato in precedenza in modo da espellerlo.



Figura 3.2 - Modello di penetrazione a due fasi per il punzonamento [87]

Arifovic studia il fenomeno del punzonamento nelle murature causato dalla presenza di ancoraggi [88]. Si determina la capacità di carico di un singolo ancoraggio introducendo lo sforzo di taglio τ che agisce lungo una superficie di controllo cilindrica di diametro pari alla somma del diametro dell'ancoraggio w e dello spessore della muratura s (Figura 3.3). Si ricava, quindi, la forza F che causa la rottura dal prodotto dello sforzo di taglio per l'area della superficie laterale del cilindro secondo le seguenti relazioni:

$$F = \tau \times S_l = \tau \times [\pi \times (w + s) \times s]$$

$$\tau = 0.08 \times v \times f_k \quad (f_k \text{ in } MPa)$$

Dove:

- τ è lo sforzo di taglio agente sulla superficie di controllo cilindrica
- S_l è la superficie laterale del cilindro di controllo
- *w* è il diametro dell'ancoraggio
- *s* è lo spessore della muratura
- ν è un fattore di efficacia applicato alla resistenza a compressione della muratura
- f_k è la resistenza a compressione della muratura

Per il fattore di efficacia ν si assume la stessa relazione adottata nel meccanismo di punzonamento su lastre di calcestruzzo:

$$\nu = \frac{K_1}{\sqrt{f_k}} \quad (f_k in MPa)$$

Dove:

 K_1 è un coefficiente determinato dal confronto dei risultati teorici con le prove di laboratorio ed è posto pari a 3,82 [89]



Figura 3.3 - Sviluppo del meccanismo di punzonamento con individuazione della superficie di controllo [90]

Per il meccanismo di punzonamento su una muratura dovuto all'impatto di un blocco di roccia si adotta la formulazione sviluppata da Arifovic assumendo la grandezza w come il diametro del blocco impattante e non più come il diametro dell'ancoraggio.

3.4.1.2 Rotture per flessione verticale

Il meccanismo di flessione verticale di una parete si manifesta, per effetto di un'azione ortogonale al piano della stessa, con la formazione di una cerniera cilindrica orizzontale (Figura 3.4). La struttura muraria si divide in due blocchi rigidi che ruotano reciprocamente, intorno alla cerniera, fino al collasso [91].

Per il presente lavoro di tesi si considerano meccanismi di flessione verticale di pareti trattenute in sommità, con comportamento monolitico e in cui è coinvolto un solo piano dell'edificio, ossia sono presenti efficaci vincoli di connessione tra i solai e le pareti, per cui, tra un solaio e l'altro, la muratura è trattenuta alle estremità. Ciò comporta una ripetizione dell'analisi per tutti quei piani dell'edificio ai quali è possibile applicare il seguente schema di calcolo.

L'analisi del meccanismo di rottura è sviluppata a partire dal meccanismo di flessione verticale dovuto all'azione del sisma [91] ed è adattata al caso di blocco di roccia impattante sulla muratura.

Il punto di applicazione dell'azione orizzontale, ossia il punto di impatto del blocco di roccia, è variabile lungo tutta l'altezza della parete, occorre, quindi, eseguire l'analisi per ogni posizione della cerniera cilindrica e determinare il valore del moltiplicatore di collasso α della forza orizzontale *F* che determina l'attivazione del cinematismo.

Il moltiplicatore di collasso α può essere ottenuto applicando l'equazione dei lavori virtuali in termini di spostamenti. Si procede all'analisi del problema cinematico assegnando una rotazione virtuale unitaria $\psi = 1$ al corpo 1, così come indicato in Figura 3.4, dove:

- W è il peso proprio della muratura in esame;
- F è la forza orizzontale unitaria, supposta pari a 1 kN, che moltiplicata per il moltiplicatore di collasso α innesca la rottura;
- P_s è il peso del solaio agente sulla parete, calcolato in base all'area di influenza;
- N è il peso trasmesso alla parete dalle murature e dai solai dei livelli superiori;
- *s* è lo spessore della parete;

- *h* è l'altezza della parete (altezza di interpiano);
- h_F è la distanza verticale tra il punto di applicazione della forza F e il carrello in B;
- *d* è la distanza orizzontale dal carrello in B del punto di applicazione del carico trasmesso alla parete dai piani superiori;
- *a* è la distanza orizzontale dal carrello in B del punto di applicazione del carico trasmesso al muro dal solaio.



Figura 3.4 - Schema di calcolo per il meccanismo di flessione verticale

Per un generico punto $P(x_p; y_p)$, appartenente a un corpo rigido piano, le due componenti di spostamento $u_p \in v_p$, positive se dirette come gli assi coordinati, sono espresse in funzione delle componenti di spostamento $u_0 \in v_0$ del polo 0, origine del riferimento, e della rotazione ϑ intorno ad esso, supposta positiva se antioraria, secondo le seguenti equazioni:

$$u_p = u_0 - \vartheta y_p$$
 $v_p = v_0 - \vartheta x_p$

Fissati come poli dei due corpi 1 e 2 rispettivamente i punti $A \in B$, tenendo conto delle condizioni di vincolo e di congruenza in corrispondenza della cerniera C, si valutano la rotazione ϑ_2 del corpo 2 attorno al polo B e il relativo spostamento verticale v_B :

$$\begin{array}{ll} \text{Condizioni di vincolo:} & \begin{cases} u_A = 0 & v_A = 0 & \vartheta_1 = \psi = 1 & \text{per il corpo 1} \\ u_B = 0 & & \text{per il corpo 2} \end{cases} \\ \text{Condizioni di congruenza:} & u_{C1} = u_{C2} & v_{C1} = v_{C2} \\ \vartheta_2 = \varphi = -\psi \frac{h_1}{h_2} = -\frac{h_1}{h_2} & v_B = s \end{cases}$$

Si introduce un fattore $\mu = h/h_2$, funzione della posizione della cerniera cilindrica, da cui si ricavano le seguenti espressioni:

$$h_2 = \frac{h}{\mu}$$
 $h_1 = \frac{\mu - 1}{\mu}h$ $W_2 = \frac{W}{\mu}$ $W_1 = \frac{\mu - 1}{\mu}W$

Gli spostamenti virtuali dei punti di applicazione delle forze agenti sul sistema nella rispettiva direzione di azione sono i seguenti:

$$\delta_F = (\mu - 1)\frac{h}{\mu}$$
$$\delta_{1y} = \frac{s}{2}$$
$$\delta_{2y} = \frac{s}{2}(\mu + 1)$$
$$\delta_{Ny} = s + d(\mu - 1)$$
$$\delta_{Psy} = s + a(\mu - 1)$$

Si applica l'equazione dei lavori virtuali, ottenendo:

$$\alpha F \cdot \delta_F - W_1 \cdot \delta_{1y} - W_2 \cdot \delta_{2y} - N \cdot \delta_{Ny} - P_s \cdot \delta_{Psy} = 0$$

da cui si ricava il moltiplicatore di collasso α :

$$\alpha = \frac{W_1 \cdot \delta_{1y} + W_2 \cdot \delta_{2y} + N \cdot \delta_{Ny} + P_S \cdot \delta_{P_{Sy}}}{F \cdot \delta_F}$$

3.4.1.3 Meccanismi ad arco

Il meccanismo ad arco si verifica quando la deformazione lungo il piano medio di una parete, causata da vincoli di estremità, è impedita dalla presenza e dal collegamento con i solai. Si forma un arco resistente all'interno dello spessore della parete che genera una spinta agente nell'interfaccia con i solai e che produce delle forze di compressione interne che aumentano la capacità del muro di resistere alle azioni ortogonali al piano della parete [92].

L'analisi dei meccanismi ad arco è sviluppata dagli studi sulle murature dei sistemi di ventilazione nelle gallerie minerarie [92][93], utilizzati per reindirizzare il flusso dell'aria, ed è adattata al caso di blocco di roccia impattante sulla muratura.

In assenza di carico trasversale le estremità della parete sono completamente in contatto con i solai; all'aumentare della pressione trasversale il muro inizia a incurvarsi, cominciano ad aprirsi i giunti di malta a metà dell'altezza della parete (in corrispondenza del massimo momento positivo) e diminuisce l'area di contatto con i solai (in corrispondenza del massimo momento negativo). Si forma un arco a 3 cerniere in cui il momento esterno causato dalla pressione trasversale ($\rho \times h^2/8$) è contrastato dalla coppia di forze interne ($P \times r$), dove r è definito come la larghezza dell'arco e P è la spinta generata dall'arco. In Figura 3.5 si riporta il meccanismo descritto e si evidenzia come le zone di schiacciamento si trovino in corrispondenza delle 3 cerniere. Queste condizioni sono espresse matematicamente dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\rho \times h^2}{8} = P \times r$$
$$\rho = \frac{8 \times P \times r}{L^2}$$

Dove:

- ρ è la pressione trasversale
- h è l'altezza della parete
- *P* è la spinta dovuta all'arco agente in corrispondenza delle cerniere
- r è la larghezza dell'arco

La spinta dovuta all'arco P è funzione della resistenza a compressione dell'elemento resistente della muratura e la "zona di schiacciamento" su cui agisce P è pari a 2/10 dello spessore s della muratura (Figura 3.6a), quindi l'espressione per la spinta P è la seguente:

$$P = 0,2 \times s \times f_c \times w$$

Dove:

- *s* è lo spessore della parete
- f_c è la resistenza a compressione dell'elemento resistente
- w è la larghezza della parete su cui si innesca il meccanismo ad arco



Figura 3.5 - Schema di calcolo per il meccanismo ad arco [93]



Figura 3.6 - Schema di calcolo per metà parete: a) con specificazione dell'area su cui agisce P; b) con passaggio a una forza concentrata applicata in mezzeria dell'altezza della muratura [92][93]

Per adattare il meccanismo ad arco al caso di impatto di un blocco di roccia si può passare dalla pressione trasversale ρ agente sulla muratura a una forza concentrata F applicata nel punto medio della muratura. Lo schema di carico della metà superiore della parete relativo alla nuova configurazione è riportato in Figura 3.6b: il momento dovuto all'azione esterna $(F \times h/2)$ è contrastato dalla coppia di forze interne $(P \times r)$, dove la larghezza dell'arco rè funzione dello spostamento laterale della parete in corrispondenza del punto medio δ_h . La nuova conformazione di carico è espressa dalle seguenti espressioni:

$$P \times (0.8 \ s - \delta_h) = F \times \frac{h}{2}$$
$$F = \frac{2 \times P \times (0.8 \ s - \delta_h)}{h}$$

La spinta P che si genera in seguito al meccanismo ad arco dipende dalla rigidità della parere. Si può esprimere la rigidità k di metà parete sia in funzione del modulo elastico E, sia in base alla spinta P e alla deformazione y delle zone di schiacciamento; la combinazione delle due relazioni può essere definita in termini di y secondo quanto segue:

$$k = \frac{A \times E}{\frac{h}{2}} \qquad k = \frac{P}{2y}$$
$$\frac{A \times E}{\frac{h}{2}} = \frac{P}{2y} \qquad \longrightarrow \qquad y = \frac{P \times \frac{h}{2}}{2 \times A \times E}$$

-

Dove:

- *A* è l'area di carico assiale della parete
- *E* è il modulo elastico
- $\frac{h}{2}$ è l'altezza di metà parete
- *P* è la spinta dovuta all'arco agente in corrispondenza delle cerniere
- y è la deformazione di ciascuna delle due zone di schiacciamento di metà parete

Dall'esame del meccanismo ad arco (Figura 3.7) si riscontra che la deformazione y delle aree di schiacciamento è geometricamente legata allo spostamento laterale δ_h . Nella Figura 3.7 la deformazione y è illustrata come l'estensione della parete oltre l'appoggio, ma in realtà rappresenta l'accorciamento del lato di parete sottoposto a trazione. Nel triangolo *BDE* il lato *BD* è uguale allo spessore della parete s a cui si sottrae lo spostamento laterale δ_h e la lunghezza del lato *DE* corrisponde a metà dell'altezza del muro h/2. Nel triangolo *BEF* il lato *FE* è pari allo spessore della parete s e il lato *BF* è dato da metà altezza del muro h/2a cui si sottrae la deformazione y delle zone di schiacciamento. Dopo aver applicato il teorema di Pitagora ai due triangoli *BDE* e *BEF* si combinano le relazioni ricavate e si ottiene una formulazione per lo spostamento laterale δ_h utilizzando la soluzione delle equazioni di secondo grado $y = \frac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{a}$:

Econdo grado
$$y = \frac{1}{2a}$$

$$\left(\frac{h}{2}\right)^2 + (s - \delta_h)^2 = \overline{BE}^2 \text{ per il triangolo } BDE$$

$$\left(\frac{h}{2} - 2y\right)^2 + s^2 = \overline{BE}^2 \text{ per il triangolo } BEF$$

$$\left(\frac{h}{2}\right)^2 + (s - \delta_h)^2 = \left(\frac{h}{2} - 2y\right)^2 + s^2 \longrightarrow \delta_h^2 - 2s(\delta_h) + (2hy - 4y^2) = 0$$

$$\delta_h = \frac{2s \pm \sqrt{(2s)^2 - 4 \times (1) \times (2hy - 4y^2)}}{2}$$



Figura 3.7 - Diagramma della geometria del muro [93]

Riassumendo è possibile calcolare la forza F che innesca il meccanismo ad arco attraverso le seguenti relazioni:

$$P = 0,2 \times s \times f_c \times w$$
$$y = \frac{P \times \frac{h}{2}}{2 \times A \times E}$$
$$\delta_h = \frac{2s \pm \sqrt{(2s)^2 - 4 \times (1) \times (2hy - 4y^2)}}{2}$$
$$F = \frac{2 \times P \times (0,8 \, s - \delta_h)}{h}$$

3.4.1.4 Legge di contatto per la muratura

Assumendo di essere in condizioni perfettamente plastiche, una descrizione della risposta nella zona di contatto tra due corpi si ricava dal modello di Meyer illustrato da Goldsmith nel 1960 [94] e successivamente ripreso da van Mier et al. nel 1991 [95]. Quando un blocco

di raggio r_b impatta con una forza F su un semipiano di muratura caratterizzato da una resistenza a compressione pari a f_k , si ha che:

$$\begin{cases} F = K_c \ \delta \\ K_c = 2\pi r_b f_k \end{cases} \longrightarrow F = 2\pi r_b f_k \delta \longrightarrow \delta = \frac{F}{2\pi r_b f_k}$$

Dove:

 K_c è il parametro di contatto

 δ è l'indentazione

L'energia di deformazione E alla massima indentazione δ_{max} , istante in cui tutta l'energia cinetica si trasforma in energia di deformazione, corrisponde all'area sottesa alla curva F (Figura 3.8) ed è definita come segue:



Figura 3.8 - Legame forza-indentazione (F- δ)

3.4.2 Altre modalità di rottura locali

Oltre al pannello murario, le aree di possibile impatto di un blocco sono le aperture, le aree in corrispondenza dei solai, gli spigoli verticali e le zone in prossimità dei muri di spina (Figura 3.1).

- Le <u>aperture</u> non offrono alcun meccanismo resistente, per cui nel caso in cui il blocco arrivi in corrispondenza di esse entrerà nell'ambiente retrostante.
- Quando un blocco di roccia impatta su aree della muratura <u>in corrispondenza dei solai</u>, il meccanismo di punzonamento non può verificarsi in quanto è impedita l'espulsione del tronco di cono di muratura. In funzione del tipo di solaio si determina la forza necessa-

ria a causare la rottura della muratura: se il solaio non è rigido, ad esempio in legno, e in assenza di soletta in c.a. si assume qualitativamente che la forza necessaria a causare la rottura sia maggiore di quella che genera il punzonamento nel semplice pannello murario e, in particolare sia pari a due o tre volte tale grandezza; se il solaio è in c.a. esso costituisce un elemento di irrigidimento, per cui si verifica la disgregazione per compressione del volume V_d individuato in Figura 3.9 e, in funzione della resistenza a compressione f_k e dell'area di impatto A_i , si determina la forza necessaria a causare la rottura secondo la seguente relazione:

$$F = A_i \times f_k$$



Figura 3.9 - Modalità di rottura quando il blocco impatta la muratura in corrispondenza di un solaio in c.a.

 Se l'impatto avviene sugli <u>spigoli verticali</u> o <u>in prossimità dei muri di spina</u> si mantengono le assunzioni qualitative precedentemente definite per il caso di urto in corrispondenza di un solaio non rigido, ossia la forza che innesca la rottura in tali zone è pari a due o tre volte quella che innesca il punzonamento nel semplice pannello murario.

3.5 Modalità di rottura globali

Quando si verifica un meccanismo di rottura locale vi può essere una propagazione del danneggiamento all'intera struttura secondo lo schema ad albero in Figura 3.10.

Per determinare a livello qualitativo i possibili scenari sono state considerate le seguenti assunzioni:

 si suppone che la propagazione del danno coinvolga solo il piano superiore rispetto al punto di impatto;

- non si considerano gli sviluppi possibili quando il blocco che entra in un ambiente continua il suo moto all'interno del fabbricato;
- l'impatto può avvenire con la stessa probabilità su tutta la superficie esposta.

Per ciascuna delle cinque aree in cui è stata suddivisa la facciata esposta all'impatto si individua la probabilità di impatto p_i in base all'area A_i della singola componente secondo la seguente relazione:

$$p_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^5 A_j}$$

La sommatoria delle cinque componenti costituisce l'area totale della superficie esposta e di conseguenza è valida l'equazione che segue:

$$\sum_{i=1}^5 p_i = 1$$

Quando l'urto avviene sul pannello murario il blocco può non avere l'energia necessaria a innescare un meccanismo di rottura, si ha solo il danneggiamento del pannello murario (scenario 1d); se si arriva al collasso, questo può essere per punzonamento, per flessione verticale o per meccanismo ad arco. Nel primo caso si avrà la formazione di una cavità nella parete senza ulteriori propagazioni del danno (scenario 1cP). Per il collasso per flessione verticale o per meccanismo ad arco occorre valutare la propagazione del danno in base al tipo e all'orditura del solaio: (i) in presenza di un solaio in c.a. con l'orditura tale per cui il solaio appoggia sulla muratura esposta a monte (O1) si avrà il danneggiamento dell'orizzontamento e il collasso di parte del pannello murario del piano superiore rispetto al punto di impatto (scenari 1cF-1 e 1cM-1); (ii) in caso di un solaio in legno che scarica sulla parete esposta all'urto (O1) il collasso locale della muratura comporta il collasso del solaio e di parte della muratura sovrastante la zona di impatto (scenari 1cF-2 e 1cM-2); (ii) qualora il solaio sia ordito parallelamente al fronte esposto (O2) il collasso locale non comporta conseguenze sul solaio, ma vi sarà il collasso di parte della muratura del piano superiore (scenari 1cF-3 e 1cM-3).

Se l'impatto avviene sulle aperture si ha il collasso delle stesse e nessun'altra conseguenza per il resto della struttura (scenario 2c), in quanto si considera l'assunzione precedentemente citata, per cui non si tiene conto dei possibili moti del blocco all'interno dell'edificio.

Quando l'urto si verifica in corrispondenza dei solai e l'energia di impatto non è sufficiente a innescare un meccanismo di collasso, si ha solo il danneggiamento della parete (scenario 3d). In caso contrario si arriva al collasso locale funzione di tipo di solaio: se esso è in c.a. il collasso determina la rottura per compressione della muratura (scenario 3c-1); per un solaio in legno si ha il collasso della parete esposta e il danneggiamento del solaio retrostante (scenario 3c-2).

Se l'impatto è in prossimità degli spigoli verticali può accadere che ci sia solo il danneggiamento della muratura esterna senza ulteriori conseguenze per il resto della struttura (scenario 4d) o che si arrivi al collasso locale della parete ortogonale, che porta a una propagazione del danno in funzione del tipo e all'orditura del solaio. Quando il solaio appoggia sulla parete esposta a monte (O1) il collasso locale non comporta conseguenze per il solaio, ma si ha un collasso della muratura sovrastante l'area di impatto (scenario 4c-1). Se il solaio è ordito parallelamente alla facciata esposta il meccanismo locale, oltre al collasso della muratura del piano superiore, porta al danneggiamento del solaio, se questo è in c.a. (scenario 4c-2) o al collasso dello stesso se è in legno (scenario 4c-3).

Quando l'urto avviene in corrispondenza dei muri di spina sono valide le considerazioni illustrate per il caso di impatto sugli spigoli verticali (scenari 5d, 5c-1, 5c-2 e 5c-3).



Figura 3.10 - Schema ad albero dei possibili scenari di rottura globale dovuto all'impatto di un blocco di rocci

Capitolo 4

Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pannelli murari

4.1 Introduzione

Per capire il funzionamento strutturale dei manufatti che possono essere interessati dal fenomeno di caduta massi, si è scelto di partire da una scheda di rilievo speditivo, sviluppata in un progetto in collaborazione tra Politecnico di Torino e Regione Valle d'Aosta.

Dopo aver individuato le variabili significative per l'analisi dei meccanismi di rottura locali, si sviluppa un'analisi di simulazione completa per il punzonamento, per la flessione verticale e per il meccanismo ad arco adottando alcune approssimazioni in modo da rendere sistematici i calcoli.

Si arriva a una valutazione quantitativa della vulnerabilità per i differenti meccanismi di rottura del pannello murario attraverso le curve di fragilità in cui si esprime la probabilità di rottura in funzione del contenuto energetico dell'impatto.

4.2 Scheda di rilievo

La scheda di rilievo speditivo (Figura 4.1) presenta le seguenti parti: (1) identificazione della posizione del manufatto lungo il versante e all'interno del centro abitato, della geometria e dello stato di manutenzione; (2) analisi della tecnologia costruttiva prevalente del manufatto; (3) valutazione delle componenti non strutturali; (4) potenzialità al collasso nell'eventualità che un'area circolare di diametro pari a 2 m sia rimossa dalla parete frontale del fabbricato.

I parametri di input all'interno della scheda di rilievo speditivo ritenuti importanti per l'analisi dei meccanismi di rottura per gli edifici in muratura (Figura 4.2) sono i seguenti:

- numero di piani fuori terra, che ha un peso nel meccanismo di rottura per flessione (§3.4.1.2) in quanto è adottato per semplificare i calcoli sulle azioni agenti sulla muratura in esame. Inoltre, come riportato nel §4.3.1, le valutazioni sui meccanismi di rottura sono eseguite considerando sempre e solo i primi due piani fuori terra di un fabbricato;
- altezza media di un piano, assunta pari alla media delle altezze interpiano;
- tipologia costruttiva, tra cui per il presente lavoro di tesi si è scelto di considerare solo quelle in muratura;
- tipo di struttura orizzontale (solai interpiano), ridotta a tre categorie: (i) travi in legno con semplice tavolato, (ii) travi in legno con tavolato e caldana, (iii) solai in cemento armato; in seguito questi verranno rispettivamente indicati come (i) solaio in legno leggero, (ii) solaio in legno pesante, (iii) solaio in c.a.;
- elemento resistente della muratura, per il quale si considera la sezione della scheda relativa ai tamponamenti e si limita la scelta dell'elemento resistente tra laterizio, pietra e blocchi cemento;
- spessore del pannello murario;
- stato di conservazione del pannello murario, che può essere buono, sufficiente o degrado;
- tipo di struttura della copertura, che può essere (i) copertura in legno leggero, (ii) copertura in legno pesante, (iii) copertura in c.a.;
- spinta della copertura, per cui si valutano tre possibilità: copertura spingente, copertura poco spingente e copertura a spinta eliminata.

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pannelli murari

Sche	da di	rilievo per	edif	ici in z	ona di	peri	colo crolli	di rocc	ia	E
Anagrafica del	l'edif	icio						Codice ide	entificativo	1
Comune								1		
Indirizzo								1		
Dati catastali	Fo	glio		Map.		P	art.	1		
Coordinate (UTM)		т	m Es	st _		, m	Nord	1		
Compilatore			D	ata comp	oilazione	- Lu	//			
Dati dimensionali - Età della costruzione - Stato di conservazione										
N. piani f.t. (s.t)	Altezza	media di pian	o [m]	Dime	ensioni ir	n pian	ta [m] Ani	no/period	o di cost	ruzione
			-		<u>x</u>	<u></u>		8	_	
Struttura progetta	ta con	criteri sismici	s	a O no	State	o di m	anutenzione g	jenerale:	Degra	o obe
Norme tecnicne per	la prog		lele le	alata O I		ISUTIC			Buon	0.0
Presenza di giunti	_ si C		ICIO ISC		Editicio in	aggre		incio proi	ietto	100 70
Sezione del pendio Pianta e direzione di provenienza dei blocchi										
Tipologia cost	ruttiv	a prevale	nte							_
Muratura O	Legr		Cemer	nto armat	to O		Altro:			
Muratura										
Strutture vertical	i o				Strutt	ure in	muratura			
	ificat	A tessitura ir	regola	ire e di	A tes	situra	regolare e di	olati		Ita
	ident	squa	(pietra drato)	ame non	mattor	a qua ni; piet	ra squadrata)	tri iso	Aista	forza
Strutture orizzontali	Non	Senza cordoli	Con	cordoli o	Senza c	ordoli	Con cordoli o	Pilas	~	Rin
Non identificate	0	0		0	0000		0	0	0	0
Volte	0	0		0	0		0	0	0	0
Travi in legno	0	0		0	0		0	0	0	0
con semplice tavolato Travi in legno con	0	0		0	0		0	0	0	0
Solai in cemento a		0		0			0	0	0	0
armato		0		0			0		0	0
Altro:	0	0		0	0	<u> </u>	0	0	0	0
Spessore della muratu	ra al liv	ello inferiore [cn	n]	uuu	Spessor	e della	a muratura ai liv	elli superi	ori [cm]	uuu
Tamponament	i				Cope	rtur	a			
Materiale: laterizio () pietr	a O blocchi	cemen	nto O	legno le	eggera	a O legno pe	sante O	latero ce	mento O
legno O cls C	ass	ente O		m	carpen	teria n	netallica O	inclinat	aO pi	ana O
Stato di conservaz	ione	Spessore [cn	ן [ו		Presenz	a cord	olo si O no	O Los	ie si C	no O
Degrado O	Sufficie	nte O Buon	0 0		spingen	te O	poco spingen	te O as	pinta elin	ninata O
Parete frontale							Potenzialità	li collase	o se rimo	ssa una
Cor	nponer	ite		Percer	nt. Tipo	logia	porz	ione di ar	ea ¢2 m	Loc und
1)	A.				% SO	NS O	DL10%	- 50%	6	CG
2)					% SO		DL10%	- 50%	6	CG
3)					% SO	NS O	DL10%	- 50%	6	CG
4)					% SO	NS O	DL10%	- 50%	6	CG
Sup. della parete [m ²	1			se rin	nozione s	pigolo	DL10%	- 50%	6	CG
	-			-					CL = 10%;	CG = 100 %
Note:										

Figura 4.1 - Scheda di rilievo speditivo; parte (1) in verde, parte (2) in azzurro (è riportata solo la sezione relativa alla tecnologia costruttiva "muratura"), parte (3) in arancione, parte (4) in rosso

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pannelli murari

Dati dimensionali - Età della costruzione - Stato di conservazione										
N. piani f.t. (s.t)	ni f.t. (s.t) Altezza media di piano [m] Di				nensioni in pianta [m] Anno/periodo di costruzi					
				X						
Tipologia cost	Tipologia costruttiva prevalente									
Muratura O	Legr	o O (Cemento armat	o O	Altro:					
Muratura										
Strutture vertica	li o			Strutture in	muratura					
	n identificat	A tessitura ir cattiva qualità squad	regolare e di (pietrame non drato)	A tessitura i buona qual mattoni; pieti	regolare e di ità (blocchi; ra squadrata)	astri isolati	Mista	inforzata		
Strutture orizzontali	Nor	o catene	catene	o catene	catene	Pila		Ř		
Non identificate	0	О	О	0	0	0	0	0		
Volte	0	0	0	0	0	0	0	0		
Travi in legno con semplice tavolato	0	0	0	0	0	0	0	0		
Travi in legno con tavolato e caldana	0	0	0	0	0	0	0	0		
Solai in cemento a armato	0	0	О	0	0	0	0	0		
Altro:	0	О	О	0	О	0	0	0		
Spessore della muratu	ıra al live	ello inferiore [cn	n]	Spessore della	muratura ai l	ivelli super	iori [cm]			
Tamponament	ti			Copertura	1					
Materiale: laterizio	O pietr	a O blocchi d	cemento O	legno leggera	O legno pe	esante O	latero ce	emento O		
legno O cls C) ass	ente O		carpenteria m	etallica O	inclinat	a O p	iana O		
Stato di conservaz	tione	Spessore [cm	1	Presenza cord	olo si O no	O Lo:	se si⊂) no ()		
Degrado O	Sufficie	nte O Buon	0 0	spingente O	poco spinger	nte O a	spinta elin	ninata O		

Figura 4.2 - Scheda di rilievo speditivo con i parametri considerati per l'analisi

4.3 Calcolo delle curve di fragilità per i meccanismi di rottura sul pannello murario

Come illustrato nel §3.4.1, i meccanismi di rottura locale considerati per un pannello in muratura sono rottura per punzonamento, rottura per flessione verticale e rottura per innesco di meccanismi ad arco. Per determinare le curve di fragilità per ogni meccanismo sono necessarie assunzioni sia di carattere generale, valide per tutti i meccanismi, sia specifiche in base al tipo di rottura studiato.

Le approssimazioni che si riportano in seguito servono a rendere sistematici i calcoli, ma non sono più necessarie nel caso in cui si studi un caso particolare, di cui si conoscono le caratteristiche geometriche, di resistenza e le azioni specifiche reali, note da rilievi e prove in sito.

4.3.1 Assunzioni generali

- La caduta massi è un fenomeno che può coinvolgere volumi di roccia diversi. Per sviluppare l'analisi è stato scelto un blocco di roccia di riferimento che verosimilmente può impattare i fabbricati situati alla base dei pendii in ambito montano. In particolare, è stato individuato un blocco di diametro pari a 0,30 m.
- Si assume che per un blocco di roccia impattante con diametro d_b si abbia un'area di impatto di diametro w, per cui vale $d_b = w$.
- In base al fenomeno franoso della caduta massi, si è individuata come possibile area di impatto quella determinata dai soli primi due piani fuori terra del fabbricato, indipendentemente dal numero di piani totali, perché è su questi che vi è la maggior probabilità che l'evento si presenti. Per le analisi si è considerata un'altezza della parete interpiano fissa pari a 2,7 m.
- L'impulso dinamico dovuto al blocco che impatta sulla parete del fabbricato esposta a monte è trasformato in una forza pseudo-statica e, per valutare le condizioni più sfavorevoli, si considera un blocco con traiettoria normale alla superficie colpita.
- In relazione al tipo di elemento resistente, per ricavare la forza che innesca i meccanismi di rottura studiati vi è la necessità di conoscere la resistenza a compressione della muratura f_k e dell'elemento resistente f_c , il modulo elastico E e il peso specifico γ : qui di seguito si riporta il modo in cui sono stati scelti i valori di riferimento per queste grandezze.

In assenza di indagini conoscitive specifiche, sono stati adottati i valori proposti all'interno della Tabella C8A.2.1 della Circolare n. 617 del 2009 [85] (si veda il §3.3.2.1 della presente). Nello specifico, le murature in laterizio, in pietra e in blocchi cemento sono state associate rispettivamente alle categorie "Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura <45%)", "Muratura in blocchi lapidei squadrati" e "Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)", individuando così i valori per f_k (indicato come f_m), $E \in \gamma$ (indicato come w) (Tabella 4.1).

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilita dei pannelli mura	itazione quantitativa della vulnerabilità dei pannell	i murari
--	---	----------

	$f_{ m m}$	τ ₀	Е	G	w	
Tipologia di muratura	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)	
	Min-max	min-max	min-max	min-max		
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre	100	2,0	690	230	10	
erratiche e irregolari)	180	3,2	1050	350	19	
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato	200	3,5	1020	340		
spessore e nucleo interno	300	5,1	1440	480	20	
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260	5,6	1500	500		
Wuratura în pierre a spaceo con buona tessitura	380	7,4	1980	660	21	
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite,	140	2,8	900	300		
ecc.)	240	4,2	1260	420	16	
Munotuno a blazabi lanidai gauadrati	600	9,0	2400	780		
Muratura a bioceni lapidei squadrati	800	12,0	3200	940	22	
Muratura in mattani niani a malta di calco	240	6,0	1200	400		
Muratura in mattoni pieni e mana di carce	400	9,2	1800	600	18	
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia	500	24	3500	875		
(es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	800	32	5600	1400	15	
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura <	400	30,0	3600	1080		
45%)	600	40,0	5400	1620	12	
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti	300	10,0	2700	810		
verticali a secco (perc. foratura < 45%)	400	13,0	3600	1080	11	
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa	150	9,5	1200	300		
(perc. foratura tra 45% e 65%)	200	12,5	1600	400	12	
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni	300	18,0	2400	600	14	
(foratura < 45%)	440	24,0	3520	880	14	

Tabella 4.1 - Valori selezionati per i parametri meccanici $f_k(f_m)$, E e per il peso specifico $\gamma(w)$ [Tabella C8A.2.1 della Circolare n. 617 del 2009][85]

Per la resistenza a compressione f_k e per il modulo elastico E, la Circolare n. 617 del 2009 [85] prescrive l'utilizzo dei valori proposti in base al livello di conoscenza e, quindi, in funzione del fattore di confidenza FC (§3.3.2.2). Si sceglie di impostare l'analisi ipotizzando un livello di conoscenza LC2, per cui si adottano i valori medi tabellati ridotti, dividendoli per un FC pari a 1,2 (Tabella 4.2).

Per ricavare i valori di resistenza a compressione f_c dell'elemento resistente (laterizio, pietra, blocco cemento), in mancanza di dati certi, si è fatto riferimento alle Tabelle 11.10.V (laterizio e blocchi in cemento) e 11.10.VI (pietra) del D.M. del 14 gennaio 2008 [83] (qui riportate come Tabelle 3.2 e 3.3). In particolare, è stata considerata la classe di malta M5 per rispettare la condizione della Tabella C8.A.2.1 della Circolare n.

617 del 2009 [85], per cui i valori suggeriti sono validi per "malte di caratteristiche scarse". Attraverso l'interpolazione lineare, a partire dai valori di resistenza della muratura f_k si ricavano le corrispondenti resistenze a compressione dell'elemento resistente f_c (indicate come f_{bk}) (Tabelle 4.3 e 4.4).

			f_k [MPa]		E [MPa]			
Tipologia di muratura	min	max	media	valore ridotto	min	max	media	valore ridotto
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	4,0	6,0	5,0	4,2	3600	5400	4500	3750
Muratura a blocchi lapidei squadrati	6,0	8,0	7,0	5,8	2400	3200	2800	2333
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	3,0	4,4	3,7	3,1	2400	3520	2960	2467

Tabella 4.2 - Valori adottati nell'analisi per i parametri meccanici f_k , E e per il peso specifico γ



Tabella 4.3 - Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione dell'elemento resistente fbk per i blocchi in cemento e il laterizio



Tabella 4.4 - Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione dell'elemento resistente f_{bk} per la pietra

Si assume che lo stato di conservazione (buono, sufficiente, degrado) della muratura determini una riduzione di f_k e di f_c . In particolare, ad uno stato di conservazione "Buono" si associano i valori precedentemente individuati, in caso di stato di conservazione "Sufficiente" o "Degrado" si diminuiscono gli stessi rispettivamente del 15% e del 30% (Tabelle 4.5 e 4.6). Lo stato di conservazione risulta irrilevante nel meccanismo di flessione verticale poiché il movimento è rigido e non entra in gioco il valore della resistenza a compressione.

	Resistenza	a media a compressione f_k [MPa]	della muratura
		Stato di conservazion	ne
l'ipologia di muratura	Buono $(100\% f_k)$	Sufficiente $(85\% f_k)$	Degrado (70% f_k)
Muratura in laterizio	4,17	3,54	2,92
Muratura in pietra	5,83	4,96	4,08
Muratura in blocchi di cemento	3,08	2,62	2,16

Tabella 4.5 - Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione della muratura f_k al variare dello stato di conservazione

	Resistenza caratteristica a compressione dell'elemento f_{ϵ} [MPa]						
ידי <u>ו</u> וי וי		Stato di conservazione	e				
l'ipologia di muratura	Buono (100% f)	Sufficiente (85% f)	Degrado (70% <i>f</i> .)				
Muratura in laterizio	7,78	6,61	5,44				
Muratura in pietra	14,36	12,21	10,05				
Muratura in blocchi di cemento	4,61	3,92	3,22				

Tabella 4.6 - Valori adottati nell'analisi per la resistenza a compressione dell'elemento fc al variare dello stato di conservazione

I meccanismi di rottura sono valutati per murature di spessore variabile da 0,30 m a 0,80 m, con passo di 0,10 m. Si studiano quindi sei murature di diverso spessore.

4.3.2 Punzonamento

4.3.2.1 Assunzioni

Oltre alle assunzioni di carattere generale (§4.3.1), i cui valori di riferimento fissi sono riassunti in Tabella 4.7, si aggiungono considerazioni specifiche per il meccanismo di punzonamento.

Ca	selle di inserimento	o datı		
LORI DI IFERIM.	Diametro area di impatto w [m]	Riduzione % di f _k in caso di stato di conservazione "Sufficiente"	Riduzione % di f _k in caso di stato di conservazione "Degrado"	Altezza della parete (interpiano) h [m]
VA R	0,300	15%	30%	2,70

Tabella 4.7 - Valori di riferimento adottati nell'analisi per il meccanismo di punzonamento

- > Il punto di applicazione della forza F sul pannello murario non incide nell'analisi per determinare il valore di carico di rottura fino a quando non si è in prossimità di solai o pareti ortogonali, dove la superficie di taglio che si forma dall'impronta del blocco sulla muratura varia rispetto al caso di impatto sull'area centrale (Figura 4.3a). La valutazione di questo caso specifico richiederebbe studi più approfonditi, pertanto è necessario formulare alcune approssimazioni:
 - si definisce *area in prossimità del solaio* la zona in cui la superficie di taglio che si sviluppa dalla zona di impatto termina nell'intersezione tra solaio e pannello murario; non essendo possibile individuarla in modo univoco al variare dei parametri, si assume che quest'area abbia estensione corrispondente a una volta e mezza il diametro del blocco (Figura 4.3b);
 - in considerazione del fatto che il volume di rottura diminuisce all'avvicinarsi dell'area di impatto al solaio, si assume come caso limite l'impatto rappresentato in Figura 4.3c e, volendo individuare una nuova superficie di controllo, questa sarà data dalla superficie laterale di un prisma la cui base è formata da un cerchio tagliato da una corda;
 - nel meccanismo reale non si individua una forma ben definita perciò, per valutare le condizioni più sfavorevoli, per l'intera area in prossimità del solaio si approssima una superficie di controllo minore coincidente con la superficie laterale del ci-

lindro con base inscritta nel suddetto cerchio tagliato dalla corda, quindi con base di diametro pari a w + s/2 (Figura 4.3c).



Figura 4.3 - Confronto impatto su area centrale e su area in prossimità del solaio (a), definizione dell'area in prossimità del solaio (b), caso limite di meccanismo di punzonamento con nuova superficie di riferimento (c)

4.3.2.2 Analisi

Secondo quanto descritto nei §3.4.1.1 e §3.4.1.4, si determina la forza di innesco del meccanismo di rottura e la corrispondente energia di impatto per differenti configurazioni. Le variabili prese in conto sono il tipo di elemento resistente, lo stato di conservazione e lo spessore della muratura. Si sviluppa l'analisi combinando le diverse variabili, ottenendo in totale 54 casi (Tabella 4.8), infine si ricava la curva di fragilità in cui si esprime la probabilità di rottura in funzione del contenuto energetico dell'impatto.

Variabili in input	Valori delle variabili	Numero variabili	Numero analisi TOTALE
Elemento resistente della muratura	Laterizio Pietra Blocchi cemento	3	
Stato di conservazione	Buono Sufficiente Degrado	3	54
Spessore della muratura s [m]	0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8	6	34

Tabella 4.8 - Variabili considerate nell'analisi per il meccanismo di punzonamento

Esempio

Per una maggiore comprensione si illustrano in dettaglio i calcoli (riassunti in Tabella 4.9) sviluppati per il caso di blocco impattante su una muratura costituita da laterizio, in buono stato di conservazione e spessa 0,30 m.

La resistenza a compressione f_k della muratura è ricavata secondo le considerazioni del §4.3.1: per la muratura in oggetto costituita da laterizio, f_k è 4,17 MPa.

Il fattore di efficacia ν applicato alla resistenza a compressione della muratura e lo sforzo di taglio nominale τ lungo la superficie di controllo sono calcolati in base a quanto illustrato nel §3.4.1.1: per il caso in esame ν è 1,87 e τ è 0,62 MPa.

Come spiegato nel §4.3.2.1, le altezze delle tre fasce orizzontali in cui si suddivide la parete sono funzione del fattore moltiplicativo 1,5 e del diametro dell'area di impatto w. Ne consegue un'altezza di 0,45 m per le due aree in prossimità dei solai e di 1,80 m per la zona centrale.

La superficie laterale S_l del cilindro di controllo si determina per l'area centrale S_{lc} e per la zona in prossimità del solaio S_{ls} partendo rispettivamente da un cerchio di diametro w + s e w + s/2; risulta quindi:

$$S_{lc} = \pi(w+s) \times s = 0,57 m^2$$
$$S_{ls} = \pi\left(w + \frac{s}{2}\right) \times s = 0,42 m^2$$

Si ricavano le forze necessarie a causare il collasso per punzonamento e le relative energie di impatto riferite alla due zone in prossimità dei solai (pedice s) e alla zona centrale del pannello murario (pedice c), che costituiscono quindi tre fasce orizzontali:

$$F_{c} = \tau \times S_{lc} = 352,75 \ kN \quad \to \quad E_{c} = \frac{1}{2} \frac{F_{c}^{2}}{2\pi r_{b} f_{k}} = 15,84 \ kJ$$

$$F_{s} = \tau \times S_{ls} = 264,56 \ kN \quad \to \quad E_{s} = \frac{1}{2} \frac{F_{s}^{2}}{2\pi r_{b} f_{k}} = 8,91 \ kJ$$

Poiché lungo l'altezza del pannello murario l'impatto può avvenire in qualsiasi punto con la stessa probabilità, per ricavare la curva di fragilità (Figura 4.4) i valori di energia di impatto precedentemente ottenuti sono disposti in ordine crescente e le corrispondenti altezze delle fasce di impatto sono rapportate all'altezza totale in modo da ottenere una percentuale che rappresenti la probabilità di innesco del meccanismo.

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pannelli murari

IQ ILVO LVQ VQ ICOTOD VQ VQ VQ VQ VQ VQ VQ VQ VQ VQ VQ VQ VQ	enza a	Fattore di	0.0 1				
COLO	essione uratura IPa] 17	Efficacia applicato alla resistenza a compressione della muratura ν [-] 1,87	Storzo di taglio nominale lungo la superficie di controllo τ [MPa] 0,62				
FINAL	Zona In prossimità del solaio Centrale		Alterzza fascia h _f [m] 0,45 1,80	Circonferenza cilindro di controllo [m] 1,41 1,88	Superficie laterale cilindro di controllo [m ²] 0,42 0,57	Forza che causa il collasso F [kN] 264,56 352,75	Energia di impatto E [J] 8911,95 15843,47





Figura 4.4 - Curva di fragilità di una muratura in laterizio, in buono stato di conservazione, spessa 0,30 m per punzonamento

Osservazioni sui risultati dell'analisi

Rielaborando le espressioni che permettono di definire l'energia di impatto E, si ricava che questa grandezza è indipendente dalla resistenza a compressione, quindi variare il tipo di elemento resistente della muratura o cambiare lo stato di conservazione non comporta alterazioni dell'energia di impatto E (si veda la Tabella A.B2). Si riportano di seguito le equazioni riadattate:

$$\begin{cases} E = \frac{1}{2} \frac{F_{max}^{2}}{2\pi r_{b}f_{k}} \\ F = \tau \times S_{l} \\ \tau = 0.08 \times \nu \times f_{k} \quad (f_{k} \text{ in } MPa) \\ \nu = \frac{K_{1}}{\sqrt{f_{k}}} \\ K_{1} = 3.82 \end{cases}$$
$$E = \frac{1}{2 \times 2\pi r_{b}f_{k}} \times \left(0.08 \times \frac{3.82}{\sqrt{f_{k}}} \times f_{k} \times S_{l}\right)^{2} \quad \rightarrow \quad E = \frac{0.08^{2} \times 3.82^{2} \times S_{l}^{2}}{4\pi r_{b}}$$

L'unica variabile da considerare è lo spessore della muratura: in Tabella 4.10 si riassumono le energie di impatto per le aree in prossimità del solaio e per la zona centrale e in Figura 4.5 sono rappresentate le corrispondenti curve di fragilità. Si osserva che all'aumentare dello spessore l'energia necessaria a innescare il meccanismo di punzonamento nella zona centrale cresce più velocemente rispetto a quella che determina la rottura nella zona in prossimità dei solai (Figura 4.6).

Spessore muratura s [m]	Increm. dello spessore [%]	Area in prossimità del solaio			Area centrale		
		Energia di impatto E [kJ]	Incremento dell'energia [%]	(Increm. dell'energia)/ (Increm. dello spessore)	Energia di impatto E [kJ]	Incremento dell'energia [%]	(Increm. dell'energia)/ (Increm. dello spessore)
0,30		8,91			15,84		
0,40	33%	19,56	119%	3,6	38,34	142%	4,3
0,50	25%	36,98	89%	3,6	78,24	104%	4,2
0,60	20%	63,37	71%	3,6	142,59	82%	4,1
0,70	17%	101,23	60%	3,6	239,61	68%	4,1
0,80	14%	153,35	51%	3,6	378,68	58%	4,1





Figura 4.5 - Curve di fragilità di una muratura per punzonamento al variare dello spessore



Figura 4.6 - Energia di impatto di rottura per punzonamento al variare dello spessore della muratura
4.3.3 Flessione verticale

4.3.3.1 Assunzioni

Oltre alle assunzioni di carattere generale (§4.3.1), i cui valori di riferimento fissi sono riassunti in Tabella 4.11, si aggiungono considerazioni specifiche per il meccanismo di flessione verticale.

Ca	selle di inserimento	o dati
LORI DI FERIM.	Diametro area di impatto w [m]	Altezza della parete (interpian h [m]

0,3

N I

Tabella 4.11 - Valori di riferimento adottati nell'analisi per il meccanismo di flessione verticale

2.70

- I fabbricati considerati hanno un tetto a doppia falda con il colmo parallelo alle curve di livello, per cui la copertura scarica sempre sulla muratura esposta a monte.
- Per tener conto delle diverse configurazioni della spinta della copertura, e quindi per determinare le componenti verticale e orizzontale del carico, è necessario conoscere l'angolo tra la falda e l'orizzontale. Poiché le analisi sono valide per fabbricati in ambito montano, si è considerata una copertura a doppia falda con pendenza del 62%, ossia con un angolo di 32° rispetto all'orizzontale (Figura 4.7).
- Un'altra assunzione necessaria per sistematizzare i calcoli legati ai carichi della copertura è la definizione della sporgenza della stessa oltre il filo esterno della muratura, in modo da determinare la lunghezza effettiva della singola falda. In questo modo, a partire dal carico al m², è possibile ricavare il carico totale agente sulla muratura. Si sceglie un valore di 0,30 m come sporgenza della copertura (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Assunzioni per l'angolo tra la falda e l'orizzontale e per la sporgenza della copertura dal filo esterno della muratura

Secondo quanto stabilito nel §4.2, la copertura può essere spingente, a spinta eliminata o poco spingente. In caso di copertura spingente si scompone l'azione C agente parallelamente al piano della falda nelle componenti orizzontale C_h e verticale C_v (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Scomposizione del carico di copertura in caso questa sia spingente

In presenza di una copertura a spinta eliminata, ossia in presenza di catena, l'intera azione C è applicata verticalmente. Se la copertura è poco spingente, ad esempio in presenza di strutture con capriata senza catena, è stato stabilito di supporre che la componente orizzontale C_h sia il 10% della componente verticale C_v . Per cui nota l'azione C si determinano le componenti come segue:

$$\begin{cases} C_h = 0.10 \times C_v \\ C_h^2 + C_v^2 = C^2 \end{cases} \qquad \Rightarrow \qquad C_v = \frac{C}{\sqrt{1.01}}$$

➢ Poiché il punto di impatto del blocco di roccia può avvenire con la stessa probabilità lungo l'altezza della parete, si dovrebbe eseguire l'analisi per tutte le posizioni di impatto. Per ottenere un'analisi attendibile, si considerano sufficienti le valutazioni per 30 punti lungo l'altezza della muratura, così da rimanere nell'ordine dei 10 cm tra un punto e il seguente. In particolare, il primo e l'ultimo punto (a partire dal basso) distano una misura pari al raggio del blocco r_b rispettivamente dall'estradosso e dall'intradosso del solaio più vicino, secondo lo schema in Figura 4.9, e lungo l'altezza compresa h_a si individuano altri 28 punti, in modo da ottenerne 30 fra loro equidistanti.



Figura 4.9 - Punti considerati per l'impatto (in rosso)

Il meccanismo di flessione illustrato al §3.4.1.2 è sviluppato su una striscia verticale di muratura. Risulta evidente, però, che nel momento in cui il blocco impatta sul pannello murario la rottura si propaga lungo fratture inclinate rispetto alla verticale, secondo un angolo che è funzione del tipo di tessitura degli elementi resistenti. Si può desumere che il meccanismo di flessione verticale interessi il volume di muro rappresentato in Figura 4.10. Per le analisi si considerano superfici di rottura che formano un angolo rispetto alla verticale di 25°. Ne consegue che il volume in gioco si ricava come segue:

$$V = \left[(h \times w) + 2 \times \left(\frac{h_1 \times h_1 \tan \left(25^\circ \right)}{2} \right) + 2 \times \left(\frac{h_2 \times h_2 \tan \left(25^\circ \right)}{2} \right) \right] \times s$$

> I carichi agenti sulla muratura dipendono anche dall'area di carico assiale $s \times e$ (area blu in Figura 4.10), dove e è la larghezza di carico assiale determinabile dalla seguente relazione:



 $e = w + 2 \times (h_2 \times \tan 25^\circ)$

Figura 4.10 - Volume interessato dal meccanismo di flessione verticale

Nel meccanismo di rottura bisogna considerare le azioni agenti sul pannello in muratura, quindi un dato di input necessario è il carico al m² dei solai interpiano e della copertura. Per il presente lavoro di tesi sono stati adottati valori corrispondenti a solai tipo (in legno leggero, in legno pesante o in c.a.).

Il solaio interpiano in legno leggero adottato nell'analisi è composto da travi in legno e semplice tavolato, costituito da assiti in legno (Tabella 4.12); quello in legno pesante è formato come il precedente con l'aggiunta della caldana, del sottofondo di allettamento, del pavimento in cotto e dell'intonaco civile (Tabella 4.13); quello in c.a. è l'insieme

delle pignatte, della soletta, dei travetti, del sottofondo in calcestruzzo magro, del pavimento in piastrelle e dell'intonaco civile (Tabella 4.14). Il solaio di copertura in legno leggero è costituito da travetti, tavelle e coppi (Tabella 4.15); quello in legno pesante è come il precedente, ma presenta le lose in sostituzione dei coppi (Tabella 4.16); quello in c.a. è composto dall'intonaco, dalle pignatte, dalla soletta, dai travetti, dal manto impermeabilizzante, dal manto isolante termico e dalle tegole su correntini in legno (Tabella 4.17). Per tutti i solai è stato considerato un carico variabile in base alla categoria corrispondente: per quelli interpiano si assume un carico variabile dovuto agli ambienti ad uso residenziale, per le coperture si adotta il carico variabile per la sola manutenzione.

Caselle di inserimento dati

Caselle contenenti i dati elaborati

Caselle contenenti i risultati finali dell'analisi

Solaio interpiano in legno leggero										
(Caratteristiche		Carichi a m ²							
	Sezione	0,15		Elementi del solaio	$[kN/m^2]$					
Travo	[m] x [m]	0,22		Trave	0,36					
Trave	Interasse [m]	0,5		Assito in legno	0,19					
	Peso specifico [kN/m ³]	5,5		Destinazione civile abitazione	2,00					
Assito in loopo	Spessore [cm]	3,5		TOTALE	2,56					
rissito in legito	Peso specifico [kN/m ³]	5,5								

Tabella 4.12 - Carico a m² per un solaio interpiano in legno leggero

	leg	no pesante		
C		Ca		
	Sezione	0,15		Elementi de
T	[m] x [m]	0,22		Trav
Irave	Interasse [m]	0,5		Assito in
	Peso specifico [kN/m ³]	5,5		Calda
A	Spessore [cm]	3,5		Pavimento
Assito in legno	Peso specifico [kN/m ³]	5,5		Sottofondo di a
Caldana	Spessore [cm]	4,0		Intonaco
Caldana	Peso specifico [kN/m ³]	7		Destinazione civ
	Spessore [cm]	3,0		TOTA
Sottofondo	Peso specifico [kN/m ³]	18		
Pavimento in	Spessore [cm]	2,5		
cotto	Peso specifico [kN/m ³]	16		

eg	no pesante	
	Carichi a m ²	
	Elementi del solaio	$[kN/m^2]$
	Trave	0,36
	Assito in legno	0,19
	Caldana	0,28
	Pavimento in cotto	0,40
	Sottofondo di allettamento	0,54
	Intonaco civile	0,40
	Destinazione civile abitazione	2,00
	TOTALE	4,18

Tabella 4.13 - Carico a m² per un solaio interpiano in legno pesante

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pannelli murari

	in c.a.						
0	Caratteristiche			Carichi a m ²			
	Sezione	0,16		Elementi del solaio	$[kN/m^2]$		
Dispatto	[m] x [m]	0,4		Pignatte	0,70		
Pignatte	Interasse [m]	0,5		Soletta	1,00		
	Peso specifico [kN/m ³]	5,5		Travetti	0,80		
C 1 //	Spessore [cm]	4		Pavimento in piastrelle	0,40		
Soletta	Peso specifico [kN/m ³]	25		Sottofondo in cls magro	0,80		
	Sezione	0,16		Intonaco civile	0,40		
<u>т</u>	[m] x [m]	0,1		Destinazione civile abitazione	2,00		
Iravetti	Interasse [m]	0,5		TOTALE	6,10		
	Peso specifico [kN/m ³]	25]				

Tabella 4.14 - Carico a m² per un solaio interpiano in c.a.

Copertura in legno leggero										
C	aratteristiche		Carichi a m ²							
Rivestimento in	Spessore [cm]	4,0		Elementi del solaio	$[kN/m^2]$					
coppi	Peso specifico [kN/m ³] 19			Travetti + tavelle	0,80					
				Соррі	0,78					
				Manutenzione	0,50					

Tabella 4.15 - Carico a m² per una copertura in legno leggero

TOTALE

TOTALE

2,08

4,00

Copertura in legno pesante									
C	aratteristiche		Carichi a m ²						
Rivestimento in	Peso per m ² [kN/m ²]	1,8		Elementi del solaio	$[kN/m^2]$				
lose (Luserna)	Sovrapposizione lose	1,5		Travetti + tavelle	0,80				
				Lose (Luserna)	2,70				
				Manutenzione	0,50				

Tabella 4.16 -	Carico a	m ² per una	copertura in	n legno	pesante
		1	1		

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pant	nelli murari
---	--------------

Copertura in c.a.									
C	Caratteristiche			Carichi a m ²					
	Sezione	0,16		Elementi del solaio	$[kN/m^2]$				
Dignatto	[m] x [m]	0,4		Intonaco	0,29				
Fighatte	Interasse [m]	0,5		Pignatte	0,70				
	Peso specifico [kN/m ³]	5,5		Soletta	1,00				
C 1 44	Spessore [cm]	4		Travetti	0,80				
Soletta	Peso specifico [kN/m ³]	25		Manto impermeabilizzante	0,15				
	Sezione	0,16		Manto isolante termico	0,10				
	[m] x [m]	0,1		Tegole su correntini in legno	0,83				
Iravetti	Interasse [m]	0,5		Manutenzione	0,50				
	Peso specifico [kN/m ³]	25		TOTALE	4,38				

Tabella 4.17 - Carico a m² per una copertura in c.a.

- All'interno dello stesso fabbricato si suppone sia presente la stessa tipologia strutturale per i solai interpiano e per la copertura.
- Per i solai sono state valutate lunghezze variabili da 3 m a 5 m, con passo di 1 m. Si studiano, quindi, tre solai con luce diversa.
- Nel caso in cui l'orditura del solaio sia tale per cui il solaio appoggia sulla muratura esposta a monte, il carico trasmesso dal solaio P_s è dato dal prodotto dell'area di influenza per il carico al m² precedentemente definito. Per l'area di influenza si suppone uno schema di carico in cui il peso del solaio è suddiviso in parti uguali sui due appoggi, quindi coincide con metà della superficie *luce solaio* × *e*. Al contrario, quando il solaio è ordito in modo da scaricare il peso sui muri ortogonali alla parete studiata, l'azione P_s si annulla.

In ogni caso si assume un'orditura comune tra tutti i solai interpiano.

> Per regolarizzare il calcolo del carico trasmesso dai piani superiori N, si assume uno schema standard dei fabbricati studiati (Figura 4.11); ne consegue che, per un edificio con n piani f.t., sono adottate le seguenti relazioni:

$$\begin{split} N &= (W_e + P_s) \times (n - 2) + C_v \quad per \ il \ muro \ al \ piano \ terra \\ N &= (W_e + P_s) \times (n - 3) + C_v \quad per \ il \ muro \ al \ piano \ primo \\ W_e &= h \times e \times s \times \gamma \end{split}$$

Dove:

 W_e è il carico della muratura di un piano superiore agente sull'area di carico assiale $(s \times e)$



Figura 4.11 - Schema delle strutture assunte per l'analisi

Secondo lo schema di calcolo per il meccanismo di flessione verticale (Figura 3.4), il carico trasmesso dai piani superiori N e dal solaio P_s sono applicati sulla muratura rispettivamente con un braccio orizzontale d e a dal carrello in B. Per l'analisi sono stati scelti dei valori fissi per i due bracci e, in particolare, il carico trasmesso dai piani superiori è considerato applicato sempre nel centro della muratura, quindi d vale s/2, mentre il carico che arriva dal solaio ha un braccio fisso pari a un quarto dello spessore della muratura, quindi a è pari a s/4.

4.3.3.2 Analisi

Secondo quanto descritto nei §3.4.1.2 e §3.4.1.4, si determina la forza di innesco del meccanismo di rottura e la corrispondente energia di impatto per differenti configurazioni. Le variabili prese in esame sono il numero di piani dell'edificio, la luce del solaio, la spinta della copertura, l'orditura del solaio interpiano, il tipo di solaio interpiano e di copertura, il tipo di elemento resistente e lo spessore della muratura. Si sviluppa l'analisi combinando le diverse variabili ottenendo in totale 1944 casi (Tabella 4.18). Infine si ricava la curva di fragilità in cui si esprime la probabilità di rottura in funzione del contenuto energetico dell'impatto.

.

÷

.

Variabili in input	Valori delle variabili	Numero variabili	Numero analisi TOTALE		
Numero di piani	3 piani f.t.	2			
dell'edificio	4 piani f.t.	2			
	Laterizio				
della muratura	Pietra	3			
	Blocchi cemento				
	0,3				
	0,4				
Spessore della	0,5	6			
muratura s [m]	0,6	0			
	0,7				
	0,8		1944		
Orditura del solaio	Sì = solaio scarica sulla muratuta	2	1 744		
	No = solaio non scarica sulla muratura	2			
Tipo di solaio	In legno leggero				
interpiano e di	In legno pesante	3			
copertura	In c.a.				
T 11 1. T	3				
Luce del solato L	4	3			
[111]	5				
Sector della	Spingente				
opertura	Poco spingente	3			
copertura	A spinta eliminata				

Tabella 4.18 - Variabili considerate nell'analisi per il meccanismo di flessione verticale

Esempio

Per una maggiore comprensione si illustrano in dettaglio i calcoli (riassunti in Tabella 4.19) sviluppati per il caso di blocco impattante sulla muratura al primo piano di un edificio costituito da 3 piani fuori terra, secondo lo schema riportato in Figura 4.12, con luce del solaio pari a 3 m, con la copertura a spinta eliminata, con l'orditura del solaio tale per cui il carico del solaio agisce sulla muratura esposta a monte, con il solaio interpiano e di copertura in legno leggero, con la muratura costituita da laterizio e spessa 0,30 m.

Caselle di inserimento dati

Caselle contenenti i dati elaborati

	- -		Numero Luce Spinta Orditura: piani solaio copertura luce solaio scarica		ara:	Ti	ро	Л	lipo		Elemento			Spessore					
D1		5			piani		0	copert	ura	solaio so	carica	. sol	solaio		olaio		resiste	ente	mura
	IA	Ż –	edifici	.0	l [m]	1		sulla mui	atura:	Interp	biano io in	Cor	ortura	de	ella mu	ratura	S [1	mj
	AR	z	3 3				A spin	nta	Sì		leg	no	in	legno		Lateri	zio	0,	30
ĺ							elimina	ata			legg	ero	leg	ggero					
			Lunghezza		0.1	. .	0.11						F	Peso	F	Resiste	nza a	Fo	rza
	ID S	3 1			Caric solai	hi O	Solai	hi					spe	ecifico	co	mpres	ssione	unit	aria
-	Ξŝ	3	falda	la L	interpia	ano	coperti	ura	d [n	1]	a [1	m]	Ċ	lella		dell	а	che c	ausa
	DA	Ā	[m]		[kN/n	n²]	[kN/n	n²]					mu v.П.	ratura N/m31		murat f. IM	ura Pal	1 col	lasso zNII
	- (4,42		2,56	5	2,08		0,15	5	0,0	75	1 [K	1 1 ,0		4,1	7	1,0	000
1		1			3377	1177	11/7	D		0	· · ·	0	•		-		N 7		
h ₁ [m]	h ₂ [m]	е [m]	W [kN]	W1 [kN]	W2 [kN]	W _e [kN]	P _s [kN	C _v	C _h [kN]	μ[-]	δ _F [m]	δ _{1y} [m]	δ _{2y} [m]	δ _{Ny} [m]	δ _{Psy} [m]	N [kN]	α [-]	Е[J]
0,1	5	2,55	2,68	13,87	7 0,8	13,1	26,0	10,2	7 12,34	0	1,06	0,15	0,2	0,31	0,31	0,30	12,3	74,0	697, 0
0,2	3	2,47	2, 60	13,23	3 1,1	12,1	25,3	9,9	7 11,99	0	1,09	0,23	0,2	0,31	0,31	0,31	12,0	46,4	273,9
0,3	2	2,38	2,52	12,63	3 1,5	11,2	24,5	9,6	7 11,63	0	1,13	0,32	0,2	0,32	0,32	0,31	11,6	33,3	141,2
0,4	0	2,30	2,45	12,08	3 1,8	10,3	23,8	9,3	8 11,28	0	1,17	0,40	0,2	0,33	0,33	0,31	11,3	25,7	84,1
0,4	8	2,22	2,37	11,57	7 2,1	9,5	23,0	9,0	8 10,92	0	1,22	0,48	0,2	0,33	0,33	0,32	10,9	20,7	54,8
0,5	6	2,14	2,29	11,11	1 2,3	8,8	22,3	8,7	9 10,57	0	1,26	0,56	0,2	0,34	0,34	0,32	10,6	17,3	37,9
0,6	5	2,05	2,22	10,70) 2,6	8,1	21,5	8,4	9 10,21	0	1,31	0,65	0,2	0,35	0,35	0,32	10,2	14,7	27,5
0,7	3	1,97	2,14	10,33	3 2,8	7,5	20,8	8,2	9,85	0	1,37	0,73	0,2	0,36	0,36	0,33	9,9	12,7	20,6
0,8	1	1,89	2,06	10,01	1 3,0	7,0	20,0	7,9	0 9,50	0	1,43	0,81	0,2	0,36	0,36	0,33	9,5	11,2	15,9
0,8	9	1,81	1,98	9,73	3,2	6,5	19,3	7,6) 9,14	0	1,50	0,89	0,2	0,37	0,37	0,34	9,1	10,0	12,6
0,9	8	1,72	1,91	9,50	3,4	6,1	18,5	7,3	1 8,79	0	1,57	0,98	0,2	0,39	0,39	0,34	8,8	8,9	10,2
1,0	4	1,64	1,85	9,32	3,/	5,/	17,8	7,0	1 8,45	0	1,05	1,06	0,2	0,40	0,40	0,35	8,4	8,1	8,3 7.0
1,1	4	1,30	1,75	9,10	5,9 4 1	5,5	16.3	6.4	2 0,00	0	1,75	1,14	0,2	0,41	0,41	0,30	0,1 7 7	6.9	7,0 5.0
1,2	.)	1,47	1,07	9.04	4.4	47	15,5	6.1	2 7,72	0	1.05	1,25	0,2	0,44	0,44	0,30	74	6.3	5.0
1,3	9	1,37	1,00	9.04	47	44	14.8	5.8	3 7 01	0	2.06	1 39	0,2	0,46	0.46	0.38	7,4	5.9	4.4
1.4	.7	1.23	1.44	9.09	5.0	4.1	14.0	5.5	3 6.65	0	2,00	1.47	0.2	0.48	0.48	0.39	6.7	5.5	3.8
1,5	6	1,14	1,37	9,18	5,3	3,9	13,3	5,2	4 6,30	0	2,36	1,56	0,2	0,50	0,50	0,40	6,3	5,2	3,4
1,6	4	1,06	1,29	9,32	5,7	3,7	12,5	4,9	4 5,94	0	2,55	1,64	0,2	0,53	0,53	0,42	5,9	4,9	3,0
1,7	2	0,98	1,21	9,50	6,1	3,4	11,8	4,6	4 5,59	0	2,76	1,72	0,2	0,56	0,56	0,43	5,6	4,6	2,8
1,8	1	0,89	1,13	9,73	6,5	3,2	11,0	4,3	5 5,23	0	3,02	1,81	0,2	0,60	0,60	0,45	5,2	4,5	2,5
1,8	9	0,81	1,06	10,01	1 7,0	3,0	10,3	4,0	5 4,87	0	3,32	1,89	0,2	0,65	0,65	0,47	4,9	4,3	2,3
1,9	7	0,73	0,98	10,33	3 7,5	2,8	9,5	3,7	6 4,52	0	3, 70	1,97	0,2	0,71	0,71	0,50	4,5	4,1	2,2
2, 0	5	0,65	0,90	10,70) 8,1	2,6	8,8	3,4	6 4,16	0	4,18	2,05	0,2	0,78	0,78	0,54	4,2	4,0	2,1
2,1	4	0,56	0,83	11,11	1 8,8	2,3	8,0	3,1	7 3,81	0	4,79	2,14	0,2	0,87	0,87	0,58	3,8	4,0	2,0
2,2	2	0,48	0,75	11,57	7 9,5	2,1	7,3	2,8	7 3,45	0	5,61	2,22	0,2	0,99	0,99	0,65	3,5	3,9	2,0
2,3	0	0,40	0,67	12,08	3 10,3	1,8	6,5	2,5	7 3,09	0	6,78	2,30	0,2	1,17	1,17	0,73	3,1	4,0	2,0
2,3	8	0,32	0,59	12,63	3 11,2	1,5	5,8	2,2	8 2,74	0	8,56	2,38	0,2	1,43	1,43	0,87	2,7	4,1	2,1
2,4	7	0,23	0,52	13,23	3 12,1	1,1	5,0	1,9	8 2,38	0	11,60	2,47	0,2	1,89	1,89	1,10	2,4	4,3	2,4
2,5	5	0,15	0,44	13,87	7 13,1	0,8	4,3	1,6	2,03	0	18,00	2,55	0,2	2,85	2,85	1,58	2,0	4,9	3,1

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pannelli murari

Tabella 4.19 - Calcolo dell'energia di impatto per cui si verifica la flessione verticale per una muratura al piano primo di un fabbricato costituito da 3 piani fuori terra, con luce del solaio pari a 3 m, con la copertura a spinta eliminata, con l'orditura del solaio tale per cui il carico agisce sulla muratura esposta a monte, con il solaio interpiano e di copertura in legno leggero, con la muratura costituita da laterizio e spessa 0,30 m La lunghezza della singola falda, valore necessario per determinare l'azione dovuta alla copertura agente sulla muratura, è calcolata secondo la seguente relazione (Figura 4.12):

 $lunghezza singola falda = \frac{sporgenza copertura+s+luce solaio+s_{muratura centrale/2}}{cop 22^{\circ}}$



Figura 4.12 - Assunzioni per il calcolo della lunghezza della singola falda

I carichi a m² del solaio interpiano e della copertura sono assunti secondo quanto illustrato al 4.3.3.1 e, per il caso in esame di solaio in legno leggero, sono rispettivamente pari a 2,56 kN/m² e 2,08 kN/m².

Per il muro in esame, di spessore 0,30 m, i bracci delle azioni d e a dovute al carico trasmesso dai piani superiori N e dal solaio P_s sono rispettivamente pari a 0,15 m e 0,075 m, secondo quanto definito al §4.3.3.1.

Il peso specifico γ e la resistenza a compressione f_k della muratura sono ricavati secondo le considerazioni del §4.3.1 e, per la muratura in oggetto costituita da laterizio, si ha che γ è 12 kN/m³ e f_k vale 4,17 MPa.

Come spiegato nel §4.3.3.1, l'analisi si ripete per 30 punti lungo l'altezza della muratura, e in base al punto di impatto cambiano le seguenti grandezze:

- le altezze dei blocchi h_1 e h_2 che si individuano quando si forma la cerniera cilindrica;
- la larghezza di carico assiale e;
- il peso proprio del volume interessato dal meccanismo di flessione W e i pesi dei due blocchi W_1 e W_2 ;
- i carichi trasmessi dai solai interpiano P_s , dalla copertura C e dai piani superiori N, poiché dipendono dalla larghezza di carico assiale e;
- il fattore μ ;
- gli spostamenti virtuali dei punti di applicazione delle forze δ_F , δ_{2y} , δ_{Ny} e δ_{Psy} .

Se per esempio si analizza l'impatto a quota h_1 equivalente a 2,22 m, le grandezze sopra citate sono:

$$\begin{split} h_{2} &= h - h_{1} = 0,48 \ m \\ e &= w + 2 \times (h_{2} \times \tan 25^{\circ}) = 0,75 \ m \\ W &= \left[(h \times w) + 2 \times \left(\frac{h_{1} \times h_{1} \tan (25^{\circ})}{2} \right) + 2 \times \left(\frac{h_{2} \times h_{2} \tan (25^{\circ})}{2} \right) \right] \times s \times \gamma = 11,57 \ kN \\ W_{1} &= 2 \times \left(\frac{h_{1} \times h_{1} \tan (25^{\circ})}{2} \right) \times s \times \gamma = 9,5 \ kN \\ W_{2} &= 2 \times \left(\frac{h_{2} \times h_{2} \tan (25^{\circ})}{2} \right) \times s \times \gamma = 2,1 \ kN \\ W_{e} &= h \times e \times s \times \gamma = 7,3 \ kN \\ P_{s} &= \frac{(carico \ a \ m^{2})_{solaio \ interpiano} \times luce \ solaio \times e}{2} = 2,87 \ kN \\ C_{v} &= C = \frac{(carico \ a \ m^{2})_{copertura} \times lunghezza \ singola \ falda \times e}{2} = 3,45 \ kN \\ C_{h} &= 0 \ kN \\ \mu &= \frac{h}{h_{2}} = 5,61 \\ \delta_{F} &= (\mu - 1) \frac{h}{\mu} = 2,22 \ m \\ \delta_{1y} &= \frac{s}{2} = 0,15 \ m \\ \delta_{2y} &= \frac{s}{2} (\mu + 1) = 0,99 \ m \\ \delta_{Ny} &= s + d(\mu - 1) = 0,99 \ m \\ \delta_{Ny} &= s + a(\mu - 1) = 0,65 \ m \end{split}$$

Per ogni punto di impatto si determina il moltiplicatore di collasso α , ossia la forza orizzontale F che determina l'attivazione del cinematismo e l'energia di impatto corrispondente. Per l'impatto alla quota analizzata si ottengono i seguenti valori:

$$\alpha = \frac{W_1 \cdot \delta_{1y} + W_2 \cdot \delta_{2y} + N \cdot \delta_{Ny} + P_s \cdot \delta_{Psy}}{F \cdot \delta_F} = 8,5$$

$$\alpha F = 8,5 \ kN$$

$$E = \frac{1}{2} \frac{F^2}{2\pi r_b f_k} = 9,2 \ J$$

Si sviluppa un grafico in cui si osserva la variazione della forza che causa il meccanismo di flessione in funzione del punto di applicazione lungo l'altezza della parete (Figura 4.13).

Si ricava infine la curva di fragilità (Figura 4.14) relativa alla parete studiata disponendo i valori di energia di impatto precedentemente ottenuti in ordine crescente (Tabella 4.20), e associando a ciascuno una probabilità $P(E_i)$ definita dalle seguenti relazioni:

$$P_{base} = \frac{1}{30}$$
$$P(E_i) = P_{base} \times \sum_{j=1}^{i} j$$

Dove:

 P_{base} è la probabilità che l'impatto si verifichi in uno dei 30 punti considerati lungo l'altezza del muro

- j
- è il numero di punti in cui l'energia necessaria alla rottura per flessione è minore o uguale al valore E_i



Figura 4.13 - Forza che causa la rottura per flessione verticale lungo l'altezza della muratura



Figura 4.14 - Curva di fragilità di una muratura al primo piano di un fabbricato costituito da 3 piani fuori terra, con luce del solaio pari a 3 m, con la copertura a spinta eliminata, con l'orditura del solaio tale per cui il carico agisce sulla muratura esposta a monte, con il solaio interpiano e di copertura in legno leggero, con la muratura costituita da laterizio, spessa 0,30 m per flessione verticale

Caselle contenenti i dati elaborati

ЕШ	
(in ordine crescente)	Р
1.98	0.03
2.00	0.07
2,00	0,10
2,01	0.13
2,00	0.17
2,10	0.20
2,19	0.23
2,34	0.25
2,57	0.30
2,32	0.33
3.04	0.37
3 11	0.40
3 39	0.43
3,83	0.47
4 36	0.50
5.04	0.53
5.88	0.57
6.96	0.60
8.35	0.63
10.17	0.67
12.61	0.70
15.95	0.73
20.65	0.77
27.50	0.80
37.93	0.83
54,75	0,87
84,07	0,90
141,21	0,93
273,90	0,97
697,02	1,00

Tabella 4.20 - Energie di impatto disposte in ordine crescente

Osservazioni sui risultati dell'analisi

Per confrontare le curve di fragilità che si ottengono, caratterizzate dall'andamento presente in Figura 4.14, si è scelto di paragonare i valori dell'energia di impatto al frattile 90%, in modo da apprezzare meglio lo scostamento tra le funzioni.

• La variazione del <u>numero di piani fuori terra</u> da 3 a 4 comporta un aumento dell'energia necessaria a innescare il meccanismo di flessione verticale sul pannello murario. Tale incremento è dovuto alla crescita del carico trasmesso dai piani superiori N, che a sua volta innalza il moltiplicatore di carico α .

Se per esempio si confrontano i risultati ottenuti per la parete al piano terra e per quella al piano primo, a parità di tipologia e luce del solaio, l'aumento percentuale minimo e massimo corrispondono rispettivamente alla muratura in laterizio spessa 0,30 m e alla muratura in pietra spessa 0,80 m. Se si considerano valori fissi per la tipologia e per lo spessore della muratura, l'incremento minimo si ha per il solaio in c.a. di luce 5 m, mentre quello massimo per il solaio in legno leggero di luce 3 m (Figure 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18)

Riassumendo, gli incrementi per la muratura al piano terra e al piano primo sono compresi tra i valori riportati in Tabella 4.21. Per i risultati completi si vedano le Tabelle A.C2.1 e A.C2.2 nell'Appendice A.

	Incremento	Incremento
	minimo	massimo
Muro al piano terra	77,96%	166,15%
Muro al piano primo	125,46%	636,06%

Tabella 4.21 - Incrementi minimi e massimi per il frattile 90% dell'energia di impatto al passaggio da 3 a 4 piani fuori terra



Figura 4.15 - Incremento minimo per la muratura al piano terra al passaggio da 3 a 4 piani f.t.



Figura 4.16 - Incremento massimo per la muratura al piano terra al passaggio da 3 a 4 piani f.t.



Figura 4.17 - Incremento minimo per la muratura al piano primo al passaggio da 3 a 4 piani f.t.



Figura 4.18 - Incremento massimo per la muratura al piano primo al passaggio da 3 a 4 piani f.t.

L'energia di impatto che innesca la rottura per flessione verticale al variare della <u>tipologia di elemento resistente</u> (laterizio, pietra, blocchi cemento) è racchiusa tra i valori riportati in Tabella 4.22. Le energie minime corrispondono al caso di edificio costituito da 3 piani f.t., con il solaio in legno leggero, di luce 3 m e con la parete di spessore 0,30 m; quelle massime, invece, al caso di fabbricato di 4 piani f.t., con il solaio in c.a., di luce 5 m e con il muro spesso 0,80 m (Figure 4.19 e 4.20).

In generale, a parità di tutte le altre variabili, l'energia di impatto legata alla muratura in laterizio è inferiore a quella connessa alle altre, mentre i valori di energia per la muratura in pietra e in blocchi cemento sono paragonabili; quale sia il maggiore dei due dipende dalle altre variabili in gioco. Per i risultati completi si vedano le Tabelle A.C3.1 e A.C3.2 nell'Appendice A.

	Energia di impatto al frattile 90% [kJ]					
	in laterizio		in pietra		in blocchi cemento	
	min	max	min	max	min	max
Muro al piano terra	0,18	57,54	0,34	83,26	0,31	91,48
Muro al piano primo	0,02	26,06	0,04	35,14	0,04	40,68

Tabella 4.22 - Energia di impatto al frattile 90% minima e massima per la muratura in laterizio, in pietra e in blocchi cemento



Figura 4.19 - Valori minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare del tipo di muratura (M-L, M-P e M-BC)



Figura 4.20 - Valori minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare del tipo di muratura (M-L, M-P e M-BC)

Al crescere dello <u>spessore della muratura</u> si ha un incremento dell'energia di impatto, e questo è vero specialmente quando si considerano le pareti di minore spessore. Se per esempio si confrontano i risultati ottenuti per la parete al piano terra e per quella al piano primo, a parità di tipologia e luce del solaio, l'aumento percentuale minimo e massimo sono dati rispettivamente dalla muratura in laterizio, che passa da 0,70 m a 0,80 m di spessore, e dalla muratura in pietra, che varia da 0,30 m a 0,40 m. Se si considerano valori fissi per la tipologia e per l'incremento di spessore della muratura, l'aumento minimo è determinato dal solaio in legno leggero di luce 3 m, mentre quello massimo dal solaio in c.a. di luce 5 m (Figure 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24).

Riassumendo, gli incrementi per la muratura al piano terra e al piano primo sono compresi tra i valori riportati in Tabella 4.23. Per i risultati completi si vedano le Tabelle A.C4.1 e A.C4.2 nell'Appendice A.

	Incremento minimo	Incremento massimo
Muro al piano terra	48,03%	202,99%
Muro al piano primo	42,81%	195,55%





Figura 4.21 - Incremento minimo per la muratura al piano terra all'aumento dello spessore



Figura 4.22 - Incremento massimo per la muratura al piano terra all'aumento dello spessore



Figura 4.23 - Incremento minimo per la muratura al piano primo all'aumento dello spessore



Figura 4.24 - Incremento massimo per la muratura al piano primo all'aumento dello spessore

• Quando il <u>tipo di orditura</u> è tale per cui il solaio scarica sulla muratura esposta a monte, l'energia che serve a innescare la rottura per flessione è maggiore rispetto a quando il carico del solaio agisce sulle pareti ortogonali. Questo succede perché quando si annulla l'azione P_s decresce il moltiplicatore di carico α .

Se per esempio si confrontano i risultati ottenuti per la parete al piano terra e per quella al piano primo, a parità di tipologia e luce del solaio, la diminuzione percentuale minima e massima, dal caso i cui P_s è presente al caso in cui lo stesso è nullo, sono dati rispettivamente dalla muratura in pietra spessa 0,80 m e dalla muratura in laterizio spessa 0,30 m. Se si considerano valori fissi per la tipologia e per lo spessore della muratura il decremento minimo è determinato dal solaio in legno leggero di luce 3 m, mentre quello massimo dal solaio in c.a. di luce 5 m (Figure 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28).

Riassumendo, gli incrementi per la muratura al piano terra e al piano primo sono compresi tra i valori riportati in Tabella 4.24. Per i risultati completi si vedano le Tabelle A.C5.1 e A.C5.2 nell'Appendice A.

	Decremento minimo	Decremento massimo
Muro al piano terra	-16,20%	-78,64%
Muro al piano primo	-17,33%	-78,98%

Tabella 4.24 - Decrementi minimi e massimi per il frattile 90% dell'energia di impatto al variare del tipo di orditura: dal caso per cui il solaio scarica sulla muratura esposta a monte a quella in cui scarica sulle pareti ortogonali



Figura 4.25 - Decremento minimo per la muratura al piano terra al variare dell'orditura



Figura 4.26 - Decremento massimo per la muratura al piano terra al variare dell'orditura



Figura 4.27 - Decremento minimo per la muratura al piano primo al variare dell'orditura



Figura 4.28 - Decremento massimo per la muratura al piano primo al variare dell'orditura

L'energia di impatto che innesca la rottura per flessione verticale sulla muratura al variare del tipo di solaio (in legno leggero, in legno pesante e in c.a.) è racchiusa tra i valori riportati in Tabella 4.25. Le energie minime corrispondono al caso di edificio costituito da 3 piani f.t., con la muratura in laterizio spessa 0,30 m, con luce del solaio pari a 3 m; quelle massime, invece, al caso di fabbricato di 4 piani f.t., con la muratura in pietra se il solaio è in legno leggero o in blocchi cemento se lo stesso è in legno pesante o in c.a., con la parete spessa 0,80 m e luce del solaio pari a 5 m (Figure 4.29 e 4.30).

In generale, a parità di tutte le altre variabili, l'energia di impatto che causa il meccanismo di flessione quando il solaio è in legno leggero è inferiore a quella connessa al solaio in legno pesante, che a sua volta è minore rispetto al valore legato al solaio in c.a.. Per i risultati completi si vedano le Tabelle A.C6.1 e A.C6.2 nell'Appendice A.

	Energia di impatto al frattile 90% [kJ]					
	Solaio in legno leggero		Solaio in legno pesante		Solaio in c.a.	
	min	max	min	max	min	max
Muro al piano terra	0,18	53,88	0,27	71,64	0,29	91,48
Muro al piano primo	0,02	21,12	0,04	31,53	0,05	40,68

Tabella 4.25 - Energia di impatto al frattile 90% minima e massima per la muratura in caso di solaio in legno leggero, legno pesante e in c.a.



Figura 4.29 - Valori minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare del tipo di solaio (S-LL, S-LP e S-CA)



Figura 4.30 - Valori minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare del tipo di solaio (S-LL, S-LP e S-CA)

* L'aumento della <u>luce del solaio</u> comporta una maggiore energia necessaria a innescare il meccanismo di flessione verticale sul pannello murario. Tale incremento è dovuto alla crescita del carico trasmesso dal solaio P_s agente sulla parete, che a sua volta innalza il moltiplicatore di carico α .

Se per esempio si confrontano i risultati ottenuti per la parete al piano terra e per quella al piano primo, a parità di tipologia e luce del solaio, l'aumento percentuale minimo e massimo corrispondono rispettivamente alla muratura in pietra spessa 0,80 m e alla muratura in laterizio spessa 0,30 m. Se si considerano valori fissi per la tipologia e per lo spessore della muratura, l'incremento minimo è dato dalla variazione da 4 m a 5 m per il solaio in legno leggero, mentre quello massimo dal solaio in c.a. la cui lunghezza varia da 3 m a 4 m (Figura 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34).

Riassumendo, gli incrementi per la muratura al piano terra e al piano primo sono compresi tra i valori riportati in Tabella 4.26. Per i risultati completi si vedano le Tabelle A.C7.1 e A.C7.2 nell'Appendice A.

4 - V	alutazione	quantitativa	della	vulnerabilità	dei	pannelli r	nurari
-------	------------	--------------	-------	---------------	-----	------------	--------

	Incremento da 3 m a 4 m		Incremento da 4 m a 5 m		
	min	max	min	max	
Muro al piano terra	2,01%	45,07%	1,99%	36,83%	
Muro al piano primo	3,29%	53,63%	3,24%	42,38%	

Tabella 4.26 - Incrementi minimi e massimi per il frattile 90% dell'energia di impatto al variare della luce del solaio



Figura 4.31 - Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio da 3 m a 4 m



Figura 4.32 - Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio da 4 m a 5 m



Figura 4.33 - Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio da 3 m a 4 m



Figura 4.34 - Incrementi minimi e massimi per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio da 4 m a 5 m

Il <u>tipo di spinta della copertura</u> influenza l'energia di impatto che innesca la rottura per flessione verticale solo nella parete al piano primo in un edificio costituito da 3 piani fuori terra; infatti per le murature al piano terra e quelle al piano primo di fabbricati con 4 o più piani f.t. l'azione della copertura agisce verticalmente, portata dalle pareti superiori. L'energia che causa il meccanismo di flessione verticale è racchiusa tra i valori ri riportati in Tabella 4.27. Le energie minime corrispondono al caso di edificio con il solaio in legno leggero, con luce pari a 3 m e con la parete in laterizio di spessore 0,30 m; quelle massime, invece, al caso di fabbricato con il solaio in c.a., con luce pari a 5 m e con il muro spesso 0,80 m (Figura 4.35).

In generale, a parità di tutte le altre variabili, l'energia di impatto legata alla presenza di una copertura spingente è inferiore a quella connessa alle altre, mentre i valori di energia per la copertura non spingente e poco spingente sono confrontabili, e il maggiore fra i due è quello connesso alla copertura non spingente. Per i risultati completi si vedano le Tabelle A.C8 nell'Appendice A.

	Energia di impatto al frattile 90% [kJ]					
	Copertura a spinta eliminata		Copertura poco spingente		Copertura spingente	
	min	max	min	max	min	max
Muro al piano primo	0,04	10,18	0,04	10,15	0,02	6,96

Tabella 4.27 - Energia di impatto al frattile 90% minima e massima per la muratura in
caso di copertura a spinta eliminata, poco spingente o spingente



Figura 4.35 - Valori minimi e massimi per la muratura al piano primo di un edifcio con 3 piani f.t. al variare della spinta della copertura (C-nSp, C-pSp e C-Sp)

Oltre alle osservazioni sui risultati complessivi dell'analisi di simulazione sviluppata, si evidenzia la legge di contatto tra il blocco e la muratura (§3.4.1.4), ossia l'equazione che lega la forza e l'energia di impatto.

Nell'esempio precedentemente analizzato si determinano la forza e l'energia di impatto necessarie a innescare il meccanismo su una muratura, rispettivamente pari a 8,5 kN e 9,2 J. Considerando per il blocco di riferimento un diametro di 0,30 m e una densità γ di 2500 kg/m³, si ricavano il volume V e la massa m del blocco di roccia secondo le seguenti relazioni:

$$V = \frac{4}{3}\pi r_b^3 = 0.014 m^3$$
$$m = \gamma \times V = 35 kg$$

Conoscendo l'energia di impatto E e la massa del blocco m, si ottiene la velocità v di quest'ultimo attraverso l'equazione dell'energia cinetica:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = 0,73 \ m/s$$

In generale un'energia di 9,2 J può generare una forza di 8,5 kN, ma si deve essere in condizioni perfettamente rigide, per cui l'impatto dura un tempo molto breve (dell'ordine dei ms). Nelle murature, invece, un'energia di 9,2 J, associata a un blocco di 35 kg che si muove a una velocità di 0,73 m/s, è incompatibile con una forza di 8,5 kN, che invece sarebbe determinata da una massa di circa 867 kg a cui viene impressa l'accelerazione di gravità. Questo errore è dovuto alla legge di contatto adottata, che è valida per il calcestruzzo in condizioni perfettamente plastiche, ma che per le murature risulta troppo cautelativa.

4.3.4 Meccanismi ad arco

4.3.4.1 Assunzioni

Oltre alle assunzioni di carattere generale (§4.3.1), i cui valori di riferimento fissi sono riassunti in Tabella 4.28, si aggiungono delle considerazioni specifiche per il meccanismo ad arco.

Caselle di inserimento dati						
LORI DI IFERIM.	Diametro area di impatto w [m]	Riduzione % di f _k in caso di stato di conservazione "Sufficiente"	Riduzione % di f _k in caso di stato di conservazione "Degrado"	Altezza della parete (interpiano) h [m]		
VA R	0,300	15%	30%	2,70		

Tabella 4.28 - Valori di riferimento adottati nell'analisi per il meccanismo ad arco

Come precedentemente definito per il meccanismo di flessione verticale, la rottura si propaga lungo fratture inclinate rispetto alla verticale (Figura 4.36). Per le analisi si considerano superfici di rottura che formano un angolo di 25° rispetto alla verticale.



Figura 4.36 - Volume interessato dal meccanismo ad arco

Per passare dallo schema di calcolo per metà parete, riportato in Figura 3.6, allo schema con il nuovo volume interessato dal meccanismo si ritiene opportuno trovare un'area media su cui agisce la spinta P generata dall'arco. Si ottiene l'area di carico assiale media secondo le seguenti relazioni:

$$A_m = s \times \frac{e+w}{2}$$
$$e = w + 2 \times \left(\frac{h}{2}\right) \times \tan 25^\circ$$

Dove:

- *e* è la larghezza di carico assiale all'interfaccia con i solai
- ▶ Il meccanismo ad arco si instaura solo quando il blocco impatta in mezzeria della parete, ma questo porta ad avere una probabilità di rottura lungo l'altezza della muratura molto bassa. Perciò ha senso estendere l'area in cui l'impatto può innescare il meccanismo di rottura a una fascia orizzontale di altezza pari a due volte il diametro del blocco d_b . Si ottiene la probabilità di innesco rapportando l'altezza della fascia centrale all'altezza totale.

4.3.4.2 Analisi

Secondo quanto descritto nei §3.4.1.3 e §3.4.1.4 si determina la forza di innesco del meccanismo di rottura e la corrispondente energia di impatto per differenti configurazioni. Le variabili prese in conto sono il tipo di elemento resistente della muratura, lo stato di conservazione e lo spessore della muratura. Si sviluppa l'analisi combinando le diverse variabili ottenendo un totale di 54 casi studiati (Tabella 4.29). Infine si ricava la curva di fragilità in cui si esprime la probabilità di rottura in funzione del contenuto energetico dell'impatto.

Variabili in input	Valori delle variabili	Numero variabili	Numero analisi TOTALE
Elemento resistente della muratura	Laterizio Pietra Blocchi cemento	3	
Stato di conservazione	Buono Sufficiente Degrado	3	54
Spessore della muratura s [m]	0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8	6	54

Tabella 4.29 - Variabili considerate nell'analisi per il meccanismo ad arco

Esempio

Per una maggiore comprensione si illustrano in dettaglio i calcoli (riassunti in Tabella 4.30) sviluppati per il caso di blocco impattante su una muratura costituita da laterizio, in buono stato di conservazione e spessa 0,30 m.

Il modulo elastico E, la resistenza a compressione f_c dell'elemento e f_k della muratura sono ricavati secondo le considerazioni del §4.3.1, e per la muratura in oggetto costituita da laterizio e in buono stato di conservazione, sono rispettivamente pari a 3750000 kN/m², 7,78 MPa e 4,17 MPa.

Per il muro in esame alto 2,70 m, la larghezza di carico assiale e e l'area di carico assiale media A_m sono rispettivamente pari a 1,56 m e 0,28 m², secondo quanto definito al §4.3.4.1.

Come spiegato nel §3.4.1.3 si calcola la spinta dovuta all'arco P, la deformazione y, lo spostamento laterale δ_h e la forza che causa il collasso F e si ottengono i seguenti valori:

$$P = 0.2 \times A_m \times f_c = 433,78 \ kN$$

$$y = \frac{P \times h/2}{2 \times A_m \times E} = 0,28 \ mm$$

$$\delta_h = \frac{2 \times s \pm \sqrt{4 \times s^2 - 4 \times (2 \times h \times y - 4 \times y^2)}}{2} = 2,53 \ mm$$

$$F = \frac{P \times (0.8 \times s - \delta_h)}{h/2} = 103,30 \ kN$$

Infine si determina la relativa energia di impatto:

$$E = \frac{1}{2} \frac{F^2}{2\pi r_b f_k} = 1358,53 J$$

La curva di fragilità relativa all'intera parete è ottenuta considerando un'altezza della fascia centrale pari a 0,60 m, che rapportata all'altezza totale della parete di 2,70 m determina una probabilità del **22%** (Figura 4.37).

4 - Valutazione quantitativa della vulnerabilità dei pannelli murari

Caselle di inserimento dati

Caselle contenenti i dati elaborati

Caselle contenenti i risultati finali dell'analisi

ARIABILI N INPUT	Elemento resistente della muratura	Stato di conservazione	Spessore muratura s [m]
N II	Laterizio	Buono	0,3

ATI DI CAL- COLO	Modulo elastico E [kN/m²]	Larghezza di carico assiale e [m]	Area di carico assiale media A _m [m²]	Resistenza a compressione dell'elemento resistente f _c [MPa]	Resistenza a compressione della muratura f _k [MPa]
Q	3750000,00	1,56	0,28	7,78	4,17

ATI DI CAL- OLO FINALI	Spinta arco P [kN]	Deformazione y [mm]	Spostamento laterale δ _h [mm]	Forza che causa il collasso F [kN]	Energia di impatto E [J]
CL	433,78	0,28	2,53	103,30	1358,53





Figura 4.37 - Curva di fragilità di una muratura in laterizio, in buono stato di conservazione, spessa 0,30 m per meccanismo ad arco

Osservazioni sui risultati dell'analisi

 L'energia di impatto che innesca il meccanismo ad arco al variare della <u>tipologia di e-</u> <u>lemento resistente</u> (laterizio, pietra, blocchi cemento) è racchiusa tra i valori riportati in Tabella 4.31. Le energie minime corrispondono al caso di muratura spessa 0,30 m e con uno stato di conservazione classificato come "degrado"; quelle massime, invece, al caso di parete spessa 0,80 m in uno stato di conservazione "buono" (Figura 4.38).

In generale, a parità di tutte le altre variabili, l'energia di impatto legata alla muratura in blocchi cemento è inferiore a quella connessa alla muratura in laterizio, a sua volta minore dell'energia per la muratura in pietra. Per i risultati completi si veda la Tabella A.D2 nell'Appendice D.

		Energia di impatto [kJ]	
		min	max
	in laterizio	0,96	69,63
Parete	in pietra	2,28	168,78
	in blocchi cemento	0,45	33,01

Tabella 4.31 - Energia di impatto minima e massima per la muratura in laterizio, in pietra e in blocchi cemento



Figura 4.38 - Valori minimi e massimi per la muratura al variare del tipo di muratura (M-L, M-P e M-BC)

La variazione dello stato di conservazione, da buono a sufficiente e da sufficiente a degrado, comporta un decremento dell'energia di impatto medio rispettivamente di -14,86% e del -17,51%. Al variare del tipo di elemento resistente e dello spessore lo scostamento dal decremento medio è compreso tra i valori riportati in Tabella 4.32. Per i risultati completi di veda la Tabella A.D3 nell'Appendice D.

	min	max
Scostamento dal decremento medio da buono a sufficiente	-3,23%	0,75%
Scostamento dal decremento medio da sufficiente a degrado	-2,64%	0,62%

Tabella 4.32 - Scostamento minimo e massimo dal valore medio del decremento dovuto alla variazione dello stato di conservazione

Al crescere dello <u>spessore della muratura</u> si ha un incremento dell'energia di impatto, e questo è vero specialmente quando si considerano le pareti di minore spessore. Confrontando i risultati ottenuti, l'aumento percentuale minimo e massimo sono dati rispettivamente dalla muratura in blocchi cemento, in stato di "degrado", che passa da 0,70 m a 0,80 m di spessore, e dalla muratura in pietra, in stato "buono", che varia da 0,30 m a 0,40 m (Tabella 4.33 e Figure 4.39 e 4.40). Per i risultati completi si veda la Tabella A.D4 nell'Appendice D.

Incremento	Incremento
minimo	massimo
71%	223%

Tabella 4.33 - Incremento minimo e massimo all'aumentare dello spessore della muratura



Figura 4.39 - Incremento minimo al crescere dello spessore della muratura



Figura 4.40 - Incremento massimo al crescere dello spessore della muratura

Conclusioni

La caduta massi, crollo di un volume di roccia di piccole/medie dimensioni lungo un versante, costituisce un notevole rischio per le persone e per le infrastrutture presenti sul territorio montano interessato, a causa della frequenza e del grado di distruttività dell'evento. La valutazione della pericolosità, e in particolare della vulnerabilità, legata a questo fenomeno franoso riveste un'importanza elevata nella pianificazione del territorio.

Per comprendere il fenomeno della caduta massi è stata studiata la dinamica e l'evoluzione del movimento, con particolare attenzione ai contenuti energetici in gioco. L'obiettivo, infatti, è esprimere la vulnerabilità del fabbricato in muratura esposto al rischio in funzione dell'intensità dell'evento pericoloso, tradotta in energia di impatto del blocco di roccia, quantificandone le conseguenze attraverso le curve di fragilità.

Per determinare i meccanismi di rottura che si possono instaurare su un fabbricato in muratura in seguito alla caduta massi, sono state considerate le diverse zone di impatto in modo da valutare la risposta dell'edificio a livello locale. La facciata esposta a monte è stata quindi divisa in cinque aree: i pannelli murari, le aperture, le aree in corrispondenza dei solai, gli spigoli verticali e le zone in prossimità dei muri di spina.

Conclusioni

Si è affrontato in termini analitici solo il problema dell'impatto sul pannello murario, studiando tre diversi meccanismi (punzonamento, flessione verticale e meccanismi ad arco) e effettuando molteplici assunzioni necessarie per adattare le modalità di rottura locali al caso di innesco per impatto di un blocco di roccia. In particolare, l'analisi è stata sviluppata considerando un blocco di riferimento che realisticamente può colpire gli edifici situati alla base dei pendii, di diametro pari a 0,30 m, e un'area di impatto composta dai primi due piani f.t.. Sulle modalità di rottura locali nelle altre aree di impatto della facciata esposta si sono compiute unicamente valutazioni di carattere qualitativo.

Per definire un livello di vulnerabilità in modo rapido si è partiti dalla scheda di rilievo speditivo, frutto di un progetto di ricerca tra Politecnico di Torino e Regione Valle d'Aosta, da cui sono state estrapolate le caratteristiche del fabbricato ritenute rilevanti per i meccanismi di rottura sopra citati.

Le schede sono state impostate per studiare i diversi meccanismi di collasso limitatamente agli edifici che si possono trovare nell'ambiente studiato: fabbricati di tre o quattro piani f.t., in muratura con l'elemento resistente costituito da laterizio, pietra o blocchi di cemento, con i pannelli murari di spessore compreso tra 0,30 m e 0,80 m, in uno stato di conservazione variabile tra buono, sufficiente o degrado, con il solaio che scarica sulla parete esposta a monte o su quelle ortogonali, con gli orizzontamenti in legno leggero, in legno pesante o in c.a., con la luce del solaio compresa tra 3 m e 5 m e con la copertura che può essere spingente, poco spingente o a spinta eliminata.

Per determinare la vulnerabilità, sono state adottate approssimazioni sia di carattere generale, sia specifiche per i singoli meccanismi, in modo da passare dalle informazioni qualitative presenti nella scheda di rilievo a valori quantitativi.

Le schede elaborate permettono due approcci differenti a seconda del livello di conoscenza del fabbricato esaminato: in assenza di dati specifici, si possono semplicemente selezionare la tipologia di elemento resistente e quella degli orizzontamenti, a cui corrispondono parametri predefiniti per le caratteristiche di resistenza e per le proprietà non conosciute; nel caso in cui questi siano noti in seguito a rilievi e prove in sito, invece, è possibile inserire i valori reali per le caratteristiche geometriche, di resistenza e per le azioni agenti.

Riassumendo, è stato sviluppato un metodo che consente di compilare la scheda di rilievo sulla base delle informazioni ricavate in sito, ottenendo immediatamente una curva di fragilità legata al pannello murario per un impatto tipo. La suddetta curva di fragilità esprime la
probabilità che la muratura collassi se il blocco la colpisce con una data energia in un dato punto.

Sono state esaminate tutte le configurazioni possibili in base alle variabili considerate per i tre meccanismi di rottura locali sul pannello murario, ottenendo così un'analisi di simulazione composta da 54 casi per il punzonamento, 1944 per la flessione verticale e 54 per il meccanismo ad arco.

Dall'osservazione sui risultati delle analisi si ricava che la vulnerabilità del pannello murario per **punzonamento** è funzione solo dello spessore della parete stessa.

Nel meccanismo di flessione verticale occorre distinguere le osservazioni sulla parete al piano terra e su quella al piano primo, poiché hanno uno schema di carico differente. Variare il numero complessivo di piani f.t. del fabbricato incide maggiormente sulle murature al piano primo, in pietra, di grande spessore, in presenza di solai leggeri e di luce piccola. La tipologia di elemento resistente comporta un'energia di impatto massima in caso di edificio di 4 piani f.t., con il solaio più pesante, di luce grande e con la parete molto spessa. L'aumento dello spessore della muratura incrementa l'energia di impatto necessaria alla rottura in particolar modo quando si è in presenza di un solaio pesante e di grande luce. Quando il solaio scarica sulla muratura esposta a monte, l'energia che serve a innescare la rottura per flessione è maggiore rispetto al caso in cui il solaio agisca sulle pareti ortogonali; la differenza maggiore tra i due casi si osserva con una muratura in laterizio, di spessore piccolo, in presenza di un solaio pesante e di grande luce. Il tipo di solaio influenza maggiormente l'energia di impatto che innesca la rottura quando l'edificio ha 4 piani f.t., la parete è molto spessa e il solaio ha una luce grande. L'incremento maggiore dell'energia necessaria alla rottura dovuto all'aumento della luce del solaio si ha con pareti in laterizio, di piccolo spessore e con il solaio pesante. L'energia di impatto è condizionata in maggior misura dal tipo di spinta della copertura quando il solaio è pesante, con una grande luce e la parete è molto spessa.

Il **meccanismo ad arco** è funzione di tre variabili che influenzano in modo diverso i valori di energia di impatto che innesca la rottura sulla muratura. La tipologia di elemento resistente influenza maggiormente i valori di energia quando la parete è molto spessa ed è ben conservata. Quando lo stato di conservazione peggiora, si ha una diminuzione dell'energia che non risulta eccessivamente influenzata dal tipo di elemento resistente, né dallo spessore della parete. Incrementare lo spessore della parete aumenta l'energia soprattutto per murature in pietra e in buono stato di conservazione.

Conclusioni

Il principale limite del metodo sviluppato è legato alla legge di contatto tra il blocco e la muratura utilizzata nel meccanismo di flessione verticale. Ad oggi non esiste una teoria che descriva l'impatto tra un masso e una parete in muratura, ma adottare il modello elaborato per il calcestruzzo sotto determinate ipotesi risulta troppo cautelativo nel caso delle murature. Per sviluppi futuri sarà necessario approfondire tale aspetto.

Inoltre, per un'analisi completa si dovrebbe elaborare un approccio che non si limiti a considerare la rottura locale, ma che prenda in esame la propagazione del danno all'intera struttura, ossia che calcoli la risposta globale in base alla geometria del manufatto. Si otterrebbe così una curva di fragilità complessiva della struttura, e si potrebbero individuare quali sono gli elementi chiave il cui danneggiamento comporta le conseguenze più gravi. L'approfondimento di tale tema rappresenta il naturale sviluppo del presente lavoro, in quanto permetterebbe il passaggio dalla semplice compilazione della scheda di rilievo alla valutazione del livello di energia di impatto cui resiste l'intera costruzione.

Bibliografia e sitografia

- Cascini L., Critelli S., Di Nocera S., Gullà G., A methodological approach to landslide hazard assessment: a case history, Proc. of the 6th ISL, Christchurch, v. 2, pp. 899-904, 1992
- [2] Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development, Geomorphology, v. 31, pp. 181-216, 1999
- [3] Cruden D. M., A simple definition of a landslide, Bulletin International Association of Engineering Geology, v. 43, pp. 27-29, 1991
- [4] Cruden, D. M., Varnes, D. J., Landslide types and processes, Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247, pp. 36-75, Washington: Transportation Research Board, 1996
- [5] Varnes D. J., Slope movement types and processes, Ladslides, analysis and control, Transportation Research Board Sp. Rep. N. 176, Natural Academy of Sciences, Washington, 1978
- [6] Vallario A., Frane e territorio Le frane nella morfogenesi dei versanti e nell'uso del territorio, Liguori Editore, Napoli, 1992
- [7] Carrara A., D'Elia B., Semenza E., *Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi*, Geologia Applicata e Idrogeologia, v. 20, p. 2, 1985
- UNESCO The International Geotechnical Societies, *Multilingual landslide glossary*, Working Party for World Landslide Inventory, 1990
- [9] UNI 11211-1:2007 Opere di difesa dalla caduta massi Parte 1: Termini e definizioni
- [10] Giani G. P., Caduta di massi. Analisi del moto e opere di protezione, Helvelius Edizioni, Napoli, 1992

- [11] Hoek E., Rockfall: a computer program for prediction rockfall trajectories, ISRM News J, v. 2, pp. 4-16, 1987
- [12] Pfeiffer T., Bowen T., Computer simulation of rock falls, Bulletin International Associa tion of Engineering Geologists, n. 26, pp. 117-126 e 135-146, 1989a
- Scioldo G., ROTOMAP: analisi statistica del rotolamento dei massi Guida informatica am bientale, Patron, pp. 81-84, Milano, 1991
- [14] Richards L. R., Rockfall protection: a review of current analytical and design methods, Atti CO REP Politecnico di Torino, v. 11, pp. 1-13, 1988
- [15] Ritchie A. M., Evaluation of Rockfall and its Control, Highway Research Board, Highway Research Record, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington D.C., v. 17, pp. 13-28, 1963
- [16] Broili L., In situ tests for the study of rockfall, Geologia Applicata e Idrogeologia, v. 8, pp. 105-111, 1973
- [17] Paronuzzi P., Blasi L., Cautilli F., Tassoni E., La falesia delle Acque Dolci di Monte Argentario: modellazione cinematica di caduta massi e progettazione delle opere di difesa, Quarry & Construction, n. 2, pp. 79-94, 1996
- [18] ETAG 27 Guideline for European technical approval of Falling Rock Protection Kits
- [19] Pfeiffer T., Bowen T., Colorado Rockfall Simulation Program, Colorado School of Mines US Department of Trasportation Federal Highway Administration, Final Report, 1989b
- [20] Dorren L. Berger F., New approaches for 3D rockfall modelling with or without the effect of forest in Rockyfor3D, EGU General Assemply, p. 14811, Vienna, 2010
- [21] Paronuzzi P., Modelli di calcolo per l'analisi a propagazione di blocchi rocciosi in frana, Rivista Italiana di Geotecnica, v. 21, n. 4, pp. 145-165, 1987
- [22] Stevens W. D., RocFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, Master of Applied Science Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1998
- [23] Crosta G. B., Carrara A., Agliardi F., Campedel P., Frattini P., Valutazione della pericolosità da caduta massi tramite un approccio integrato statistico e deterministico, Giornale di Geologia Applicata, v. 4, pp. 41-48, 2006
- [24] Aleotti P., Chowdhury R., Landslides hazard assessment: summary review and new perspectives, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 58, pp.21-44, 1999
- [25] Leroi, E., Bonnard, C., Fell, R., McInnes, R., Risk Assessment and Management, Landslide risk management, Balkema, Rotterdam, 159-198, 2005
- [26] Varnes D. J., IAEG Commission on Landslides, Landslide hazard zonation a review of principles and practice, UNESCO, Parigi, 1984
- [27] Arpa Piemonte, Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali, 2005
- [28] Einstein H. H., Special lecture: Landslide risk assessment procedure, Proc. V Int. Symp. on Landslides, Lausanne, v. 2, pp. 1075–1090, 1988
- [29] Canuti P., Casagli N., Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana, Consiglio Nazionale delle Ricerche
 Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, 1994
- [30] Hungr O., Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements, PhD Thesis, University of Alberta, 1981

- [31] Fell R., Landslide risk assessment and accettable risk, Canadian Geotechnical Journal, v. 31, pp. 261-272, 1994
- [32] Hartlén J., Viberg L., General report: evaluation of landslide hazard, Proc. of the 5th International Symposium on Landslides, Losanna, v. 2, pp. 1037-1058, 1988
- [33] Hansen A., Landslide Hazard Analysis, Slope Instability, John Wiley&Sons, pp. 523-602, 1984
- [34] van Westen C. J., Montoya L., Multi-hazard risk assessment: Distance Education Course, Guide Book Enschede, ITC, 2009
- [35] Glade T., Crozier M. J., The nature of landslide hazard and impact, Landslide hazard and risk, Wiley, Chichester, pp. 43-74, 2005
- [36] Cazzaniga C., Sciesa E., Valutazione della pericolosità e del rischio da frana in Lombardia, Regione Lombardia Struttura Rischi Idrogeologici, Università di Milano Bicocca, 2001
- [37] IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment, Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the state of the art, Landslide Risk Assessment, Balkema, Rotterdam, pp. 3-12, 1997
- [38] Dai F. C., Lee C. F., Ngai Y. Y., Landslide risk assessment and management: an overview, Engineering Geology, v. 64, pp. 65-87, 2002
- [39] Frattini P., Crosta G. B., Valutazione dell'accettabilità del rischio da frana e analisi costi-benefici, Giornale di Geologia Applicata, v. 4, pp. 49-56, 2006
- [40] DRM Délégation aux Risques Majeurs, Evaluation de la vulnerabilite, Plan d'Exposition aux risques, Ministère de l'Environnement, Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques, La documentation Française, pp. 112, 1988
- [41] CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes, London, Report 63, 1977
- [42] Starr C., Social Benefit versus Technological Risk, Science, v. 165, pp. 1232-1238, 1969
- [43] Ale B. J. M., Risk analysis and risk policy in the Netherlands and the EEC, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 4, pp. 58-64, 1991
- [44] Morgan M. G., Henrion M., Small M., Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis, Cambridge University Press, 1992
- [45] Finlay P. J., Fell R., Landslides: risk perception and acceptance, Canadian Geotechnical Journal, v. 34, n. 2, pp. 169-188, 1997
- [46] Sterlacchini S., Akbas S. O., Blahut J., Mavrouli O. C., Garcia C., Luna B. Q., Corominas J., Methods for the Characterization of the Vulnerability of Elements at Risk, Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance, pp. 233-273, 2014
- [47] Kumpulainen S., Natural and technological hazards and risks affecting the spatial development of European Regions, vol. 42, Geological Survey of Finland, Espoo, pp. 5-74, 2006
- [48] Williams L. Kaputska L., Ecosystem vulnerability: a complex interface with technical components, Environmental Toxicology and Chemistry, v. 19 (4), pp. 1055-1058, 2000

- [49] Remondo J., Bonachea J., Cendrero A., Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences, Geomorphology, v. 94, pp. 496-507, 2008
- [50] Wisner B., Blaikie P. M., Cannon T., At risk: natural hazard, people vulnerability and disasters, Routledge Publisher, London, 2005
- [51] Few R., Flooding, vulnerability and coping strategies: local responses to a global threat, Prog. Dev. Stud., v. 3 (1), pp. 43-58, 2003
- [52] ESPON Hazards project European Spatial Planning Observation Network, The spatial effects and management of natural and technological hazards in general and in relation to climate change, Final Report, Marzo 2005
- [53] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, *Third assessment report Climate change 2001*, Working group II: impacts, adaptation and vulnerability, Chapter 1, 2001
- [54] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth assessment report Climate change 2007, Working group II: impacts, adaptation and vulnerability, Appendix 1 - Glosssary, 2007
- [55] van Westen C. J., Castellanos Abella E. A., Sekhar L. K., Spatial data for landslide susceptibility, hazards and vulnerability assessment: an overview, Engineering Geology, v. 102, pp. 112-131, 2008
- [56] Glade T., Vulnerability assessment in landslide risk analysis, Die Erde, v. 134, pp. 123-146, 2003
- [57] DMTP Disaster Management Training Programme, Vulnerability and risk assessment, Module prepared by Coburn A. W., Spence R. J. S., Pomonis A., Cambridge Architectural Research Limited. The Oast House, Malting Lane, Cambridge, 1994
- [58] Galli M., Guzzetti F., Landslide vulnerability criteria: a case study from Umbria, Central Italy, Environmental Management, v. 40, pp. 649-665, 2007
- [59] Linneroth J., The value of human life: a review of the models, Economic Inquiry, v. 17, pp. 52-74, 1979
- [60] Cardinali M., Reichenbach P., Guzzetti F., Ardizzone F., Antonini G., Galli M., Cacciano M., Castellani M., Salvati P., A geomorphological approach to estimate landslide hazard and risk in urban and rural areas in Umbria, central Italy, Natural Hazard and Earth System Science, v. 2, pp. 57-72, 2002
- [61] Reichenbach P., Galli M., Cardinali M., Guzzetti F., Ardizzone F., Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of Central Italy, Landslides hazard and risk, Wiley, Chichester, 2005
- [62] Alexander D., Confronting catastrophe, Terra Publishing, Harpenden, 2000
- [63] Alexander D., Vulnerability to landslides, Landslide hazard and risk, Wiley, Chichester, 2005
- [64] Fuchs S., Heiss K., Hübl J., *Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment*, Natural Hazard and Earth System Sciences, v. 7, pp. 495-506, 2007
- [65] Akbas S. O., Blahut J., Sterlacchini S., Critical assessment of existing physical vulnerability functions for debris flows, Landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling, CERG, Strasbourg, 2009
- [66] Borter P., Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1999

- [67] Fell R., Hartford D., Landslide risk management, Landslide risk assessment, Balkema, Rotterdam, pp. 51– 109, 1997
- [68] Quan Luna B., Blahut J., van Westen C. J., Sterlacchini S., van Asch T. W. J., Akbas S.O., *The applica*tion of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves, Natural Hazard and Earth System Sciences, v. 11, pp. 2047–2060, 2011
- [69] DEI, Prezzi Tipologie Edilizie 2006, DEI Tipografia del Genio Civile, 2006
- [70] Bell R., Glade T., Quantitative risk analysis for landslides. Examples from Bildudalur, NW-Iceland, Natural Hazard and Earth System Science, v. 4, pp. 117–131, 2004
- [71] Corominas J., Copons R., Moya J., Vilaplana J. M., Altimir J., Amigó J., Quantitative assessment of the residual risk in a rock fall protected area, Landslides, v. 2, pp. 343–357, 2005
- [72] Lopez-Garcia D., Discussion on: critical building separation distance in reducing pounding risk under earthquake excitation, Structural Safety, v. 27, pp. 393–396, 2005
- [73] Lopez J. L., Courtel F., An integrated approach for debris-flow risk mitigation in the North coastal range of Venezuela, Proc. of the 13th IWRA World Water Congress, 1-4, Montpellier, France, pp. 1-4, settembre 2008
- [74] Agliardi F., Crosta G. B., Frattini P., Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques, Natural Hazard and Earth System Sciences, v. 9, pp. 1059-1073, 2009
- [75] Mavrouli O., Corominas J., Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls, Landslides, v. 7, pp. 169-180, 2010a
- [76] Corominas J., Mavrouli O., Rockfall Quantitative risk assessment, Rockfall engineering, Wiley, London, pp. 255–296, 2011
- [77] Mavrouli O., Corominas J., Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings, Natural Hazard and Earth System Sciences, v. 10(10), pp. 2055-2066, 2010b
- [78] Kaynia A. M., Papathoma-Köhle M., Neuhäuser B., Ratzinger K., Wenzel H., Medina-Cetina Z., Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany, Engineering Geology, v. 101(1–2), pp. 33–48, 2008
- [79] Li Z., Nadim F., Huang H., Uzielli M., Lacasse S., Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide bazards, Landslides, v. 7(2), pp. 125–134, 2010
- [80] Akbas S. O., Blahut J., Sterlacchini S., *Estimation of a vulnerability function for debris flow risk assessment using a well-documented event in Selvetta, Italy*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2013
- [81] Uzielli M., Nadim F., Lacasse S., Kaynia A. M., A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides, Engineering Geology, v. 102, pp. 251-256, 2008
- [82] Santoro L., Tipologie edilizie e interventi di miglioramento strutturale, Dario Flaccovio Editore, 2001
- [83] Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 Norme Tecniche per le Costruzioni
- [84] UNI EN 1052-1:2001 Metodi di prova per muratura Determinazione della resistenza a compressione
- [85] Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008

- [86] CNR-DT 212/2013, Consiglio Nazionale delle Ricerche Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni, Istruzioni per la Valutazione Affidabilistica della Sicurezza Sismica di Edifici Esistenti, 2013
- [87] Yankelevsky D. Z., Local response of concrete slabs to low velocity missile impact, International Journal of Impact Engineering, v. 19 (4), pp. 331-343, 1997
- [88] Arifovic F., Nielsen M. P., Strenght of anchors in masonry, Technical University of Denmark, Lyngby, 2006
- [89] Hansen L. Z., Findsen K., Nielsen M. P., Strength of bonded anchors in masonry, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, 2004
- [90] Nielsen M. P., Limit Analysis and Concrete Plasticity, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, Lyngby, 1999
- [91] AA. VV., Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura, Decreto del Commissario Delegato per gli interventi di protezione civile n. 28 del 10 aprile 2002, 2007
- [92] Barczak T. M., Batchler T. J., Development of new protocols to evaluate the transverse loading of mine vintilation stoppings, Proceedings of the 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, University Park, Pennsylvania, 5-7 June 2006
- [93] Barczak T. M., Evaluation of the transverse load capacity of block stoppings for mine ventilation control, Ph.D Dissertation, West Virginia University, 2005
- [94] Goldsmith W., Impact: The theory and physical behaviour of colliding solids, Edward Arnold Publishers Ltd, London, 1960
- [95] van Mier J. G. M., Pruijssers A. F., Reinhardt H. W., Monnier T., Load-Time Response of Colliding Concrete Bodies, J. Struct. Eng., v. 117 (2), pp. 354-374, 1991
- [1*] http://www.isprambiente.gov.it
- [2*] http://www.protezionecivile.gov.it
- [3*] http://www.lastampa.it
- [4*] http://www.geobrugg.com

Appendice A

Simbologia utilizzata

Moltiplicatore di collasso
Peso specifico
Densità
Variazione del livello di rischio
Indentazione
Spostamento virtuale verticale in corrispondenza della forza W_1
Spostamento virtuale verticale in corrispondenza della forza W_2
Spostamento virtuale orizzontale in corrispondenza della forza unitaria F
Spostamento laterale della parete in corrispondenza del punto medio nel mecca- nismo ad arco
Spostamento virtuale verticale in corrispondenza della forza N
Spostamento virtuale verticale in corrispondenza della forza P_s

θ	Rotazione intorno al polo O
μ	Fattore funzione della posizione della cerniera cilindrica nel meccanismo di fles- sione verticale
ρ	Pressione trasversale nel meccanismo ad arco
σ_n	Tensione normale mdia dovuta ai carichi verticali agenti nella sezione di verifica
τ	Sforzo di taglio agente sulla superficie di controllo cilindrica
$ au_0$	Resistenza media a taglio della muratura
ψ	Rotazione virtuale
Α	Danno superficiale (vulnerabilità espressa come danno atteso per gli elementi a rischio)
	Area di carico assiale della parete nel meccanismo ad arco
A_i	Area di impatto
A_m	Area di carico assiale della parete media nel meccanismo ad arco
а	Distanza orizzontale dal carrello in B del punto di applicazione del carico tra smesso al muro dal solaio
b	Costante dipendente dal tenore di vita della popolazione
С	Coefficiente che esprime il costo delle conseguenze di una rottura in rapporto al costo iniziale dell'opera
	Spinta della copertura
C_h	Componente orizzontale della spinta della copertura
C_{v}	Componente verticale della spinta della copertura
D	Danno atteso
DI	Indice di danno
d	Distanza orizzontale dal carrello in B del punto di applicazione del carico tra smesso alla parete dai piani superiori

d_b	Diametro del blocco di roccia impattante
Ε	Energia di impatto
	Elemento a rischio
	Modulo di elasticità normale secante
E _c	Livello di energia sufficiente a provocare la distruzione di un pilastro per l'impat- to di un blocco
E _i	Costo iniziale in dollari della costruzione
E_k	Energia cinetica
E_s	Esposizione al rischio
е	Larghezza di carico assiale
	Larghezza di carico assiale all'interfaccia con i solai
F	Fenomeno potenzialmente dannoso
	Danno funzionale (vulnerabilità espressa come danno atteso per gli elementi a rischio)
	Forza orizzontale unitaria che moltiplicata per α attiva il meccanismo di rottura
FC	Fattore di confidenza
f_{bk}	Resistenza a compressione degli elementi
f _{bm}	Resistenza media a compressione degli elementi in pietra squadrata
f_c	Resistenza a compressione dell'elemento resistente
f_k	Resistenza caratteristica a compressione della muratura
f_m	Resistenza media a compressione della muratura
f _{vk}	Resistenza caratteristica a taglio della muratura
f _{vk0}	Resistenza caratteristica a taglio in assenza di azione assiale della muratura
f _{vm}	Resistenza media ottenura dai risultati delle prove

G	Modulo di elasticità tangenziale secante
H	Pericolosità
h	Altezza dei depositi
	Altezza dei depositi nei modelli di run-out
	Altezza della parete (interpiano)
h_1	Altezza della parte inferiore della parete nel meccanismo di flessione verticale
h_2	Altezza della parte superiore della parete nel meccanismo di flessione verticale
h _a	Altezza della parete lungo cui si individuano i possibili punti di impatto per il meccanismo di flessione verticale
h _F	Distanza verticale tra il punto di applicazione della forza F e il carrello in B
Ι	Intensità delle frane
j	Numero di punti in cui l'energia necessaria alla rottura per flessione è minore o uguale al valore E_i
<i>K</i> ₁	Coefficiente determinato dal confronto dei risuralti teorici con le prove di labo- ratorio
K _c	Parametro di contatto
K _s	Costante dipendente dal tipo di opera e dal suo utilizzo sociale
k	Coefficiente funzione dei numero di provini n
	Rigidità della parete
m	Massa
Ν	Neoformazione (stato di attività)
	Periodo temporale considerato in anni
	Peso trasmesso alla parete dalle murature e dai solai dei livelli superiori
n	Numero di provini

Numero di piani f.t.

n _d	Tempo di servizio del sistema
n _r	Numero di persone esposte al rischio nel tempo n_d
Р	Pressione di impatto nei modelli di run-out
	Probabilità
	Generico punto
	Spinta dovuta all'arco agente in corrispondenza delle cerniere nel meccanismo ad arco
P annua	Probabilità annua
$P_{a(e)}$	Probabilità di rottura accettabile secondo il criterio economico
$P_{a(s)}$	Probabilità di rottura accettabile secodo il criterio sociale
P _{a(se)}	Probabilità di rottura accettabile secondo il criterio socio-economico
P _{base}	Probabilità che l'impatto che innesca la rottura per flessione verticale si verifichi in uno dei 30 punti considerati lungo l'altezza del muro
P _{e,k}	Probabilità che un elemento strutturale o non strutturale k sia colpito da un blocco di intensità i
$P(E_i)$	Probabilità che un impatto con energia E_i inneschi la rottura per flessione verticale
P_s	Peso del solaio agente sulla parete, calcolato in base all'area di influenza
p_i	Probabilità di impatto
q	Valore medio in dollari fissato dalle assicurazioni per la vita umana
R	Coefficiente di restituzione
	Rischio
	Riattivazione (stato di attività)

	Resistenza degli elementi esposti al rischio
Raccet	Rischio accettabile in funzione di decessi/anno
R_n	Coefficiente di restituzione normale
R_r	Rischio residuo
R _s	Rischio specifico
R_t	Coefficiente di restituzione tangenziale
	Rischio totale
R_{t0}	Valore soglia di accettabilità del rischio
<i>RRC</i> _k	Costo per il recupero di un elemento strutturale o non strutturale k colpito da un blocco di roccia con intensità i e velocità j
r	Larghezza dell'arco nel meccanismo ad arco
r^2	Coefficiente di determinazione
r _b	Raggio del blocco di roccia impattante
S	Danno strutturale (vulnerabilità espressa come danno atteso per gli elementi a rischio)
S_l	Superficie laterale del cilindro di controllo
S_{lc}	Superficie laterale del cilindro di controllo nell'area centrale della parete
S_{ls}	Superficie laterale del cilindro di controllo in prossimità del solaio
<i>S</i>	Stima dello scarto
	Spessore della muratura
T(anni)	Tempo espresso in anni
u	Velocità dei blocchi
<i>u</i> ₀	Componente orizzontale di spostamento del polo 0

 $\boldsymbol{u_p}$ Componente orizzontale di spostamento di un generico punto P

V	Vulnerabilità
	Volume interessato dal meccanismo di flessione verticale
V ₀	Velocità iniziale
V_1	Velocità del blocco prima del rimbalzo
V_{1n}	Velocità normale del blocco prima del rimbalzo
V_{1t}	Velocità tangenziale del blocco prima del rimbalzo
V'_1	Velocità del blocco dopo il rimbalzo
V'_{1n}	Velocità normale del blocco dopo il rimbalzo
V'_{1t}	Velocità tangenziale del blocco dopo il rimbalzo
$V(R_{ij})$	Vulnerabilità di un blocco di roccia con intensità i e velocità j
ν	Velocità di impatto
	Fattore di efficacia applicato alla resistenza a compressione della muratura
v_0	Componente verticale di spostamento del polo ${\it 0}$
v_p	Componente verticale di spostamento di un generico punto P
W	Valore dell'elemento a rischio
	Peso proprio della muratura in esame
<i>W</i> ₁	Peso proprio della parte inferiore della muratura in esame nel meccanismo di flessione verticale
<i>W</i> ₂	Peso proprio della parte superiore della muratura in esame nel meccanismo di flessione verticale
W _e	Carico della muratura di un piano superiore agente sull'area di carico assiale $(s \times e)$
W_L	Valore potenziale delle perdite
W	Peso specifico medio della muratura

	Diametro dell'ancoraggio
	Diametro dei blocco impattante
	Larghezza della parete su cui si innesca il meccanismo ad arco
	Diametro area di impatto
x_p	Ascissa di un generico punto P
у	Deformazione delle zone di schiacciamento nel meccanismo ad arco
<i>y</i> _p	Ordinata di un generico punto P

Appendice B

Analisi di simulazione per il punzonamento

Si presentano i risultati ottenuti eseguendo l'analisi di simulazione per il punzonamento (Tabella A.B2). Le variabili considerate con la relativa codifica adottata sono riportate in Tabella A.B1.

		Laterizio	-L
Elemento resistente	Μ	Pietra	-P
		Blocchi cemento	-BC
		0,30 m	30
		0,40 m	40
S	_	0,50 m	50
Spessore muratura	S	0,60 m	60
		0,70 m	70
		0,80 m	80
		Buono	-B
Stato di conservazione	SC	Sufficiente	-S
		Degrado	-D



		Energia di impatto E [kJ]											
		Area in	prossimità de	el solaio		Area centrale							
		SC-B	SC-S	SC-D	SC-B	SC-S	SC-D						
	M-L	8,91	8,91	8,91	15,84	15,84	15,84						
s30	M-P	8,91	8,91	8,91	15,84	15,84	15,84						
	M-BC	8,91	8,91	8,91	15,84	15,84	15,84						
	M-L	19,56	19,56	19,56	38,34	38,34	38,34						
s40	M-P	19,56	19,56	19,56	38,34	38,34	38,34						
	M-BC	19,56	19,56	19,56	38,34	38,34	38,34						
	M-L	36,98	36,98	36,98	78,24	78,24	78,24						
s50	M-P	36,98	36,98	36,98	78,24	78,24	78,24						
	M-BC	36,98	36,98	36,98	78,24	78,24	78,24						
	M-L	63,37	63,37	63,37	142,59	142,59	142,59						
s 60	M-P	63,37	63,37	63,37	142,59	142,59	142,59						
	M-BC	63,37	63,37	63,37	142,59	142,59	142,59						
	M-L	101,23	101,23	101,23	239,61	239,61	239,61						
s70	M-P	101,23	101,23	101,23	239,61	239,61	239,61						
	M-BC	101,23	101,23	101,23	239,61	239,61	239,61						
	M-L	153,35	153,35	153,35	378,68	378,68	378,68						
s 80	M-P	153,35	153,35	153,35	378,68	378,68	378,68						
	M-BC	153,35	153,35	153,35	378,68	378,68	378,68						

Tabella A.B2 - Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare del tipo di elemento resistente e dello stato di conservazione

Appendice C

Analisi di simulazione per la flessione verticale

Si presentano i risultati ottenuti eseguendo l'analisi di simulazione per la flessione verticale (Tabelle A.C2, A.C3, A.C4, A.C5, A.C6 A.C7 e A.C8). Le variabili considerate con la relativa codifica adottata sono riportate in Tabella A.C1.

In Tabella A.C2.1 si riporta il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare del numero di piani fuori terra; per ogni colonna si evidenziano gli incrementi minimi e massimi e per l'intera tabella gli stessi sono in grassetto.

In Tabella A.C2.2, suddivisa in due parti (A.C2.2-1 e A.C2.2-2), è presente il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la parete al piano primo al variare del numero di piani fuori terra; l'incremento da 3 piani f.t. a 4 piani f.t considera i valori di copertura non spingente per il fabbricato composto da 3 piani f.t.; per ogni colonna si evidenziano gli incrementi minimi e massimi e per l'intera tabella gli stessi sono in grassetto.

In Tabella A.C3.1 si illustra il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della tipologia di elemento resistente; per ogni elemento si evidenziano i valori di energia di impatto minimi e massimi al frattile 90% e, a parità di tutte le altre variabili, si confrontano le energie di impatto per i tre tipi di elemento resistente della muratura, adottando una colorazione rosa di tonalità crescente a seconda del valore. In Tabella A.C.3.2, suddivisa in tre parti (A.C.3.2-1, A.C.3.2-2 e A.C.3.2-3), si osservano le energie di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di elemento resistente; per ogni elemento si evidenziano i valori di energia di impatto minimi e massimi al frattile 90% e, a parità di tutte le altre variabilit, si confrontano le energie di impatto per i tre tipi di elemento resistente, adottando una colorazione rosa di tonalità crescente a seconda del valore.

In Tabella A.C4.1, suddivisa in due parti (A.C4.1-1 e A.C4.1-2), è riportato il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dello spessore della parete; per l'intera tabella si evidenziano gli incrementi minimi e massimi e, a parità di tutte le altre variabili, si confrontano gli incrementi delle energie di impatto all'aumentare dello spessore della muratura, adottando una colorazione rosa di tonalità crescente a se-conda del valore.

In Tabella A.C4.2, suddivida in cinque parti (A.C4.2-1, A.C4.2-2, A.C4.2-3, A.C4.2-4 e A.C4.2-5), è presente il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete; per l'intera tabella si evidenziano gli incrementi minimi e massimi e, a parità di tutte le altre variabili, si confrontano gli incrementi delle energie di impatto all'aumentare dello spessore della muratura, adottando una colorazione rosa di tonalità crescente a seconda del valore.

In Tabella A.C5.1 si illustra il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dell'orditura del solaio; per ogni colonna si evidenziano i decrementi minimi e massimi e per l'intera tabella gli stessi sono in grassetto.

In Tabella A.C5.2, suddivisa in tre parti (A.C5.2-1, A.C5.2-2 e A.C5.2-3), si osservano le energie di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dell'orditura del solaio; per ogni colonna si evidenziano i decrementi minimi e massimi e per l'intera tabella gli stessi sono in grassetto.

In Tabella A.C6.1 si riporta il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della tipologia di solaio; per ogni tipo di solaio si evidenziano i valori di energia di impatto minimi e massimi al frattile 90% e, a parità di tutte le altre variabili, si confrontano le energie di impatto per i tre tipi solaio, adottando una colorazione rosa di tonalità crescente a seconda del valore.

In Tabella A.C6.2, suddivisa in due parti (A.C6.2-1 e A.C6.2-2), è presente il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipolo-

gia di solaio; per ogni tipo di solaio si evidenziano i valori di energia di impatto minimi e massimi al frattile 90% e, a parità di tutte le altre variabili, si confrontano le energie di impatto per i tre tipi solaio, adottando una colorazione rosa di tonalità crescente a seconda del valore.

In Tabella A.C7.1, suddivisa in due parti (A.C7.1-1 e A.C7.1-2), si illustra il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio; per ogni colonna si evidenziano gli incrementi minimi e massimi al variare della luce del solaio da 3 m a 4 m e da 4 m a 5 m e per l'intera tabella gli stessi sono in grassetto.

In Tabella A.C7.2, suddivisa in quattro parti (A.C7.2-1, A.C7.2-2, A.C7.2-3 e A.C7.2-4), si osservano le energie di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio; per ogni colonna si evidenziano gli incrementi minimi e massimi al variare della luce del solaio da 3 m a 4 m e da 4 m a 5 m e per l'intera tabella gli stessi sono in grassetto.

In Tabella A.C8 è riportato il confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della spinta della copertura; per ogni tipo di spinta di copertura si evidenziano i valori di energia di impatto minimi e massimi al frattile 90% e, a parità di tutte le altre variabili, si confrontano le energie di impatto per i tre tipi di spinta di copertura, adottando una colorazione rosa di tonalità crescente a seconda del valore.

Numara di niani	D	3 piani f.t.	3
Numero di piani	Р	4 piani f.t.	4
		Laterizio	-L
Elemento resistente	М	Pietra	-P
		Blocchi cemento	-BC
		0,30 m	30
		0,40 m	40
		0,50 m	50
Spessore muratura	s	0,60 m	60
		0,70 m	70
		0,80 m	80
	0	Solaio scarica sulla muratura	1
Orditura	0	Solaio non scarica sulla muratura	2
		In legno leggero	-LL
Tipo di solaio	S	In legno pesante	-LP
		In c.a.	-CA
		3 m	3
Luce solaio	L	4 m	4
		5 m	5
		-nSp	a spinta eliminata
Tipo di spinta della copertura	С	-pSp	poco spingente
		-Sp	spingente

Tabella A.C1 - Codifica variabili considerate nel meccanismo di flessione verticale

Tabella A.C2.1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare del numero di piani fuori terra

Incremento minimo

Incremento massimo

		S-LL						S-LP									S-CA											
Energ	gia al 90%	L3 L4 L5				L3 L4 L5								L3 L4 L5														
frat	tile [k]]			Indip	ender	nte dal	la spinta c	iella C				-	Indip	enden	te dall	la spinta d	lella C	2				Indip	endente	dalla	a spinta d	lella C	2	
		P3	P3 P4 Increm. P3 P4 Increm. P3 P4 Increm.					Increm.	P3 P4 Increm. P3 P4 Increm. P3 P4 Increm.					P3 P4 Increm. P3 P4 Increm. P3 P4 Incre								Increm.						
	s30 O1	0,4	0,8	129%	0,5	1,0	123%	0,6	1,3	118%	0,6	1,3	111%	0,9	1,8	105%	1,2	2,4	101%	0,9	1,9	110%	1,3 2	2,7	106%	1,8	3,6	103%
	³⁵⁰ O2	0,2	0,4	130%	0,2	0,5	120%	0,2	0,5	112%	0,3	0,6	102%	0,3	0,6	91%	0,4	0,7	82%	0,3	0,6	98%	0,4 (0,7	87%	0,4	0,8	78%
	s40 O1	0,9	2,1	136%	1,1	2,6	130%	1,4	3,1	125%	1,5	3,2	117%	2,0	4,2	111%	2,6	5,4	107%	2,0	4,3	116%	2,8 5	5,9	111%	3,7	7,7	107%
	02 O2	0,5	1,2	138%	0,6	1,3	130%	0,6	1,4	123%	0,7	1,5	113%	0,8	1,7	103%	1,0	1,9	94%	0,8	1,6	109%	0,9 1	1,8	99%	1,1	2,0	90%
	s50 O1	1,9	4,5	141%	2,3	5,3	135%	2,7	6,2	130%	2,9	6,6	123%	3,8	8,3	117%	4,9	10,3	112%	3,9	8,5	121%	5,2 1	1,3	115%	6,8	14,4	111%
M-L	02	1,2	2,9	144%	1,3	3,0	137%	1,4	3,2	131%	1,6	3,5	121%	1,8	3,8	111%	2,1	4,2	103%	1,7	3,6	117%	1,9 4	4,0	107%	2,2	4,4	99%
111 12	s60 O1	3,5	8,5	145%	4,1	9,9	139%	4,8	11,3	134%	5,3	11,9	127%	6,7	14,7	121%	8,3	17,8	116%	6,7	15,1	125%	8,9 1	9,4	119%	11,3	24,3	115%
	02 O2	2,3	5,8	149%	2,5	6,0	142%	2,7	6,3	136%	3,0	6,8	127%	3,4	7,4	118%	3,8	8,0	110%	3,2	7,1	123%	3,6	7,7	114%	4,0	8,4	106%
	s70 O1	5,9	14,7	148%	6,9	16,8	142%	8,0	19,0	138%	8,7	20,0	131%	10,8	24,2	125%	13,1	28,8	120%	10,8	24,7	128%	14,0 3	1,2	122%	17,6	38,4	118%
	02 O2	4,1	10,4	152%	4,4	10,9	146%	4,7	11,3	141%	5,3	12,2	131%	5,9	13,1	123%	6,5	14,0	116%	5,5	12,5	128%	6,2 1	3,5	120%	6,9	14,5	112%
	s80 O1	9,5	23,7	150%	10,9	26,8	145%	12,4	30,0	141%	13,5	31,5	134%	16,5	37,5	128%	19,8	44,1	123%	16,6	38,3	131%	21,1 4	7,4	125%	26,1	57,5	121%
	³⁰⁰ O2	6,9	17,5	154%	7,3	18,2	149%	7,7	18,8	144%	8,6	20,2	135%	9,4	21,5	127%	10,3	22,8	121%	8,9	20,7	132%	9,9 2	2,2	124%	10,9	23,7	117%
	s30 O1	0,5	1,3	145%	0,6	1,5	139%	0,8	1,8	134%	0,8	1,9	128%	1,1	2,3	121%	1,3	2,9	116%	1,1	2,4	125%	1,4 3	3,1	120%	1,8	3,9	115%
	02	0,3	0,9	149%	0,4	0,9	142%	0,4	0,9	136%	0,4	1,0	128%	0,5	1,1	118%	0,6	1,2	110%	0,5	1,0	124%	0,5 1	1,2	114%	0,6	1,3	106%
	s40 O1	1,4	3,6	151%	1,7	4,1	146%	1,9	4,7	141%	2,1	4,8	135%	2,6	5,8	128%	3,1	6,9	123%	2,6	5,9	132%	3,3	7,5	126%	4,1	9,2	121%
	02	1,0	2,6	156%	1,1	2,7	150%	1,1	2,8	145%	1,3	3,0	137%	1,4	3,2	129%	1,5	3,4	121%	1,3	3,1	134%	1,5 3	3,3	125%	1,6	3,5	117%
	s50 O1	3,2	8,1	155%	3,6	9,1	150%	4,1	10,1	146%	4,3	10,4	140%	5,2	12,2	134%	6,2	14,2	129%	5,2	12,4	137%	6,6 1	5,2	131%	8,0	18,2	126%
M-P	02	2,4	6,2	160%	2,5	6,4	155%	2,6	6,6	150%	2,9	6,9	143%	3,1	7,4	136%	3,4	7,8	129%	3,0	7,1	140%	3,2 7	7,5	132%	3,5	8,0	126%
	s60 O1	6,2	15,9	158%	6,9	17,5	154%	7,7	19,1	150%	8,1	19,8	144%	9,6	22,8	138%	11,1	26,0	133%	9,6	23,1	141%	11,7 2	7,6	135%	14,1	32,4	131%
	02	4,8	12,6	163%	5,0	13,0	158%	5,2	13,3	154%	5,6	14,0	147%	6,1	14,6	141%	6,5	15,3	135%	5,8	14,2	145%	6,3 1	5,0	138%	6,8	15,8	132%
	s70 01	10,8	28,2	161%	12,0	30,7	157%	13,1	33,2	153%	13,9	34,3	147%	16,1	38,9	142%	18,5	43,8	137%	16,1	39,4	144%	19,4 4	6,2	139%	22,9	53,5	134%
	02	8,7	23,1	165%	9,1	23,7	161%	9,4	24,2	157%	10,1	25,3	151%	10,8	26,4	145%	11,5	27,4	139%	10,4	25,7	148%	11,1 2	6,9	142%	11,9	28,1	136%
	s80 01	17,8	46,6	163%	19,4	50,2	159%	21,1	53,9	155%	22,2	55,6	150%	25,4	62,2	145%	28,9	69,3	140%	25,6	63,1	147%	30,2 7	2,8	141%	35,1	83,3	137%
	02	14,7	39,1	166%	15,2	39,9	163%	15,7	40,7	160%	16,7	42,4	153%	17,7	44,0	148%	18,8	45,6	143%	17,2	43,1	151%	18,3 4	4,8	145%	19,4	46,6	140%
	s30 01	0,6	1,3	133%	0,7	1,7	127%	0,9	2,0	122%	1,0	2,1	115%	1,3	2,8	109%	1,8	3,6	104%	1,4	2,9	114%	1,9 4	4,0	109%	2,6	5,3	105%
	02	0,3	0,7	135%	0,3	0,8	126%	0,4	0,8	119%	0,4	0,9	109%	0,5	1,1	98%	0,6	1,2	89%	0,5	1,0	105%	0,6 1	1,1	94%	0,7	1,3	85%
	s40 01	1,5	3,5	140%	1,8	4,2	134%	2,2	4,9	129%	2,3	5,2	122%	3,1	6,6	116%	3,9	8,3	111%	3,1	6,8	120%	4,2 9	9,1	115%	5,6	11,7	111%
	02	0,9	2,2	143%	1,0	2,3	136%	1,1	2,4	129%	1,2	2,7	120%	1,4	2,9	110%	1,6	3,2	101%	1,3	2,8	116%	1,5 3	3,1	106%	1,7	3,4	9/%
	s50 01	3,1	7,6	145%	3,7	8,9	139%	4,4	10,2	134%	4,7	10,7	127%	6,0	13,3	121%	7,5	16,1	116%	6,0	13,6	125%	8,0 1	/,6	119%	10,3	22,1	115%
M-BC	02	2,1	5,1	149%	2,2	5,4	142%	2,4	5,6	136%	2,7	6,0	127%	3,0	6,6	118%	3,4	7,1	110%	2,8	6,2	123%	3,2 (5,8	114%	3,6	7,4	106%
	s60 01	5,8	14,5	149%	6,8	16,6	143%	7,9	18,8	138%	8,5	19,7	132%	10,6	23,8	125%	12,9	28,4	120%	10,6	24,3	129%	13,8 3	0,7	123%	17,3	37,9	119%
	02	4,1	10,3	153%	4,3	10,7	14/%	4,6	11,2	142%	5,1	12,0	133%	5,7	12,8	124%	6,3	13,7	11/%	5,4	12,3	129%	6,0 1	3,3	121%	6,7	14,3	113%
	s70 01	10,0	25,2	152%	11,5	28,4	146%	13,1	51,8	142%	14,1	33,2	135%	1/,3	39,6	129%	20,/	46,4	124%	1/,4	40,3	132%	22,0 4	9,9	12/%	27,2	60,4	122%
	02	7,3	18,7	156%	7,7	19,4	151%	8,2	20,1	146%	9,0	21,4	13/%	9,9	22,8	129%	10,9	24,2	123%	9,4	22,0	134%	10,4 2	3,5	126%	11,4	25,1	119%
	s80 01	16,2	41,1	154%	18,3	45,7	149%	20,7	50,6	145%	22,2	52,8	138%	26,7	61,9	132%	31,5	/1,6	127%	26,8	63,0	135%	33,4 7	6,6	129%	40,7	91,5	125%
	02	12,2	31,5	158%	12,8	32,5	153%	13,5	33,5	149%	14,8	35,6	140%	16,1	37,6	133%	17,5	39,7	127%	15,4	36,5	137%	16,8 3	8,7	130%	18,3	41,0	123%

																												11101	01110110	0	
									S-LL															S-LP							
Energ	a al 90%			L3					L4					L5					L3					L4					L5		
fratt	ile [k]]		P3					P3																							
		C-nSp	C-pSp	C-Sp	P4	Increm.	C-nSp	C-pSp	C-Sp	P4	Increm.	C-nSp	C-pSp	C-Sp	P4	Increm.	C-nSp	C-pSp	C-Sp	P4	Increm.	C-nSp	C-pSp	C-Sp	P4	Increm.	C-nSp	C-pSp	C-Sp	P4 :	Increm.
	01	0,1	0,1	0,1	0,4	323%	0,1	0,1	0,1	0,5	288%	0,2	0,2	0,1	0,6	264%	0,2	0,2	0,1	0,6	233%	0,3	0,3	0,2	0,9	210%	0,4	0,4	0,2	1,2	195%
	s30 O2	0,0	0,0	0,0	0,2	325%	0,1	0,1	0,0	0,2	275%	0,1	0,1	0,0	0,2	238%	0,1	0,1	0,0	0,3	198%	0,1	0,1	0,1	0,3	162%	0,2	0,2	0,1	0,4	136%
		0,2	0,2	0,1	0,9	365%	0,3	0,3	0,2	1,1	326%	0,3	0,3	0,2	1,4	298%	0,4	0,4	0,3	1,5	262%	0,6	0,6	0,4	2,0	235%	0,8	0,8	0,5	2,6	217%
	s40 O2	0,1	0,1	0,1	0,5	382%	0,1	0,1	0,1	0,6	330%	0,2	0,2	0,1	0,6	290%	0,2	0,2	0,1	0,7	242%	0,3	0,3	0,1	0,8	201%	0,4	0,4	0,2	1,0	172%
	01	0,4	0,4	0,3	1,9	399%	0,5	0,5	0,4	2,3	358%	0,6	0,6	0,4	2,7	328%	0,8	0,8	0,5	2,9	288%	1,1	1,1	0,7	3,8	258%	1,4	1,4	0,9	4,9	237%
	s50 O2	0,2	0,2	0,1	1,2	425%	0,3	0,3	0,2	1,3	373%	0,3	0,3	0,2	1,4	332%	0,4	0,4	0,2	1,6	279%	0,5	0,5	0,3	1,8	235%	0,7	0,7	0,3	2,1	203%
M-L	01	0,7	0,7	0,5	3,5	428%	0,8	0,8	0,6	4,1	386%	1,1	1,1	0,8	4,8	354%	1,3	1,3	0,8	5,3	311%	1,8	1,8	1,1	6,7	279%	2,3	2,3	1,5	8,3	256%
	s60 O2	0,4	0,4	0,3	2,3	459%	0,5	0,5	0,3	2,5	409%	0,6	0,6	0,4	2,7	368%	0,7	0,7	0,4	3,0	310%	0,9	0,9	0,5	3,4	265%	1,1	1,1	0,6	3,8	231%
	01	1,1	1,1	0,8	5,9	453%	1,4	1,4	1,0	6,9	410%	1,7	1,7	1,2	8,0	377%	2,0	2,0	1,4	8,7	331%	2,7	2,7	1,8	10,8	297%	3,5	3,5	2,3	13,1	273%
	s70 O2	0,7	0,7	0,5	4,1	487%	0,8	0,8	0,6	4,4	438%	0,9	0,9	0,6	4,7	398%	1,2	1,2	0,7	5,3	336%	1,5	1,5	0,8	5,9	291%	1,8	1,8	1,0	6,5	256%
	01	1,7	1,6	1.3	9,5	474%	2,1	2,0	1,5	10,9	431%	2,5	2,5	1,8	12,4	398%	3,0	3,0	2,0	13,5	349%	4,0	4,0	2,6	16,5	314%	5,1	5,1	3.3	19,8	288%
	s80 O2	1,1	1,1	0,8	6,9	510%	1,3	1,3	0,9	7,3	463%	1,5	1,5	1,0	7,7	424%	1,9	1,9	1,1	8,6	358%	2,3	2,3	1,3	9,4	313%	2,7	2,7	1,5	10,3	278%
	01	0,1	0,1	0,1	0,5	430%	0,1	0,1	0,1	0,6	385%	0,2	0,2	0,1	0,8	351%	0,2	0,2	0,1	0,8	316%	0,3	0,3	0,2	1,1	280%	0,4	0,4	0,2	1,3	256%
	s30 O2	0,1	0,1	0,0	0,3	465%	0,1	0,1	0,0	0,4	410%	0,1	0,1	0,1	0,4	365%	0,1	0,1	0,1	0,4	315%	0,1	0,1	0,1	0,5	266%	0,2	0,2	0,1	0,6	229%
	O1	0,2	0,2	0,2	1,4	480%	0,3	0,3	0,2	1,7	434%	0,4	0,4	0,3	1,9	398%	0,4	0,4	0,3	2,1	358%	0,6	0,6	0,4	2,6	319%	0,8	0,8	0,5	3,1	290%
	s40 O2	0,2	0,2	0,1	1,0	522%	0,2	0,2	0,1	1,1	470%	0,2	0,2	0,1	1,1	426%	0,3	0,3	0,2	1,3	371%	0,3	0,3	0,2	1,4	320%	0,4	0,4	0,2	1,5	280%
	O1	0,5	0,5	0,4	3,2	519%	0,6	0,6	0,5	3,6	472%	0,8	0,8	0,6	4,1	436%	0,9	0,9	0,6	4,3	393%	1,2	1,2	0,8	5,2	352%	1,5	1,5	1,0	6,2	321%
MD	s50 O2	0,4	0,4	0,3	2,4	563%	0,4	0,4	0,3	2,5	514%	0,5	0,5	0,3	2,6	473%	0,6	0,6	0,4	2,9	414%	0,7	0,7	0,4	3,1	363%	0,8	0,8	0,5	3,4	322%
IVI-12	01	0,9	0,9	0,8	6,2	549%	1,1	1,1	0,9	6,9	504%	1,3	1,3	1,0	7,7	467%	1,5	1,5	1,1	8,1	423%	2,0	2,0	1,4	9,6	380%	2,5	2,5	1,7	11,1	348%
	S60 O2	0,7	0,7	0,5	4,8	593%	0,8	0,8	0,6	5,0	548%	0,9	0,9	0,6	5,2	509%	1,0	1,0	0,7	5,6	448%	1,2	1,2	0,8	6,1	398%	1,4	1,4	0,9	6,5	358%
	•70 O1	1,6	1,6	1,3	10,8	574%	1,9	1,9	1,5	12,0	530%	2,2	2,2	1,8	13,1	494%	2,5	2,5	1,9	13,9	448%	3,2	3,2	2,3	16,1	405%	3,9	3,9	2,8	18,5	371%
	S70 O2	1,2	1,2	1,0	8,7	617%	1,3	1,3	1,0	9,1	575%	1,5	1,5	1,1	9,4	538%	1,8	1,7	1,2	10,1	476%	2,0	2,0	1,4	10,8	428%	2,4	2,3	1,5	11,5	388%
	-80 O1	2,6	2,6	2,2	17,8	594%	3,0	3,0	2,4	19,4	552%	3,4	3,4	2,8	21,1	517%	3,9	3,9	3,0	22,2	469%	4,8	4,8	3,6	25,4	426%	5,9	5,8	4,2 2	28,9	392%
	⁵⁰⁰ O2	2,0	2,0	1,6	14,7	636%	2,2	2,2	1,7	15,2	597%	2,4	2,4	1,8	15,7	562%	2,8	2,8	2,0	16,7	499%	3,2	3,2	2,2	17,7	453%	3,7	3,6	2,4	18,8	413%
	c30 O1	0,1	0,1	0,1	0,6	348%	0,2	0,2	0,1	0,7	310%	0,2	0,2	0,2	0,9	283%	0,3	0,3	0,2	1,0	251%	0,4	0,4	0,3	1,3	225%	0,6	0,6	0,3	1,8	208%
	^{\$30} O2	0,1	0,1	0,0	0,3	360%	0,1	0,1	0,0	0,3	307%	0,1	0,1	0,1	0,4	267%	0,1	0,1	0,1	0,4	225%	0,2	0,2	0,1	0,5	185%	0,2	0,2	0,1	0,6	156%
	e40 O1	0,3	0,3	0,2	1,5	393%	0,4	0,4	0,3	1,8	351%	0,5	0,5	0,4	2,2	321%	0,6	0,6	0,4	2,3	284%	0,9	0,9	0,6	3,1	254%	1,2	1,2	0,7	3,9	233%
	S40 O2	0,2	0,2	0,1	0,9	417%	0,2	0,2	0,1	1,0	364%	0,3	0,3	0,1	1,1	323%	0,3	0,3	0,2	1,2	272%	0,4	0,4	0,2	1,4	228%	0,5	0,5	0,3	1,6	196%
	s50 O1	0,6	0,6	0,4	3,1	429%	0,8	0,8	0,6	3,7	386%	1,0	1,0	0,7	4,4	353%	1,1	1,1	0,8	4,7	313%	1,6	1,6	1,0	6,0	279%	2,1	2,1	1,3	7,5	256%
MRC	³⁵⁰ O2	0,4	0,4	0,3	2,1	461%	0,4	0,4	0,3	2,2	409%	0,5	0,5	0,3	2,4	367%	0,6	0,6	0,4	2,7	311%	0,8	0,8	0,4	3,0	265%	1,0	1,0	0,5	3,4	231%
M-DC	s60 O1	1,0	1,0	0,8	5,8	459%	1,3	1,3	1,0	6,8	415%	1,6	1,6	1,2	7,9	381%	1,9	1,9	1,3	8,5	337%	2,6	2,6	1,7	10,6	302%	3,4	3,4	2,2	12,9	276%
	300 O2	0,7	0,7	0,5	4,1	495%	0,8	0,8	0,5	4,3	445%	0,9	0,9	0,6	4,6	404%	1,2	1,2	0,7	5,1	344%	1,4	1,4	0,8	5,7	297%	1,8	1,7	0,9	6,3	261%
	s70 O1	1,7	1,7	1,3	10,0	484%	2,1	2,1	1,6	11,5	440%	2,6	2,6	1,9	13,1	406%	3,1	3,1	2,1	14,1	359%	4,1	4,1	2,8	17,3	322%	5,2	5,2	3,5	20,7	295%
	°70 O2	1,2	1,2	0,9	7,3	522%	1,3	1,3	0,9	7,7	474%	1,5	1,5	1,0	8,2	434%	1,9	1,9	1,2	9,0	371%	2,3	2,3	1,4	9,9	324%	2,8	2,8	1,5	10,9	287%
	s80 O1	2,7	2,7	2,1	16,2	505%	3,3	3,3	2,5	18,3	462%	3,9	3,9	2,9	20,7	427%	4,6	4,6	3,3	22,2	378%	6,1	6,0	4,1	26,7	340%	7,6	7,6	5,1	31,5	312%
	02	1.9	1.9	1.4	12.2	544%	2,1	2.1	1.5	12,8	499%	2,4	2,4	1.7	13.5	460%	3.0	3.0	1.9	14.8	394%	3.6	3.6	2.2	16.1	348%	4.3	4.2	2.4	17.5	311%

Tabella A.C2.2-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare del numero di piani Incremento massimo

fuori terra

Incremento minimo

										S-CA								Inc	remento	minimo
Energ	ia al 90)%			L3					L4					L5					
frat	ile [kJ]			P3	-	D4	Incrom		P3		D4	Incrom		P3		- D4	Increm	Inc	remento	massim
			C-nSp	C-pSp	C-Sp	F4	increm.	C-nSp	C-pSp	C-Sp	г4	merem.	C-nSp	C-pSp	C-Sp	F4	merem.			
	e30	O1	0,3	0,3	0,2	0,9	231%	0,4	0,4	0,3	1,3	213%	0,6	0,6	0,4	1,8	201%			
	\$50 (02	0,1	0,1	0,0	0,3	183%	0,1	0,1	0,1	0,4	149%	0,2	0,2	0,1	0,4	125%			
	\$40	O1	0,6	0,6	0,4	2,0	256%	0,8	0,8	0,5	2,8	234%	1,2	1,2	0,8	3,7	219%			
	010 (02	0,2	0,2	0,1	0,8	225%	0,3	0,3	0,1	0,9	187%	0,4	0,4	0,2	1,1	159%			
	\$50	O1	1,0	1,0	0,7	3,9	279%	1,5	1,5	1,0	5,2	253%	2,0	2,0	1,3	6,8	235%			
M-L		02	0,5	0,5	0,2	1,7	261%	0,6	0,6	0,3	1,9	219%	0,8	0,8	0,4	2,2	189%			
	s60	01	1,7	1,7	1,1	6,7	298%	2,4	2,4	1,6	8,9	270%	3,2	3,2	2,1	11,3	251%			
		02	0,8	0,8	0,4	3,2	290%	1,0	1,0	0,5	3,6	247%	1,3	1,3	0,6	4,0	215%			
	s70	01	2,6	2,6	1,8	10,8	316%	3,6	3,6	2,4	14,0	286%	4,8	4,8	3,2	17,6	265%			
	(02	1,3	1,3	0,8	5,5	316%	1,7	1,6	0,9	6,2	272%	2,0	2,0	1,0	6,9	239%			
	s80	01	3,8	3,8	2,7	16,6	332%	5,3	5,2	3,6	21,1	301%	6,9	6,9	4,6	26,1	279%			
	(02	2,0	2,0	1,2	8,9	338%	2,5	2,5	1,4	9,9	294%	3,0	3,0	1,6	10,9	260%			
	s30	01	0,3	0,3	0,2	1,1	303%	0,4	0,4	0,3	1,4	272%	0,5	0,5	0,3	1,8	251%			
		02	0,1	0,1	0,1	0,5	296%	0,2	0,2	0,1	0,5	248%	0,2	0,2	0,1	0,6	213%			
	s40		0,6	0,0	0,4	2,0	2500/	0,8	0,8	0,0	3,3	200%	1,1	1,1	0,7	4,1	281%			
		02	0,5	0,5	0,2	1,5	33070	1.5	1.5	1.1	1,5	2250/	2.0	2.0	1.4	1,0	20270			
	s50	$\frac{01}{02}$	0.6	1,1	0,0	3,2	302%	1,5	1,5	0.4	3.2	33370	2,0	2,0	0.5	0,0 3.5	30770			
M-P		01	1.0	1.0	1.4	9,0	300%	2.5	2.5	1.8	3,2 11.7	360%	3.3	3.3	2.3	14.1	331%			
	s60	$\frac{01}{02}$	11	1,5	0.7	5.8	427%	13	1.3	0.8	63	377%	1.6	1.5	0.9	6.8	337%			
		01	3.1	3.1	23	16.1	423%	4.0	4.0	2.9	19.4	382%	51	5.0	3.6	22.9	352%			
	s70	$\frac{0}{02}$	1.9	1.9	1.3	10.4	455%	2.2	2.2	1.4	11.1	407%	2.5	2.5	1.6	11.9	367%			
		01	4.7	4.7	3.6	25.6	443%	6.0	6.0	4.5	30.2	402%	7.5	7.4	5.4	35.1	371%			
	s80	02	3.0	3.0	2.1	17.2	478%	3.4	3.4	2.3	18.3	431%	3.9	3.9	2.5	19.4	392%			
		01	0,4	0,4	0,3	1,4	247%	0,6	0,6	0,4	1,9	226%	0,8	0,8	0,5	2,6	211%			
	s30	02	0,2	0,2	0,1	0,5	209%	0,2	0,2	0,1	0,6	171%	0,3	0,3	0,1	0,7	144%			
	(O1	0,8	0,8	0,6	3,1	275%	1,2	1,2	0,8	4,2	249%	1,7	1,7	1,1	5,6	232%			
	s40	02	0,4	0,4	0,2	1,3	254%	0,5	0,5	0,2	1,5	212%	0,6	0,6	0,3	1,7	182%			
	50	O1	1,5	1,5	1,0	6,0	300%	2,2	2,2	1,4	8,0	271%	2,9	2,9	1,9	10,3	251%			
MDC	\$50	02	0,7	0,7	0,4	2,8	292%	0,9	0,9	0,5	3,2	248%	1,1	1,1	0,6	3,6	214%			
м-вС	(O1	2,5	2,5	1,7	10,6	322%	3,5	3,5	2,4	13,8	291%	4,7	4,7	3,1	17,3	269%			
	500	02	1,3	1,3	0,7	5,4	324%	1,6	1,6	0,9	6,0	278%	2,0	1,9	1,0	6,7	243%			
	\$70	01	3,9	3,9	2,8	17,4	341%	5,4	5,4	3,7	22,0	308%	7,1	7,0	4,8	27,2	285%			
	\$70	02	2,1	2,1	1,3	9,4	350%	2,6	2,6	1,5	10,4	304%	3,1	3,1	1,7	11,4	269%			
	\$80	O1	5,9	5,8	4,1	26,8	358%	7,9	7,8	5,5	33,4	324%	10,2	10,1	7,0	40,7	299%			
	300	02	3.3	3,2	2.0	15,4	373%	3.9	3.9	2.3	16.8	327%	4.7	4.7	2.6	18.3	291%			

Tabella A.C2.2-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare del numero di piani fuori terra

Tabella A.C3.1 - Confronto dell'energia di impatto a	l frattile 90% per la muratura	al piano terra al variare	della tipologia
di elemento resistente			



Appendice 0 . Analisi d: simulazione la flessione verticale

Valore minimo

s40

s50

s60

s70

s80

s40

s50

s60

s70

s80

P3

per

Valore minimo

Valore massimo

Tabella A.C3.2-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di elemento resistente

S-LL L3 L4 L5 Energia al 90% frattile [k]] C-nSp C-pSp C-Sp C-nSp C-pSp C-Sp C-nSp C-pSp C-Sp M-P M-P M-BC M-L M-P M-BC M-P M-BC M-P M-BC M-L M-P M-BC M-P M-BC M-P M-BC M-L M-P M-BC M-L M-BC M-L M-L M-L M-L M-L 0.08 0,10 0,06 0,08 0,12 0,13 0,17 0,16 0,17 0,11 0,12 0,10 0,13 0,08 0,13 0,12 0,13 0,18 0.08 0.10 0,12 0,16 0,24 O1 0.09 0,18 0,24 0,16 s30 02 0,04 0,06 0,07 0,04 0,06 0,07 0,02 0,04 0,04 0,06 0,07 0,09 0,05 0,07 0,09 0,03 0,05 0,05 0,07 0,09 0,11 0,07 0,09 0,10 0,04 0,05 0,06 0,23 0,29 0,19 0,25 0,19 0,25 0,14 0,19 0,26 0,31 0,18 0,24 0,34 0,39 0,34 0,39 0,36 O1 0,30 0,30 0,22 0,26 0,31 0,40 0,40 0,28 0,51 0,51 s40 02 0,11 0,16 0,11 0,17 0,07 0,12 0,13 0,19 0,13 0,22 0,16 0,22 0,09 0,14 0,17 0,16 0,11 0,21 0,19 0,21 0,08 0,13 0,13 0,16 0,25 0,25 0,15 0,37 0,37 0,27 0,41 0,49 0,35 0,49 0,76 0,76 0,44 0,58 O1 0,51 0,59 0,51 0,58 0,44 0,50 0,63 0,76 0,63 0,76 0,56 0,63 0,96 0,63 0,96 0,69 s50 O2 0,22 0,36 0,15 0,28 0,41 0,27 0,17 0,30 0,46 0,32 0,19 0,32 0,37 0,22 0,36 0,36 0,25 0,27 0,43 0,41 0,43 0,28 0,32 0,51 0,46 0,50 0,31 P3 0,95 0,95 0,49 0,78 1,14 0,85 0,62 0,91 1,35 1,06 0,76 1,05 O1 0,66 1,04 0,65 1,04 0,80 0,85 1,32 1,14 1,32 0,99 1,07 1,64 1,35 1,63 1,19 s60 02 0,69 0,41 0,29 0,55 0,77 0,49 0,77 0,32 0,59 0,86 0,57 0,35 0,62 0,41 0,69 0,69 0,49 0,49 0,80 0,79 0,54 0,57 0,92 0,86 0,91 0,59 0,68 O11,07 1,61 1,72 1,07 1,61 1,71 0,81 1,34 1,34 1,36 1,90 2,14 1,35 1,89 2,13 1,00 1,54 1,62 1,67 2,21 2,60 1,67 2,21 2,59 1,21 1,75 1,92 s70 0,71 1,22 1,34 0,82 0,55 1,04 1,47 0,60 1,10 02 1,18 0,70 1,22 0,50 0,98 0,82 1,35 1,34 0,94 0,94 1,53 0,94 1,47 1,52 1,02 1,17 0,87 1,34 O1 1,65 2,56 2,67 1,65 2,56 2,67 1,27 2,15 2,98 3,27 2,05 2,97 1,54 2,44 3,42 3,92 2,49 3,42 3,91 1,83 2,75 2,94 2,11 2,05 3,26 2,51 2,50 s80 02 2,00 1,13 0,82 1,29 2,18 2,14 1,29 2,36 2,40 1,46 0,97 1,13 1,90 1,99 1,64 2,17 0,89 1,72 1,54 1,47 2,36 1,81 1,89 1,43 2,13 2,39 1,65 Indipendente dalla spinta della C Indipendente dalla spinta della C Indipendente dalla spinta della C M-L M-P M-BC M-L M-P M-L M-P M-BC M-BC 0,36 0,59 0,76 O1 0,53 0,57 0,46 0,64 0,73 0,91 s30 O2 0,18 0,34 0,21 0,37 0,23 0,40 0,31 0,35 0.39 O1 0,89 1,44 1,12 1,68 1,37 1,94 1,46 1,79 2,16 s40 0,51 1,02 0,57 1,08 1,15 O2 0,98 0,63 0,89 1,06 3,18 2,27 3,62 4,09 O1 1,86 3,10 3,70 2,71 4,36 s50 O2 1,17 2,39 2,05 1,27 2,51 2,21 1,38 2,64 2,37 P4 6,16 4,12 6,89 7,65 7,88 O1 3,47 5,83 6,81 4,84 s60 02 2,32 4,82 5,02 2,49 2,67 5,24 4,08 4,34 4,62 5,92 10,83 10,03 6,91 11,96 11,54 7,99 13,14 13,14 O1s70 02 4,15 8,74 7,33 4,41 9,07 7,74 4,69 9,40 8,17 17,77 10,91 O19,47 16,17 19,40 18,35 12,44 21,12 20,65 s80 02 14,69 6,89 12,22 7,28 15,17 12,83 7,69 15,66 13,45

Tabella A.C3.2-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per	la muratura al piano primo al variare della tipologia
di elemento resistente	

																CID													
			_				1.2									S-LP									1.7				
Energia	al 90%	trattile		0.0		r –	1.3		r	0.0			0.0		r –	LA			6.6			6 6			LS			0.0	
	[KJ]		267	C-nSp	MDG		C-pS	p		C-Sp			C-nSp			C-pS	2		C-Sp	NDC		C-nSp	MBG		C-pSp			C-Sp	MDC
			M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC
	s30	01	0,19	0,20	0,28	0,19	0,20	0,28	0,12	0,13	0,18	0,29	0,28	0,41	0,29	0,28	0,41	0,17	0,18	0,26	0,40	0,37	0,58	0,40	0,37	0,57	0,24	0,24	0,35
		02	0,09	0,11	0,14	0,09	0,11	0,14	0,04	0,06	0,07	0,13	0,14	0,19	0,13	0,14	0,19	0,06	0,07	0,09	0,17	0,17	0,25	0,17	0,17	0,24	0,07	0,09	0,11
	s40	01	0,41	0,45	0,61	0,41	0,45	0,61	0,26	0,31	0,40	0,60	0,61	0,87	0,59	0,61	0,87	0,37	0,41	0,55	0,82	0,80	1,18	0,81	0,79	1,17	0,50	0,53	0,73
		02	0,21	0,27	0,32	0,21	0,27	0,32	0,11	0,17	0,17	0,28	0,33	0,43	0,28	0,33	0,42	0,13	0,19	0,21	0,36	0,41	0,54	0,36	0,40	0,54	0,16	0,22	0,26
	s50	01	0,76	0,88	1,14	0,76	0,88	1,14	0,49	0,63	0,76	1,07	1,16	1,59	1,07	1,15	1,58	0,68	0,81	1,03	1,44	1,48	2,10	1,43	1,47	2,09	0,90	1,00	1,34
P3		02	0,42	0,56	0,65	0,41	0,55	0,64	0,23	0,36	0,37	0,54	0,67	0,82	0,53	0,67	0,82	0,27	0,41	0,44	0,68	0,80	1,02	0,67	0,80	1,02	0,32	0,47	0,52
	s60	01	1,28	1,55	1,94	1,27	1,54	1,93	0,85	1,14	1,32	1,76	1,99	2,63	1,75	1,98	2,62	1,14	1,42	1,74	2,32	2,49	3,43	2,31	2,48	3,41	1,47	1,73	2,22
		02	0,/4	1,03	1,16	0,73	1,03	1,15	0,42	0,70	0,69	0,93	1,22	1,44	0,93	1,21	1,43	0,50	0,78	0,81	1,15	1,43	1,/6	1,14	1,42	1,/5	0,58	0,87	0,93
	s70	01	2,01	2,53	3,08	2,00	2,52	3,07	1,35	1,89	2,13	2,/1	3,19	4,09	2,70	3,18	4,08	1,/8	2,31	2,75	3,52	3,92	5,24	3,51	3,91	5,22	2,27	2,/8	3,45
		02	1,21	1,/5	1,92	1,20	1,/4	1,91	0,/1	1,23	1,19	1,50	2,04	2,34	1,49	2,03	2,33	0,83	1,35	1,36	1,82	2,35	2,81	1,81	2,34	2,79	0,95	1,49	I,55
	s80	01	3,00	2,91	4,64	2,99	3,90	4,00	2,05	2,97	3,20	3,98	4,84	6,05	3,96	4,82	0,05 2,50	2,05	2,57	4,15	5,10	2,67	/,65	5,08	5,85	1,62	3,32 1.40	4,22	5,11 2,42
		02	1,87	2,/9	5,00	1,87	2,78	cointe de	1,14	2,01	1,91	2,28	3,21	5,00	Z,Z/	3,20 a dalla	5,59 spinte de	1,51	2,19	2,10	2,/3	3,05	4,20	Z,/Z	3,04	4,24	1,49	2,39	2,43
			MI	MD	MRC	indent	e uaira	spina de	illa C			MI	MD	MRC		e uana	spina de	na C			MI	MD	MRC	naena	ualla s	spina de	iia C		
		01	0.64	0.81	0.08							0.80	1.05	1 35							1 10	1.32	1 77						
	s30	01	0.27	0.45	0,50							0,09	0.51	0.53							0.40	0.57	0.63						
		01	1.40	2.06	2.34							200	2.56	3.08							2.50	3.11	3.02						
	s40	02	0.72	1.26	1.21							0.85	1.40	1.40							0.98	1 54	1.60						
		01	2.95	4 33	4.71							3.84	5.23	6.01							4.85	6.21	7.48						
	s50	02	1.57	2.86	2.66							1.81	3.12	3.01							2.05	3.39	3.38						
P4		01	5.25	8.09	8.49							6.67	9.55	10.58							8.26	11.14	12.90						
	s60	02	3.02	5.64	5.15							3.40	6.08	5.72							3.80	6.53	6.33						
		01	8,66	13,86	14,14							10,78	16,08	17,27							13,12	18,47	20,71						
	s70	02	5,27	10,08	9,05							5,85	10,76	9,94							6,47	11,46	10,87						
		01	13,47	22,24	22,19							16,48	25,45	26,66							19,79	28,87	31,53						
	s80	02	8 5 9	16.74	14.83							9.44	17.73	16.13							10.34	18.76	17.49						

Valore minimo Valore massimo

Tabella A.C3.2-3 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di elemento resistente

ii eien	lento	resis	lente																								Va	lore n	nassimo
																S-CA													
Energia	1 al 90%	frattile					L3									L4									L5				
	[k]]			C-nSp)		C-pS	р		C-Sp)		C-nSp)		C-pS	р		C-Sp)		C-nSp			C-pS	þ		C-Sp)
			M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC	M-L	M-P	M-BC
	•	O1	0,27	0,26	0,39	0,27	0,26	0,39	0,17	0,18	0,25	0,42	0,38	0,59	0,41	0,38	0,59	0,26	0,26	0,38	0,59	0,52	0,84	0,59	0,52	0,83	0,37	0,35	0,53
	\$30	02	0,10	0,12	0,15	0,10	0,12	0,15	0,05	0,07	0,08	0,14	0,15	0,21	0,14	0,15	0,21	0,06	0,08	0,10	0,19	0,20	0,28	0,19	0,19	0,28	0,08	0,10	0,12
	10	O1	0,56	0,58	0,82	0,56	0,58	0,82	0,37	0,41	0,55	0,84	0,82	1,21	0,84	0,81	1,21	0,54	0,57	0,80	1,17	1,09	1,67	1,17	1,08	1,67	0,75	0,74	1,09
	s40	02	0,24	0,29	0,36	0,23	0,29	0,36	0,12	0,18	0,19	0,32	0,37	0,48	0,32	0,36	0,47	0,15	0,21	0,23	0,41	0,45	0,61	0,41	0,45	0,61	0,18	0,24	0,28
	50	O1	1,02	1,11	1,51	1,02	1,11	1,50	0,68	0,81	1,03	1,48	1,51	2,16	1,48	1,51	2,15	0,97	1,07	1,45	2,03	1,97	2,93	2,02	1,97	2,92	1,32	1,37	1,93
D2	\$50	02	0,46	0,60	0,71	0,46	0,60	0,71	0,24	0,38	0,40	0,60	0,73	0,92	0,60	0,73	0,91	0,30	0,44	0,47	0,76	0,88	1,15	0,76	0,88	1,14	0,36	0,50	0,56
P3	(0)	O1	1,68	1,92	2,52	1,68	1,91	2,51	1,14	1,42	1,74	2,39	2,55	3,52	2,38	2,54	3,51	1,59	1,84	2,39	3,22	3,26	4,70	3,21	3,25	4,68	2,12	2,31	3,14
	\$60	02	0,81	1,10	1,27	0,81	1,10	1,26	0,45	0,73	0,74	1,03	1,32	1,59	1,03	1,31	1,58	0,54	0,82	0,87	1,28	1,56	1,95	1,28	1,55	1,94	0,63	0,92	1,00
	70	O1	2,61	3,09	3,94	2,60	3,08	3,93	1,78	2,32	2,76	3,63	4,01	5,39	3,61	4,00	5,37	2,44	2,94	3,70	4,82	5,06	7,08	4,80	5,04	7,05	3,20	3,63	4,79
	\$70	02	1,32	1,87	2,09	1,32	1,86	2,08	0,76	1,28	1,26	1,66	2,19	2,57	1,65	2,18	2,56	0,89	1,42	1,46	2,02	2,55	3,11	2,01	2,54	3,09	1,03	1,57	1,66
	00	O1	3,84	4,71	5,85	3,83	4,70	5,83	2,66	3,58	4,15	5,25	6,01	7,87	5,23	5,99	7,84	3,57	4,46	5,46	6,88	7,46	10,18	6,86	7,44	10,15	4,62	5,43	6,96
	\$80	02	2,04	2,97	3,25	2,03	2,96	3,24	1,21	2,09	2,02	2,51	3,44	3,94	2,50	3,42	3,92	1,40	2,29	2,30	3,03	3,94	4,69	3,01	3,92	4,66	1,60	2,51	2,60
					Indipo	endent	e dalla	spinta de	ella C					Indip	endent	e dalla	spinta de	ella C					Indipe	ndente	e dalla s	spinta de	lla C		
			M-L	M-P	M-BC							M-L	M-P	M-BC							M-L	M-P	M-BC						
	-20	O1	0,90	1,05	1,35							1,30	1,42	1,93							1,78	1,83	2,60						
	\$30	02	0,29	0,47	0,48							0,36	0,54	0,58							0,43	0,61	0,68						
	- 40	O1	2,01	2,56	3,09							2,80	3,31	4,23							3,74	4,15	5,56						
	840	02	0,77	1,31	1,28							0,91	1,46	1,49							1,06	1,63	1,72						
	-50	O1	3,86	5,25	6,04							5,23	6,57	8,02							6,81	8,04	10,28						
D4	\$30	02	1,66	2,96	2,79							1,92	3,25	3,18							2,20	3,55	3,60						
P4	-60	O1	6,71	9,59	10,63							8,86	11,72	13,77							11,31	14,07	17,31						
	\$00	02	3,16	5,81	5,37							3,59	6,30	6,02							4,05	6,80	6,70						
	.70	O1	10,84	16,15	17,37							14,02	19,36	22,02							17,60	22,86	27,22						
	\$70	02	5,51	10,36	9,41							6,16	11,11	10,40							6,86	11,89	11,45						
	c80	O1	16,59	25,56	26,81							21,05	30,16	33,39							26,06	35,14	40,68						
	500	02	8,95	17,16	15,38							9,90	18,26	16,83							10,90	19,40	18,34						

Valore minimo

Tabella A.C4.1-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dello
spessore della parete

Incremento minimo

Incremento massimo

								S	-LL											S-	LP					
En	ergia al 9	0%		I	3			Ι	.4			I	.5			I	3			Ι	A]	.5	
t	frattile [k	J			•		Indipe	endente d	alla spi	nta della (С		-						Indipe	ndente da	ılla spi	nta della (0			
			O1	Increm.	02	Increm.	O1	Increm.	02	Increm.	O1	Increm.	O2	Increm.	O1	Increm.	02	Increm.	O1	Increm.	02	Increm.	O1	Increm.	02	Increm.
		s30	0,4		0,2		0,5		0,2		0,6		0,2		0,6		0,3		0,9		0,3		1,2		0,4	
		s40	0,9	151%	0,5	183%	1,1	141%	0,6	176%	1,4	133%	0,6	170%	1,5	133%	0,7	165%	2,0	124%	0,8	156%	2,6	117%	1,0	149%
	MI	s50	1,9	109%	1,2	128%	2,3	103%	1,3	124%	2,7	99%	1,4	121%	2,9	98%	1,6	118%	3,8	92%	1,8	113%	4,9	88%	2,1	108%
	101-12	s60	3,5	86%	2,3	98%	4,1	82%	2,5	95%	4,8	78%	2,7	93%	5,3	78%	3,0	92%	6,7	74%	3,4	88%	8,3	70%	3,8	85%
		s70	5,9	71%	4,1	79%	6,9	68%	4,4	77%	8,0	65%	4,7	76%	8,7	65%	5,3	75%	10,8	62%	5,9	72%	13,1	59%	6,5	70%
		s80	9,5	60%	6,9	66%	10,9	58%	7,3	65%	12,4	56%	7,7	64%	13,5	56%	8,6	63%	16,5	53%	9,4	61%	19,8	51%	10,3	60%
		s30	0,5		0,3		0,6		0,4		0,8		0,4		0,8		0,4		1,1		0,5		1,3		0,6	
		s40	1,4	170%	1,0	196%	1,7	161%	1,1	190%	1,9	154%	1,1	186%	2,1	153%	1,3	182%	2,6	143%	1,4	175%	3,1	135%	1,5	168%
D3	MD	s50	3,2	121%	2,4	134%	3,6	116%	2,5	132%	4,1	111%	2,6	129%	4,3	111%	2,9	127%	5,2	105%	3,1	123%	6,2	100%	3,4	120%
15	101-1	s60	6,2	93%	4,8	102%	6,9	90%	5,0	100%	7,7	87%	5,2	99%	8,1	87%	5,6	97%	9,6	83%	6,1	95%	11,1	79%	6,5	93%
		s70	10,8	76%	8,7	82%	12,0	74%	9,1	81%	13,1	72%	9,4	80%	13,9	71%	10,1	79%	16,1	68%	10,8	77%	18,5	66%	11,5	76%
		s80	17,8	64%	14,7	68%	19,4	62%	15,2	67%	21,1	61%	15,7	67%	22,2	61%	16,7	66%	25,4	58%	17,7	65%	28,9	56%	18,8	64%
		s30	0,6		0,3		0,7		0,3		0,9		0,4		1,0		0,4		1,3		0,5		1,8		0,6	
		s40	1,5	156%	0,9	187%	1,8	146%	1,0	180%	2,2	138%	1,1	174%	2,3	138%	1,2	170%	3,1	128%	1,4	161%	3,9	122%	1,6	154%
	MBC	s50	3,1	112%	2,1	130%	3,7	107%	2,2	126%	4,4	102%	2,4	123%	4,7	101%	2,7	121%	6,0	95%	3,0	116%	7,5	91%	3,4	111%
	M-DC	s60	5,8	88%	4,1	99%	6,8	84%	4,3	97%	7,9	81%	4,6	95%	8,5	80%	5,1	93%	10,6	76%	5,7	90%	12,9	72%	6,3	87%
		s70	10,0	72%	7,3	80%	11,5	69%	7,7	78%	13,1	67%	8,2	77%	14,1	67%	9,0	76%	17,3	63%	9,9	74%	20,7	61%	10,9	72%
		s80	16,2	61%	12,2	67%	18,3	59%	12,8	66%	20,7	57%	13,5	65%	22,2	57%	14,8	64%	26,7	54%	16,1	62%	31,5	52%	17,5	61%
		s30	0,8		0,4		1,0		0,5		1,3		0,5		1,3		0,6		1,8		0,6		2,4		0,7	
		s40	2,1	158%	1,2	194%	2,6	148%	1,3	189%	3,1	141%	1,4	184%	3,2	140%	1,5	180%	4,2	131%	1,7	172%	5,4	124%	1,9	166%
	MI	s50	4,5	114%	2,9	133%	5,3	108%	3,0	131%	6,2	103%	3,2	128%	6,6	103%	3,5	126%	8,3	97%	3,8	122%	10,3	92%	4,2	118%
	101-12	s60	8,5	89%	5,8	101%	9,9	85%	6,0	100%	11,3	82%	6,3	98%	11,9	81%	6,8	97%	14,7	77%	7,4	94%	17,8	74%	8,0	92%
		s70	14,7	73%	10,4	81%	16,8	70%	10,9	80%	19,0	68%	11,3	79%	20,0	67%	12,2	78%	24,2	64%	13,1	76%	28,8	62%	14,0	75%
		s80	23,7	62%	17,5	68%	26,8	60%	18,2	67%	30,0	58%	18,8	66%	31,5	58%	20,2	66%	37,5	55%	21,5	64%	44,1	53%	22,8	63%
		s30	1,3		0,9		1,5		0,9		1,8		0,9		1,9		1,0		2,3		1,1		2,9		1,2	
		s40	3,6	177%	2,6	203%	4,1	168%	2,7	200%	4,7	161%	2,8	196%	4,8	160%	3,0	193%	5,8	151%	3,2	188%	6,9	143%	3,4	183%
D4	MD	s50	8,1	124%	6,2	138%	9,1	120%	6,4	136%	10,1	116%	6,6	135%	10,4	115%	6,9	133%	12,2	110%	7,4	130%	14,2	105%	7,8	128%
г4	101-1	s60	15,9	96%	12,6	104%	17,5	93%	13,0	103%	19,1	90%	13,3	102%	19,8	90%	14,0	101%	22,8	86%	14,6	99%	26,0	83%	15,3	98%
		s70	28,2	78%	23,1	83%	30,7	76%	23,7	82%	33,2	74%	24,2	82%	34,3	73%	25,3	81%	38,9	71%	26,4	80%	43,8	68%	27,4	79%
		s80	46,6	65%	39,1	69%	50,2	64%	39,9	69%	53,9	62%	40,7	68%	55,6	62%	42,4	68%	62,2	60%	44,0	67%	69,3	58%	45,6	66%
		s30	1,3		0,7		1,7		0,8		2,0		0,8		2,1		0,9		2,8		1,1		3,6		1,2	
		s40	3,5	163%	2,2	197%	4,2	154%	2,3	192%	4,9	146%	2,4	187%	5,2	145%	2,7	184%	6,6	136%	2,9	176%	8,3	128%	3,2	170%
	MRC	s50	7,6	117%	5,1	135%	8,9	111%	5,4	132%	10,2	107%	5,6	130%	10,7	106%	6,0	128%	13,3	100%	6,6	124%	16,1	95%	7,1	121%
	M-DC	s60	14,5	91%	10,3	102%	16,6	87%	10,7	101%	18,8	84%	11,2	99%	19,7	84%	12,0	98%	23,8	79%	12,8	96%	28,4	76%	13,7	93%
		s70	25,2	74%	18,7	82%	28,4	72%	19,4	81%	31,8	69%	20,1	80%	33,2	69%	21,4	79%	39,6	66%	22,8	77%	46,4	63%	24,2	76%
		s80	41,1	63%	31,5	68%	45,7	61%	32,5	67%	50,6	59%	33,5	67%	52,8	59%	35,6	66%	61,9	56%	37,6	65%	71,6	54%	39,7	64%

								S-	CA						Incremento mi	inimo
Er	nergia al 9	0%		Ι	3			Ι	.4			Ι	.5			
	frattile [k	Л					Indipe	ndente da	alla spi	nta della (<u>C</u>				Incremento ma	assimo
			O1	Increm.	02	Increm.	O1	Increm.	02	Increm.	O1	Increm.	02	Increm.		
		s30	0,9		0,3		1,3		0,4		1,8		0,4			
		s40	2,0	124%	0,8	162%	2,8	116%	0,9	153%	3,7	110%	1,1	146%		
	MI	s50	3,9	92%	1,7	116%	5,2	86%	1,9	111%	6,8	82%	2,2	107%		
	101-1.2	s60	6,7	74%	3,2	91%	8,9	69%	3,6	87%	11,3	66%	4,0	84%		
		s70	10,8	62%	5,5	74%	14,0	58%	6,2	72%	17,6	56%	6,9	69%		
		s80	16,6	53%	8,9	63%	21,1	50%	9,9	61%	26,1	48%	10,9	59%		
		s30	1,1		0,5		1,4		0,5		1,8		0,6			
		s40	2,6	143%	1,3	180%	3,3	133%	1,5	172%	4,1	126%	1,6	166%		
D2	MD	s50	5,2	105%	3,0	126%	6,6	99%	3,2	122%	8,0	94%	3,5	118%		
13	111-1-	s60	9,6	83%	5,8	97%	11,7	78%	6,3	94%	14,1	75%	6,8	92%		
		s70	16,1	68%	10,4	78%	19,4	65%	11,1	76%	22,9	63%	11,9	75%		
		s80	25,6	58%	17,2	66%	30,2	56%	18,3	64%	35,1	54%	19,4	63%		
		s30	1,4		0,5		1,9		0,6		2,6		0,7			
		s40	3,1	129%	1,3	167%	4,2	120%	1,5	158%	5,6	114%	1,7	151%		
	MDC	s50	6,0	95%	2,8	119%	8,0	89%	3,2	114%	10,3	85%	3,6	110%		
	м-вс	s60	10,6	76%	5,4	92%	13,8	72%	6,0	89%	17,3	68%	6,7	86%		
		s70	17,4	63%	9,4	75%	22,0	60%	10,4	73%	27,2	57%	11,4	71%		
		s80	26,8	54%	15,4	63%	33,4	52%	16,8	62%	40,7	49%	18,3	60%		
		s30	1,9		0,6		2,7		0,7		3,6		0,8			
		s40	4,3	130%	1,6	177%	5,9	121%	1,8	170%	7,7	115%	2,0	163%		
	1.6.1	s50	8,5	96%	3,6	125%	11,3	90%	4,0	120%	14,4	86%	4,4	117%		
	M-L	s60	15,1	77%	7,1	96%	19,4	72%	7,7	93%	24,3	69%	8,4	91%		
		s70	24,7	64%	12,5	78%	31,2	61%	13,5	76%	38,4	58%	14,5	74%		
		s80	38,3	55%	20,7	65%	47,4	52%	22,2	64%	57,5	50%	23,7	63%		
		s30	2,4		1,0		3,1		1,2		3,9		1,3			
		s40	5,9	150%	3,1	191%	7,5	140%	3,3	186%	9,2	133%	3,5	180%		
D.	1 (D	s50	12,4	109%	7,1	132%	15,2	103%	7,5	129%	18,2	98%	8,0	126%		
P4	M-P	s60	23,1	86%	14,2	100%	27,6	82%	15,0	99%	32,4	78%	15,8	97%		
		s70	39,4	71%	25,7	81%	46,2	68%	26,9	80%	53,5	65%	28,1	78%		
		s80	63,1	60%	43,1	67%	72,8	58%	44,8	67%	83,3	56%	46,6	66%		
		s30	2,9		1,0		4,0		1,1		5,3		1,3			
		s40	6,8	135%	2,8	181%	9,1	126%	3,1	174%	11,7	119%	3,4	168%		
	MDC	s50	13,6	100%	6,2	127%	17,6	93%	6,8	123%	22,1	89%	7,4	119%		
	M-BC	s60	24,3	79%	12,3	97%	30,7	75%	13,3	95%	37,9	71%	14,3	92%		
		s70	40,3	66%	22,0	79%	49,9	62%	23,5	77%	60,4	60%	25,1	75%		
		s80	63.0	56%	36.5	66%	76.6	54%	38.7	65%	91.5	51%	41.0	64%		

Tabella A.C4.1-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dello spessore della parete

														S-	LL												1	Increm	ento minim	0
En	ergia al	90%						L	3											L4	1									
f	rattile [kJ]		C-1	nSp	-		C-	pSp			C-	Sp			C-r	ıSp			C-1	pSp			C-	-Sp			Increm	ento massin	no
		_	O1	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	O2	Incr.	O1	Incr.	O2	Incr.	O1	Incr.	O2	Incr.	O1	Incr.	O2	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.				
		s30	0,08		0,04		0,08		0,04		0,06		0,02		0,12		0,06		0,12		0,05		0,08		0,03					
		s40	0,19	128%	0,11	150%	0,19	128%	0,11	150%	0,14	136%	0,07	169%	0,26	119%	0,13	141%	0,26	120%	0,13	141%	0,18	126%	0,08	161%				
	M-L	s50	0,37	95%	0,22	109%	0,37	95%	0,22	109%	0,27	100%	0,15	120%	0,50	89%	0,27	103%	0,49	89%	0,27	103%	0,35	94%	0,17	115%				
		<u>s60</u>	0,66	/6%	0,41	86%	0,65	76%	0,41	86%	0,49	/9%	0,29	93%	0,85	71%	0,49	82%	0,85	/1%	0,49	82%	0,62	75%	0,32	90%				
		s/0	1,07	63%	0,/1	/0%	1,07	63%	0,70	/1%	0,81	66%	0,50	/6%	1,36	60%	0,82	68%	1,35	60%	0,82	68%	1,00	63%	0,55	/4%				
		\$80	1,05	54%	1,13	60%	1,65	54%	1,13	60%	1,2/	56%	0,82	04%	2,05	51%0	1,29	58%	2,05	51%	1,29	58%	1,54	54%	0,89	62%				
		\$30	0,10	1 470/-	0,00	1690/-	0,10	1470/-	0.16	1600/-	0,08	1560/-	0,04	1950/-	0,15	1370/-	0,07	1600/-	0,15	1370/-	0,07	160%	0,10	1460/-	0.13	1790/-				
		s40	0,23	107%	0,10	120%	0,23	107%	0,10	10970	0,19	1120%	0,12	120%	0,51	101%	0,19	115%	0,51	101%	0,19	115%	0,24	107%	0,15	125%				
P3	M-P	\$50	0.95	84%	0,50	03%	0.95	84%	0,50	03%	0.78	88%	0,20	08%	1 14	80%	0.77	90%	1 14	80%	0.77	90%	0.91	84%	0,50	96%				
		s70	1.61	70%	1.22	76%	1.61	70%	1.22	76%	1 34	72%	0,98	79%	1 90	66%	1 34	73%	1.89	66%	1 34	73%	1.54	69%	1.04	78%				
		s80	2.56	59%	2.00	64%	2.56	59%	1.99	64%	2.15	61%	1.64	67%	2.98	57%	2.18	62%	2.97	57%	2.17	62%	2.44	59%	1.72	65%				
		s30	0,13		0,07	0.1/2	0,13		0,07	01/2	0,09	0270	0,04	0.75	0,18		0,09		0,18		0,09		0,12		0,05					
		s40	0,30	132%	0,17	155%	0,30	133%	0,17	155%	0,22	141%	0,11	174%	0,40	124%	0,21	146%	0,40	124%	0,21	146%	0,28	131%	0,13	166%				
	MDC	s50	0,59	98%	0,37	112%	0,58	98%	0,36	112%	0,44	103%	0,25	123%	0,76	92%	0,43	106%	0,76	92%	0,43	106%	0,56	97%	0,28	118%				
	M-BC	s60	1,04	78%	0,69	88%	1,04	78%	0,68	88%	0,80	82%	0,49	95%	1,32	74%	0,80	84%	1,32	74%	0,79	84%	0,99	77%	0,54	92%				
		s70	1,72	65%	1,18	72%	1,71	65%	1,17	72%	1,34	68%	0,87	77%	2,14	61%	1,35	69%	2,13	61%	1,34	69%	1,62	64%	0,94	75%				
		s80	2,67	56%	1,90	61%	2,67	56%	1,89	61%	2,11	58%	1,43	65%	3,27	53%	2,14	59%	3,26	53%	2,13	59%	2,51	55%	1,54	63%				
						Indi	bende	nte dal	lla spii	nta dell	a C							Indip	bende	nte dal	la spir	nta dell	a C							
		-	01	Incr.	02	Incr.	-								01	Incr.	02	Incr.	ł											
		s30	0,36		0,18										0,46		0,21	. =												
		s40	0,89	151%	0,51	183%									1,12	141%	0,57	176%												
	M-L	<u>s50</u>	1,86	109%	1,1/	128%									2,27	103%	1,2/	124%												
		s60	5,47	86%	2,32	98%									4,12	82%	2,49	95%												
		\$70	5,92	/1%	4,15	/9%									0,91	08%0 E00/	7.20	////0												
		sou 030	9,47	0070	0.09	0070									0.64	3670	0.37	0370	1											
		s30	1 44	170%	1.02	196%									1.68	161%	1.08	190%												
		\$50	3.18	121%	2.39	134%									3.62	116%	2,51	132%												
P4	M-P	s60	6.16	93%	4.82	102%									6.89	90%	5.02	100%												
		s70	10.83	76%	8.74	82%									11.96	74%	9.07	81%												
		s80	17,77	64%	14,69	68%									19,40	62%	15,17	67%												
		s30	0,57		0,31										0,73		0,35		1											
		s40	1,46	156%	0,89	187%									1,79	146%	0,98	180%												
	MRC	s50	3,10	112%	2,05	130%									3,70	107%	2,21	126%												
	M-DC	s60	5,83	88%	4,08	99%									6,81	84%	4,34	97%												
		s70	10,03	72%	7,33	80%									11,54	69%	7,74	78%												
		s80	16,17	61%	12,22	67%									18.35	59%	12.83	66%												

1 abelia A.C4.2-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della par	Tabella A.C4.2-1	-1 - Confronto del	ll'energia di impat	o al frattile 90%	per la muratura	al piano prim	o al variare	dello spessore de	ella parete
--	------------------	--------------------	---------------------	-------------------	-----------------	---------------	--------------	-------------------	-------------

En	eroia al	90%					S-I	L											S-L	P							Incremento minimo
f	rattile [kII	C-	nSp			C-i	DSD			C-	-Sp			C-r	1Sp		1	C-1	DSD		T	C-	Sp			т., .
			Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.		Incremento massimo
		s30 0,16		0,07		0,16		0,07		0,11		0,04		0,19		0,09		0,19		0,09		0,12		0,04		İ	
		s40 0,34	113%	0,16	134%	0,34	113%	0,16	134%	0,23	120%	0,09	154%	0,41	114%	0,21	131%	0,41	114%	0,21	131%	0,26	120%	0,11	149%		
	мт	s50 0,63	85%	0,32	99%	0,63	85%	0,32	99%	0,44	89%	0,19	111%	0,76	85%	0,42	97%	0,76	85%	0,41	97%	0,49	89%	0,23	109%		
	101-12	s60 1,07	68%	0,57	78%	1,06	68%	0,57	79%	0,76	72%	0,35	87%	1,28	68%	0,74	77%	1,27	68%	0,73	77%	0,85	71%	0,42	85%		
		<u>s70</u> 1,67	57%	0,94	65%	1,67	57%	0,94	65%	1,21	60%	0,60	72%	2,01	57%	1,21	64%	2,00	57%	1,20	64%	1,35	60%	0,71	70%		
		s80 2,50	49%	1,47	56%	2,49	49%	1,46	56%	1,83	52%	0,97	61%	3,00	49%	1,87	55%	2,99	49%	1,87	55%	2,05	52%	1,14	60%		
		s30_0,17		0,09		0,17		0,09		0,12		0,05		0,20		0,11		0,20		0,11		0,13		0,06			
		<u>s40</u> 0,39	130%	0,22	153%	0,39	130%	0,22	153%	0,29	138%	0,14	172%	0,45	129%	0,27	148%	0,45	129%	0,27	149%	0,31	137%	0,17	168%		
P3	M-P	<u>s50</u> 0,76	96%	0,46	111%	0,76	96%	0,46	111%	0,58	102%	0,32	122%	0,88	96%	0,56	108%	0,88	96%	0,55	108%	0,63	101%	0,36	120%		
		<u>s60</u> 1,35	77%	0,86	87%	1,35	77%	0,86	87%	1,05	81%	0,62	94%	1,55	76%	1,03	85%	1,54	76%	1,03	85%	1,14	80%	0,70	93%		
		<u>s70</u> 2,21	64%	1,47	71%	2,21	64%	1,47	71%	1,75	67%	1,10	77%	2,53	64%	1,75	70%	2,52	64%	1,74	70%	1,89	67%	1,23	75%		
		s80 3,42	55%	2,36	61%	3,42	55%	2,36	61%	2,75	5/%	1,81	64%	3,91	55%	2,79	60%	3,90	55%	2,78	60%	2,97	5/%	2,01	64%	-	
		<u>s30</u> 0,24	4470/	0,11	1200/	0,24	4470/	0,10	1200/	0,16	10/0/	0,06	4500/	0,28	4470/	0,14	4.0 50 /	0,28	4470/	0,14	1050/	0,18	1010/	0,07	15 10 (
		<u>s40</u> 0,51	11/%	0,25	138%	0,51	11/%	0,25	138%	0,36	124%	0,15	159%	0,61	070/	0,32	135%	0,61	070/	0,32	135%	0,40	124%	0,17	154%		
	M-BC	<u>s50</u> 0,96	8/%	0,51	102%	1,90	88%	0,50	0102%	1,09	92%	0,51	114%	1,14	8/%	0,05	700/	1,14	8/%	1.15	700/	0,70	92%	0,57	070/		
		<u>sou</u> 1,04	70% 50%	0,92	81% 670/	1,03	70%	1.52	81% 670/	1,19	/4% (20/	1.02	89%	1,94	70%	1,10	/9%	1,95	70%	1,15	/9%	1,52	(20/	1 10	8/%		
		<u>\$70</u> 2,00	510/	2.40	570/-	2,39	510/-	2 30	57%	2.04	520/-	1,02	620/-	3,00	510/	3.00	560%	3,07	510/-	2.00	56%	2,15	520/-	1,19	610/		
		500 5,92	J1/0	2,40	India	pende	nte dal	la sni	nta dell	2,94 2 C	5570	1,05	02/0	4,04	J1/0	5,00	Jo 70 Indir	ende	nte dal	12,99	nta dell	13,20	5570	1,91	01/0	ł	
		01	Incr	02	Incr			ia opi	inta den	<i>a</i> 0				01	Incr	02	Incr		ince data	.14 Sp1	inta cien	1 <i>a</i> ()					
		s30 0.59	men	0.23	incr.									0.64	men	0.27	men	i i								·	
		s40 1,37	133%	0,63	170%									1,49	133%	0,72	165%										
		s50 2,71	99%	1,38	121%									2,95	98%	1,57	118%										
	M-L	s60 4,84	78%	2,67	93%									5,25	78%	3,02	92%										
		s70 7,99	65%	4,69	76%									8,66	65%	5,27	75%										
		s80 12,44	56%	7,69	64%									13,47	56%	8,59	63%										
		s30 0,76		_0,40		Ι								0,81		0,45											
		s40 1,94	154%	1,15	186%									2,06	153%	1,26	182%										
D4	MР	s50 4,09	111%	2,64	129%									4,33	111%	2,86	127%										
Г4	101-1	s60 7,65	87%	5,24	99%									8,09	87%	5,64	97%										
		s70 13,14	72%	9,40	80%									13,86	71%	10,08	79%										
		s80 21,12	61%	15,66	67%	ļ								22,24	61%	16,74	66%										
		s30 0,91		0,39										0,98		0,45											
		<u>s40</u> 2,16	138%	1,06	174%									2,34	138%	1,21	170%										
	M-BC	<u>s50</u> 4,36	102%	2,37	123%									4,71	101%	2,66	121%										
	11 100	<u>s60</u> 7,88	81%	4,62	95%									8,49	80%	5,15	93%										
		<u>s70</u> 13,14	67%	8,17	77%									14,14	67%	9,05	76%										
		s80 20,65	57%	13,45	65%	1								22,19	57%	14,83	64%	1								1	

Tabella A.C4.2-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete

														S-I	LP												ī 🛛	Incremento m	inimo
Ene	ergia al	90%								L5									1										
frattile [k]]		kJ]	C-nSp			C-pSp				C-Sp			C-nSp			-	C-pSp				C-Sp			-		Incremento m	assimo		
		-	01	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.	01	Incr.	02	Incr.	O1	Incr.	02	Incr.	01	Incr.	02	Incr.	↓ ──		
		s30	0,29		0,13		0,29		0,13		0,17		0,06		0,40		0,17		0,40		0,17		0,24		0,07				
		s40	0,60	107%	0,28	122%	0,59	107%	0,28	123%	0,37	112%	0,13	140%	0,82	102%	0,36	116%	0,81	102%	0,36	116%	0,50	107%	0,16	133%			
	M-L	s50	1,07	80%	0,54	91%	1,07	80%	0,53	91%	0,68	84%	0.27	103%	1,44	76%	0,68	8/%	1,43	/6%	0,67	8/%	0,90	80%	0,32	98%			
		<u>s60</u>	1,/6	64%	0,93	/ 3%	1,/5	64%	0,93	/3%	1,14	6/%	0,50	81%	2,32	61%	1,15	/0%	2,31	61%	1,14	/0%	1,4/	64%	0,58	/8%			
		<u>s/0</u>	2,/1	54%	1,50	61% 520/	2,70	54%	1,49	61% 520/	1,/8	50% 400/	0,85	6/% 500/	5,52	52%	1,82	58%	5,51	52% 450/	1,81	50%	2,27	54%	0,95	05% 570/			
		\$80	0.28	4/%	0.14	32%	0.28	4/%	0.14	33%0	0.18	49%	0.07	38%0	0.37	45%	$\frac{2.73}{0.17}$	50%	0.37	45%	0.17	50%0	0.24	4/%	0.09	30%0	1		
		s30	0,20	120%	0.33	130%	0,20	121%	0.33	130%	0,10	128%	0,07	150%	0,57	11/0/2	0,17	132%	0,57	11/10/2	0,17	132%	0,24	121%	0,09	152%			
		\$50	1 16	90%	0,55	102%	1 1 5	90%	0.67	102%	0.81	95%	$0,1^{\prime}$ 0.41	115%	1 48	85%	0.80	98%	1 47	85%	0,40	98%	1.00	90%	0.47	110%			
P3	M-P	s60	1 99	72%	1.22	81%	1 98	72%	1.21	81%	1.42	76%	0.78	89%	2.49	69%	1 43	78%	2.48	69%	1.42	78%	173	72%	0.87	87%			
		s70	3.19	60%	2.04	67%	3.18	60%	2.03	67%	2.31	63%	1.35	73%	3.92	58%	2.35	65%	3.91	58%	2.34	65%	2.78	61%	1.49	71%			
		s80	4,84	52%	3,21	57%	4,82	52%	3.20	57%	3,57	54%	2,19	62%	5,87	50%	3,65	55%	5,85	50%	3,64	55%	4,22	52%	2,39	60%			
		s30	0,41		0,19		0,41		0,19		0,26		0,09		0,58		0,25		0,57		0,24		0,35		0,11		1		
		s40	0,87	110%	0,43	126%	0,87	110%	0,42	127%	0,55	116%	0,21	145%	1,18	105%	0,54	120%	1,17	105%	0,54	120%	0,73	110%	0,26	138%			
	MDC	s50	1,59	82%	0,82	94%	1,58	82%	0,82	94%	1,03	86%	0,44	106%	2,10	78%	1,02	89%	2,09	78%	1,02	90%	1,34	82%	0,52	101%			
	M-DC	s60	2,63	66%	1,44	75%	2,62	66%	1,43	75%	1,74	69%	0,81	84%	3,43	63%	1,76	72%	3,41	63%	1,75	72%	2,22	66%	0,93	80%			
		s70	4,09	55%	2,34	63%	4,08	55%	2,33	63%	2,75	58%	1,36	69%	5,24	53%	2,81	60%	5,22	53%	2,79	60%	3,45	56%	1,55	67%			
		s80	6,05	48%	3,60	54%	6,03	48%	3,59	54%	4,13	50%	2,16	59%	7,65	46%	4,26	52%	7,62	46%	4,24	52%	5,11	48%	2,43	57%	1		
					-	Indip	endei	nte dall	a spin	ta della	ıС							Indij	sende	nte dal	la spir	nta del	la C				4		
			01	Incr.	02	Incr.	-								01	Incr.	02	Incr.											
		s30	0,89	1010/	0,33	4 5 40 4									1,19	4470/	0,40	4.4007											
		<u>s40</u>	2,00	124%	0,85	156%									2,59	11/%	0,98	149%											
	M-L	s50	3,84	92%	1,81	115%									4,85	88%	2,05	108%											
		<u>s60</u>	0,07	/4%	5,40	88%									8,20	70%	5,80	85%											
		\$70	10,78	62% 520/	5,85	(10/									10,12	59%	0,4/	/0%											
		\$30	10,40	3370	0.51	0170									19,79	3170	0.57	0070											
		\$40	2.56	143%	1 40	175%									3.11	135%	1.54	168%											
		\$50	5 23	105%	3.12	123%									6.21	100%	3 30	120%											
P4	M-P	s60	9.55	83%	6.08	95%									11.14	79%	6.53	93%											
		s70	16.08	68%	10.76	77%									18.47	66%	11.46	76%											
		s80	25.45	58%	17.73	65%									28.87	56%	18.76	64%											
		s30	1,35		0,53	1	1								1,77		0,63												
		s40	3,08	128%	1,40	161%									3,92	122%	1,60	154%											
	MDC	s50	6,01	95%	3,01	116%									7,48	91%	3,38	111%											
	M-DC	s60	10,58	76%	5,72	90%									12,90	72%	6,33	87%											
		s70	17,27	63%	9,94	74%									20,71	61%	10,87	72%											
		s80	26,66	54%	16,13	62%									31,53	52%	17,49	61%	1								1		

Tabella A.C4.2-3 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete

			S-C											CA											1]	Incremento	minimo	
En	ergia al	90%	J L3														L4									_			
frattile [kJ]		kJ]	C-nSp			C-pSp			C-Sp			C-nSp					C-pSp			C-Sp				4	1	Incremente	massimo		
	1	01	Incr.	02	Incr.	01	Incr.	02	Incr.	01	Incr.	02	Incr.	01	Incr.	02	Incr.	01	Incr.	02	Incr.	01	Incr.	02	Incr.	4 -	- · ·		
		<u>s30</u> 0,27	1000/	0,10	1000/	0,27	1000/	0,10	1200/	0,17	1100/	0,05	1 470/	0,42	1020/	0,14	1200/	0,41	1020/	0,14	1200/	0,26	10(0/	0,06	1270/				
		s40 0,50	Q10/	0,24	05%	1.02	Q10/-	0,25	05%	0,57	Q 40/-	0,12	14770	1 49	76%	0,52	0.00%	1 49	760/	0,52	0.00%	0,54	700%	0,15	1010/				
	M-L	s60 1.68	65%	0.81	76%	1,02	65%	0,40	76%	1 14	67%	0.45	84%	2 39	61%	1.03	72%	2 38	61%	1.03	72%	1 59	64%	0,50	80%				
		\$70 2.61	55%	1 32	63%	2.60	55%	1 32	63%	1 78	57%	0.76	70%	3.63	52%	1,05	60%	3.61	52%	1,05	60%	2.44	53%	0,94	67%				
		\$80 3.84	47%	2.04	54%	3.83	47%	2.03	54%	2.66	49%	1.21	59%	5.25	45%	2.51	52%	5.23	45%	2.50	52%	3.57	46%	1.40	57%				
		s30 0,26		0,12		0,26		0,12		0,18		0,07		0,38		0,15		0,38		0,15		0,26		0,08		1			
		s40 0,58	122%	0,29	146%	0,58	122%	0,29	146%	0,41	129%	0,18	165%	0,82	114%	0,37	137%	0,81	114%	0,36	137%	0,57	120%	0,21	156%				
D2	мр	s50 1,11	91%	0,60	106%	1,11	91%	0,60	107%	0,81	95%	0,38	118%	1,51	85%	0,73	101%	1,51	85%	0,73	101%	1,07	89%	0,44	113%				
P3	101-12	s60 1,92	73%	1,10	84%	1,91	73%	1,10	84%	1,42	76%	0,73	92%	2,55	69%	1,32	80%	2,54	69%	1,31	80%	1,84	72%	0,82	88%				
		<u>s70</u> 3,09	61%	1,87	69%	3,08	61%	1,86	69%	2,32	63%	1,28	75%	4,01	57%	2,19	66%	4,00	58%	2,18	66%	2,94	60%	1,42	72%				
		s80 4,71	52%	2,97	59%	4,70	52%	2,96	59%	3,58	54%	2,09	63%	6,01	50%	3,44	57%	5,99	50%	3,42	57%	4,46	52%	2,29	61%	1			
		<u>s30</u> 0,39		0,15		0,39		0,15		0,25		0,08		0,59		0,21		0,59		0,21		0,38		0,10					
		<u>s40</u> 0,82	111%	0,36	133%	0,82	111%	0,36	133%	0,55	116%	0,19	151%	1,21	105%	0,48	124%	1,21	105%	0,47	124%	0,80	109%	0,23	142%				
	M-BC	<u>s50</u> 1,51	83%	0,71	98%	1,50	83%	0,71	98%	1,03	87%	0,40	110%	2,16	78%	0,92	92%	2,15	78%	0,91	92%	1,45	81%	0,47	104%				
		<u>s60</u> 2,52	67%	1,27	/8%	2,51	67%	1,26	/8%	1,74	70%	0,74	86%	3,52	63%	1,59	/4%	3,51	63%	1,58	/4%	2,39	65%	0,87	82%				
		<u>s/0</u> 3,94	56% 40%	2,09	65% 560/	3,93	56% 40%	2,08	65% 560/	2,/6	58%	1,26	/1%	5,39	55%	2,5/	62% 520/	5,3/	55%	2,56	62% 520/	3,/0	55% 400/	1,40	68%	1			
		500 5,05	4970	3,23	Indir	<u> </u>	nte da	13,24	nta dell	4,15 a (3070	2,02	0070	/,0/	4070	5,94	Indir	7,04 Dende	nte dal	13,92	nta del	13,40	4070	2,30	3070	1			
		01	Incr	02	Incr		ince cra	na opi	ina acri	a 0				01	Incr	02	Incr		iite da	14 op 11	ina aci	14 0				1			
		s30 0.90	mer.	0.29	mer.	1								1.30	mier.	0.36	mer.	1											
		s40 2.01	124%	0.77	162%									2.80	116%	0.91	153%												
		s50 3,86	92%	1,66	116%									5,23	86%	1,92	111%												
	M-L	s60 6,71	74%	3,16	91%									8,86	69%	3,59	87%												
		s70 10,84	62%	5,51	74%									14,02	58%	6,16	72%												
		s80 16,59	53%	8,95	63%									21,05	50%	9,90	61%												
		<u>s30</u> 1,05		0,47										1,42		0,54													
		<u>s40</u> 2,56	143%	1,31	180%									3,31	133%	1,46	172%												
P4	M-P	<u>s50</u> 5,25	105%	2,96	126%									6,57	99%	3,25	122%												
		<u>s60</u> 9,59	83%	5,81	97%									11,72	78%	6,30	94%												
		<u>s70</u> 16,15	68%	10,36	78%									19,36	65%	11,11	76%												
		s80 25,56	58%	17,16	66%									30,16	56%	18,26	64%												
		<u>\$30</u> 1,35	1200/	0,48	1670/									1,95	1200/	0,58	1 500/												
		<u>\$40</u> 5,09	129%	1,28	10/%									4,23	120%	2 1 9	138%												
	M-BC	s50 0,04 s60 10.63	76%	5 37	02%									13 77	72%	6.02	80%									1			
		s70 17 37	63%	9.41	75%									22.02	60%	10.40	73%									1			
		s80 26.81	54%	15,38	63%									33,39	52%	16,83	62%												

Tabella A.C4.2-4 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete

E		0.00/					Incremen	nto minimo								
Ene	ergia al	90%		C	- C			L5			C	C				
ti	rattile [ĸIJ	01	-1 T	nop	т	01	<u>p</u>	osp	т	01	т. Т	-sp	т	Incremen	ito massimo
		.20	0.50	Incr.	0.10	lncr.	0.50	Incr.	0.10	Incr.	0.27	Incr.	0.00	Incr.		
		s30	1 1 7	0.8%	0,19	11/10/2	1 17	08%	0,19	11/10/2	0,57	101%	0.18	130%		
		s40	2.03	730/-	0.76	Q50/	202	730/-	0.76	Q50/	1 32	750/-	0.36	070/-		
	M-L	\$50	3.22	50%	1 28	60%	3.21	50%	1 28	60%	1,52 2.12	61%	0,50	77%		
		\$00	1.92	40%	2.02	590/	1.80	100/-	2.01	5.00%	2,12	510/	1.03	6.40/-		
		\$70	6.88	49/0	3.02	50%	6.86	49/0	3.01	50%	4.62	<u>44%</u>	1,05	55%		
		s30	0.52		0.20	5070	0.52	4570	0.19	5070	0.35	77/0	0.10	5570		
		\$40	1.09	109%	0.45	130%	1.08	109%	0.45	130%	0.74	114%	0.24	149%		
		\$50	1.97	81%	0.88	96%	1.97	81%	0.88	96%	1 37	85%	0.50	109%		
P3	M-P	s60	3.26	65%	1.56	77%	3.25	65%	1 55	77%	2.31	68%	0.92	85%		
		s70	5.06	55%	2.55	64%	5.04	55%	2.54	64%	3.63	57%	1 57	70%		
		\$80	746	47%	3.94	55%	7 44	48%	3.92	55%	5.43	49%	2.51	60%		
		s30	0.84	1770	0.28	0070	0.83	1070	0.28	0070	0.53	12 / 0	0.12	0070		
		s40	1.67	100%	0.61	118%	1.67	100%	0.61	118%	1.09	104%	0.28	135%		
		s50	2,93	75%	1,15	88%	2,92	75%	1,14	88%	1,93	78%	0,56	100%		
	M-BC	s60	4,70	60%	1,95	70%	4,68	60%	1,94	71%	3,14	62%	1,00	79%		
		s70	7,08	51%	3,11	59%	7,05	51%	3,09	59%	4,79	52%	1,66	66%		
		s80	10,18	44%	4,69	51%	10,15	44%	4,66	51%	6,96	45%	2,60	56%		
						Indij	sender	nte dall	a spin	ta della	ıС					
		-	O1	Incr.	02	Incr.										
		s30	1,78		0,43											
		s40	3,74	110%	1,06	146%										
	M-I	s50	6,81	82%	2,20	107%										
	IVI-L	s60	11,31	66%	4,05	84%										
		s70	17,60	56%	6,86	69%										
		s80	26,06	48%	10,90	59%										
		s30	1,83		0,61											
		s40	4,15	126%	1,63	166%										
P4	M-P	s50	8,04	94%	3,55	118%										
1 4	101-1	s60	14,07	75%	6,80	92%										
		s70	22,86	63%	11,89	75%										
		s80	35,14	54%	19,40	63%										
		s30	2,60		0,68											
		s40	5,56	114%	1,72	151%										
	M-BC	s50	10,28	85%	3,60	110%										
		s60	17,31	68%	6,70	86%										
		s70	27,22	57%	11,45	71%										
		s80	40,68	49%	18,34	60%										

Tabella A.C4.2-5 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dello spessore della parete
Tabella A.C5.1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare dell'orditura del solaio

Decremento massimo

							S-	LL								S-I	Р								S-C/	1			
En	ergia al	90%		L	3		L	4		L5			Ľ	3		L	1		Ľ	5		L3			L	1		Ľ	5
f	rattile []	«J]			Indip	ende	nte da	alla spinta	della (2	-		-	Indipe	enden	te dal	la spinta d	iella (С				Indiper	ndente	e dalla	a spinta de	ella C		
			O1	02	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	02	Decrem.	O1	02	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	02	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.
		s30	0,36	0,18	-48,84%	0,46	0,21	-55,46%	0,59	0,23	-60,30%	0,64	0,27	-57,36%	0,89	0,33	-62,95%	1,19	0,40	-66,80%	0,90	0,29	-67,34%	1,30	0,36	-72,37%	1,78	0,43	-75,68%
		s40	0,89	0,51	-42,22%	1,12	0,57	-48,99%	1,37	0,63	-54,14%	1,49	0,72	-51,45%	2,00	0,85	-57,58%	2,59	0,98	-61,96%	2,01	0,77	-61,76%	2,80	0,91	-67,56%	3,74	1,06	-71,51%
	M-I	s50	1,9	1,2	-37,15%	2,3	1,3	-43,82%	2,71	1,38	-49,07%	2,9	1,6	-46,60%	3,8	1,8	-53,01%	4,9	2,1	-57,72%	3,86	1,66	-56,97%	5,2	1,9	-63,28%	6,8	2,2	-67,70%
	141-12	s60	3,5	2,3	-33,15%	4,1	2,5	-39,62%	4,84	2,67	-44,84%	5,3	3,0	-42,56%	6,7	3,4	-49,08%	8,3	3,8	-53,99%	6,71	3,16	-52,82%	8,9	3,6	-59,46%	11,3	4,0	-64,22%
		s70	5,9	4,1	-29,92%	6,9	4,4	-36,14%	7,99	4,69	-41,26%	8,7	5,3	-39,15%	10,8	5,9	-45,67%	13,1	6,5	-50,69%	10,84	5,51	-49,22%	14,0	6,2	-56,04%	17,6	6,9	-61,05%
		s80	9,5	6,9	-27,26%	10,9	7,3	-33,21%	12,44	7,69	-38,20%	13,5	8,6	-36,24%	16,5	9,4	-42,69%	19,8	10,3	-47,75%	16,59	8,95	-46,05%	21,1	9,9	-52,97%	26,1	10,9	-58,15%
		s30	0,5	0,3	-35,41%	0,6	0,4	-42,01%	0,76	0,40	-47,26%	0,8	0,4	-45,20%	1,1	0,5	-51,66%	1,3	0,6	-56,45%	1,05	0,47	-55,61%	1,4	0,5	-62,04%	1,8	0,6	-66,58%
		s40	1,4	1,0	-29,32%	1,7	1,1	-35,49%	1,94	1,15	-40,59%	2,1	1,3	-38,83%	2,6	1,4	-45,34%	3,1	1,5	-50,37%	2,56	1,31	-48,94%	3,3	1,5	-55,77%	4,1	1,6	-60,80%
D3	MD	s50	3,2	2,4	-25,00%	3,6	2,5	-30,70%	4,09	2,64	-35,53%	4,3	2,9	-34,02%	5,2	3,1	-40,37%	6,2	3,4	-45,43%	5,25	2,96	-43,65%	6,6	3,2	-50,59%	8,0	3,5	-55,87%
15	141-1	s60	6,2	4,8	-21,79%	6,9	5,0	-27,04%	7,65	5,24	-31,59%	8,1	5,6	-30,25%	9,6	6,1	-36,36%	11,1	6,5	-41,35%	9,59	5,81	-39,37%	11,7	6,3	-46,26%	14,1	6,8	-51,64%
		s70	10,8	8,7	-19,31%	12,0	9,1	-24,15%	13,14	9,40	-28,42%	13,9	10,1	-27,23%	16,1	10,8	-33,07%	18,5	11,5	-37,93%	16,15	10,36	-35,84%	19,4	11,1	-42,59%	22,9	11,9	-47,98%
		s80	17,8	14,7	-17,33%	19,4	15,2	-21,82%	21,12	15,66	-25,83%	22,2	16,7	-24,75%	25,4	17,7	-30,32%	28,9	18,8	-35,02%	25,56	17,16	-32,88%	30,2	18,3	-39,45%	35,1	19,4	-44,79%
		s30	0,6	0,3	-45,42%	0,7	0,3	-52,15%	0,91	0,39	-57,18%	1,0	0,4	-54,45%	1,3	0,5	-60,34%	1,8	0,6	-64,47%	1,35	0,48	-64,65%	1,9	0,6	-70,08%	2,6	0,7	-73,71%
		s40	1,5	0,9	-38,82%	1,8	1,0	-45,55%	2,16	1,06	-50,78%	2,3	1,2	-48,33%	3,1	1,4	-54,66%	3,9	1,6	-59,26%	3,09	1,28	-58,72%	4,2	1,5	-64,86%	5,6	1,7	-69,12%
	MBC	s50	3,1	2,1	-33,87%	3,7	2,2	-40,39%	4,36	2,37	-45,62%	4,7	2,7	-43,41%	6,0	3,0	-49,91%	7,5	3,4	-54,79%	6,04	2,79	-53,72%	8,0	3,2	-60,30%	10,3	3,6	-64,99%
	M-DC	s60	5,8	4,1	-30,03%	6,8	4,3	-36,26%	7,88	4,62	-41,39%	8,5	5,1	-39,37%	10,6	5,7	-45,89%	12,9	6,3	-50,90%	10,63	5,37	-49,47%	13,8	6,0	-56,28%	17,3	6,7	-61,28%
		s70	10,0	7,3	-26,96%	11,5	7,7	-32,89%	13,14	8,17	-37,86%	14,1	9,0	-36,01%	17,3	9,9	-42,45%	20,7	10,9	-47,51%	17,37	9,41	-45,82%	22,0	10,4	-52,74%	27,2	11,4	-57,93%
		s80	16,2	12,2	-24,46%	18,3	12,8	-30,08%	20,65	13,45	-34,88%	22,2	14,8	-33,17%	26,7	16,1	-39,48%	31,5	17,5	-44,53%	26,81	15,38	-42,66%	33,4	16,8	-49,60%	40,7	18,3	-54,91%
		s30	0,8	0,4	-48,75%	1,0	0,5	-55,99%	1,27	0,49	-61,38%	1,3	0,6	-59,16%	1,8	0,6	-65,50%	2,4	0,7	-69,91%	1,88	0,58	-69,31%	2,7	0,7	-74,93%	3,6	0,8	-78,64%
		s40	2,1	1,2	-41,60%	2,6	1,3	-48,84%	3,07	1,40	-54,47%	3,2	1,5	-52,46%	4,2	1,7	-59,32%	5,4	1,9	-64,29%	4,34	1,60	-63,03%	5,9	1,8	-69,47%	7,7	2,0	-73,89%
	M-L	s50	4,5	2,9	-36,25%	5,3	3,0	-43,27%	6,24	3,19	-48,90%	6,6	3,5	-47,06%	8,3	3,8	-54,13%	10,3	4,2	-59,42%	8,52	3,61	-57,70%	11,3	4,0	-64,65%	14,4	4,4	-69,57%
	11112	s60	8,5	5,8	-32,10%	9,9	6,0	-38,81%	11,33	6,31	-44,33%	11,9	6,8	-42,64%	14,7	7,4	-49,73%	17,8	8,0	-55,18%	15,07	7,06	-53,15%	19,4	7,7	-60,38%	24,3	8,4	-65,65%
		s70	14,7	10,4	-28,80%	16,8	10,9	-35,17%	19,00	11,30	-40,52%	20,0	12,2	-38,96%	24,2	13,1	-45,97%	28,8	14,0	-51,48%	24,71	12,55	-49,23%	31,2	13,5	-56,60%	38,4	14,5	-62,10%
		s80	23,7	17,5	-26,11%	26,8	18,2	-32,14%	29,97	18,79	-37,30%	31,5	20,2	-35,86%	37,5	21,5	-42,73%	44,1	22,8	-48,22%	38,27	20,73	-45,83%	47,4	22,2	-53,24%	57,5	23,7	-58,89%
		s30	1,3	0,9	-34,29%	1,5	0,9	-41,17%	1,78	0,95	-46,76%	1,9	1,0	-45,22%	2,3	1,1	-52,31%	2,9	1,2	-57,68%	2,38	1,05	-55,86%	3,1	1,2	-62,94%	3,9	1,3	-68,01%
		s40	3,6	2,6	-28,05%	4,1	2,7	-34,33%	4,66	2,81	-39,63%	4,8	3,0	-38,33%	5,8	3,2	-45,31%	6,9	3,4	-50,82%	5,95	3,06	-48,58%	7,5	3,3	-55,97%	9,2	3,5	-61,50%
P4	M-P	s50	8,1	6,2	-23,72%	9,1	6,4	-29,42%	10,05	6,60	-34,36%	10,4	6,9	-33,23%	12,2	7,4	-39,92%	14,2	7,8	-45,37%	12,44	7,10	-42,93%	15,2	7,5	-50,31%	18,2	8,0	-56,04%
1 1		s60	15,9	12,6	-20,55%	17,5	13,0	-25,73%	19,11	13,32	-30,31%	19,8	14,0	-29,32%	22,8	14,6	-35,66%	26,0	15,3	-40,95%	23,11	14,23	-38,43%	27,6	15,0	-45,66%	32,4	15,8	-51,41%
		s70	28,2	23,1	-18,12%	30,7	23,7	-22,86%	33,20	24,20	-27,11%	34,3	25,3	-26,23%	38,9	26,4	-32,21%	43,8	27,4	-37,29%	39,43	25,72	-34,77%	46,2	26,9	-41,77%	53,5	28,1	-47,46%
		s80	46,6	39,1	-16,20%	50,2	39,9	-20,56%	53,88	40,67	-24,52%	55,6	42,4	-23,72%	62,2	44,0	-29,36%	69,3	45,6	-34,23%	63,07	43,06	-31,74%	72,8	44,8	-38,48%	83,3	46,6	-44,06%
		s30	1,3	0,7	-44,98%	1,7	0,8	-52,26%	2,01	0,85	-57,81%	2,1	0,9	-55,76%	2,8	1,1	-62,40%	3,6	1,2	-67,12%	2,89	0,98	-66,19%	4,0	1,1	-72,24%	5,3	1,3	-76,32%
		s40	3,5	2,2	-37,95%	4,2	2,3	-45,06%	4,94	2,44	-50,71%	5,2	2,7	-48,88%	6,6	2,9	-55,90%	8,3	3,2	-61,10%	6,80	2,75	-59,54%	9,1	3,1	-66,33%	11,7	3,4	-71,09%
	M-BC	s50	7,6	5,1	-32,80%	8,9	5,4	-39,56%	10,21	5,60	-45,11%	10,7	6,0	-43,47%	13,3	6,6	-50,56%	16,1	7,1	-55,99%	13,58	6,24	-54,02%	17,6	6,8	-61,21%	22,1	7,4	-66,42%
	M-DC	s60	14,5	10,3	-28,86%	16,6	10,7	-35,24%	18,78	11,16	-40,60%	19,7	12,0	-39,11%	23,8	12,8	-46,12%	28,4	13,7	-51,63%	24,33	12,31	-49,40%	30,7	13,3	-56,77%	37,9	14,3	-62,26%
		s70	25,2	18,7	-25,77%	28,4	19,4	-31,76%	31,79	20,07	-36,89%	33,2	21,4	-35,53%	39,6	22,8	-42,37%	46,4	24,2	-47,87%	40,32	21,99	-45,47%	49,9	23,5	-52,89%	60,4	25,1	-58,54%
		s80	41,1	31,5	-23,27%	45,7	32,5	-28,90%	50,55	33,47	-33,79%	52,8	35,6	-32,54%	61,9	37,6	-39,18%	71,6	39,7	-44,60%	63,01	36,47	-42,11%	76,6	38,7	-49,48%	91,5	41,0	-55,22%

Tabella A.C5.2-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare	
dell'orditura del solaio	

Ŧ	Ineroi	al														S-LL													
0()0/- fro	tilo.					L3									L4		-						_	L5		-		
50	//011a	uie		C-nS	р	(C-pSp			C-S	р		C-nS	р		C-pS	Sp		C-S	р		C-nS	р		C-pS	Sp		C-S	р
	[KJ]		O1	O2	Decrem.	O1 (D2 Dec	crem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.	O1	O2	Decrem.
		s30	0,08	0,04	-49,1%	0,08 0,	04 -49	9,2%	0,06	0,02	-57,1%	0,12	0,06	-53,9%	0,12	0,05	-54,0%	0,08	0,03	-62,9%	0,16	0,07	-57,2%	0,16	0,07	-57,3%	0,11	0,04	-67,0%
		s40	0,19	0,11	-44,2%	0,19 0,	11 -44	4,3%	0,14	0,07	-51,0%	0,26	0,13	-49,4%	0,26	0,13	-49,5%	0,18	0,08	-57,3%	0,34	0,16	-53,1%	0,34	0,16	-53,2%	0,23	0,09	-61,9%
	M-L	s50	0,37	0,22	-40,2%	0,37 0,	22 -40	10,3%	0,27	0,15	-46,0%	0,50	0,27	-45,6%	0,49	0,27	-45,7%	0,35	0,17	-52,6%	0,63	0,32	-49,6%	0,63	0,32	-49,7%	0,44	0,19	-57,4%
	141-12	s60	0,66	0,41	-36,8%	0,65 0,	41 -30	6,9%	0,49	0,29	-41,8%	0,85	0,49	-42,4%	0,85	0,49	-42,4%	0,62	0,32	-48,5%	1,07	0,57	-46,5%	1,06	0,57	-46,6%	0,76	0,35	-53,6%
		s70	1,07	0,71	-34,0%	1,07 0,	70 -34	54, 0%	0,81	0,50	-38,4%	1,36	0,82	-39,5%	1,35	0,82	-39,6%	1,00	0,55	-45,0%	1,67	0,94	-43,7%	1,67	0,94	-43,8%	1,21	0,60	-50,1%
		s80	1,65	1,13	-31,5%	1,65 1.	13 -31	31,6%	1,27	0,82	-35,4%	2,05	1,29	-37,0%	2,05	1,29	-37,1%	1,54	0,89	-42,0%	2,50	1,47	-41,3%	2,49	1,46	-41,3%	1,83	0,97	-47,1%
		s30	0,10	0,06	-39,4%	0,10 0,	06 -39	39,4%	0,08	0,04	-44,5%	0,13	0,07	-44,8%	0,13	0,07	-44,9%	0,10	0,05	-51,1%	0,17	0,09	-48,9%	0,17	0,09	-48,9%	0,12	0,05	-56,0%
		s40	0,25	0,16	-34,1%	0,25 0,	16 -34	34,1%	0,19	0,12	-38,0%	0,31	0,19	-39,6%	0,31	0,19	-39,6%	0,24	0,13	-44,6%	0,39	0,22	-43,8%	0,39	0,22	-43,9%	0,29	0,14	-49,7%
P3	M-P	s50	0,51	0,36	-30,0%	0,51 0,	36 -30	30,0%	0,41	0,28	-33,1%	0,63	0,41	-35,4%	0,63	0,41	-35,5%	0,49	0,30	-39,5%	0,76	0,46	-39,7%	0,76	0,46	-39,7%	0,58	0,32	-44,7%
		s60	0,95	0,69	-26,8%	0,95 0,	69 -20	26,8%	0,78	0,55	-29,4%	1,14	0,77	-32,0%	1,14	0,77	-32,1%	0,91	0,59	-35,5%	1,35	0,86	-36,3%	1,35	0,86	-36,3%	1,05	0,62	-40,5%
		s70	1,61	1,22	-24,2%	1,61 1.	22 -24	24,2%	1,34	0,98	-26,4%	1,90	1,34	-29,2%	1,89	1,34	-29,3%	1,54	1,04	-32,2%	2,21	1,47	-33,4%	2,21	1,47	-33,4%	1,75	1,10	-37,0%
		s80	2,56	2,00	-22,1%	2,56 1	99 -22	22,1%	2,15	1,64	-23,9%	2,98	2,18	-26,9%	2,97	2,17	-26,9%	2,44	1,72	-29,4%	3,42	2,36	-30,9%	3,42	2,36	-30,9%	2,75	1,81	-34,1%
		s30	0,13	0,07	-46,8%	0,13 0,	07 -40	6,9%	0,09	0,04	-54,1%	0,18	0,09	-51,8%	0,18	0,09	-51,9%	0,12	0,05	-60,2%	0,24	0,11	-55,3%	0,24	0,10	-55,4%	0,16	0,06	-64,5%
		s40	0,30	0,17	-41,8%	0,30 0,	17 -41	1,8%	0,22	0,11	-47,7%	0,40	0,21	-47,1%	0,40	0,21	-47,2%	0,28	0,13	-54,2%	0,51	0,25	-51,0%	0,51	0,25	-51,1%	0,36	0,15	-59,0%
	M-BC	s50	0,59	0,37	-37,7%	0,58 0,	36 -37	37,7%	0,44	0,25	-42,7%	0,76	0,43	-43,2%	0,76	0,43	-43,2%	0,56	0,28	-49,3%	0,96	0,51	-47,3%	0,96	0,50	-47,3%	0,69	0,31	-54,4%
		s60	1,04	0,69	-34,3%	1,04 0.	68 -34	34,3%	0,80	0,49	-38,6%	1,32	0,80	-39,8%	1,32	0,79	-39,8%	0,99	0,54	-45,2%	1,64	0,92	-44,0%	1,63	0,91	-44,1%	1,19	0,59	-50,3%
		s70	1,72	1,18	-31,4%	1,71 1.	17 -31	31,5%	1,34	0,87	-35,2%	2,14	1,35	-36,9%	2,13	1,34	-37,0%	1,62	0,94	-41,7%	2,60	1,53	-41,2%	2,59	1,52	-41,3%	1,92	1,02	-46,9%
		s80	2,67	1,90	-29,0%	2,67 1	89 -29	29,1%	2,11	1,43	-32,3%	3,27	2,14	-34,4%	3,26	2,13	-34,5%	2,51	1,54	-38,7%	3,92	2,40	-38,7%	3,91	2,39	-38,8%	2,94	1,65	-43,8%
		-		0.0	Indiper	idente d	alla spi	inta de	ella C			0.1	0.0	Indiper	dente	e dalla	spinta de	ella C			0.1		Indiper	idente	e dalla	. spinta de	ella C		
		20	01	0.1.0	Decrem.							01	0.21	Decrem.							01	02	Decrem.						
		\$30	0,36	0,18	-48,8%							0,46	0,21	-55,5%							0,59	0,23	-60,5%						
		540	0,89	0,51	-42,2%							1,12	0,57	-49,0%							1,37	0,65	-54,1%						
	M-L	\$50	1,80	1,17	-3/,1%							2,27	1,27	-43,8%							2,/1	1,38	-49,1%						
		\$50	5.02	2,32 4 1 5	-33,1%							4,12	2,49	-39,0%							4,84	2,07	-44,8%0 41.20/						
		\$70	0.47	4,15	-29,970							10.01	7 20	-30,170							1244	4,09	-41,570						
		so0	9,47	0,09	-27,370							0.64	7,20 0.37	-33,270							0.76	0.40	-30,270						
		s30	1.44	1.02	20 30/-							1.68	1.08	35 50/							1.04	1 1 5	40,6%						
		\$50	3.18	2 30	-25,0%							3.62	2 51	-30.7%							4 09	264	-35 5%						
P4	M-P	\$60	616	4.82	-21,8%							6.89	5.02	-27.0%							7.65	5 24	-31.6%						
		\$70	10.83	874	-19.3%							11.96	9.02	-24.2%							1314	9.40	-28.4%						
		\$80	17 77	14.69	-17 3%							19.40	15 17	-21.8%							21 12	15.66	-25.8%						
		\$30	0.57	0 31	-45.4%							073	035	-52.2%							0.91	039	-57.2%						
		\$40	1 46	0.89	-38.8%							1 79	0.98	-45,5%							216	1.06	-50.8%						
		\$50	310	2,05	-33.9%							370	2.21	-40.4%							4 36	2.37	-45.6%						
	M-BC	s60	5.83	4.08	-30.0%							6.81	4.34	-36.3%							7.88	4.62	-41.4%						
		s70	10.03	7.33	-27.0%							11.54	7.74	-32.9%							13.14	8,17	-37.9%						
		s80	16.17	12.22	-24.5%							18.35	12.83	-30.1%							20.65	13.45	-34.9%						

Appendice C - Analisi di simulazione per la flessione verticale

Decremento minimo

Decremento massimo

Tabella A.C5.2-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dell'orditura del solaio



Appendice 0 τ. Analisi di simulazione per la flessione verticale

Decremento minimo

Decremento massimo

Tabella A.C5.2-3 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare dell'orditura del solaio

Decremento minimo

Decremento massimo

I	Energi	a al					13								Ι.4	S-C	A								15				
90	0% fra	uttile		CnS	0		 	So	1	6.5	0		CnS	0	1.4	<u> </u>	So		6.5	0		CnS	2		 	0		<u> </u>	2
	[k]]	ŀ	01	O^2	Decrem	01	02	Decrem	01	02	Decrem	01	02	Decrem	01	C-p.	Decrem	01	02	Decrem	01	02	Decrem	01	C-p3	Decrem	01	02	Decrem
-		c30	0.27	0.10	61.8%	0.27	0.10	61.0%	0.17	0.05	72.6%	0.42	0.14	65.3%	0.41	014	65.4%	0.26	0.06	76.5%	0.50	0.10	67.6%	0.50	0.10	67.7%	0.37	0.08	-70 0%
		s40	0,27	0.24	-58.1%	0,27	0.23	-58.2%	0,17	0,05	-68.1%	0,42	0,14	-62.2%	0,41	0,14	-62.3%	0,20	0,00	-72.8%	1 17	0,17	-64.9%	1 17	0,17	-65.0%	0,57	0,00	-75.9%
		s50	1.02	0,24	-54.8%	1.02	0,46	-54.9%	0,57	0.24	-64.2%	1.48	0,52	-59.4%	1 48	0,52	-59.5%	0,97	0,15	-69.5%	2.03	0.76	-62 5%	202	0.76	-62.6%	1 32	0,10	-73.0%
	M-L	s60	1,62	0.81	-51.9%	1,62	0.81	-51.9%	1 14	0.45	-60.6%	2 39	1.03	-56.8%	2,38	1.03	-56.9%	1 59	0,54	-66.3%	3,22	1.28	-60.1%	3,21	1.28	-60.2%	2.12	0,63	-70.3%
		s70	2.61	1.32	-49.2%	2.60	1.32	-49.3%	1.78	0.76	-57.4%	3.63	1.66	-54.4%	3.61	1.65	-54.4%	2.44	0.89	-63.5%	4.82	2.02	-58.0%	4.80	2.01	-58,1%	3.20	1.03	-67.7%
		s80	3.84	2.04	-46.8%	3.83	2.03	-46.8%	2.66	1.21	-54.4%	5.25	2.51	-52.1%	5.23	2.50	-52.2%	3.57	1.40	-60.8%	6.88	3.03	-56.0%	6.86	3.01	-56.1%	4.62	1.60	-65.3%
		s30	0.26	0.12	-54.9%	0.26	0.12	-54.9%	0.18	0.07	-63.4%	0.38	0.15	-59.4%	0.38	0.15	-59.5%	0.26	0.08	-68.8%	0.52	0.20	-62.5%	0.52	0.19	-62.6%	0.35	0.10	-72.4%
		s40	0,58	0,29	-50,1%	0,58	0,29	-50,1%	0,41	0,18	-57,6%	0,82	0,37	-55,2%	0,81	0,36	-55,3%	0,57	0,21	-63,6%	1,09	0,45	-58,7%	1,08	0,45	-58,8%	0,74	0,24	-67,9%
		s50	1,11	0,60	-46,0%	1,11	0,60	-46,1%	0,81	0,38	-52,6%	1,51	0,73	-51,5%	1,51	0,73	-51,5%	1,07	0,44	-59,1%	1,97	0,88	-55,4%	1,97	0,88	-55,4%	1,37	0,50	-63,8%
P3	M-P	s60	1,92	1,10	-42,6%	1,91	1,10	-42,6%	1,42	0,73	-48,4%	2,55	1,32	-48,2%	2,54	1,31	-48,3%	1,84	0,82	-55,1%	3,26	1,56	-52,4%	3,25	1,55	-52,4%	2,31	0,92	-60,1%
		s70	3,09	1,87	-39,6%	3,08	1,86	-39,7%	2,32	1,28	-44,8%	4,01	2,19	-45,3%	4,00	2,18	-45,4%	2,94	1,42	-51,7%	5,06	2,55	-49,6%	5,04	2,54	-49,7%	3,63	1,57	-56,8%
		s80	4,71	2,97	-37,0%	4,70	2,96	-37,0%	3,58	2,09	-41,7%	6,01	3,44	-42,8%	5,99	3,42	-42,8%	4,46	2,29	-48,6%	7,46	3,94	-47,2%	7,44	3,92	-47,2%	5,43	2,51	-53,8%
		s30	0,39	0,15	-60,3%	0,39	0,15	-60,4%	0,25	0,08	-70,6%	0,59	0,21	-64,0%	0,59	0,21	-64,1%	0,38	0,10	-74,8%	0,84	0,28	-66,5%	0,83	0,28	-66,6%	0,53	0,12	-77,6%
		s40	0,82	0,36	-56,3%	0,82	0,36	-56,4%	0,55	0,19	-65,8%	1,21	0,48	-60,7%	1,21	0,47	-60,8%	0,80	0,23	-70,8%	1,67	0,61	-63,6%	1,67	0,61	-63,7%	1,09	0,28	-74,2%
	MDC	s50	1,51	0,71	-52,8%	1,50	0,71	-52,9%	1,03	0,40	-61,5%	2,16	0,92	-57,6%	2,15	0,91	-57,7%	1,45	0,47	-67,2%	2,93	1,15	-60,9%	2,92	1,14	-61,0%	1,93	0,56	-71,0%
	M-DC	s 60	2,52	1,27	-49,7%	2,51	1,26	-49,8%	1,74	0,74	-57,7%	3,52	1,59	-54,8%	3,51	1,58	-54,9%	2,39	0,87	-63,8%	4,70	1,95	-58,4%	4,68	1,94	-58,5%	3,14	1,00	-68,0%
		s70	3,94	2,09	-46,9%	3,93	2,08	-47,0%	2,76	1,26	-54,3%	5,39	2,57	-52,3%	5,37	2,56	-52,4%	3,70	1,46	-60,7%	7,08	3,11	-56,1%	7,05	3,09	-56,2%	4,79	1,66	-65,2%
		s80	5,85	3,25	-44,4%	5,83	3,24	-44,5%	4,15	2,02	-51,3%	7,87	3,94	-50,0%	7,84	3,92	-50,0%	5,46	2,30	-57,9%	10,18	4,69	-54,0%	10,15	4,66	-54,1%	6,96	2,60	-62,7%
		Ļ			Indipen	ndent	e dalla	ı spinta d	ella C					Indipen	ndente	e dalla	ı spinta do	ella C					Indiper	ndente	dalla	spinta de	ella C		
_			O1	O2	Decrem.							O1	O2	Decrem.							01	O2	Decrem.						
		s30	0,90	0,29	-67,3%							1,30	0,36	-72,4%							1,78	0,43	-75,7%						
		s40	2,01	0,77	-61,8%							2,80	0,91	-67,6%							3,74	1,06	-71,5%						
	M-L	s50	3,86	1,66	-57,0%							5,23	1,92	-63,3%							6,81	2,20	-67,7%						
		s60	6,71	3,16	-52,8%							8,86	3,59	-59,5%							11,31	4,05	-64,2%						
		s70	10,84	5,51	-49,2%							14,02	6,16	-56,0%							17,60	6,86	-61,0%						
		s80	16,59	8,95	-46,1%							21,05	9,90	-53,0%							26,06	10,90	-58,1%						
		<u>s30</u>	1,05	0,47	-55,6%							1,42	0,54	-62,0%							1,83	0,61	-66,6%						
		<u>s40</u>	2,56	1,31	-48,9%							3,31	1,46	-55,8%							4,15	1,63	-60,8%						
P4	M-P	<u>s50</u>	5,25	2,96	-43,7%							6,57	3,25	-50,6%							8,04	3,55	-55,9%						
		<u>s60</u>	9,59	5,81	-39,4%							11,/2	6,50	-46,5%							14,07	6,80	-51,6%						
		<u>s/0</u>	10,15	10,36	-35,8%							19,36	11,11	-42,6%							22,86	11,89	-48,0%						
		580	23,36	1/,16	-32,9%							30,16	18,20	-39,5%							200	19,40	-44,8%						
		\$30	1,00	1.20	-64,/%							1,95	0,58	-/0,1%							2,60	0,68	-/3,/%						
		<u>s40</u>	5,09	1,28	-58,7%							4,23 8.02	1,49	-04,9%							5,50 10.29	1,/2	-09,1%						
	M-BC	550	10.62	2,19 5 37	-55,7%							0,02 13,77	5,10	-00,5%							10,28	5,00 6,70	-05,0%						
		s00	10,03	3,37 0,41	49,5%							13,77	10.40	-50,5% 52,7%							17,31 27.22	11 /5	-01,5%						
		\$70	26.81	2,41 15 38	-43,870							33 30	16.83	-49.6%							40.68	18 3/	-54.9%						

Valore massimo



Ene	roia al 90	10/0 fra	ttile		L3			L4			L5	
Line	п_п	70 II a	une			Indip	benden	te dalla s	spinta d	ella C		
	[KJ]			S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA
		s30	O1	0,36	0,64	0,90	0,46	0,89	1,30	0,59	1,19	1,78
		\$50	O2	0,18	0,27	0,29	0,21	0,33	0,36	0,23	0,40	0,43
		¢40	O1	0,89	1,49	2,01	1,12	2,00	2,80	1,37	2,59	3,74
		340	O2	0,51	0,72	0,77	0,57	0,85	0,91	0,63	0,98	1,06
		e50	O1	1,86	2,95	3,86	2,27	3,84	5,23	2,71	4,85	6,81
	МТ	350	O2	1,17	1,57	1,66	1,27	1,81	1,92	1,38	2,05	2,20
	141-17	c60	O1	3,47	5,25	6,71	4,12	6,67	8,86	4,84	8,26	11,31
		500	O2	2,32	3,02	3,16	2,49	3,40	3,59	2,67	3,80	4,05
		c70	O1	5,92	8,66	10,84	6,91	10,78	14,02	7,99	13,12	17,60
		\$70	O2	4,15	5,27	5,51	4,41	5,85	6,16	4,69	6,47	6,86
		-90	O1	9,47	13,47	16,59	10,91	16,48	21,05	12,44	19,79	26,06
		500	O2	6,89	8,59	8,95	7,28	9,44	9,90	7,69	10,34	10,90
		c30	O1	0,53	0,81	1,05	0,64	1,05	1,42	0,76	1,32	1,83
		\$50	O2	0,34	0,45	0,47	0,37	0,51	0,54	0,40	0,57	0,61
		c40	O1	1,44	2,06	2,56	1,68	2,56	3,31	1,94	3,11	4,15
		540	O2	1,02	1,26	1,31	1,08	1,40	1,46	1,15	1,54	1,63
		a 5 0	O1	3,18	4,33	5,25	3,62	5,23	6,57	4,09	6,21	8,04
D2	MD	\$50	O2	2,39	2,86	2,96	2,51	3,12	3,25	2,64	3,39	3,55
F3	101-1-	a60	O1	6,16	8,09	9,59	6,89	9,55	11,72	7,65	11,14	14,07
		500	O2	4,82	5,64	5,81	5,02	6,08	6,30	5,24	6,53	6,80
		-70	O1	10,83	13,86	16,15	11,96	16,08	19,36	13,14	18,47	22,86
		\$70	O2	8,74	10,08	10,36	9,07	10,76	11,11	9,40	11,46	11,89
		- 90	O1	17,77	22,24	25,56	19,40	25,45	30,16	21,12	28,87	35,14
		\$60	O2	14,69	16,74	17,16	15,17	17,73	18,26	15,66	18,76	19,40
		a 2 0	O1	0,57	0,98	1,35	0,73	1,35	1,93	0,91	1,77	2,60
		\$50	O2	0,31	0,45	0,48	0,35	0,53	0,58	0,39	0,63	0,68
		a40	O1	1,46	2,34	3,09	1,79	3,08	4,23	2,16	3,92	5,56
		\$40	O2	0,89	1,21	1,28	0,98	1,40	1,49	1,06	1,60	1,72
		- 50	O1	3,10	4,71	6,04	3,70	6,01	8,02	4,36	7,48	10,28
	MDC	\$50	O2	2,05	2,66	2,79	2,21	3,01	3,18	2,37	3,38	3,60
	M-BC	a60	O1	5,83	8,49	10,63	6,81	10,58	13,77	7,88	12,90	17,31
		500	02	4,08	5,15	5,37	4,34	5,72	6,02	4,62	6,33	6,70
		.70	O1	10,03	14,14	17,37	11,54	17,27	22,02	13,14	20,71	27,22
		\$70	02	7,33	9,05	9,41	7,74	9,94	10,40	8,17	10,87	11,45
		00	O1	16,17	22,19	26,81	18,35	26,66	33,39	20,65	31,53	40,68
		\$80	02	12,22	14,83	15,38	12,83	16,13	16,83	13,45	17,49	18,34

E.		00/ E			L3			L4			L5	
Ene	ergia al 90)70 If2	uuie			Indig	bendent	e dalla s	spinta de	ella C		
	[k]			S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA
		a 2 0	O1	0,81	1,35	1,88	1,03	1,83	2,67	1,27	2,39	3,60
		\$50	O2	0,42	0,55	0,58	0,45	0,63	0,67	0,49	0,72	0,77
		a40	O1	2,10	3,24	4,34	2,56	4,23	5,92	3,07	5,35	7,74
		\$40	O2	1,23	1,54	1,60	1,31	1,72	1,81	1,40	1,91	2,02
		-50	O1	4,49	6,57	8,52	5,33	8,32	11,27	6,24	10,28	14,40
	мт	\$50	O2	2,87	3,48	3,61	3,02	3,82	3,98	3,19	4,17	4,38
	101-12	-60	O1	8,49	11,92	15,07	9,86	14,74	19,42	11,33	17,85	24,32
		\$00	O2	5,76	6,84	7,06	6,03	7,41	7,69	6,31	8,00	8,35
		.70	O1	14,67	19,97	24,71	16,76	24,19	31,17	19,00	28,82	38,38
		\$70	O2	10,45	12,19	12,55	10,87	13,07	13,53	11,30	13,99	14,55
		c80	O1	23,72	31,47	38,27	26,75	37,51	47,41	29,97	44,07	57,54
		500	O2	17,53	20,18	20,73	18,15	21,48	22,17	18,79	22,82	23,66
		c30	O1	1,31	1,86	2,38	1,54	2,33	3,11	1,78	2,85	3,94
		\$50	O2	0,86	1,02	1,05	0,90	1,11	1,15	0,95	1,21	1,26
		¢40	O1	3,62	4,83	5,95	4,13	5,84	7,48	4,66	6,94	9,18
		340	O2	2,61	2,98	3,06	2,71	3,19	3,29	2,81	3,41	3,54
		e50	O1	8,13	10,41	12,44	9,07	12,24	15,19	10,05	14,21	18,21
D4	МР	350	O2	6,20	6,95	7,10	6,40	7,35	7,55	6,60	7,76	8,00
14	101-1	s60	O1	15,91	19,76	23,11	17,48	22,76	27,57	19,11	25,98	32,43
		300	O2	12,64	13,96	14,23	12,98	14,64	14,98	13,32	15,34	15,76
		s70	O1	28,25	34,27	39,43	30,67	38,87	46,19	33,20	43,76	53,49
		370	O2	23,13	25,28	25,72	23,66	26,35	26,90	24,20	27,44	28,10
		c80	O1	46,65	55,58	63,07	50,20	62,25	72,82	53,88	69,30	83,26
		300	O2	39,09	42,39	43,06	39,88	43,97	44,80	40,67	45,58	46,58
		\$30	O1	1,33	2,11	2,89	1,65	2,82	4,02	2,01	3,62	5,34
		350	O2	0,73	0,94	0,98	0,79	1,06	1,12	0,85	1,19	1,26
		s40	O1	3,50	5,19	6,80	4,19	6,64	9,09	4,94	8,27	11,71
		510	O2	2,17	2,65	2,75	2,30	2,93	3,06	2,44	3,22	3,38
		s50	O1	7,60	10,70	13,58	8,85	13,29	17,59	10,21	16,15	22,11
	M-BC	350	O2	5,10	6,05	6,24	5,35	6,57	6,82	5,60	7,11	7,42
	m-bC	\$60	O1	14,49	19,66	24,33	16,57	23,84	30,72	18,78	28,42	37,86
		500	O2	10,31	11,97	12,31	10,73	12,84	13,28	11,16	13,75	14,29
		s70	O1	25,24	33,25	40,32	28,42	39,56	49,87	31,79	46,41	60,43
		310	O2	18,74	21,44	21,99	19,40	22,79	23,50	20,07	24,20	25,05
		s80	O1	41,06	52,82	63,01	45,69	61,87	76,58	50,55	71,64	91,48
		300	02	31,51	35,63	36,47	32,48	37,63	38,69	33,47	39,68	40,97

169

Valore massimo

Appendice C - Analisi di simulazione per la flessione verticale

E	:1.00	0/ E						L3									L4									L5				
End	ergia al 90 n-n	0% If2	ittile		C-nSp			C-pSp			C-Sp			C-nSp			C-pSp			C-Sp			C-nSp			C-pSp			C-Sp	
	[KJ]			S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA
		a 2 0	O1	0,08	0,19	0,27	0,08	0,19	0,27	0,06	0,12	0,17	0,12	0,29	0,42	0,12	0,29	0,41	0,08	0,17	0,26	0,16	0,40	0,59	0,16	0,40	0,59	0,11	0,24	0,37
		\$50	02	0,04	0,09	0,10	0,04	0,09	0,10	0,02	0,04	0,05	0,06	0,13	0,14	0,05	0,13	0,14	0,03	0,06	0,06	0,07	0,17	0,19	0,07	0,17	0,19	0,04	0,07	0,08
		- 40	O1	0,19	0,41	0,56	0,19	0,41	0,56	0,14	0,26	0,37	0,26	0,60	0,84	0,26	0,59	0,84	0,18	0,37	0,54	0,34	0,82	1,17	0,34	0,81	1,17	0,23	0,50	0,75
		\$40	02	0,11	0,21	0,24	0,11	0,21	0,23	0,07	0,11	0,12	0,13	0,28	0,32	0,13	0,28	0,32	0,08	0,13	0,15	0,16	0,36	0,41	0,16	0,36	0,41	0,09	0,16	0,18
		c50	O1	0,37	0,76	1,02	0,37	0,76	1,02	0,27	0,49	0,68	0,50	1,07	1,48	0,49	1,07	1,48	0,35	0,68	0,97	0,63	1,44	2,03	0,63	1,43	2,02	0,44	0,90	1,32
	MJ	\$50	02	0,22	0,42	0,46	0,22	0,41	0,46	0,15	0,23	0,24	0,27	0,54	0,60	0,27	0,53	0,60	0,17	0,27	0,30	0,32	0,68	0,76	0,32	0,67	0,76	0,19	0,32	0,36
	141-12	e60	O1	0,66	1,28	1,68	0,65	1,27	1,68	0,49	0,85	1,14	0,85	1,76	2,39	0,85	1,75	2,38	0,62	1,14	1,59	1,07	2,32	3,22	1,06	2,31	3,21	0,76	1,47	2,12
		300	02	0,41	0,74	0,81	0,41	0,73	0,81	0,29	0,42	0,45	0,49	0,93	1,03	0,49	0,93	1,03	0,32	0,50	0,54	0,57	1,15	1,28	0,57	1,14	1,28	0,35	0,58	0,63
		¢70	O1	1,07	2,01	2,61	1,07	2,00	2,60	0,81	1,35	1,78	1,36	2,71	3,63	1,35	2,70	3,61	1,00	1,78	2,44	1,67	3,52	4,82	1,67	3,51	4,80	1,21	2,27	3,20
		3/0	02	0,71	1,21	1,32	0,70	1,20	1,32	0,50	0,71	0,76	0,82	1,50	1,66	0,82	1,49	1,65	0,55	0,83	0,89	0,94	1,82	2,02	0,94	1,81	2,01	0,60	0,95	1,03
		s80	O1	1,65	3,00	3,84	1,65	2,99	3,83	1,27	2,05	2,66	2,05	3,98	5,25	2,05	3,96	5,23	1,54	2,65	3,57	2,50	5,10	6,88	2,49	5,08	6,86	1,83	3,32	4,62
		300	02	1,13	1,87	2,04	1,13	1,87	2,03	0,82	1,14	1,21	1,29	2,28	2,51	1,29	2,27	2,50	0,89	1,31	1,40	1,47	2,73	3,03	1,46	2,72	3,01	0,97	1,49	1,60
		s30	O1	0,10	0,20	0,26	0,10	0,20	0,26	0,08	0,13	0,18	0,13	0,28	0,38	0,13	0,28	0,38	0,10	0,18	0,26	0,17	0,37	0,52	0,17	0,37	0,52	0,12	0,24	0,35
		350	02	0,06	0,11	0,12	0,06	0,11	0,12	0,04	0,06	0,07	0,07	0,14	0,15	0,07	0,14	0,15	0,05	0,07	0,08	0,09	0,17	0,20	0,09	0,17	0,19	0,05	0,09	0,10
		s40	O1	0,25	0,45	0,58	0,25	0,45	0,58	0,19	0,31	0,41	0,31	0,61	0,82	0,31	0,61	0,81	0,24	0,41	0,57	0,39	0,80	1,09	0,39	0,79	1,08	0,29	0,53	0,74
		010	02	0,16	0,27	0,29	0,16	0,27	0,29	0,12	0,17	0,18	0,19	0,33	0,37	0,19	0,33	0,36	0,13	0,19	0,21	0,22	0,41	0,45	0,22	0,40	0,45	0,14	0,22	0,24
		s50	O1	0,51	0,88	1,11	0,51	0,88	1,11	0,41	0,63	0,81	0,63	1,16	1,51	0,63	1,15	1,51	0,49	0,81	1,07	0,76	1,48	1,97	0,76	1,47	1,97	0,58	1,00	1,37
P3	M-P	000	02	0,36	0,56	0,60	0,36	0,55	0,60	0,28	0,36	0,38	0,41	0,67	0,73	0,41	0,67	0,73	0,30	0,41	0,44	0,46	0,80	0,88	0,46	0,80	0,88	0,32	0,47	0,50
		s60	O1	0,95	1,55	1,92	0,95	1,54	1,91	0,78	1,14	1,42	1,14	1,99	2,55	1,14	1,98	2,54	0,91	1,42	1,84	1,35	2,49	3,26	1,35	2,48	3,25	1,05	1,73	2,31
			02	0,69	1,03	1,10	0,69	1,03	1,10	0,55	0,70	0,73	0,77	1,22	1,32	0,77	1,21	1,31	0,59	0,78	0,82	0,86	1,43	1,56	0,86	1,42	1,55	0,62	0,87	0,92
		s70	O1	1,61	2,53	3,09	1,61	2,52	3,08	1,34	1,89	2,32	1,90	3,19	4,01	1,89	3,18	4,00	1,54	2,31	2,94	2,21	3,92	5,06	2,21	3,91	5,04	1,75	2,78	3,63
		0.0	02	1,22	1,75	1,87	1,22	1,74	1,86	0,98	1,23	1,28	1,34	2,04	2,19	1,34	2,03	2,18	1,04	1,35	1,42	1,47	2,35	2,55	1,47	2,34	2,54	1,10	1,49	1,57
		s80	O1	2,56	3,91	4,71	2,56	3,90	4,70	2,15	2,97	3,58	2,98	4,84	6,01	2,97	4,82	5,99	2,44	3,57	4,46	3,42	5,87	7,46	3,42	5,85	7,44	2,75	4,22	5,43
			02	2,00	2,79	2,97	1,99	2,78	2,96	1,64	2,01	2,09	2,18	3,21	3,44	2,17	3,20	3,42	1,72	2,19	2,29	2,36	3,65	3,94	2,36	3,64	3,92	1,81	2,39	2,51
		s30	01	0,13	0,28	0,39	0,13	0,28	0,39	0,09	0,18	0,25	0,18	0,41	0,59	0,18	0,41	0,59	0,12	0,26	0,38	0,24	0,58	0,84	0,24	0,57	0,83	0,16	0,35	0,53
			02	0,07	0,14	0,15	0,07	0,14	0,15	0,04	0,07	0,08	0,09	0,19	0,21	0,09	0,19	0,21	0,05	0,09	0,10	0,11	0,25	0,28	0,10	0,24	0,28	0,06	0,11	0,12
		s40	01	0,30	0,61	0,82	0,30	0,61	0,82	0,22	0,40	0,55	0,40	0,87	1,21	0,40	0,87	1,21	0,28	0,55	0,80	0,51	1,18	1,67	0,51	1,17	1,67	0,36	0,73	1,09
			02	0,17	0,32	0,36	0,17	0,32	0,36	0,11	0,17	0,19	0,21	0,43	0,48	0,21	0,42	0,47	0,13	0,21	0,23	0,25	0,54	0,61	0,25	0,54	0,61	0,15	0,26	0,28
		s50	01	0,59	1,14	1,51	0,58	1,14	1,50	0,44	0,76	1,03	0,76	1,59	2,16	0,76	1,58	2,15	0,56	1,03	1,45	0,96	2,10	2,93	0,96	2,09	2,92	0,69	1,34	1,93
	M-BC		02	0,37	0,65	0,71	0,36	0,64	0,71	0,25	0,37	0,40	0,43	0,82	0,92	0,43	0,82	0,91	0,28	0,44	0,47	0,51	1,02	1,15	0,50	1,02	1,14	0,31	0,52	0,56
		s60	01	1,04	1,94	2,52	1,04	1,93	2,51	0,80	1,32	1,74	1,32	2,63	3,52	1,32	2,62	3,51	0,99	1,74	2,39	1,64	3,43	4,70	1,63	3,41	4,68	1,19	2,22	3,14
			02	0,69	1,16	1,27	0,68	1,15	1,26	0,49	0,69	0,74	0,80	1,44	1,59	0,79	1,43	1,58	0,54	0,81	0,87	0,92	1,76	1,95	0,91	1,75	1,94	0,59	0,93	1,00
		s70	01	1,72	3,08	3,94	1,71	3,07	3,93	1,34	2,13	2,76	2,14	4,09	5,39	2,13	4,08	5,37	1,62	2,75	3,70	2,60	5,24	7,08	2,59	5,22	7,05	1,92	3,45	4,79
			02	1,18	1,92	2,09	1,17	1,91	2,08	0,87	1,19	1,26	1,35	2,34	2,57	1,34	2,33	2,56	0,94	1,36	1,46	1,53	2,81	3,11	1,52	2,79	3,09	1,02	1,55	1,66
		s80	01	2,67	4,64	5,85	2,67	4,63	5,83	2,11	3,26	4,15	3,27	6,05	7,87	3,26	6,03	7,84	2,51	4,13	5,46	3,92	7,65	10,18	3,91	7,62	10,15	2,94	5,11	6,96
			02	1,90	3,00	3,25	1,89	2,99	3,24	1,43	1,91	2,02	2,14	3,60	3,94	2,13	3,59	3,92	1,54	2,16	2,30	2,40	4,26	4,69	2,39	4,24	4,66	1,65	2,43	2,60

Tabella A.C6.2-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di solaio

					L3			L4			L5		Valore minimo
Ene	ergia al 90	0% fra	attile	Indip	endente	e dalla	Indip	endente	e dalla	Indip	endente	e dalla	
	[k]	1		sp	inta dell	a C	sp	inta dell	a C	spi	nta dell	a C	Valore massimo
				S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	S-LL	S-LP	S-CA	
		- 20	O1	0,36	0,64	0,90	0,46	0,89	1,30	0,59	1,19	1,78	
		\$30	O2	0,18	0,27	0,29	0,21	0,33	0,36	0,23	0,40	0,43	
		a40	O1	0,89	1,49	2,01	1,12	2,00	2,80	1,37	2,59	3,74	
		\$40	O2	0,51	0,72	0,77	0,57	0,85	0,91	0,63	0,98	1,06	
		s50	O1	1,86	2,95	3,86	2,27	3,84	5,23	2,71	4,85	6,81	
	M-I	350	O2	1,17	1,57	1,66	1,27	1,81	1,92	1,38	2,05	2,20	
	101-12	s60	O1	3,47	5,25	6,71	4,12	6,67	8,86	4,84	8,26	11,31	
		300	O2	2,32	3,02	3,16	2,49	3,40	3,59	2,67	3,80	4,05	
		s70	O1	5,92	8,66	10,84	6,91	10,78	14,02	7,99	13,12	17,60	
		370	O2	4,15	5,27	5,51	4,41	5,85	6,16	4,69	6,47	6,86	
		s80	O1	9,47	13,47	16,59	10,91	16,48	21,05	12,44	19,79	26,06	
			O2	6,89	8,59	8,95	7,28	9,44	9,90	7,69	10,34	10,90	
		s30	01	0,53	0,81	1,05	0,64	1,05	1,42	0,76	1,32	1,83	
			02	0,34	0,45	0,47	0,37	0,51	0,54	0,40	0,57	0,61	
		s40	01	1,44	2,06	2,56	1,68	2,56	3,31	1,94	3,11	4,15	
			02	1,02	1,26	1,31	1,08	1,40	1,46	1,15	1,54	1,63	
		s50	01	3,18	4,33	5,25	3,62	5,23	6,57	4,09	6,21	8,04	
P4	M-P		02	2,39	2,86	2,96	2,51	3,12	3,25	2,64	3,39	3,55	
		s60	01	6,16	8,09	9,59	6,89	9,55	11,72	7,65	11,14	14,07	
			02	4,82	5,64	5,81	5,02	6,08	6,30	5,24	6,53	6,80	
		s70	01	10,83	13,86	16,15	11,96	16,08	19,36	13,14	18,47	22,86	
			02	8,/4	10,08	10,36	9,07	10,76	11,11	9,40	11,46	11,89	
		s80	01	1/,//	22,24	25,56	19,40	25,45	30,16	21,12	28,87	35,14	
			02	14,69	16,/4	1/,10	15,17	1/,/3	18,20	15,00	18,/6	19,40	
		s30	$\frac{01}{02}$	0,37	0,98	1,55	0,75	1,55	1,95	0,91	1,//	2,00	
			01	0,51	0,45	2,00	1,55	2,09	1.22	0,39	3.02	0,00	
		s40	$\frac{01}{02}$	0.80	2,34	1.28	0.08	1.40	4,23 1.40	2,10	1.60	5,50 1.72	
		-	01	3.10	1,21	6.04	3.70	6.01	8.02	1,00	7.48	10.28	
		s50	$\frac{01}{02}$	2.05	2.66	2 79	2 21	3.01	3.18	2 37	3 38	3.60	
	M-BC		01	5.83	8.49	10.63	6.81	10.58	1377	7.88	12.90	17 31	
		s60	0^{1}	4.08	5.15	5 37	4 34	5.72	6.02	4.62	633	670	
			01	10.03	1414	17 37	11 54	17 27	22.02	1314	20.71	27.22	
		s70	0^{2}	7 33	9.05	9.41	7 74	9.94	10.40	817	10.87	11.45	
			01	16.17	22.19	26.81	18.35	26.66	33.39	20.65	31.53	40.68	
		s80	02	12,22	14,83	15,38	12,83	16,13	16,83	13,45	17,49	18,34	

Tabella A.C6.2-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della tipologia di solaio

Incremento minimo Incremento massimo

Tabella A.C7.1-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio

Eng	raia al 00)0/2 frot	ttila			(S-LL				5	S-LP				5	S-CA	
Enc	n n)/0 1121	luie							Indiper	ndente o	lalla spinta de	ella C					
	[KJ]			L3	LA	L5	Increm. da	Increm. da	L3	L4	L5	Increm. da	Increm. da	L3	L4	L5	Increm. da	Increm. da
		s30	O1	0,36	0,46	0,59	30%	26%	0,64	0,89	1,19	40%	33%	0,90	1,30	1,78	45%	37%
		550	02	0,18	0,21	0,23	13%	13%	0,27	0,33	0,40	21%	19%	0,29	0,36	0,43	23%	20%
		s40	O1	0,89	1,12	1,37	25%	22%	1,49	2,00	2,59	34%	29%	2,01	2,80	3,74	40%	33%
		0.10	02	0,51	0,57	0,63	11%	10%	0,72	0,85	0,98	17%	16%	0,77	0,91	1,06	19%	17%
		s50	01	1,86	2,27	2,71	22%	20%	2,95	3,84	4,85	30%	26%	3,86	5,23	6,81	36%	30%
	M-L		02	1,17	1,27	1,38	9%	8%	1,57	1,81	2,05	15%	14%	1,66	1,92	2,20	16%	15%
		s60	01	3,47	4,12	4,84	19%	17%	5,25	6,67	8,26	27%	24%	6,71	8,86	11,31	32%	28%
		000	02	2,32	2,49	2,67	7%	7%	3,02	3,40	3,80	13%	12%	3,16	3,59	4,05	14%	13%
		s70	01	5,92	6,91	7,99	17%	16%	8,66	10,78	13,12	24%	22%	10,84	14,02	17,60	29%	26%
		0.0	02	4,15	4,41	4,69	6%	6%	5,27	5,85	6,47	11%	11%	5,51	6,16	6,86	12%	11%
		s80	01	9,47	10,91	12,44	15%	14%	13,47	16,48	19,79	22%	20%	16,59	21,05	26,06	27%	24%
			02	6,89	7,28	7,69	6%	6%	8,59	9,44	10,34	10%	9%	8,95	9,90	10,90	11%	10%
		s30	01	0,53	0,64	0,76	20%	19%	0,81	1,05	1,32	29%	25%	1,05	1,42	1,83	34%	29%
			02	0,34	0,37	0,40	8%	8%	0,45	0,51	0,57	14%	13%	0,47	0,54	0,61	15%	14%
		s40	01	1,44	1,68	1,94	16%	15%	2,06	2,56	3,11	24%	22%	2,56	3,31	4,15	29%	25%
			02	1,02	1,08	1,15	6%	6%	1,26	1,40	1,54	11%	10%	1,31	1,46	1,63	12%	11%
		s50	01	3,18	3,62	4,09	14%	13%	4,33	5,23	6,21	21%	19%	5,25	6,57	8,04	25%	22%
P3	M-P		02	2,39	2,51	2,64	5%	5%	2,86	3,12	3,39	9%	9%	2,96	3,25	3,55	10%	9%
_		s60	01	6,16	6,89	7,65	12%	11%	8,09	9,55	11,14	18%	17%	9,59	11,72	14,07	22%	20%
			02	4,82	5,02	5,24	4%	4%	5,64	6,08	6,53	8%	/%	5,81	6,30	6,80	8%	8%
		s70	01	10,83	11,96	13,14	10%	10%	13,86	16,08	18,47	16%	15%	16,15	19,36	22,86	20%	18%
		0.0	02	8,74	9,07	9,40	4%	4%	10,08	10,76	11,46	7%	7%	10,36	11,11	11,89	7%	7%
		s80	01	17,77	19,40	21,12	9%	9%	22,24	25,45	28,87	14%	13%	25,56	30,16	35,14	18%	17%
			02	14,69	15,17	15,66	3%	3%	16,74	17,73	18,76	6%	6%	17,16	18,26	19,40	6%	6%
		s30	01	0,57	0,73	0,91	28%	24%	0,98	1,35	1,//	3/%	31%	1,35	1,93	2,60	42%	35%
			02	0,31	0,35	0,39	12%	11%	0,45	0,53	0,63	19%	18%	0,48	0,58	0,68	21%	19%
		s40	01	1,46	1,/9	2,16	23%	20%	2,34	3,08	3,92	32%	2/%	3,09	4,23	5,56	3/%	31%
			02	0,89	0,98	1,06	9%	9%	1,21	1,40	1,60	16%	14%	1,28	1,49	1,72	17%	15%
		s50	01	3,10	3,70	4,36	19%	18%	4,71	6,01	7,48	28%	24%	6,04	8,02	10,28	33%	28%
	M-BC		02	2,05	2,21	2,37	8%	/%	2,66	3,01	3,38	13%	12%	2,79	3,18	3,60	14%	13%
		s60	01	5,83	6,81	/,88	1/%	16%	8,49	10,58	12,90	25%	22%	10,63	13,//	1/,31	29%	26%
			02	4,08	4,34	4,62	6%	6%	5,15	5,72	6,33	11%	11%	5,37	6,02	6,70	12%	11%
		s70	01	10,03	11,54	13,14	15%	14%	14,14	1/,2/	20,/1	22%	20%	1/,3/	22,02	27,22	2/%	24%
			02	/,33	/,/4	8,17	6%	5%	9,05	9,94	10,87	10%	9%	9,41	10,40	11,45	11%	10%
		s80	01	16,17	18,35	20,65	13%	13%	22,19	26,66	31,53	20%	18%	26,81	33,39	40,68	25%	22%
			02	12,22	12,83	13,45	5%	5%	14,83	16,13	17,49	9%	8%	15,38	16,83	18,34	9%	9%

Incremento minimo Incremento massimo

E.		00/ E					S-LL					S-LP					S-CA	
En	ergia al 90	J70 If2	attile				-			Indiper	ndente	dalla spinta d	ella C					
	[k]			L3	L4	L5	Increm da	Increm da	L3	L4	L5	Increm da	Increm da	L3	L4	L5	Increm da	Increm da
		a 2 0	O1	0,81	1,03	1,27	27%	24%	1,35	1,83	2,39	36%	31%	1,88	2,67	3,60	42%	35%
		\$50	O2	0,42	0,45	0,49	9%	8%	0,55	0,63	0,72	15%	14%	0,58	0,67	0,77	16%	15%
		a40	O1	2,10	2,56	3,07	22%	20%	3,24	4,23	5,35	31%	27%	4,34	5,92	7,74	36%	31%
		\$40	O2	1,23	1,31	1,40	7%	7%	1,54	1,72	1,91	12%	11%	1,60	1,81	2,02	13%	12%
		a 5 0	O1	4,49	5,33	6,24	19%	17%	6,57	8,32	10,28	27%	24%	8,52	11,27	14,40	32%	28%
	мт	\$50	O2	2,87	3,02	3,19	6%	5%	3,48	3,82	4,17	10%	9%	3,61	3,98	4,38	10%	10%
	IVI-L	s60	O1	8,49	9,86	11,33	16%	15%	11,92	14,74	17,85	24%	21%	15,07	19,42	24,32	29%	25%
		500	O2	5,76	6,03	6,31	5%	5%	6,84	7,41	8,00	8%	8%	7,06	7,69	8,35	9%	9%
		.70	O1	14,67	16,76	19,00	14%	13%	19,97	24,19	28,82	21%	19%	24,71	31,17	38,38	26%	23%
		\$70	O2	10,45	10,87	11,30	4%	4%	12,19	13,07	13,99	7%	7%	12,55	13,53	14,55	8%	8%
		-80	O1	23,72	26,75	29,97	13%	12%	31,47	37,51	44,07	19%	18%	38,27	47,41	57,54	24%	21%
		500	O2	17,53	18,15	18,79	4%	4%	20,18	21,48	22,82	6%	6%	20,73	22,17	23,66	7%	7%
		c30	O1	1,31	1,54	1,78	17%	16%	1,86	2,33	2,85	25%	23%	2,38	3,11	3,94	31%	27%
		\$50	O2	0,86	0,90	0,95	5%	5%	1,02	1,11	1,21	9%	9%	1,05	1,15	1,26	10%	9%
		¢40	O1	3,62	4,13	4,66	14%	13%	4,83	5,84	6,94	21%	19%	5,95	7,48	9,18	26%	23%
		540	O2	2,61	2,71	2,81	4%	4%	2,98	3,19	3,41	7%	7%	3,06	3,29	3,54	8%	7%
		e50	O1	8,13	9,07	10,05	11%	11%	10,41	12,24	14,21	18%	16%	12,44	15,19	18,21	22%	20%
D4	мр	550	O2	6,20	6,40	6,60	3%	3%	6,95	7,35	7,76	6%	6%	7,10	7,55	8,00	6%	6%
14	111-1	s60	O1	15,91	17,48	19,11	10%	9%	19,76	22,76	25,98	15%	14%	23,11	27,57	32,43	19%	18%
		500	O2	12,64	12,98	13,32	3%	3%	13,96	14,64	15,34	5%	5%	14,23	14,98	15,76	5%	5%
		e70	O1	28,25	30,67	33,20	9%	8%	34,27	38,87	43,76	13%	13%	39,43	46,19	53,49	17%	16%
		\$70	O2	23,13	23,66	24,20	2%	2%	25,28	26,35	27,44	4%	4%	25,72	26,90	28,10	5%	4%
		e80	O1	46,65	50,20	53,88	8%	7%	55,58	62,25	69,30	12%	11%	63,07	72,82	83,26	15%	14%
		300	O2	39,09	39,88	40,67	2%	2%	42,39	43,97	45,58	4%	4%	43,06	44,80	46,58	4%	4%
		\$30	O1	1,33	1,65	2,01	24%	22%	2,11	2,82	3,62	33%	29%	2,89	4,02	5,34	39%	33%
		350	O2	0,73	0,79	0,85	8%	7%	0,94	1,06	1,19	13%	12%	0,98	1,12	1,26	14%	13%
		¢40	O1	3,50	4,19	4,94	20%	18%	5,19	6,64	8,27	28%	25%	6,80	9,09	11,71	34%	29%
		340	O2	2,17	2,30	2,44	6%	6%	2,65	2,93	3,22	10%	10%	2,75	3,06	3,38	11%	11%
		s50	O1	7,60	8,85	10,21	17%	15%	10,70	13,29	16,15	24%	22%	13,58	17,59	22,11	29%	26%
	M-BC	350	O2	5,10	5,35	5,60	5%	5%	6,05	6,57	7,11	9%	8%	6,24	6,82	7,42	9%	9%
	M-DC	s60	O1	14,49	16,57	18,78	14%	13%	19,66	23,84	28,42	21%	19%	24,33	30,72	37,86	26%	23%
		500	O2	10,31	10,73	11,16	4%	4%	11,97	12,84	13,75	7%	7%	12,31	13,28	14,29	8%	8%
		s70	O1	25,24	28,42	31,79	13%	12%	33,25	39,56	46,41	19%	17%	40,32	49,87	60,43	24%	21%
		570	O2	18,74	19,40	20,07	4%	3%	21,44	22,79	24,20	6%	6%	21,99	23,50	25,05	7%	7%
		-80	O1	41,06	45,69	50,55	11%	11%	52,82	61,87	71,64	17%	16%	63,01	76,58	91,48	22%	19%
		800	O2	31,51	32,48	33,47	3%	3%	35,63	37,63	39,68	6%	5%	36,47	38,69	40,97	6%	6%

Tabella A.C7.1-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano terra al variare della luce del solaio

												S-LL							Incremento minimo
Ene	rgia al 90)% frat	ttile			(C-nSp	-		-		C-pSp	_		-		C-Sp	_	
	[k]			1.0	T 4	T	Increm. da	Increm. da	т.а	т.	1.5	Increm. da	Increm. da	1.0	T 4	T. 7	Increm. da	Increm. da	Incremento massimo
	1.55			L3	L4	LS	L3 a L4	L4 a L5	L3	L4	L5	L3 a L4	L4 a L5		L4	L5	L3 a L4	L4 a L5	-
		20	O1	0,08	0,12	0,16	42%	35%	0,08	0,12	0,16	42%	35%	0,06	0,08	0,11	38%	32%	
		\$30	O2	0,04	0,06	0,07	29%	25%	0,04	0,05	0,07	29%	25%	0,02	0,03	0,04	20%	18%	
		-40	O1	0,19	0,26	0,34	37%	31%	0,19	0,26	0,34	37%	31%	0,14	0,18	0,23	33%	28%	
		\$40	O2	0,11	0,13	0,16	24%	21%	0,11	0,13	0,16	24%	21%	0,07	0,08	0,09	16%	15%	
		°20	O1	0,37	0,50	0,63	33%	28%	0,37	0,49	0,63	33%	28%	0,27	0,35	0,44	29%	25%	
	M-I	350	O2	0,22	0,27	0,32	21%	19%	0,22	0,27	0,32	20%	19%	0,15	0,17	0,19	13%	12%	
	101-12	\$60	O1	0,66	0,85	1,07	29%	26%	0,65	0,85	1,06	29%	26%	0,49	0,62	0,76	26%	23%	
		300	O2	0,41	0,49	0,57	18%	17%	0,41	0,49	0,57	18%	16%	0,29	0,32	0,35	11%	11%	
		s70	O1	1,07	1,36	1,67	27%	23%	1,07	1,35	1,67	27%	23%	0,81	1,00	1,21	23%	21%	
			02	0,71	0,82	0,94	16%	15%	0,70	0,82	0,94	16%	15%	0,50	0,55	0,60	10%	9%	
		s80	O1	1,65	2,05	2,50	24%	22%	1,65	2,05	2,49	24%	22%	1,27	1,54	1,83	21%	19%	
			02	1,13	1,29	1,47	14%	13%	1,13	1,29	1,46	14%	13%	0,82	0,89	0,97	9%	8%	
		s30	01	0,10	0,13	0,17	32%	27%	0,10	0,13	0,17	32%	27%	0,08	0,10	0,12	28%	24%	
			02	0,06	0,07	0,09	20%	18%	0,06	0,07	0,09	20%	18%	0,04	0,05	0,05	12%	12%	
		s40	01	0,25	0,31	0,39	27%	24%	0,25	0,31	0,39	27%	24%	0,19	0,24	0,29	23%	21%	
			02	0,16	0,19	0,22	16%	15%	0,16	0,19	0,22	16%	15%	0,12	0,13	0,14	10%	9%	
		s50	01	0,51	0,63	0,76	23%	21%	0,51	0,63	0,76	23%	21%	0,41	0,49	0,58	19%	18%	
P3	M-P		02	0,36	0,41	0,46	13%	13%	0,36	0,41	0,46	13%	13%	0,28	0,30	0,32	8%	8%	
		s60	01	0,95	1,14	1,35	20%	18%	0,95	1,14	1,35	20%	18%	0,78	0,91	1,05	1/%	16%	
			02	0,69	0,77	0,86	12%	11%	0,69	0,77	0,86	12%	11%	0,55	0,59	0,62	1/%	1/0/0	
		s70	01	1,61	1,90	2,21	18%	1/%	1,61	1,89	2,21	18%	16%	1,34	1,54	1,/5	15%	14%	
			02	1,22	1,34	1,4/	10%	10%	1,22	1,34	1,4/	10%	10%	0,98	1,04	1,10	6%	6%	
		s80	01	2,56	2,98	3,42	16%	15%	2,56	2,97	3,42	16%	15%	2,15	2,44	2,/5	13%	13%	
			02	2,00	2,18	2,36	9% 200/	9% 220/	1,99	2,1/	2,36	9% 200/	9% 220/	1,64	1,/2	1,81	5% 2(0/	5%0 2007	
		s30	$\frac{01}{02}$	0,15	0,18	0,24	3970 26%	230/a	0,15	0,10	0,24	3970 26%	23 ⁰ / ₀	0,09	0,12	0,10	18%	3076 16%	
			01	0,07	0,09	0,11	2070	20%	0,07	0,09	0,10	2070	20%	0,04	0,05	0,00	30%	26%	
		s40	$\frac{01}{02}$	0,50	0,40	0,31	22%	2970	0,50	0,40	0,51	22%	2970	0,22	0,20	0,50	14%	13%	
			01	0,17	0,21	0.96	30%	26%	0,17	0,21	0.96	30%	26%	0.44	0,15	0,15	26%	23%	
		s50	O^2	0,37	0,70	0,50	10%	17%	0,36	0,70	0,50	10%	17%	0,77	0.28	0,05	120%	11%	
	M-BC		01	1.04	1 32	1.64	27%	24%	1.04	1.32	1.63	27%	24%	0,25	0,20	1 1 0	23%	21%	
		s60	0^{1}	0.69	0.80	0.92	16%	15%	0.68	0.79	0.91	16%	15%	0.49	0,55	0.59	10%	10%	
			01	172	214	2 60	24%	22%	1 71	213	2 59	24%	22%	1 34	1.62	1.92	21%	19%	
		s70	0^2	1 18	1 35	1 53	14%	13%	1 17	1 34	1.52	14%	13%	0.87	0.94	1.02	9%	8%	
			01	2.67	3.27	3.92	22%	20%	2.67	3.26	3.01	22%	20%	2 11	2 51	2.94	19%	17%	
		s80	02	1,90	2,14	2,40	13%	12%	1,89	2,13	2,39	13%	12%	1,43	1,54	1,65	8%	7%	

Tabella A.C7.2-1 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio

												S-LP							Incremento minimo
Ene	rgia al 90	0% fra	ttile			C	C-nSp					C-pSp					C-Sp		
	[k]	1		т.а	тı	T. 7	Increm. da	Increm. da	т.а	т.4	T. 7	Increm. da	Increm. da	т.а	. .	1.5	Increm. da	Increm. da	Incremento massimo
	1.5			L3	L4	L5	L3 a L4	L4 a L5	L3	L4	L5	L3 a L4	L4 a L5	L3	LA	L5	L3 a L4	L4 a L5	
		20	O1	0,19	0,29	0,40	50%	40%	0,19	0,29	0,40	50%	40%	0,12	0,17	0,24	47%	38%	
		\$50	O2	0,09	0,13	0,17	38%	32%	0,09	0,13	0,17	38%	32%	0,04	0,06	0,07	29%	25%	
		a40	O1	0,41	0,60	0,82	45%	37%	0,41	0,59	0,81	45%	37%	0,26	0,37	0,50	42%	35%	
		\$40	O2	0,21	0,28	0,36	33%	29%	0,21	0,28	0,36	33%	29%	0,11	0,13	0,16	24%	22%	
		e50	O1	0,76	1,07	1,44	41%	34%	0,76	1,07	1,43	41%	34%	0,49	0,68	0,90	38%	32%	
	MJ	350	O2	0,42	0,54	0,68	29%	26%	0,41	0,53	0,67	29%	26%	0,23	0,27	0,32	21%	19%	
	101-12	\$60	O1	1,28	1,76	2,32	38%	32%	1,27	1,75	2,31	38%	32%	0,85	1,14	1,47	35%	29%	
		300	O2	0,74	0,93	1,15	26%	23%	0,73	0,93	1,14	26%	23%	0,42	0,50	0,58	18%	17%	
		\$70	O1	2,01	2,71	3,52	35%	30%	2,00	2,70	3,51	35%	30%	1,35	1,78	2,27	32%	27%	
		370	O2	1,21	1,50	1,82	24%	21%	1,20	1,49	1,81	24%	21%	0,71	0,83	0,95	16%	15%	
	s	\$80	O1	3,00	3,98	5,10	33%	28%	2,99	3,96	5,08	33%	28%	2,05	2,65	3,32	29%	26%	
		300	O2	1,87	2,28	2,73	22%	20%	1,87	2,27	2,72	22%	20%	1,14	1,31	1,49	15%	14%	
		\$30	O1	0,20	0,28	0,37	41%	34%	0,20	0,28	0,37	41%	34%	0,13	0,18	0,24	37%	31%	
		350	O2	0,11	0,14	0,17	29%	26%	0,11	0,14	0,17	29%	26%	0,06	0,07	0,09	20%	18%	
		s40	O1	0,45	0,61	0,80	36%	30%	0,45	0,61	0,79	36%	30%	0,31	0,41	0,53	32%	27%	
		510	O2	0,27	0,33	0,41	25%	22%	0,27	0,33	0,40	25%	22%	0,17	0,19	0,22	16%	15%	
		e50	O1	0,88	1,16	1,48	32%	27%	0,88	1,15	1,47	32%	27%	0,63	0,81	1,00	28%	24%	
P3	M-P	350	O2	0,56	0,67	0,80	21%	19%	0,55	0,67	0,80	21%	19%	0,36	0,41	0,47	14%	13%	
1.5	101-1	\$60	O1	1,55	1,99	2,49	29%	25%	1,54	1,98	2,48	29%	25%	1,14	1,42	1,73	25%	22%	
		300	O2	1,03	1,22	1,43	19%	17%	1,03	1,21	1,42	18%	17%	0,70	0,78	0,87	12%	11%	
		\$70	O1	2,53	3,19	3,92	26%	23%	2,52	3,18	3,91	26%	23%	1,89	2,31	2,78	22%	20%	
		370	O2	1,75	2,04	2,35	17%	15%	1,74	2,03	2,34	16%	15%	1,23	1,35	1,49	10%	10%	
		\$80	O1	3,91	4,84	5,87	24%	21%	3,90	4,82	5,85	24%	21%	2,97	3,57	4,22	20%	18%	
		300	O2	2,79	3,21	3,65	15%	14%	2,78	3,20	3,64	15%	14%	2,01	2,19	2,39	9%	9%	
		\$30	O1	0,28	0,41	0,58	48%	39%	0,28	0,41	0,57	48%	39%	0,18	0,26	0,35	45%	37%	
		350	O2	0,14	0,19	0,25	36%	31%	0,14	0,19	0,24	36%	31%	0,07	0,09	0,11	27%	23%	
		s40	O1	0,61	0,87	1,18	43%	35%	0,61	0,87	1,17	43%	35%	0,40	0,55	0,73	40%	33%	
		340	O2	0,32	0,43	0,54	31%	27%	0,32	0,42	0,54	31%	27%	0,17	0,21	0,26	22%	20%	
		\$50	O1	1,14	1,59	2,10	39%	33%	1,14	1,58	2,09	39%	33%	0,76	1,03	1,34	35%	30%	
	M-BC	350	O2	0,65	0,82	1,02	27%	24%	0,64	0,82	1,02	27%	24%	0,37	0,44	0,52	19%	17%	
	M-DC	\$60	O1	1,94	2,63	3,43	36%	30%	1,93	2,62	3,41	36%	30%	1,32	1,74	2,22	32%	28%	
		300	O2	1,16	1,44	1,76	24%	22%	1,15	1,43	1,75	24%	22%	0,69	0,81	0,93	16%	15%	
		\$70	O1	3,08	4,09	5,24	33%	28%	3,07	4,08	5,22	33%	28%	2,13	2,75	3,45	29%	25%	
		370	O2	1,92	2,34	2,81	22%	20%	1,91	2,33	2,79	22%	20%	1,19	1,36	1,55	15%	14%	
		\$80	O1	4,64	6,05	7,65	30%	26%	4,63	6,03	7,62	30%	26%	3,26	4,13	5,11	27%	24%	
		300	02	3,00	3,60	4,26	20%	18%	2,99	3,59	4,24	20%	18%	1,91	2,16	2,43	13%	12%	

Tabella A.C7.2-2 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio

									S-CA									Incremento minimo		
Ene	rgia al 90	0% fra	ttile			(C-nSp					C-pSp					C-Sp			
	[k]	1					Increm. da	Increm. da		T (Increm. da	Increm. da				Increm. da	Increm. da		Incremento massimo
	1.51	,		L3	LA	L5	L3 a L4	L4 a L5	L3	L4	L5	L3 a L4	LA a L5	L3	L4	L5	L3 a L4	L4 a L5		
		20	O1	0,27	0,42	0,59	54%	42%	0,27	0,41	0,59	54%	42%	0,17	0,26	0,37	52%	41%		
		s30	02	0,10	0,14	0,19	40%	33%	0,10	0,14	0,19	40%	33%	0,05	0,06	0,08	30%	26%		
		c40	O1	0,56	0,84	1,17	49%	40%	0,56	0,84	1,17	49%	39%	0,37	0,54	0,75	47%	38%		
		540	02	0,24	0,32	0,41	35%	30%	0,23	0,32	0,41	35%	29%	0,12	0,15	0,18	25%	23%		
		\$50	O1	1,02	1,48	2,03	45%	37%	1,02	1,48	2,02	45%	37%	0,68	0,97	1,32	43%	36%		
	M-L	350	02	0,46	0,60	0,76	31%	27%	0,46	0,60	0,76	31%	27%	0,24	0,30	0,36	22%	20%		
	101 12	s60	01	1,68	2,39	3,22	42%	35%	1,68	2,38	3,21	42%	35%	1,14	1,59	2,12	40%	33%		
			02	0,81	1,03	1,28	28%	24%	0,81	1,03	1,28	28%	24%	0,45	0,54	0,63	19%	18%		
		s70	01	2,61	3,63	4,82	39%	33%	2,60	3,61	4,80	39%	33%	1,78	2,44	3,20	37%	31%		
			02	1,32	1,66	2,02	25%	22%	1,32	1,65	2,01	25%	22%	0,76	0,89	1,03	17%	16%		
		s80	01	3,84	5,25	6,88	37%	31%	3,83	5,23	6,86	37%	31%	2,66	3,57	4,62	34%	29%		
			O_2	2,04	2,51	3,03	23%	21%	2,03	2,50	3,01	23%	21%	1,21	1,40	1,60	16%	14%		
		s30	$\frac{01}{02}$	0,26	0,38	0,52	45%0 210/	3/% 270/	0,26	0,38	0,52	45%	3/% 270/	0,18	0,26	0,35	42%	35%0 1.00/		
			02	0,12	0,15	1.00	3170 40%	2/7/0	0,12	0,15	1.09	3170 4094	2/70	0,07	0,08	0,10	2170	1970 2104		
		s40	$\frac{01}{02}$	0,58	0,62	0.45	4070 26%	230/2	0,50	0,01	1,00	40%	230/2	0,41	0,57	0,74	17%	3170 16%		
			0^{1}	1 1 1	1.51	1.07	2070 36%	2.570 31%	1 1 1	1.51	1.07	2070 36%	2.370 31%	0,10	1.07	1.37	33%	28%		
		s50	0^{1}	0.60	0.73	0.88	22%	20%	0.60	0.73	0.88	22%	20%	0.38	0.44	0.50	15%	14%		
P3	M-P		01	1.92	2 55	3.26	33%	28%	1.91	2 54	3.25	33%	28%	1 42	1.84	2 31	20%	26%		
		s60	0^{1}	1,02	1 32	1.56	20%	18%	1 10	1 31	1,55	20%	18%	0.73	0.82	0.92	13%	12%		
			01	3.09	4.01	5.06	30%	26%	3.08	4.00	5.04	30%	26%	2.32	2.94	3.63	27%	24%		
		s70	02	1.87	2.19	2.55	18%	16%	1.86	2.18	2.54	17%	16%	1.28	1.42	1.57	11%	10%		
		00	O1	4,71	6,01	7,46	28%	24%	4,70	5,99	7,44	28%	24%	3,58	4,46	5,43	24%	22%		
		s80	02	2,97	3,44	3,94	16%	15%	2,96	3,42	3,92	16%	15%	2,09	2,29	2,51	10%	9%		
		-20	O1	0,39	0,59	0,84	52%	41%	0,39	0,59	0,83	52%	41%	0,25	0,38	0,53	50%	40%		
		\$50	O2	0,15	0,21	0,28	37%	32%	0,15	0,21	0,28	37%	32%	0,08	0,10	0,12	28%	25%		
		¢40	O1	0,82	1,21	1,67	47%	38%	0,82	1,21	1,67	47%	38%	0,55	0,80	1,09	45%	37%		
		540	O2	0,36	0,48	0,61	32%	28%	0,36	0,47	0,61	32%	28%	0,19	0,23	0,28	23%	21%		
		\$50	O1	1,51	2,16	2,93	43%	36%	1,50	2,15	2,92	43%	35%	1,03	1,45	1,93	41%	34%		
	M-BC	350	O2	0,71	0,92	1,15	29%	25%	0,71	0,91	1,14	28%	25%	0,40	0,47	0,56	20%	18%		
	M-DC	\$60	O1	2,52	3,52	4,70	40%	33%	2,51	3,51	4,68	40%	33%	1,74	2,39	3,14	37%	31%		
			02	1,27	1,59	1,95	26%	23%	1,26	1,58	1,94	25%	23%	0,74	0,87	1,00	17%	16%		
		s70	01	3,94	5,39	7,08	37%	31%	3,93	5,37	7,05	37%	31%	2,76	3,70	4,79	34%	29%	1	
			02	2,09	2,57	3,11	23%	21%	2,08	2,56	3,09	23%	21%	1,26	1,46	1,66	15%	14%	1	
		s80	01	5,85	7,87	10,18	34%	29%	5,83	7,84	10,15	34%	29%	4,15	5,46	6,96	32%	27%	1	
			02	3,25	3,94	4,69	21%	19%	3,24	3,92	4,66	21%	19%	2,02	2,30	2,60	14%	13%		

Tabella A.C7.2-3 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio

Incremento minimo

Incremento massimo

							C T T				6	TD					TD	
East		0/ £			Indine	ndente	<u>8-LL</u> dalla spinta d	ella C		Indiner	dente d	-LP Ialla spinta da	alla C		Indiner	dente d	<u>5-LP</u> dalla spinta de	alla C
Ene	ergia al 90	0%0 I f 2	ittile .		marpe	luente		In a second of the		indiper			In a second of the		indiper			In a second a
	[kJ]			L3	L4	L5	Le La	Increm. da	L3	L4	L5		Increm. da	L3	L4	L5		Increm. da
							L3 a L4	L4 a L5				L3 a L4	L4 a L5				L3 a L4	L4 a L5
		s30	01	0,36	0,46	0,59	30%	26%	0,64	0,89	1,19	40%	33%	0,90	1,30	1,78	45%	37%
			02	0,18	0,21	0,23	13%	13%	0,27	0,33	0,40	21%	19%	0,29	0,36	0,43	23%	20%
		s40	01	0,89	1,12	1,37	25%	22%	1,49	2,00	2,59	34%	29%	2,01	2,80	3,74	40%	33%
			02	0,51	0,57	0,63	11%	10%	0,72	0,85	0,98	17%	16%	0,77	0,91	1,06	19%	17%
		s50	01	1,86	2,27	2,71	22%	20%	2,95	3,84	4,85	30%	26%	3,86	5,23	6,81	36%	30%
	M-L		02	1,17	1,27	1,38	9%	8%	1,57	1,81	2,05	15%	14%	1,66	1,92	2,20	16%	15%
		s60	01	3,47	4,12	4,84	19%	17%	5,25	6,67	8,26	27%	24%	6,71	8,86	11,31	32%	28%
			02	2,32	2,49	2,67	/%	/%	3,02	3,40	3,80	13%	12%	3,16	3,59	4,05	14%	13%
		s70	01	5,92	6,91	7,99	17%	16%	8,66	10,78	13,12	24%	22%	10,84	14,02	17,60	29%	26%
			O_2	4,15	4,41	4,69	6%	6%	5,27	5,85	6,47	11%	11%	5,51	6,16	6,86	12%	11%
		s80	01	9,47	10,91	12,44	15%	14%	13,47	16,48	19,79	22%	20%	16,59	21,05	26,06	27%	24%
			O_2	6,89	7,28	/,69	6%	6%	8,59	9,44	10,34	10%	9%	8,95	9,90	10,90	11%	10%
		s30		0,53	0,64	0,76	20%	19%	0,81	1,05	1,32	29%	25%	1,05	1,42	1,83	34%	29%
	-		02	0,34	0,37	0,40	8%	8%	0,45	0,51	0,57	14%	13%	0,47	0,54	0,61	15%	14%
		s40	01	1,44	1,68	1,94	16%	15%	2,06	2,56	3,11	24%	22%	2,56	3,31	4,15	29%	25%
			02	1,02	1,08	1,15	6%	6%	1,26	1,40	1,54	11%	10%	1,31	1,46	1,63	12%	11%
		s50	01	3,18	3,62	4,09	14%	13%	4,33	5,23	6,21	21%	19%	5,25	6,57	8,04	25%	22%
P4	M-P		02	2,39	2,51	2,64	5%	5%	2,86	3,12	3,39	9%	9%	2,96	3,25	3,55	10%	9%
		s60	01	6,16	6,89	/,65	12%	11%	8,09	9,55	11,14	18%	1/%	9,59	11,/2	14,07	22%	20%
			02	4,82	5,02	5,24	4%	4%	5,64	6,08	6,53	8%	/%	5,81	6,30	6,80	8%	8%
		s70	01	10,83	11,96	13,14	10%	10%	13,86	16,08	18,47	16%	15%	16,15	19,36	22,86	20%	18%
			02	8,74	9,07	9,40	4%	4%	10,08	10,76	11,46	/%	/%	10,36	11,11	11,89	/%	/%
		s80	01	17,77	19,40	21,12	9%	9%	22,24	25,45	28,87	14%	13%	25,56	30,16	35,14	18%	17%
			O_2	14,69	15,17	15,66	3%	3%	16,74	17,73	18,76	6%	6%	17,16	18,26	19,40	6%	6%
		s30	$\frac{01}{2}$	0,57	0,/3	0,91	28%	24%	0,98	1,35	1,//	3/%	31%	1,35	1,93	2,60	42%	35%
			02	0,31	0,35	0,39	12%	11%	0,45	0,53	0,63	19%	18%	0,48	0,58	0,68	21%	19%
		s40	01	1,46	1,/9	2,16	23%	20%	2,34	3,08	3,92	32%	2/%	3,09	4,23	5,56	3/%	31%
			02	0,89	0,98	1,06	9%	9%	1,21	1,40	1,60	16%	14%	1,28	1,49	1,/2	1/%	15%
		s50	01	3,10	3,70	4,36	19%	18%	4,71	6,01	7,48	28%	24%	6,04	8,02	10,28	33%	28%
	M-BC		O2	2,05	2,21	2,37	8%	10%	2,66	3,01	3,38	13%	12%	2,79	3,18	3,60	14%	13%
		s60	01	5,83	6,81	7,88	17%	16%	8,49	10,58	12,90	25%	22%	10,63	13,77	17,31	29%	26%
			02	4,08	4,34	4,62	6%	6%	5,15	5,72	6,33	11%	11%	5,37	6,02	6,70	12%	11%
		s70	01	10,03	11,54	13,14	15%	14%	14,14	17,27	20,71	22%	20%	17,37	22,02	27,22	27%	24%
			02	7,33	7,74	8,17	6%	5%	9,05	9,94	10,87	10%	9%	9,41	10,40	11,45	11%	10%
		s80	01	16,17	18,35	20,65	13%	13%	22,19	26,66	31,53	20%	18%	26,81	33,39	40,68	25%	22%
			02	12,22	12,83	13,45	5%	5%	14,83	16,13	17,49	9%	8%	15,38	16,83	18,34	9%	9%

Tabella A.C7.2-4 - Confronto dell'energia di impatto al frattile 90% per la muratura al piano primo al variare della luce del solaio

Valore massimo

Appendice C - Analisi di simulazione per la flessione verticale

Tabella A.C8 -	Confronto dell'	energia di im	natto al frattile 90%	per la muratura al 1	niano 1	orimo al variare della s	spinta della copertura 🛛 💻
1 40 0114 11 00	001111011100 0001	energie er mi					pinta acina copertaria

Ene	Energia al 90% frattile							S-LL									S-LP									S-CA		-		
Line	тgia аг 70 п п	//0 114	aune		L3			L4			L5			L3			L4			L5			L3			L4			L5	
	[KJ]			C-nSp	C-pSp	C-Sp	C-nSp	C-pSp	C-Sp	C-nSp	C-pSp	C-Sp	C-nSp	C-pSp	C-Sp	C-nSp	C-pSp	C-Sp	C-nSp	C-pSp	C-Sp									
		a 2 0	O1	0,08	0,08	0,06	0,12	0,12	0,08	0,16	0,16	0,11	0,19	0,19	0,12	0,29	0,29	0,17	0,40	0,40	0,24	0,27	0,27	0,17	0,42	0,41	0,26	0,59	0,59	0,37
		\$50	O2	0,04	0,04	0,02	0,06	0,05	0,03	0,07	0,07	0,04	0,09	0,09	0,04	0,13	0,13	0,06	0,17	0,17	0,07	0,10	0,10	0,05	0,14	0,14	0,06	0,19	0,19	0,08
		¢40	O1	0,19	0,19	0,14	0,26	0,26	0,18	0,34	0,34	0,23	0,41	0,41	0,26	0,60	0,59	0,37	0,82	0,81	0,50	0,56	0,56	0,37	0,84	0,84	0,54	1,17	1,17	0,75
		340	O2	0,11	0,11	0,07	0,13	0,13	0,08	0,16	0,16	0,09	0,21	0,21	0,11	0,28	0,28	0,13	0,36	0,36	0,16	0,24	0,23	0,12	0,32	0,32	0,15	0,41	0,41	0,18
		e50	O1	0,37	0,37	0,27	0,50	0,49	0,35	0,63	0,63	0,44	0,76	0,76	0,49	1,07	1,07	0,68	1,44	1,43	0,90	1,02	1,02	0,68	1,48	1,48	0,97	2,03	2,02	1,32
	мт	350	O2	0,22	0,22	0,15	0,27	0,27	0,17	0,32	0,32	0,19	0,42	0,41	0,23	0,54	0,53	0,27	0,68	0,67	0,32	0,46	0,46	0,24	0,60	0,60	0,30	0,76	0,76	0,36
	101-12	s60	O1	0,66	0,65	0,49	0,85	0,85	0,62	1,07	1,06	0,76	1,28	1,27	0,85	1,76	1,75	1,14	2,32	2,31	1,47	1,68	1,68	1,14	2,39	2,38	1,59	3,22	3,21	2,12
		300	O2	0,41	0,41	0,29	0,49	0,49	0,32	0,57	0,57	0,35	0,74	0,73	0,42	0,93	0,93	0,50	1,15	1,14	0,58	0,81	0,81	0,45	1,03	1,03	0,54	1,28	1,28	0,63
		\$70	O1	1,07	1,07	0,81	1,36	1,35	1,00	1,67	1,67	1,21	2,01	2,00	1,35	2,71	2,70	1,78	3,52	3,51	2,27	2,61	2,60	1,78	3,63	3,61	2,44	4,82	4,80	3,20
		370	O2	0,71	0,70	0,50	0,82	0,82	0,55	0,94	0,94	0,60	1,21	1,20	0,71	1,50	1,49	0,83	1,82	1,81	0,95	1,32	1,32	0,76	1,66	1,65	0,89	2,02	2,01	1,03
		s80	O1	1,65	1,65	1,27	2,05	2,05	1,54	2,50	2,49	1,83	3,00	2,99	2,05	3,98	3,96	2,65	5,10	5,08	3,32	3,84	3,83	2,66	5,25	5,23	3,57	6,88	6,86	4,62
		000	02	1,13	1,13	0,82	1,29	1,29	0,89	1,47	1,46	0,97	1,87	1,87	1,14	2,28	2,27	1,31	2,73	2,72	1,49	2,04	2,03	1,21	2,51	2,50	1,40	3,03	3,01	1,60
		s30	<u>O1</u>	0,10	0,10	0,08	0,13	0,13	0,10	0,17	0,17	0,12	0,20	0,20	0,13	0,28	0,28	0,18	0,37	0,37	0,24	0,26	0,26	0,18	0,38	0,38	0,26	0,52	0,52	0,35
		000	02	0,06	0,06	0,04	0,07	0,07	0,05	0,09	0,09	0,05	0,11	0,11	0,06	0,14	0,14	0,07	0,17	0,17	0,09	0,12	0,12	0,07	0,15	0,15	0,08	0,20	0,19	0,10
		s40	<u>O1</u>	0,25	0,25	0,19	0,31	0,31	0,24	0,39	0,39	0,29	0,45	0,45	0,31	0,61	0,61	0,41	0,80	0,79	0,53	0,58	0,58	0,41	0,82	0,81	0,57	1,09	1,08	0,74
			02	0,16	0,16	0,12	0,19	0,19	0,13	0,22	0,22	0,14	0,27	0,27	0,17	0,33	0,33	0,19	0,41	0,40	0,22	0,29	0,29	0,18	0,37	0,36	0,21	0,45	0,45	0,24
		s50	01	0,51	0,51	0,41	0,63	0,63	0,49	0,76	0,76	0,58	0,88	0,88	0,63	1,16	1,15	0,81	1,48	1,47	1,00	1,11	1,11	0,81	1,51	1,51	1,07	1,97	1,97	1,37
P3	M-P		02	0,36	0,36	0,28	0,41	0,41	0,30	0,46	0,46	0,32	0,56	0,55	0,36	0,67	0,67	0,41	0,80	0,80	0,47	0,60	0,60	0,38	0,73	0,73	0,44	0,88	0,88	0,50
		s60	01	0,95	0,95	0,78	1,14	1,14	0,91	1,35	1,35	1,05	1,55	1,54	1,14	1,99	1,98	1,42	2,49	2,48	1,73	1,92	1,91	1,42	2,55	2,54	1,84	3,26	3,25	2,31
			02	0,69	0,69	0,55	0,77	0,77	0,59	0,86	0,86	0,62	1,03	1,03	0,70	1,22	1,21	0,78	1,43	1,42	0,87	1,10	1,10	0,73	1,32	1,31	0,82	1,56	1,55	0,92
		s70	01	1,61	1,61	1,34	1,90	1,89	1,54	2,21	2,21	1,75	2,53	2,52	1,89	3,19	3,18	2,31	3,92	3,91	2,78	3,09	3,08	2,32	4,01	4,00	2,94	5,06	5,04	3,63
			02	1,22	1,22	0,98	1,34	1,34	1,04	1,47	1,47	1,10	1,75	1,74	1,23	2,04	2,03	1,35	2,35	2,34	1,49	1,87	1,86	1,28	2,19	2,18	1,42	2,55	2,54	1,57
		s80	01	2,56	2,56	2,15	2,98	2,97	2,44	3,42	3,42	2,75	3,91	3,90	2,97	4,84	4,82	3,57	5,87	5,85	4,22	4,71	4,70	3,58	6,01	5,99	4,46	7,46	7,44	5,43
			02	2,00	1,99	1,64	2,18	2,17	1,72	2,36	2,36	1,81	2,79	2,78	2,01	3,21	3,20	2,19	3,65	3,64	2,39	2,97	2,96	2,09	3,44	3,42	2,29	3,94	3,92	2,51
		s30	01	0,13	0,13	0,09	0,18	0,18	0,12	0,24	0,24	0,16	0,28	0,28	0,18	0,41	0,41	0,26	0,58	0,57	0,35	0,39	0,39	0,25	0,59	0,59	0,38	0,84	0,83	0,53
			02	0,07	0,07	0,04	0,09	0,09	0,05	0,11	0,10	0,06	0,14	0,14	0,07	0,19	0,19	0,09	0,25	0,24	0,11	0,15	0,15	0,08	0,21	0,21	0,10	0,28	0,28	0,12
		s40		0,30	0,30	0,22	0,40	0,40	0,28	0,51	0,51	0,36	0,61	0,61	0,40	0,87	0,87	0,55	1,18	1,1/	0,/3	0,82	0,82	0,55	1,21	1,21	0,80	1,67	1,67	1,09
			02	0,17	0,17	0,11	0,21	0,21	0,13	0,25	0,25	0,15	0,52	0,32	0,17	0,43	0,42	0,21	0,54	0,54	0,26	0,36	0,36	0,19	0,48	0,47	0,23	0,61	0,61	0,28
M-BO		s50	01	0,59	0,58	0,44	0,76	0,76	0,56	0,96	0,96	0,69	1,14	1,14	0,76	1,59	1,58	1,03	2,10	2,09	1,34	1,51	1,50	1,03	2,16	2,15	1,45	2,93	2,92	1,93
	M-BC		02	0,37	0,36	0,25	0,43	0,43	0,28	0,51	0,50	0,31	0,65	0,64	0,37	0,82	0,82	0,44	1,02	1,02	0,52	0,/1	0,/1	0,40	0,92	0,91	0,4/	1,15	1,14	0,56
		s60	01	1,04	1,04	0,80	1,32	1,32	0,99	1,64	1,63	1,19	1,94	1,93	1,32	2,63	2,62	1,/4	3,43	3,41	2,22	2,52	2,51	1,/4	3,52	3,51	2,39	4,/0	4,68	3,14
			02	0,69	0,68	0,49	0,80	0,79	0,54	0,92	0,91	0,59	1,16	1,15	0,69	1,44	1,43	0,81	1,76	1,/5	0,93	1,2/	1,26	0,74	1,59	1,58	0,87	1,95	1,94	1,00
		s70		1,/2	1,/1	1,54	2,14	2,13	1,62	2,60	2,59	1,92	3,08	3,07	2,13	4,09	4,08	2,75	5,24	5,22	3,45	3,94	3,93	2,76	5,39	5,57	3,70	7,08	7,05	4,79
			02	1,18	1,1/	0,87	1,35	1,34	0,94	1,53	1,52	1,02	1,92	1,91	1,19	2,34	2,33	1,36	2,81	2,79	1,55	2,09	2,08	1,26	2,5/	2,56	1,46	3,11	3,09	1,66
		s80		2,67	2,67	2,11	3,27	3,20	2,51	3,92	3,91	2,94	4,04	4,63	3,20 1.01	0,05	0,03	4,15	7,05	7,62	5,11	2,85	2,85	4,15	7,87	7,84	5,46	10,18	10,15	0,90

178

Appendice D

Analisi di simulazione per il meccanismo ad arco

Si presentano i risultati ottenuti eseguendo l'analisi di simulazione per il meccanismo ad arco (Tabelle A.D2, A.D3 e A.D4). Le variabili considerate con la relativa codifica adottata sono riportate in Tabella A.D1.

In Tabella A.D2 è riportato il confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare della tipologia di elemento resistente; per ogni tipo di elemento si evidenziano i valori di energia di impatto minimi e massimi.

In Tabella A.D.3 si illustra il confronto dell'energia di impatto per la parete quando cambia lo stato di conservazione; si evidenzia il decremento percentuale quando lo stato di conservazione cambia da "Buono" a "Sufficiente" e da "Sufficiente" a "Discreto".

In Tabella A.D.4 si presenta il confronto dell'energia di impatto al variare dello spessore della parete; si assegna una colorazione rosa di tonalità crescente a seconda dell'incremento dato dall'aumento dello spessore.

		Laterizio	-L			
Elemento resistente	Μ	Pietra	-P			
		Blocchi cemento	-BC			
		0,30 m	30			
	0,40 m					
C .		0,50 m	50			
Spessore muratura	s	0,60 m	60			
		0,70 m	70			
		0,80 m	80			
		Buono	-B			
Stato di conservazione	SC	Sufficiente	-S			
		Degrado	-D			

Tabella A.D1 - Codifica variabili considerate nel meccanismo ad arco

Valore massimo

			Energia [kJ]	
		M-L	M-P	M-BC
	SC-B	1,36	3,20	0,64
s30	SC-S	1,16	2,74	0,55
	SC-D	0,96	2,28	0,45
	SC-B	4,32	10,34	2,05
s40	SC-S	3,68	8,83	1,75
	SC-D	3,03	7,30	1,44
	SC-B	10,59	25,49	5,02
s50	SC-S	9,01	21,72	4,27
	SC-D	7,42	17,93	3,52
	SC-B	21,99	53,13	10,43
s60	SC-S	18,71	45,24	8,87
	SC-D	15,41	37,32	7,31
	SC-B	40,79	98,74	19,34
s70	SC-S	34,69	84,04	16,44
	SC-D	28,58	69,30	13,55
	SC-B	69,63	168,78	33,01
s80	SC-S	59,21	143,61	28,06
	SC-D	48,77	118,38	23,12

Tabella A.D2 - Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare del tipo di elemento resistente



Incremento massimo

		Е	nergia [k	;J]	Decremento da buono a	Scostamento dal valore	Decremento da sufficiente	Scostamento dal valore	
		SC-B	SC-S	SC-D	sufficiente	medio	a degrado	medio	ł
	M-L	1,36	1,16	0,96	-14,80%	-0,44%	-17,45%	-0,36%	l
s30	M-P	3,20	2,74	2,28	-14,38%	-3,23%	-17,05%	-2,64%	
	M-BC	0,64	0,55	0,45	-14,82%	-0,30%	-17,47%	-0,25%	
	M-L	4,32	3,68	3,03	-14,89%	0,16%	-17,54%	0,13%	l
s40	M-P	10,34	8,83	7,30	-14,66%	-1,37%	-17,32%	-1,12%	l
	M-BC	2,05	1,75	1,44	-14,90%	0,24%	-17,55%	0,20%	
	M-L	10,59	9,01	7,42	-14,93%	0,44%	-17,58%	0,36%	ł
s50	M-P	25,49	21,72	17,93	-14,78%	-0,53%	-17,44%	-0,43%	l
	M-BC	5,02	4,27	3,52	-14,94%	0,49%	-17,58%	0,40%	
	M-L	21,99	18,71	15,41	-14,95%	0,59%	-17,60%	0,48%	ł
s60	M-P	53,13	45,24	37,32	-14,85%	-0,08%	-17,50%	-0,07%	ł
	M-BC	10,43	8,87	7,31	-14,96%	0,62%	-17,60%	0,51%	
	M-L	40,79	34,69	28,58	-14,96%	0,67%	-17,61%	0,55%	l
s70	M-P	98,74	84,04	69,30	-14,89%	0,19%	-17,54%	0,15%	ł
	M-BC	19,34	16,44	13,55	-14,97%	0,70%	-17,62%	0,57%	
	M-L	69,63	59,21	48,77	-14,97%	0,73%	-17,62%	0,60%	ł
s80	M-P	168,78	143,61	118,38	-14,92%	0,36%	-17,57%	0,29%	
	M-BC	33,01	28,06	23,12	-14,97%	0,75%	-17,62%	0,62%	
					-14,86%		-17,51%		V m

Tabella A.D3 - Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare dello stato di conservazione



Incremento massimo

	M-L												
	SC-B	Increm.	SC-S	Increm.	SC-D	Increm.							
s30	1,36		1,16		0,96								
s40	4,32	218%	3,68	218%	3,03	218%							
s50	10,59	145%	9,01	145%	7,42	145%							
s60	21,99	108%	18,71	108%	15,41	108%							
s70	40,79	85%	34,69	85%	28,58	85%							
s80	69,63	71%	59,21	71%	48,77	71%							

	M-P													
	SC-B	Increm.	SC-S	Increm.	SC-D	Increm.								
s30	3,20		2,74		2,28									
s 40	10,34	223%	8,83	222%	7,30	221%								
s50	25,49	146%	21,72	146%	17,93	146%								
s60	53,13	108%	45,24	108%	37,32	108%								
s70	98,74	86%	84,04	86%	69,30	86%								
s80	168,78	71%	143,61	71%	118,38	71%								

	M-BC													
	SC-B	Increm.	SC-S	Increm.	SC-D	Increm.								
s30	0,64		0,55		0,45									
s40	2,05	218%	1,75	218%	1,44	217%								
s50	5,02	145%	4,27	145%	3,52	145%								
s 60	10,43	108%	8,87	108%	7,31	108%								
s70	19,34	85%	16,44	85%	13,55	85%								
s 80	33,01	71%	28,06	71%	23,12	71%								

Tabella A.D4 - Confronto dell'energia di impatto per la muratura al variare dello spessore della parete