



POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Edile - Architettura
Corso di Laurea in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

EFFETTI DEL RITIRO E DELLA TEMPERATURA SUL COMPORTAMENTO DI PANNELLI IN VETROCEMENTO

Relatore: Prof. Ing. Sara CATTANEO

Tesi di Laurea Specialistica di:
Alberto D'OCCHIO
Matricola 786706

Anno Accademico 2013/2014

Indice

Indice.....	3
Indice delle figure	6
Indice delle tabelle	10
Abstract.....	11

Capitolo 1

Introduzione	13
1.1. Obiettivi	15
1.2. Organizzazione dei contenuti.....	16

Capitolo 2

Stato dell'Arte	19
2.1. Il mondo delle facciate.....	19
2.2. Curtain Wall.....	26
2.2.1. Classificazione	28
2.3. Facciate in vetrocemento	34
2.3.1. Classificazione	35
2.3.2. Esempi di facciate in vetrocemento	38
2.4. Problematiche nella progettazione di facciate in vetrocemento	50
2.4.1. Effetti dovuti al ritiro del calcestruzzo.....	51
2.4.2. Effetti termici	57
2.4.3. Tipologia delle connessioni	59
2.5. Resistenza del Vetro	62
2.5.1. Struttura chimica del vetro	62
2.5.2. Proprietà meccaniche del vetro	65
2.5.3. classificazione degli elementi strutturali in vetro.....	70
2.5.4. Valutazione probabilistica della sicurezza.....	72

2.6. Il processo produttivo del mattone di vetro.....	75
 Capitolo 3	
Caso Studio.....	77
3.1. Materiali.....	79
3.1.1. Mattoni di vetro.....	79
3.1.2. Calcestruzzo.....	81
3.2. Modalità di produzione dei pannelli.....	81
3.2.1. Documentazione fotografica.....	83
 Capitolo 4	
Elaborazione Dati.....	85
4.1. Ritiro del calcestruzzo: modello analitico.....	86
4.2. Effetti termici.....	89
4.2.1. Modellazione in THERM 6.3.....	91
4.2.2. Linearizzazione delle isoterme.....	100
4.2.3. Considerazioni finali.....	100
4.3. Conessioni.....	101
4.4. Resistenza del mattone di vetro.....	103
 Capitolo 5	
Analisi agli Elementi Finiti dei Pannelli.....	105
5.1. Generazione del modello.....	106
5.1.1. Modellazione geometrie.....	106
5.1.2. Assegnazione delle proprietà dei materiali.....	108
5.1.3. Step costruttivi e tipologie di vincolo.....	110
5.2. Risultati dell'analisi FEM lineare.....	112
5.2.1. Considerazioni sui risultati dell'analisi FEM Lineare.....	118
5.3. Risultati dell'analisi FEM Non-Lineare.....	119
5.3.1. Considerazioni sui risultati dell'analisi FEM Non-Lineare.....	123

Capitolo 6

Valutazione Influenza dello Spessore del Calcestruzzo.....	125
6.1. Analisi dei pannelli con travetti da 4 cm	126
6.1.1. Analisi Lineare	129
6.1.2. Analisi Non-Lineare.....	132
6.2. Analisi dei pannelli con travetti da 2 cm	135
6.2.1. Analisi Lineare	136
6.2.2. Analisi Non-Lineare.....	138
6.3. Considerazioni riguardo all'influenza dello spessore di calcestruzzo..	140

Capitolo 7

Valutazione Influenza della Legge di Ritiro del Calcestruzzo.....	141
7.1. Variazione della curva di ritiro	142
7.2. Analisi dei pannelli con travetti da 8 cm con SRA.....	143
7.2.1. Analisi Lineare	144
7.2.2. Analisi Non-Lineare.....	145
7.3. Analisi dei pannelli con travetti da 4 cm con SRA.....	146
7.3.1. Analisi Lineare	147
7.3.2. Analisi Non-Lineare.....	147
7.4. Analisi dei pannelli con travetti da 2 cm con SRA.....	148
7.4.1. Analisi Lineare	149
7.4.2. Analisi Non-Lineare.....	149
7.5. Considerazioni riguardo all'influenza della legge di ritiro del calcestruzzo.....	150

Capitolo 8

Conclusioni	153
Bibliografia	157

Indice delle figure

Figura 1: Esempi di utilizzo del vetro mattone. In senso orario - R. Piano, <i>Maison Hermes</i> , Tokyo, 1998 – 2006 – Scorcio dell'ex fabbrica Rolla, Parco delle Gole del Breggia, Svizzera – interno del <i>Complesso Kursaal</i> , Montecatini Terme (Pistoia), 2004.	14
Figura 2: Estratto dalla UNI 8290-81 “Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia”.....	20
Figura 3: In senso orario - Mies van der Rohe, <i>Seagram Building</i> , New York, 1957 – R. B. Fuller, <i>Il Padiglione Americano</i> alla "Expo 67" di Montreal - K. Wachsmann, <i>The package house system, interno e dettagli di connessione</i> , 1942.....	22
Figura 4: J. Paxton, <i>Crystal Palace</i> , Londra, 1851.	24
Figura 5: R. Rogers & R. Piano, <i>Centre Pompidou</i> , Parigi, 1977.....	24
Figura 6: da sinistra - N. Foster, <i>30 st Mary Axe</i> , Londra, 1997-2004 - N. Foster, <i>Hearst Tower</i> , New York, 2003-2006 - R. Rogers, <i>Lloyd's Building</i> , Londra, 1978-1986.....	25
Figura 7: Jean Nouvel, <i>RBC Design Center</i> , Parigi, 2012.	25
Figura 8: Esempi di curtain wall – A: Metal curtain wall in vetro e alluminio – B: Curtain wall in legno e vetro – C: Curtain wall in pannelli di legno – D: Curtain wall con pannelli di terracotta – E: Window wal lintegrata in una struttura in calcestruzzo armato.....	29
Figura 9: A. Facciata a montanti e traversi o Stik System – B. Facciata metallica a telai – C. Facciata ad elementi o Unit System – D. Facciata strutturale.....	31
Figura 10: E. Facciata a pannelli o Panel System – F. Facciata a copertura dei pilastri – G. Facciata sospesa o Point Fixed.....	32
Figura 11: Esempio di progetto di curtain wall complessa (vista esterna, X-Ray e interna).....	33
Figura 12: Esempio di configurazione di facciata in vetrocemento messa in opera.....	36
Figura 13: Esempio di configurazione di pareti curve di vetro mattoni.....	37
Figura 14: Esempio di configurazione di facciata in vetrocemento a curtain wall con fissaggi puntuali.....	37
Figura 15: Esempio di configurazione di facciata in vetrocemento a curtain wall con sottostruttura metallica.....	38
Figura 16: Pierre Chareau, <i>Maison de Verre</i> , Parigi, 1928-1931.....	39
Figura 17: <i>Maison de Verre</i> . Vista interna.....	39
Figura 18: Pier Luigi Nervi, <i>Teatro Puccini</i> , Firenze, 1939-1940.....	40
Figura 19: Teatro Puccini. Viste notturne della facciata illuminata dopo la ristrutturazione ad opera degli architetti Ferrini & Davighi.....	41
Figura 20: Teatro Puccini. Particolari della torre di facciata.....	41
Figura 21: Studio Ulrich Wolf & Helge Pitz, <i>Deutsches Technikmuseum</i> , Berlino, 1982.....	42
Figura 22: Edificio Malecòn. Particolare della facciata continua.....	43
Figura 23: HOK International LTD, Edificio Malecòn, Buenos Aires, 1992-1999.....	44
Figura 24: Edificio Malecòn, Particolari dei pannelli in vetrocemento.....	44
Figura 25: Renzo Piano, <i>Maison Hermès</i> , Tokyo, 1998-2006.....	45
Figura 26: <i>Maison Hermès</i> . Particolari della facciata.....	46
Figura 27: Studio Moneo-Brock, Terme di Tiberio, Panticosa, 2005-2007.....	47
Figura 28: 5+1AA, <i>IULM Knowlwdge Transfer Center</i> , Milano, 2003-2013.....	48
Figura 29: <i>IULM Knowlwdge Transfer Center</i> . Vista dinamica serale.....	49
Figura 30: <i>IULM Knowlwdge Transfer Center</i> . Contesto.....	49

Figura 31: Ritiro del calcestruzzo in ambienti a differenti UR.	52
Figura 32: Effetti combinati del ritiro e legge di equilibrio associata al fenomeno.	53
Figura 33: Curve di ritiro ricavate dalla letteratura.	55
Figura 34: Flusso termico in una parete di vetrocemento standard.	59
Figura 35: Schema isostatico.	61
Figura 36: Schema Di Fissaggio Dei Pannelli.	61
Figura 37: Struttura chimica del vetro. Gruppo tetraedrico (a sinistra) e struttura a lungo raggio (a destra).	64
Figura 38: Confronto tra struttura cristallina e struttura amorfa.	64
Figura 39: Modello di cricca penny-shaped in un semispazio infinito.	66
Figura 40: Grafico per la determinazione del coefficiente Y in funzione della forma del fronte di cricca.	66
Figura 41: Esempio di cricca in stato avanzato di propagazione.	67
Figura 42: Determinazione di K_{mod} in funzione della durata del carico per vetri presollecitati.	70
Figura 43: Processo produttivo del mattone di vetro.	76
Figura 44: Caso di studio.	78
Figura 45: Elemento mattone di vetro DIAMANTE. Caratteristiche tecniche e geometriche.	80
Figura 46: Fasi di preparazione al getto - Posizionamento mattoni, armature e sponde.	83
Figura 47: Dettaglio - Inserimento delle boccole laterali.	83
Figura 48: Dettaglio - Posizionamento boccole di fissaggio del pannello.	83
Figura 49: Dettaglio - Legatura ferri di armatura nel punto di incontro tra correnti verticali e orizzontali.	83
Figura 50: Dettaglio - Completamento getto superiore.	84
Figura 51: Fase di maturazione del getto.	84
Figura 52: Dettaglio – Fine di maturazione del getto.	84
Figura 53: Dettaglio – Finitura di bordo del pannello.	84
Figura 54: Posizionamento verticale dei pannelli.	84
Figura 55: Dettaglio – Movimentazione tramite le boccole perimetrali.	84
Figura 56: Schema delle coazioni tra cls e vetro.	86
Figura 57: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R.	88
Figura 58: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 42.5R.	88
Figura 59: Umidità Relativa (1/4/2013-31/3/2013). Dati forniti dall'ARPA.	89
Figura 60: Temperatura (1/4/2013-31/3/2013). Dati forniti dall'ARPA.	90
Figura 61: Temperatura e umidità relativa (massima, minima, media e deviazione standard) in diversi periodi.	90
Figura 62: Rappresentazione grafica dei vettori di flusso termico all'interno del pannello (caso invernale).	91
Figura 63: Mattone in vetro SEVES modello Diamante, sezione.	92
Figura 64: Semplificazione della geometria reale.	93
Figura 65: Calcolo dell'area equivalente $A'=A$ e riduzione a caso di parete piana.	94
Figura 66: Verifica calcolo λ_{eq} tramite isoRef.	95
Figura 67: Geometria importata e conducibilità assegnate.	96
Figura 68: Isotherme e Infrarosso caso estivo.	98
Figura 69: Isotherme e Infrarosso caso invernale con ambiente interno non riscaldato.	98

Figura 70: Isoterme e Infrarosso caso invernale con ambiente interno riscaldato.....	99
Figura 71: Confronto tra i due casi invernali.....	99
Figura 72: Linearizzazione delle isoterme in CAD.....	100
Figura 73: Schema di fissaggio dei pannelli di facciata.....	102
Figura 74: Giunto siliconico tra i pannelli che compongono la facciata.....	102
Figura 75: Distribuzione delle tensioni in un elemento temprato chimicamente.....	104
Figura 76: Modello 3D del pannello di facciata e del mattone di vetro.....	106
Figura 77: Particolare dell'inserimento dei ferri di armatura e del posizionamento delle boccole nel modello.....	107
Figura 78: Proprietà geometriche degli elementi beam.....	107
Figura 79: Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.....	108
Figura 80: Curve di ritiro del calcestruzzo a 10000 e 180 giorni ricavate da CEB-FIB 1990.....	109
Figura 81: Proprietà meccaniche del vetro e dell'acciaio.....	109
Figura 82: Schema ad albero degli step costruttivi.....	110
Figura 83: Stage 1 – Schema vincolare.....	110
Figura 84: Stage 2 – Schema vincolare.....	111
Figura 85: Fase 1 – Deformata.....	112
Figura 86: Fase 1 – Andamento degli sforzi lungo l'asse x.....	112
Figura 87: Fase 1 – Andamento degli sforzi lungo l'asse y.....	113
Figura 88: Fase 2 – Deformata.....	113
Figura 89: Fase 2 – Andamento degli sforzi lungo l'asse x.....	114
Figura 90: Fase 2 – Andamento degli sforzi lungo l'asse y.....	114
Figura 91: Fase 3 – Andamento degli sforzi lungo l'asse y.....	115
Figura 92: Fase 3 – Andamento degli sforzi lungo l'asse y (picchi dovuti ai vincoli incastro).....	115
Figura 93: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (fronte e retro).....	116
Figura 94: Fase 5 – Deformata.....	117
Figura 95: Fase 5 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello.....	118
Figura 96: Vista del modello Non-Lineare.....	119
Figura 97: Stato tensionale pre-fessurazione delle barre di armatura.....	120
Figura 98: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (retro).....	121
Figura 99: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (fronte).....	121
Figura 100: Stato tensionale post-fessurazione delle barre di armatura.....	122
Figura 101: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione del cls.....	123
Figura 102: Spaccato 3D dello stato post-fessurazione nella zona di contatto con la fessura.....	124
Figura 103: Modello lineare semplificato - Schema vincolare e confronto tra travetto da 8 cm e 4 cm.....	126
Figura 104: Fase 2 - stato tensionale del modello lineare semplificato.....	127
Figura 105: Modello semplificato - Fase 3 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 8 cm e 4 cm.....	128
Figura 106: Modello semplificato - Fase 4 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 8 cm e 4 cm.....	128
Figura 107: Schema delle azioni sul blocco di vetro.....	129
Figura 108: Fase 1 - Andamento degli sforzi lungo l'asse x (travetto da 4 cm).....	129
Figura 109: Fase 2 - Andamento degli sforzi lungo l'asse x (travetto da 4 cm).....	130
Figura 110: Fase 3 - Andamento degli sforzi lungo l'asse y (travetto da 4 cm).....	130

Figura 111: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 4 cm).	131
Figura 112: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Confronto tra casi con travetti da 4 cm a destra e 8 cm a sinistra.	132
Figura 113: Stato tensionale pre-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 4 cm).	132
Figura 114: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (travetto da 4 cm).	133
Figura 115: Stato tensionale post-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 4 cm).	133
Figura 116: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all’interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 4 cm).	134
Figura 117: Modello semplificato - Fase 3 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 4 cm e 2 cm.	135
Figura 118: Modello semplificato - Fase 4 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 4 cm e 2 cm.	135
Figura 119: Fase 2 - Andamento degli sforzi lungo l’asse x (travetto da 2 cm).	136
Figura 120: Fase 3 - Andamento degli sforzi lungo l’asse y (travetto da 2 cm).	136
Figura 121: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 2 cm).	137
Figura 122: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Confronto tra casi con travetti da 2 cm a destra e 4 cm a sinistra.	137
Figura 123: Stato tensionale pre-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 2 cm).	138
Figura 124: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (travetto da 2 cm).	138
Figura 125: Stato tensionale post-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 2 cm).	139
Figura 126: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all’interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 2 cm).	139
Figura 127: Andamento dei picchi di tensione sul vetro in funzione dello spessore di cls.	140
Figura 128: Curve di ritiro del calcestruzzo a 10000 giorni, con SRA a destra e senza a sinistra, ricavate da CEB-FIB 1990.	142
Figura 129: Modello semplificato - Fase 4 - Andamento degli sforzi - Caso di studio con aggiunta di SRA.	143
Figura 130: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Aggiunta di SRA al caso di studio.	144
Figura 131: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (caso di studio con SRA).	144
Figura 132: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all’interfaccia con la superficie di fessurazione (caso di studio con SRA).	145
Figura 133: Modello semplificato - Fase 4 - Andamento degli sforzi - Modello con travetto da 4 cm con aggiunta di SRA.	146
Figura 134: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Aggiunta di SRA al caso con travetto da 4 cm.	146
Figura 135: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 4 cm con SRA).	147

Figura 136: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 4 cm con SRA).....	147
Figura 137: Modello semplificato - Fase 4 - Andamento degli sforzi - Modello con travetto da 2 cm con aggiunta di SRA.....	148
Figura 138: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Aggiunta di SRA al caso con travetto da 2 cm.	149
Figura 139: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 2 cm con SRA).....	149
Figura 140: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 2 cm con SRA).....	150
Figura 141: Andamento dei picchi di tensione sul vetro in funzione dello spessore di cls, con aggiunta di SRA (rosso) e senza additivi antiritiro (blu).....	151

Indice delle tabelle

Tabella 1: Valori di K_{mod} per differenti durate del carico.....	69
Tabella 2: Classificazione degli elementi strutturali in vetro	72
Tabella 3: Valori della resistenza caratteristica a flessione delle diverse tipologie di vetro.	75
_Toc404804330	

Abstract

Il mattone di vetro trova collocazione nel mondo delle costruzioni grazie alle proprietà intrinseche di trasparenza e modularità. Tuttavia viene in genere utilizzato in associazione con altri materiali quindi è opportuno indagare a fondo gli elementi peculiari che governano il comportamento di tale materiale in configurazioni particolarmente critiche.

La leggerezza e la trasparenza, infatti, sono solo gli aspetti positivi di un materiale affascinante come il vetro, che d'altro canto ha un comportamento fragile per eccellenza e una forte dipendenza dalla presenza di difetti.

Lo scopo di questa tesi è indagare tutti i possibili fattori che possano causare la rottura dei mattoni di vetro di un'opera in vetrocemento, al fine di ottenere delle prescrizioni valide come riferimento per eventuali progetti futuri.

In particolare ci si sofferma inizialmente sullo stato dell'arte e, nello specifico, si dà ampio spazio ad una ricerca dei possibili effetti negativi dovuti al ritiro del calcestruzzo, al carico termico e alle condizioni di vincolo. Si tratta inoltre dettagliatamente il materiale vetro, dalla composizione chimica ai meccanismi che ne regolano la resistenza sulla base del modello della Meccanica della Frattura Elastica Lineare.

Le prescrizioni progettuali vengono stilate sulla base dei risultati ottenuti tramite accurate analisi agli elementi finiti, effettuate su un caso di studio reale che ha mostrato fenomeni di danneggiamento degli elementi in vetro.

Le analisi vengono condotte su pannelli prefabbricati in vetrocemento in una configurazione particolarmente critica (custom curtain wall panel system ad elementi fissati iperstaticamente ad una sottostruttura metallica), a seguito di una dettagliata elaborazione dei dati in cui vengono presentati:

- Un modello analitico in campo elastico lineare del ritiro del calcestruzzo, al fine di prevedere l'evoluzione del fenomeno fessurativo e gli effetti a lungo termine.
- Un'ulteriore analisi agli elementi finiti sugli aspetti termofisici, al fine di valutare l'andamento delle isoterme all'interno del pannello responsabili della non linearità del carico termico.
- Un'indagine delle condizioni di vincolo durante tutte le fasi di produzione (dal getto in officina alla posa in opera in cantiere) al fine di determinare con precisione le condizioni al contorno da implementare.
- Un calcolo della resistenza del vetro sulla base di una classe di verifica di livello I agli stati limite.

Le analisi FEM presentate sono sia lineari che non-lineari e sono state condotte valutando, dapprima separatamente e successivamente in maniera congiunta, l'influenza dello spessore dei travetti e gli effetti dovuti alla legge di ritiro del calcestruzzo (simulando l'utilizzo di additivi antiritiro), studiandone l'evoluzione nelle diverse fasi:

I risultati ottenuti possono risultare di notevole interesse applicativo e forniscono dei riferimenti progettuali per un corretto utilizzo del vetro mattone in diverse possibili configurazioni.

Capitolo 1

Introduzione

Il vetrocemento nel settore delle costruzioni compare per la prima volta all'inizio del XX secolo. La sua nascita è strettamente legata allo sviluppo industriale di quegli anni che, grazie alle nuove tecnologie e alle rivoluzionarie metodologie di produzione, dà luogo ad una crescita esponenziale di nuovi prodotti disponibili in primis per l'industria e, successivamente, per le costruzioni.

Partendo dall'esigenza di ottenere un materiale che permettesse il passaggio di luce, senza rinunciare alla privacy, nacque il mattone di vetro. Questo nuovo componente univa alle intrinseche caratteristiche di trasparenza, la comodità dell'utilizzo di un elemento modulare, sia per il trasporto che per lo stoccaggio e la posa in opera in cantiere: fu così possibile ridurre i costi dovuti alla fornitura rispetto alle classiche vetrate ad infissi. Inoltre la massa superficiale molto più elevata rispetto a quella di una semplice finestra permetteva di ottenere un migliore isolamento acustico da rumori non impattivi. Infine la camera d'aria presente tra le formelle di vetro garantiva un buon isolamento termico.

Grazie a queste caratteristiche inizialmente il vetrocemento si sviluppò per ottenere grossi punti luce nei nuovi capannoni e negli edifici industriali.

Considerato per molti anni un materiale povero e privo di fascino, negli ultimi anni il vetrocemento è riapparso nel mondo dell'architettura e del design grazie alle sue caratteristiche di versatilità e alle novità introdotte dai produttori di mattoni di vetro quali, a titolo di esempio, la colorazione delle formelle di vetro, la creazione di pezzi speciali e di geometria variabile e l'utilizzo di materiali pregiati e di prima qualità.

Il vetrocemento viene oggi utilizzato sia nelle opere di interior design, allo scopo di ottenere partizioni interne di qualsiasi forma e colore, sia nelle opere

architettoniche e di ingegneria delle facciate per comporre delle chiusure verticali od orizzontali funzionali alle esigenze più disparate (Figura 1).

Nell'architettura moderna il mattone in vetro è diventato un prodotto destinato al mercato alto, non più oggetto di servizio, ma soggetto autonomo, che esprime e valorizza in pieno tutte le sue potenzialità anche come oggetto d'arredo, adatto alle realizzazioni ad alto profilo estetico-formale. Numerose sono state fino ad oggi le grandi realizzazioni che hanno scelto la trasparenza, la modularità e la resistenza strutturale del mattone di vetro come cifra distintiva: il *Palazzo Hermes* (Figura 1) della Renzo Piano Building Workshop a Tokyo (Giappone), le *Terme di Tiberio* dello studio Moneo-Brock a Panticosa (Spagna), il *Technology Museum* dello studio Ulrich Wolf & Helge Pitz a Berlino (Germania) e la *Torre Malecòn*, Buenos Aires (Argentina), che nel 2002 è stata dichiarata, dalla commissione per l'ambiente dell'American Institute of Architects (AIA), uno dei dieci migliori esempi di architettura sostenibile.



Figura 1: Esempi di utilizzo del vetro mattone. In senso orario - R. Piano, *Maison Hermes*, Tokyo, 1998 – 2006 – Scorcio dell'ex fabbrica Rolla, Parco delle Gole del Breggia, Svizzera – interno del *Complesso Kursaal*, Montecatini Terme (Pistoia), 2004.

1.1. Obiettivi

Alla luce di questa riscoperta del mattone di vetro nel settore delle costruzioni e delle nuove modalità di utilizzo, che ne valorizzano le peculiarità e che lo porteranno ad assumere sempre più importanza a livello architettonico, è opportuno effettuare uno studio sistematico del comportamento meccanico di tale materiale.

Lo scopo di questa trattazione, infatti, non è quello di promuovere le caratteristiche estetico-formali del vetro mattone, quanto quello di fornire delle direttive, generalmente valide, che possano essere di riferimento e di ausilio per la progettazione di un'opera in mattoni di vetro, con particolare riferimento agli elementi prefabbricati.

In particolare verranno analizzati gli elementi progettuali e i principali fattori che regolano il comportamento strutturale di una facciata composta da pannelli prefabbricati in vetrocemento, con riferimento ad un caso reale che ha mostrato fenomeni di danneggiamento degli elementi in vetro.

Nello specifico verranno analizzati:

- Caratteristiche fisico-chimiche dei materiali.
- Influenza sul comportamento meccanico dello spessore dei correnti in calcestruzzo.
- Conseguenze negative dovute al ritiro del calcestruzzo.
- Effetti del carico termico da imputarsi ad una differenza di temperatura.

1.2. Organizzazione dei contenuti

Capitolo 2

Dopo un breve excursus sulla storia dell'architettura, per comprendere gli sviluppi del processo progettuale e delle tendenze estetiche e comunicative che riguardano il mondo delle facciate al giorno d'oggi, vengono presentati alcuni esempi di edifici in cui il mattone di vetro è stato il protagonista di una logica formale di trasparenza e tecnologia.

Successivamente si elencano tutti quegli aspetti che possono risultare problematici, a livello progettuale ed esecutivo, per una facciata in vetrocemento. Infine viene indagato dettagliatamente il comportamento a rottura del vetro, partendo dalle caratteristiche chimico-fisiche del materiale, fino ad arrivare alle verifiche di sicurezza che vengono imposte dalla normativa tecnica vigente.

Un piccolo spazio è stato concesso anche al processo produttivo del mattone di vetro, in modo tale da avere un quadro di riferimento sullo stato dell'arte completo ed esaustivo.

Capitolo 3

Viene presentato il caso di studio su cui sono state svolte le analisi.

In particolare ci si sofferma, oltre che sugli aspetti geometrici, sulle caratteristiche dei materiali e sulle informazioni inerenti ad essi ricavate dai rapporti di prova e dal progetto esecutivo.

Infine si riporta tutto il processo produttivo dei pannelli prefabbricati in officina, con relativa documentazione fotografica annessa.

Capitolo 4

Ci si sofferma sulle analisi propedeutiche, derivanti da una rielaborazione di tutti i dati in possesso, effettuate al fine di determinare delle condizioni al contorno, il

più possibile coincidenti con la realtà, da inserire nelle successive analisi agli elementi finiti.

In particolare vengono riportati:

- Un modello analitico in campo elastico-lineare che considera le azioni generate dal ritiro del calcestruzzo.
- L'analisi dettagliata delle condizioni termo igrometriche, responsabili dell'andamento delle isoterme e degli effetti termici che ne derivano.
- Le tipologie di vincolo.

Capitolo 5

Vengono presentati i risultati delle analisi agli elementi finiti effettuate sul caso di studio.

Dopo una breve spiegazione sulle modalità di generazione del modello, si presentano l'analisi lineare e quella non-lineare con le rispettive considerazioni ed osservazioni.

Capitolo 6

Si indaga l'influenza dello spessore del calcestruzzo sul comportamento meccanico dei pannelli.

Nello specifico vengono presentate alcune analisi in cui si mostra il miglioramento delle condizioni di sforzo come conseguenza di una riduzione dello spessore dei travetti. Anche in questo caso, sia i risultati delle analisi lineari, che quelli delle analisi non-lineari, vengono discussi e commentati.

Capitolo 7

Viene valutata l'influenza della legge di ritiro del calcestruzzo sullo stato tensionale dei mattoni di vetro, al fine di simulare l'aggiunta di additivi antiritiro all'interno del conglomerato cementizio.

Attraverso delle brevi considerazioni finali, viene effettuato il confronto con le situazioni precedentemente analizzate.

Viene inoltre esposto un quadro riassuntivo di tutti i risultati ottenuti

Capitolo 8

Si riassumono le conclusioni ottenute sulla base delle precedenti considerazioni, al fine di evidenziare l'effetto dei vari parametri (spessore dei travetti di calcestruzzo ed entità del ritiro) sui risultati ottenuti.

Capitolo 2

Stato dell'Arte

Per poter comprendere a fondo come le facciate di vetro mattoni si inseriscano nel mondo delle costruzioni, è necessario effettuare una breve carrellata riassuntiva sulle diverse tipologie di facciata. In particolare ci si sofferma sulle specifiche architettoniche ed ingegneristiche delle curtain-wall, per effettuare un'analisi funzionale ed una classificazione in cui inserire una facciata in pannelli prefabbricati di vetrocemento.

È d'obbligo sottolineare inoltre come non esistano studi sistematici ed articolati sul vetro mattone riguardanti le caratteristiche specifiche dei materiali e le problematiche strutturali legate ad essi¹.

Non avendo a disposizione dei case-study si è deciso di fondare le basi di questa trattazione su alcuni esempi di architetture che hanno fatto di questo materiale il loro segno caratteristico.

Si procederà successivamente ad elencare alcune problematiche specifiche da dover considerare nella progettazione di una facciata in vetrocemento.

2.1. Il mondo delle facciate

All'interno della normativa tecnica vigente non si trova una definizione specifica di "facciata".

Partendo dalla UNI 8290-81, di cui si riporta un estratto in Figura 2, si può notare come all'interno di una scomposizione tecnologica per caratteristiche funzionali, la facciata rientri nella classe definita "chiusura verticale", con la relativa definizione.

¹ Per una ricerca specifica sull'evoluzione del vetro mattone e la sua valenza estetica: Rossella Corrao, *Glassblock and Architecture. Evoluzione del vetro mattone e recenti applicazioni*, Alinea Editrice, 2010.

Termine	Definizione
chiusura	Insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.
chiusura verticale	Insieme degli elementi tecnici verticali del sistema edilizio aventi funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno.

Figura 2: Estratto dalla UNI 8290-81 “Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia”.

Questa definizione risulta però limitata alla pura funzione di separazione tra ambiente interno ed esterno.

Una facciata ha invece delle peculiarità non riconducibili ad un mero compito di separazione, bensì, in una prospettiva più ampia, di integrazione con l'ambiente esterno e dialogo con lo spettatore che, grazie ad essa, riesce a rapportarsi con gli ambienti interni.

La facciata dunque non è solamente la componente dell'edificio che si rivolge verso i lati esterni, ma *“in particolare quel prospetto principale [...] che si affaccia verso una piazza o via di maggiore importanza”*², essa non è una barriera con funzioni prettamente tecnologiche, ma racchiude in sé l'espressione ed il carattere dell'intero edificio.

Nella storia delle costruzioni la facciata ha svolto ruoli comunicativi e funzionali differenti, dalle facciate a colonne dei templi dell'antica Grecia, che di certo non svolgevano la funzione di separazione tra ambiente interno ed esterno, ma piuttosto di filtro, a quelle delle chiese paleocristiane prima e gotiche poi, in cui l'elemento caratterizzante era il richiamo alle navate interne, fino ad arrivare al periodo barocco, in cui la facciata diventa puro oggetto della scenografia urbana e gioca un ruolo autonomo rispetto agli ambienti interni.

Nel percorso evolutivo della facciata moderna, un ruolo fondamentale fu svolto dalla Scuola di Chicago, grazie all'opera di architetti come William Le Baron Jenney, Louis Sullivan, lo studio Holabird & Roche. Il Tacoma Building del

² *Enciclopedia Tematica “L'Universale” – Architettura*, Garzanti, 2004, Vol. 1

1884 è la prima realizzazione dove la facciata viene applicata alla struttura portante dell'edificio³ (curtain wall).

Con la nascita dell'architettura razionalista, all'inizio del Novecento, la composizione degli edifici si articola su più prospetti, non necessariamente differenziati per importanza, in cui *“tutte le superfici esterne, delimitanti l'edificio, divennero diversi aspetti di un unico oggetto plastico”*⁴.

Per arrivare al concetto di facciata come lo si intende oggi bisogna passare per il Produttivismo degli anni '50 fino ad arrivare all'High-Tech che, nato negli anni '70, domina tutt'ora la scena dell'architettura mondiale dagli anni '80.

Il produttivismo si basa sull'opera di tre architetti:

- L. Mies van der Rohe che fonda i suoi progetti sui principi di “Less is More” e “God is in the details” (concetto molto importante per l'avvento dell'High-Tech), espressi, ad esempio, attraverso un uso ripetitivo di elementi a cortina nel Seagram Building del 1956 (Figura 3);
- Richard Buckminster Fuller e il suo principio di ottenere il massimo col minimo sforzo espresso nelle cupole geodetiche (Figura 3);
- Konrad Wachsmann che, attraverso il suo particolare interesse per la prefabbricazione e la ricerca del modulo di base adatto a tutte le esigenze, diventa il principale teorico del produttivismo.

Da un punto di vista teorico, il produttivismo afferma la composizione delle forme attraverso elementi costruttivi prefabbricati e che *“gli aspetti espressivi dell'architettura siano ridotti idealmente alla sola forma produttiva o Produktform”*⁵.

Altri aspetti interessanti di questo movimento, che trovano riscontro in molti iter progettuali odierni in cui la facciata diventa la massima espressione dell'edificio, sono la totale decontestualizzazione rispetto al contorno e la neutralità formale.

³ Con la scuola di Chicago appare per la prima volta anche lo spandrel, il pannello cieco generalmente collocato in corrispondenza del solaio.

⁴ *Enciclopedia Tematica “L'Universale” – Architettura*, Garzanti, 2004, Vol. 2.

⁵ *Idem*, Vol 2.

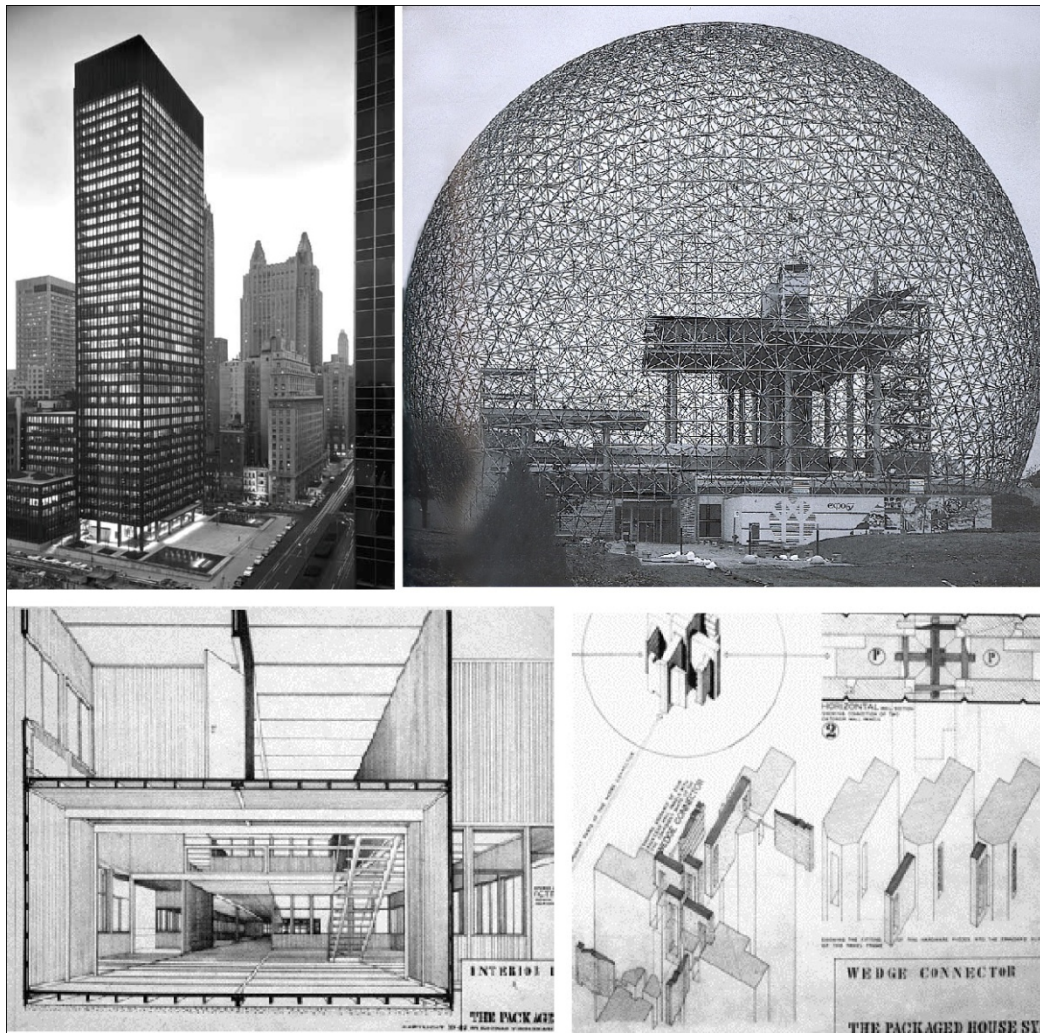


Figura 3: In senso orario - Mies van der Rohe, *Seagram Building*, New York, 1957 – R. B. Fuller, *Il Padiglione Americano* alla "Expo 67" di Montreal - K. Wachsmann, *The package house system*, interno e dettagli di connessione, 1942.

In questa corrente produttivista, soprattutto nell'ambito della cultura americana, si distinguono due aspetti principali di un edificio: la struttura (lo scheletro) ed il rivestimento (la pelle), ovvero quegli elementi fondanti che riguardano tutto il mondo delle facciate moderne, che vengono appunto intese come pelle dell'edificio.

L'architettura High-Tech viene sviluppata invece a partire dagli anni settanta principalmente da Norman Foster e Richard Rogers e trova applicazione

soprattutto su opere di grande scala (Figura 6), quali grattacieli e grandi complessi commerciali o polifunzionali, come il “Centre Pompidou” di Parigi (Figura 5), che grazie ad una presentazione di Dennis Sharp del 1980, diventa il simbolo di questa corrente di idee⁶.

Partendo dall’opera del “giardiniere” Joseph Paxton, che nel 1851 realizzò il Crystal Palace a Londra (Figura 4), l’architettura High-Tech cresce in seno al produttivismo e ne rielabora i contenuti, adattandoli al tempo presente, proponendo un approccio real-time, con l’ausilio fondamentale della computer grafica e uno sguardo sempre attento ai metodi industriali più avanzati.

“La concezione dell’architettura High-Tech, intrinsecamente legata al progresso tecnico, è basata sull’utilizzo diffuso ed esplicito di elementi ingegneristici e tecnologici e sull’esaltazione delle loro potenzialità espressive”⁷, inoltre ricerca la maggior trasparenza possibile tra interno ed esterno, per rendere visibile l’organizzazione e la modalità di fruizione degli spazi nel complesso.

In pratica vengono così messi a nudo tutti i sottosistemi tecnologici che compongono l’edificio, attraverso una pelle resa trasparente da un cospicuo e ricercato utilizzo del vetro.

A titolo di completezza va ricordata la variante High-Tech introdotta da Jean Nouvel (Figura 7) che propone un approccio di *“tutta trasparenza e precisione, sottraendo l’edificio alla complicazione tecnologica per restituirlo ad un filone capace di trasformare l’assenza, il riflesso, in poesia”⁸* ricollegandosi alle lezioni di Mies van der Rohe.

Numerose sono al giorno d’oggi le opere che attribuiscono alla facciata un particolare ruolo comunicativo e che attraverso i dettagli tecnici, appositamente studiati, esprimono il carattere e la complessità dell’intera costruzione, seppur

⁶ È certamente curioso quanto lo stesso Renzo Piano affermi riguardo a questo progetto: *“Ho capito, costruendo il Beauburg di essere un architetto artigiano [...] Il Beauburg non è affatto ciò che si crede che sia di primo acchito, cioè l’impressione di una tecnologia industriale avanzata, direi piuttosto il contrario: un grosso manufatto artigianale. L’edificio è stato costruito con metodi industriali, ma ci sono molti pezzi fatti a mano”*. Intervista a Renzo Piano in *L’Architecture d’Aujourd’hui* n. 212, dedicato a *Verre et Acier, High-Tech architecture?*, 1980.

⁷ *Enciclopedia Tematica “L’Universale” – Architettura*, Garzanti, 2004, Vol. 1

⁸ A. Muntoni, *Lineamenti di storia dell’architettura contemporanea*, Laterza, 1997, pag. 352.

talvolta gli stessi artefici di tali opere rifiutino l'appellativo di architetti High-Tech, come se il lavorare sull'aspetto costruttivo dell'edificio sia un fatto importante, ma non esaustivo delle finalità del progetto.

Ricerca del modulo, cura dei dettagli, prefabbricazione, tecnologia e trasparenza sono dunque le caratteristiche principali delle facciate contemporanee, che trovano la loro naturale espressione nelle curtain wall, essendo esse componibili in variazioni libere indipendenti dalla struttura primaria dell'edificio, e nell'utilizzo di una moltitudine di materiali abbinati immancabilmente al principe della modernità: il vetro.



Figura 4: J. Paxton, *Crystal Palace*, Londra, 1851.

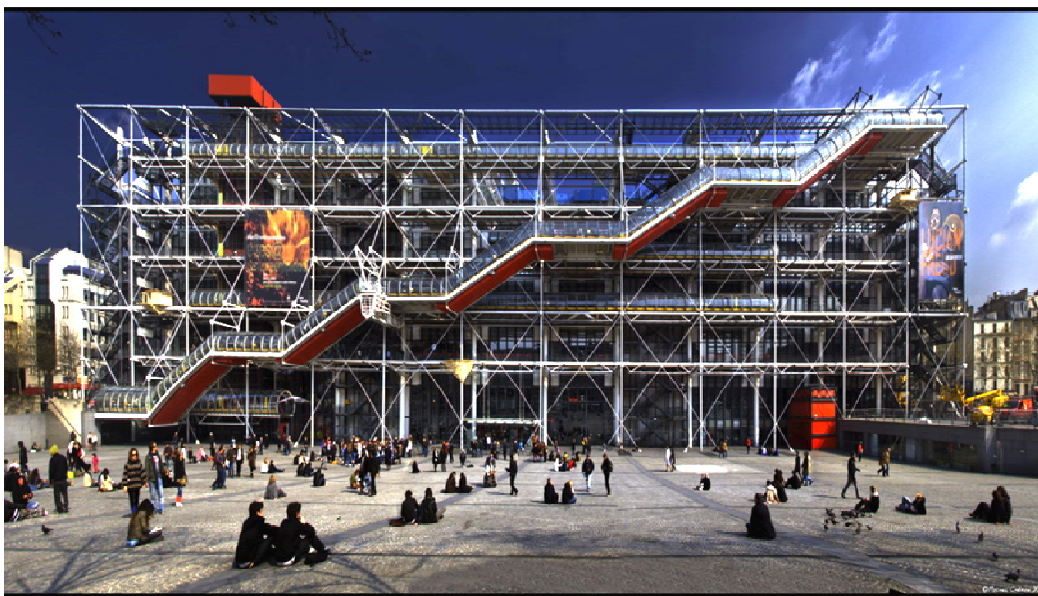


Figura 5: R. Rogers & R. Piano, *Centre Pompidou*, Parigi, 1977.



Figura 6: da sinistra - N. Foster, *30 st Mary Axe*, Londra, 1997-2004 - N. Foster, *Hearst Tower*, New York, 2003-2006 - R. Rogers, *Lloyd's Building*, Londra, 1978-1986.

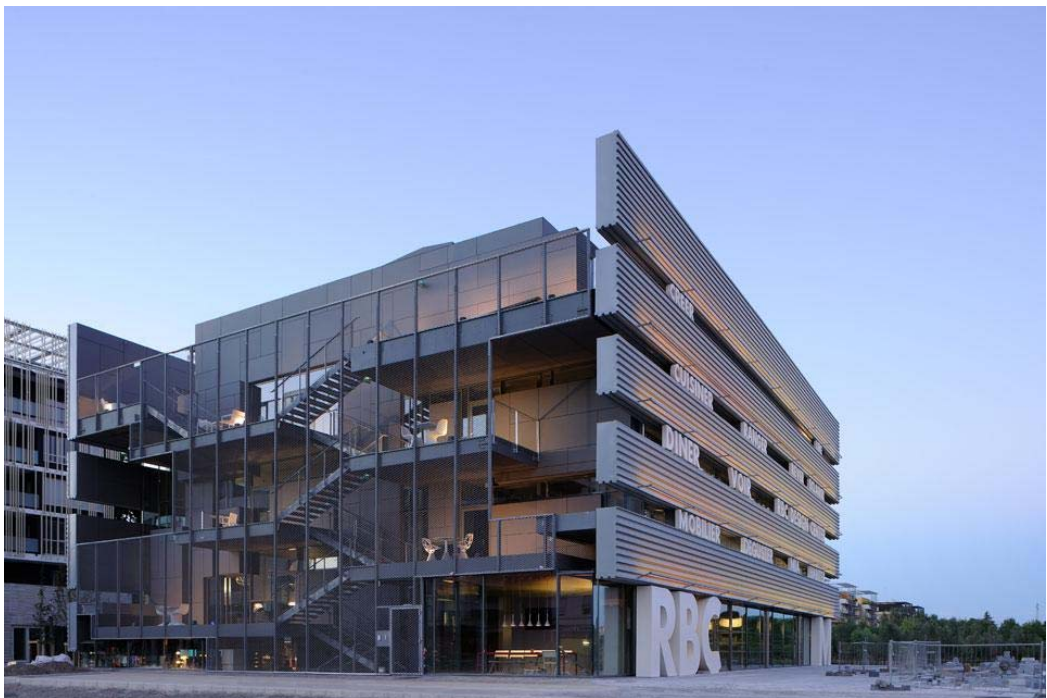


Figura 7: Jean Nouvel, *RBC Design Center*, Parigi, 2012.

2.2. Curtain Wall

La curtain wall rappresenta la conclusione di un processo evolutivo su larga scala, dovuto all'intervento di svariati fattori, tutti collegati tra loro dal progresso tecnico ed in diversa misura influenzati dalla cultura e dall'evoluzione delle poetiche architettoniche.

Per questo motivo e per altri, è molto difficile trovare una definizione univoca di curtain wall, o comunque che esaurisca tutte le funzioni e le caratteristiche ad essa legate⁹.

Tutte le fonti¹⁰ però concordano su alcuni aspetti comuni che la caratterizzano in maniera univoca:

- sistema di pareti non portanti¹¹,
- elementi modulari ripetuti,
- prefabbricazione e processi produttivi legati alla produzione industriale,
- organizzazione sistematica delle progettazioni dal dettaglio all'insieme (o viceversa),
- funzione di separazione tra interno ed esterno,
- regolazione ambientale.

Si riporta di seguito solamente un esempio tratto dalla letteratura anglosassone in cui, a differenza di altre definizioni, che si soffermano principalmente sugli aspetti sopra riportati, si fa un accenno alla modalità di trasferimento dei carichi e al posizionamento al filo esterno della struttura: "*Curtain walling may be*

⁹ "La denominazione (curtain wall) assume talvolta un significato non totalmente rigoroso perché introdotta da tempo relativamente breve, sia perché riferita a una tipologia in continuo arricchimento oscillante variamente intorno a un prodotto ideale". *Enciclopedia dell'Architettura Moderna*, Garzanti, 1967, pag. 106.

¹⁰ Si rimanda alla bibliografia per un elenco esaustivo delle fonti utilizzate. Si fa notare come per la ricerca di tale definizione non siano state utilizzate riviste o articoli specialistici, quanto esclusivamente enciclopedie, libri di testo universitari e normative comunitarie e internazionali.

¹¹ La normativa tecnica italiana (UNI 8369/2 "Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia") definisce, in base alla funzione caratteristica, 'parete portata' una soluzione costruttiva caratterizzata dall'assenza di uno strato portante appartenente all'intero edificio. Definisce inoltre, in base alla collocazione rispetto alla struttura portante, la 'parete cortina' in cui tutti gli strati funzionali si pongono esternamente agli elementi componenti la struttura dell'edificio.

*defined as being non-loadbearing walls, usually suspended in front of structural frame; their own deadweight and wind loadings being transferred to the structural frame through anchorage points. Usually they consist of rectangular grid of vertical or horizontal framing with infill panels of glass or some other lightweight panel; but that is not always so for the term 'curtain walling' encompassed a wide variety of system"*¹².

In italiano per tradurre il termine curtain wall si preferisce, alla trasposizione letterale di 'muro cortina' o 'muro tenda', la dizione 'facciata continua', facendo esplicito riferimento alla continuità materica e geometrica tipica di queste pareti perimetrali.

Attraverso l'evoluzione di alcuni processi industriali, come per esempio il deposito di ossidi di argento sulle superfici delle lastre per rendere i vetri basso emissivi, o l'evoluzione dei materiali isolanti come l'aerogel, è oggi possibile progettare e produrre facciate continue con notevoli caratteristiche isolanti, sia termiche che acustiche. Il posizionamento all'estradosso della struttura portante permette una continuità fisico-geometrica che rende facile la risoluzione dei ponti termici ed acustici, fino ad ottenerne un totale annullamento¹³. Inoltre l'intrinseca leggerezza di questa soluzione tecnica permette di sgravare la struttura primaria di un ulteriore peso, rendendola più snella e regolare, essendo meno vincolata alle logiche estetico-formali. Infine *"l'applicazione del curtain wall consente un notevole risparmio di tempi e costi di produzione, grazie alla serialità, alla rapidità di montaggio e alla leggerezza e maneggevolezza degli elementi"*¹⁴.

¹² A. J. Brookes, *Cladding of buildings*, Construction Press, Londra 1983, pag. 181.

¹³ Si intende nullo il ponte termico al netto del calcolo della U_{cw} (trasmissione complessiva della curtain wall). Può accadere che i ponti termici siano addirittura negativi, ovvero migliorativi delle caratteristiche globali della facciata rispetto al comportamento dei singoli pannelli che la compongono.

¹⁴ *Enciclopedia Tematica "L'Universale" – Architettura*, Garzanti, 2004, Vol. 1.

La rapidità di montaggio può essere contestata per alcune realizzazioni particolarmente complesse. È incontrovertibile invece per tutte quelle tipologie a cellule che non necessitano nemmeno dei ponteggi esterni per la posa in opera, contribuendo così ad una diminuzione dei costi per la sicurezza in cantiere, aumentando per altro la salvaguardia degli operatori.

Tutto ciò, unito alle infinite possibilità di assemblaggio degli elementi e dei materiali per comporre opere dotate di un particolare pathos ed una notevole carica comunicativa, hanno reso la curtain wall un fondamentale alleato dei progettisti, contribuendo alla sua diffusione su larga scala.

2.2.1. Classificazione

Così come si trova una certa difficoltà nel trovare una definizione univoca ed esaustiva di curtain wall, altrettanto si può dire per quanto riguarda la classificazione tipologica. Infatti, anche a livello internazionale, “*vi è concordanza nel ritenere che il termine curtain wall abbia dei confini di classificazione difficilmente delimitabili in conseguenza di una tecnologia ancora in fase evolutiva e ancora in grado di condizionare fortemente [...] le nuove tipologie emergenti*”¹⁵.

Per una classificazione di massima, molto chiara ed esaustiva, delle macro sezioni riguardanti il mondo delle curtain wall, al di fuori dell’ambito strettamente normativo, si può fare riferimento a quella proposta dalla AAMA¹⁶, che distingue tre tipologie di facciata continua:

- Curtain wall, intesa come parete qualunque, di qualunque materiale, non progettata per sostenere carichi verticali e collocata all’esterno delle solette di piano (Figura 8.C – 8.D);
- Metal curtain wall, intesa come facciata realizzata interamente o principalmente di metallo, oppure dalla combinazione di metallo, vetro ed altri materiali di rivestimento supportati o dotati di un telaio metallico (Figura 8.A);
- Window wall, che consiste in un particolare caso di facciata continua che si estende tra solaio e solaio, dotata di un telaio fisso ed un eventuale telaio mobile per tamponature apribili (Figura 8.E).

¹⁵ P. Rigone, *I sistemi di facciata continua: classificazione ed analisi funzionale*, UNCSAAL.

¹⁶ AA. VV., *Aluminum curtain wall design guide manual*, American Architectural Manufacturers Association, Palatine (U.S.A.), 1994.

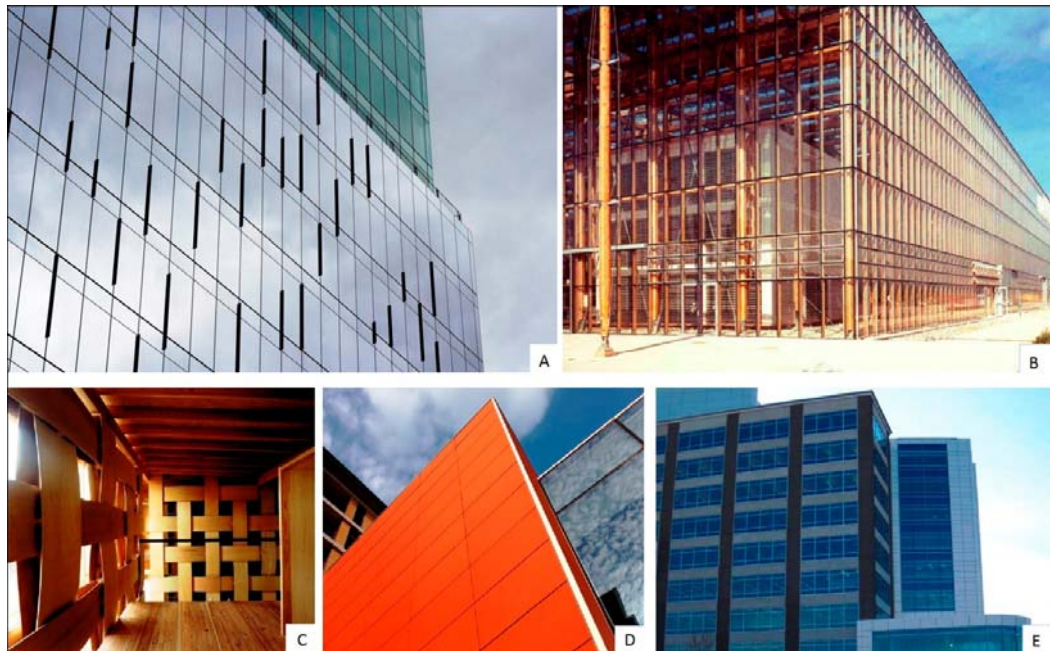


Figura 8: Esempi di curtain wall – A: Metal curtain wall in vetro e alluminio – B: Curtain wall in legno e vetro – C: Curtain wall in pannelli di legno – D: Curtain wall con pannelli di terracotta – E: Window wal lintegrata in una struttura in calcestruzzo armato.

Da ciò si può dedurre come la curtain wall non sia esclusivamente la classica facciata a montanti e traversi metallici con cui viene comunemente identificata, ma che in questa categoria rientrano una cospicua quantità di tipologie di facciata.

La norma di progetto europea¹⁷ distingue invece varie tipologie di curtain wall, sulla base dei principali schemi di funzionamento attualmente presenti sul mercato, e definisce:

- Facciata continua metallica a montanti e traversi o stick system (Figura 9.A), costituita da un telaio portante in montanti e traversi di acciaio o alluminio, con porzioni vetrate (apribili o fisse) e pannello cieco di parapetto (spandrel) con rivestimento di qualsiasi materiale (generalmente alluminio o vetro).
- Facciata continua metallica a telai (Figura 9.B), costituita anch'essa da un telaio in montanti e traversi metallici, ma con tamponamenti prefabbricati in officina e posti in opera mediante accoppiamento meccanico.

¹⁷ peEN 33202 “Curtain walling – Terminology”

- Facciata continua ad elementi o unit system (Figura 9.C), composta da cellule aventi un telaio metallico e finestre apribili o fisse, completamente preassemblate in officina e poste in opera mediante accoppiamento meccanico, senza l'utilizzo di ponteggi esterni.
- Facciata continua strutturale o structural sealant glazing (Figura 9.D), realizzata con montanti e traversi in alluminio e lastre di vetro fissate alla sottostruttura mediante incollaggio tramite silicone strutturale.
- Facciata continua a pannelli o panel system (Figura 10.E), costituita dall'assemblaggio di pannelli tra di loro molto diversificati in funzione della composizione, della finitura, delle dimensioni e delle modalità di montaggio. I pannelli hanno dimensioni differenti a seconda che siano autoportanti o siano fissati ad una sottostruttura metallica, di conseguenza possono occupare l'intero interpiano oppure solo porzioni di esso. Possono essere previste parti apribili o meno.
- Facciata continua a copertura dei pilastri o column cover and spandrel system (Figura 10.F), in cui si procede inizialmente con la copertura di tutti gli elementi strutturali verticali tramite lastre di varie tipologie di materiali o lamiere metalliche, successivamente vengono inseriti dei grandi pannelli spandrel tra i correnti verticali adiacenti ed infine si inseriscono le parti finestrate, che possono essere preassemblate o meno.
- Facciata continua sospesa o point fixed (Figura 10.G), costituita da lastre di vetro, singolo o stratificato, fissate puntualmente in corrispondenza dei vertici delle lastre stesse. I fissaggi avvengono tramite specifici apparecchi di connessione, i cosiddetti "raggi", che tengono contemporaneamente i vertici di quattro lastre convergenti. Il telaio portante è sostituito da appositi controventi verticali in vetro, detti "pinne", che collegano il sub sistema alle solette di piano, oppure da un particolare sistema di tiranti in acciaio collegati alla struttura primaria dell'edificio.

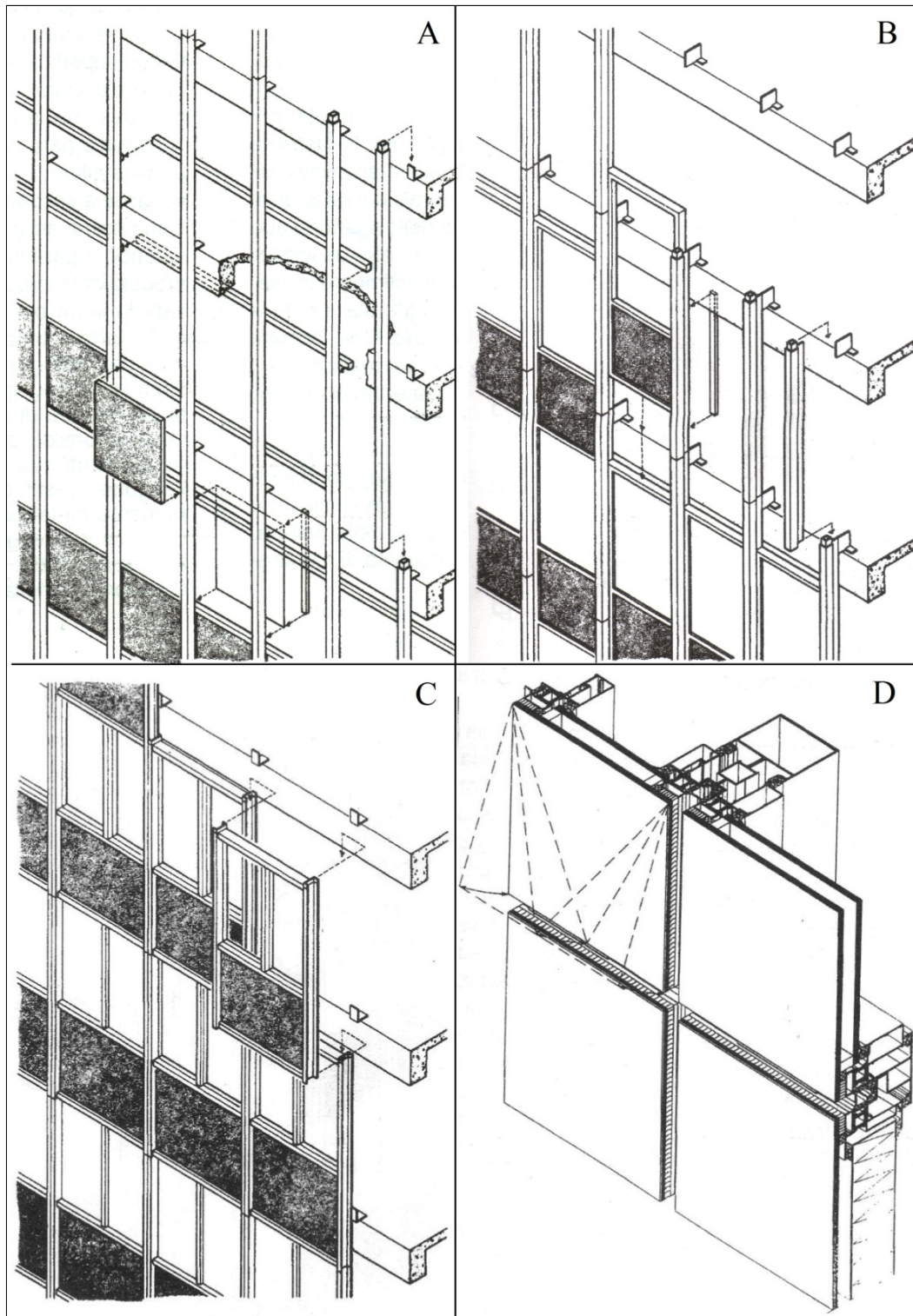


Figura 9: A. Facciata a montanti e traversi o Stik System – B. Facciata metallica a telai – C. Facciata ad elementi o Unit System – D. Facciata strutturale.

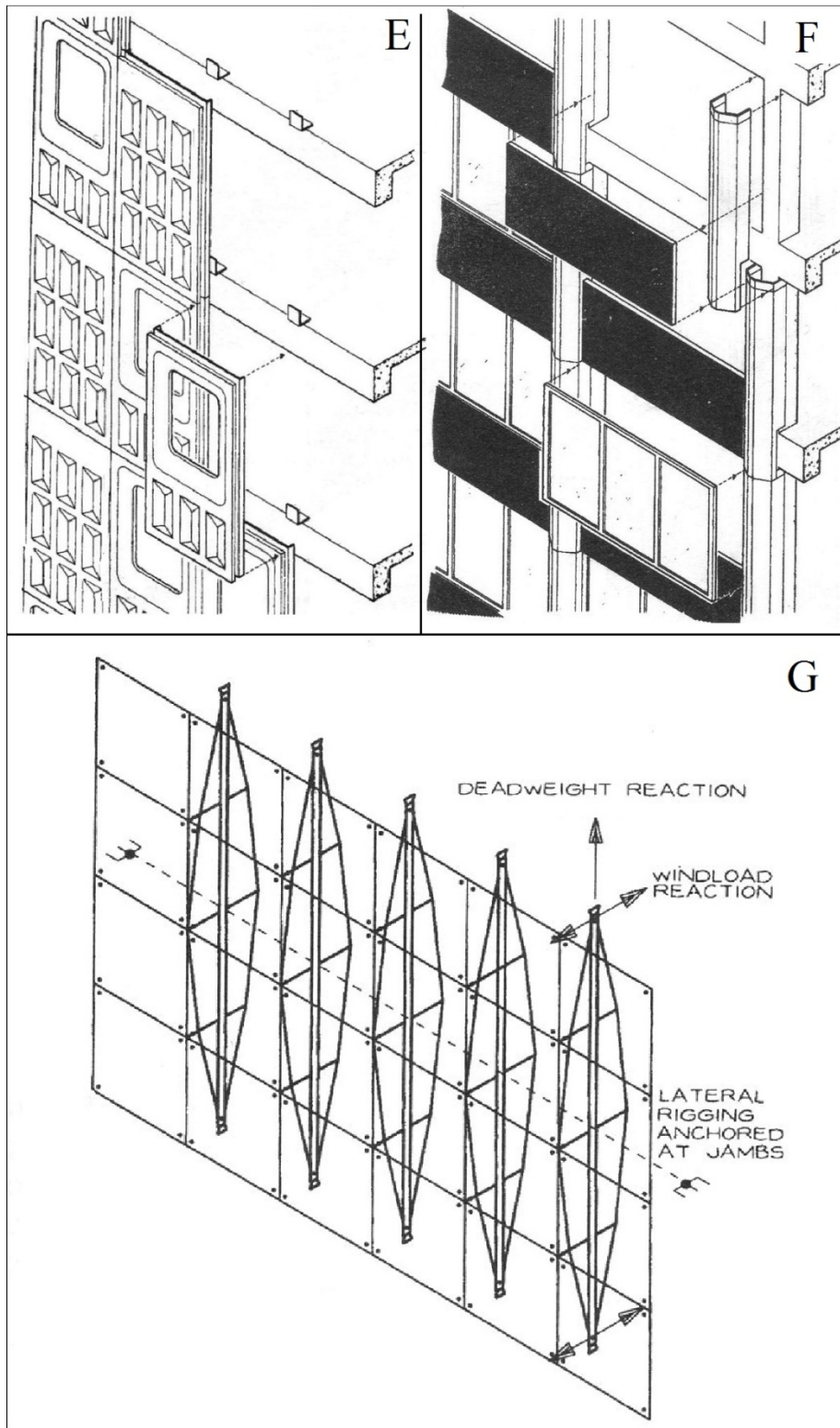


Figura 10: E. Facciata a pannelli o Panel System – F. Facciata a copertura dei pilastri – G. Facciata sospesa o Point Fixed.

Un'altra metodologia di classificazione, proposta dalla UNCSAAL ¹⁸, più semplice distingue fundamentalmente tra:

- Standard o proprietary curtain wall, che comprende tutti quei sistemi di curtain wall che sono stati “*concepiti , sviluppati e prodotti in modo standardizzato*” da parte dei produttori;
- Custom curtain wall, che comprende tutte le facciate continue concepite e progettate specificamente per un singolo edificio e che quindi costituiscono un prototipo. Tale soluzione generalmente viene pensata dal progettista nel caso di edifici di particolare valore storico, economico e comunicativo, oppure per specifiche esigenze architettoniche e prestazionali.

Per comprendere meglio tale classificazione si riporta in Figura 11 un esempio di progetto in cui si distinguono la porzione *standard*, composta da cellule prefabbricate, fisse e apribili, con balaustra e sistema di oscuramento integrato, e la porzione *custom* centrale, composta da pannelli di vetro extrawhite curvati a freddo e fissati puntualmente a tubolari in alluminio estruso, per la quale si è resa necessaria una progettazione specifica per ogni singolo pannello e per ogni dettaglio di fissaggio e di interfaccia.

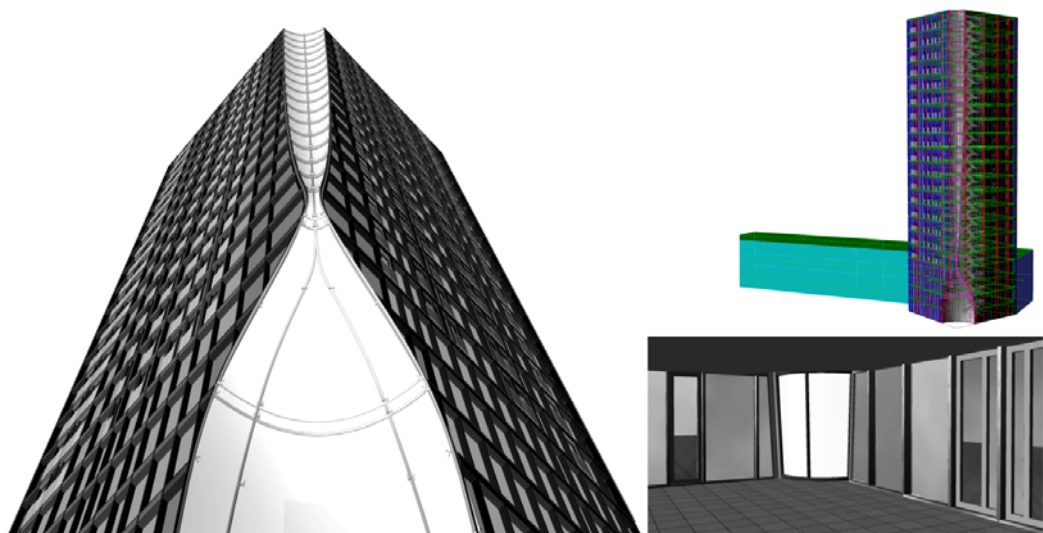


Figura 11: Esempio di progetto di curtain wall complessa (vista esterna, X-Ray e interna).

¹⁸ Unione Nazionale Costruttori Serramenti Alluminio Acciaio Leghe (vedi nota ¹⁵)

2.3. Facciate in vetrocemento

Le facciate in vetrocemento prevedono l'utilizzo dei mattoni di vetro, variamente connessi tra di loro, tramite correnti in calcestruzzo, in molteplici configurazioni, rese possibili dalla modularità e dalla versatilità dei componenti.

Nella storia delle costruzioni l'utilizzo dei mattoni di vetro come elementi di facciata si riduce a casi sporadici e comunque mai utilizzati in costruzioni di rilievo.

Come già accennato nell'introduzione, la riscoperta del mattone di vetro come elemento caratterizzante e come segno indelebile di qualità e leggerezza è da attribuirsi quasi unicamente all'ultimo decennio.

Va inoltre sottolineato come i mattoni di vetro, anche negli edifici più moderni, vengano per lo più pensati come elementi integrativi di geometrie complesse e raramente come elementi caratterizzanti principali.

Da un punto di vista normativo, i riferimenti italiani inerenti al mattone di vetro sono la UNI 7440/75 "Vetri per vetrocemento armato", un testo del 1975 che considera solo in parte tutte le caratteristiche che i vetro mattoni attuali possono avere e si riferisce principalmente alle modalità e alle tipologie di prova da effettuare sul prodotto finito, e la UNI EN 1051-2:2007 "Vetro per edilizia. Diffusori di vetro per pareti e pavimentazioni" per la valutazione di conformità e norma di prodotto.

Altri riferimenti si trovano nella normativa tedesca in due testi: DIN 18175/77 "Glasbausteine: Anforderungen, Prufung" (mattoni in vetro per costruzioni: prove, caratteristiche), DIN 4243/78 "Betonglaser: Anforderungen, Prufung" (mattoni in vetro per costruzioni: prove, caratteristiche).

Tutte queste normative però sono inerenti, in maniera specifica, esclusivamente al prodotto "mattone di vetro", nessuna di queste infatti fa riferimento alla posa in opera così da considerare la globalità di comportamento dell'elemento tecnico a parete che ne deriva o comunque per definire una "regola d'arte".

L'unica normativa riguardante la posa in opera di pareti in vetrocemento è la tedesca DIN 4242/79 "Glasbaustein - Wände: Ausführung und bemessung" (pareti in mattoni di vetro: realizzazione e calcolo), secondo cui sono state redatte le guide tecniche di installazione dei principali produttori di mattoni di vetro e da cui si ricavano, tramite una rielaborazione, le informazioni che seguono.

2.3.1. Classificazione

Si possono classificare due tipologie di posa in opera di facciate in vetrocemento:

- Posa in opera tradizionale ad umido¹⁹
- A pannelli prefabbricati

Per quanto riguarda la prima tipologia, si può facilmente intuire come essa rientri nella categoria delle murature. Infatti, sia la configurazione geometrica, sia le modalità di esecuzione, sono riconducibili ad una tecnologia tradizionale; l'unica differenza risiede nell'utilizzo di mattoni di materiale differente dal classico laterizio. Questa modalità di esecuzione è adatta esclusivamente per facciate di piccole dimensioni o comunque per porzioni di facciate, ad esempio per quei casi in cui le pareti perimetrali non permettono un'adeguata illuminazione degli ambienti interni (Figura 12). La scelta di posare in opera una parete di vetrocemento è dunque più adatta per realizzare partizioni interne o pareti curve (Figura 13) e sicuramente non è opportuno considerarla per facciate che utilizzano il mattone di vetro come segno caratteristico su grande scala.

Le facciate a pannelli prefabbricati, invece, risultano molto interessanti sia da un punto di vista applicativo che da un punto di vista estetico.

Secondo quanto visto nei paragrafi precedenti, in particolar modo al 2.2.1, le facciate a pannelli prefabbricati rientrano nella categoria della "custom curtain wall" di tipo "panel system". Esse infatti vengono collocate all'esterno della

¹⁹ Si distingue dalla posa in opera a secco, che non prevede l'utilizzo del calcestruzzo o di malte cementizie.

struttura primaria²⁰ con un sistema di fissaggio puntuale (Figura 14), oppure sostenute da una sottostruttura metallica (Figura 15).

Qualora si opti esclusivamente per il fissaggio di tipo puntuale alle solette di piano, le dimensioni dei pannelli devono garantire la copertura in altezza di un intero piano; nel caso di sottostruttura metallica, invece, i pannelli potranno avere dimensioni ridotte a seconda dell'orditura di sostegno e si avrà una maggiore adattabilità a geometrie complesse e un minor tempo di realizzazione per facciate di grandi dimensioni.

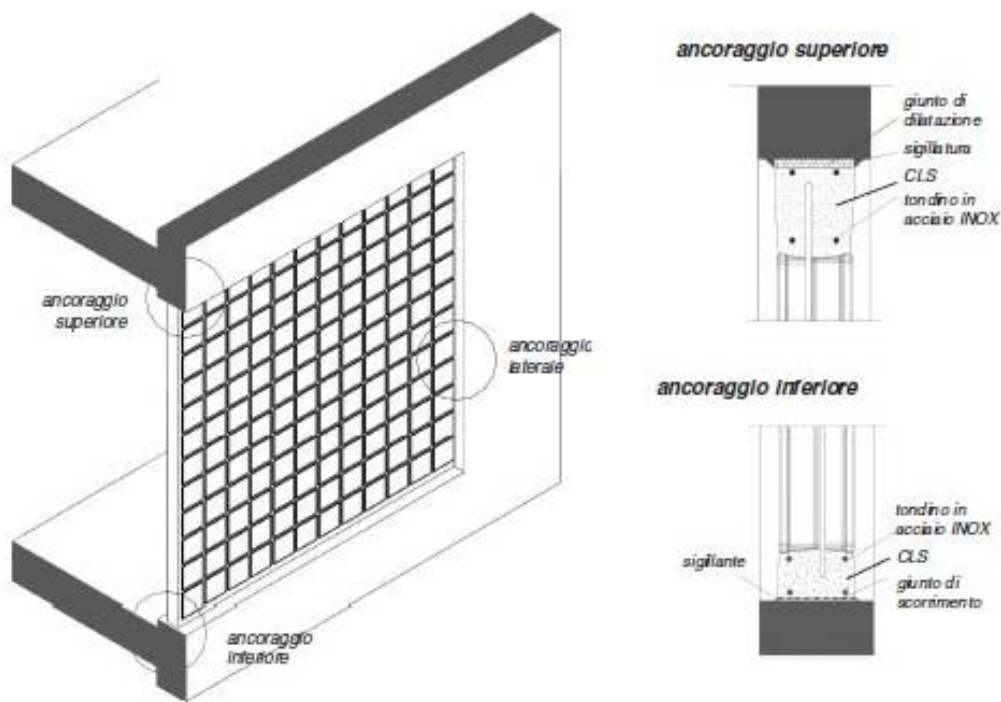


Figura 12: Esempio di configurazione di facciata in vetrocemento messa in opera.

²⁰ Non è da escludere in termini assoluti il posizionamento di pannelli prefabbricati all'interno di una cornice strutturale, ma per tale soluzione, come si è visto, è preferibile scegliere la posa direttamente in opera, a meno di particolari configurazioni che esulano da una possibile classificazione.

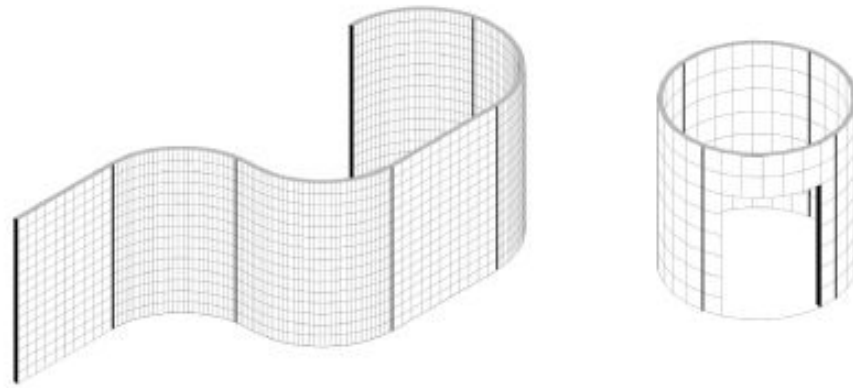


Figura 13: Esempio di configurazione di pareti curve di vetro mattoni.

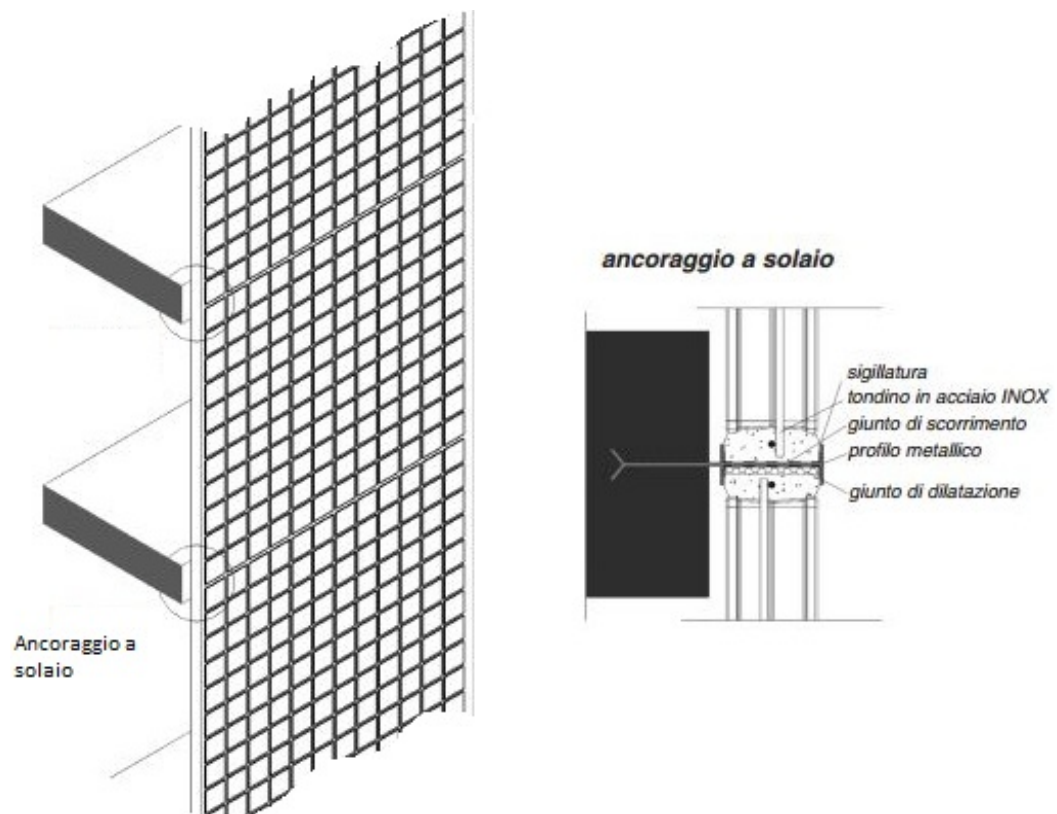


Figura 14: Esempio di configurazione di facciata in vetrocemento a curtain wall con fissaggi puntuali.

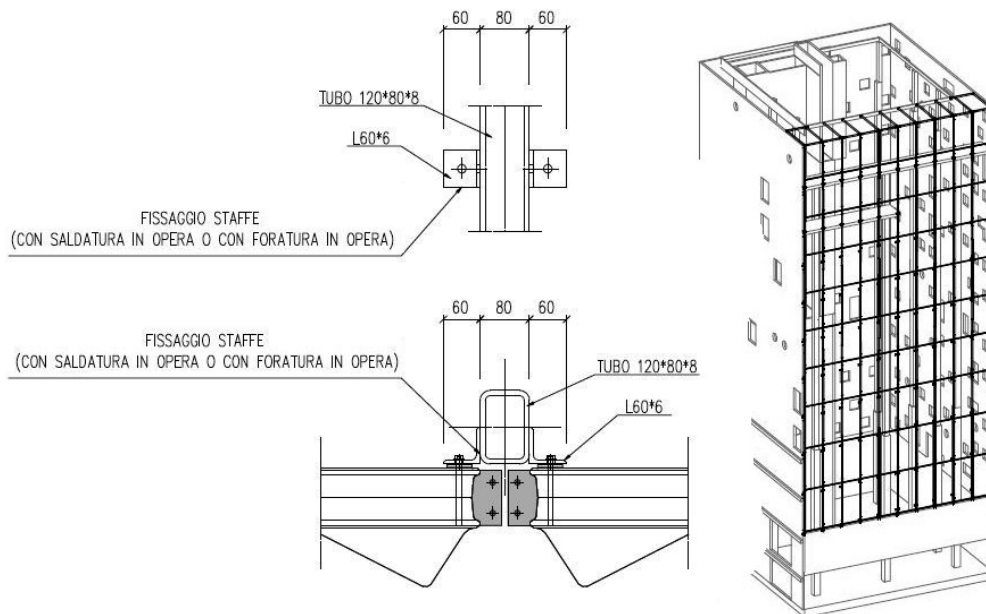


Figura 15: Esempio di configurazione di facciata in vetrocemento a curtain wall con sottostruttura metallica.

2.3.2. Esempi di facciate in vetrocemento

Maison de Verre, Parigi, 1928-1931

La Maison de Verre è il primo esempio in assoluto di facciata continua totalmente concepita in vetrocemento e rappresenta una sfida progettuale che “è andata oltre al solo aspetto architettonico, spostando in avanti il limite tecnologico fino ad allora conosciuto nell’impiego del mattone in vetro nelle costruzioni”²¹.

Il New York Times l’ha definita la miglior casa di Parigi: “NO house in France better reflects the magical promise of 20th-century architecture than the Maison de Verre”²².

La facciata (Figura 16) è composta da una struttura a telaio metallico in cui si inseriscono i pannelli vetro cementizi, per comporre una tenda di vetro traslucida che separa gli ambienti interni della casa (Figura 17) dal cortile esterno.

²¹ Enrico Basso, Amministratore Delegato SEVES

²² Nicolai Ouroussoff, *The Best House in Paris*, New York Times, 26 agosto 2007.

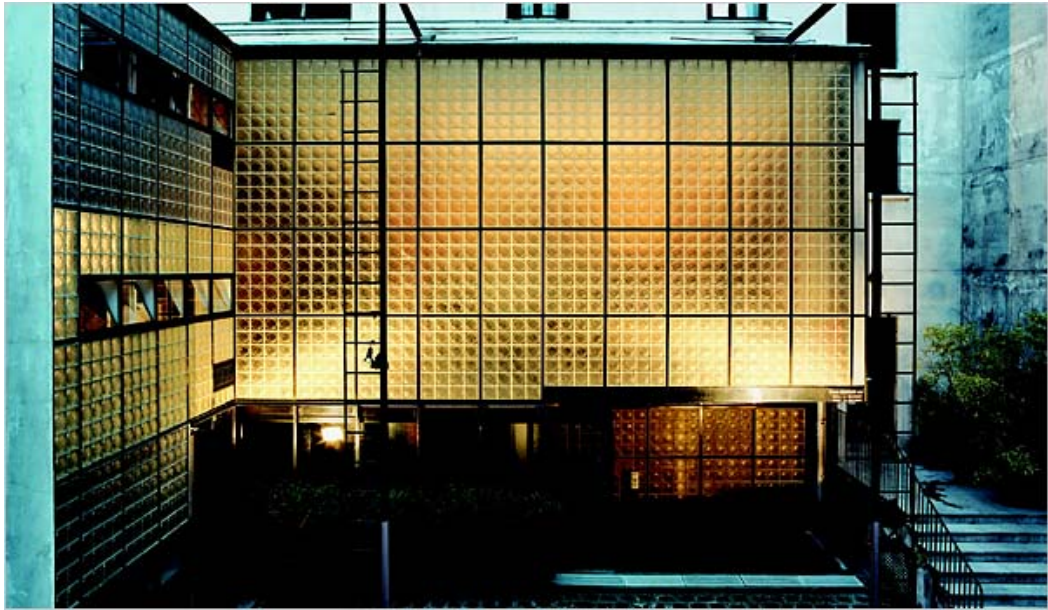


Figura 16: Pierre Chareau, *Maison de Verre*, Parigi, 1928-1931.



Figura 17: *Maison de Verre*. Vista interna.

Teatro Puccini, Firenze, 1939-1940.

Il Teatro Puccini di Firenze (Figura 18) è uno dei primi esempi italiani di utilizzo del vetrocemento per elementi di facciata. L'edificio fu costruito tra il 1939 e il 1940, in pieno Razionalismo Italiano, come luogo di svago per gli operai della Manifattura Tabacchi e la progettazione può essere attribuita a Pierluigi Nervi, che caratterizzò la facciata principale con una torre in vetrocemento (Figura 20), replica in scala minore della più celebre torre di Maratona realizzata pochi anni prima nel nuovo stadio comunale. Questa opera è un esempio tipico di utilizzo del vetrocemento come integrazione di altri elementi in un gioco di volumi contrapposti (corpo orizzontale e torre verticale).



Figura 18: Pier Luigi Nervi, *Teatro Puccini*, Firenze, 1939-1940.



Figura 19: Teatro Puccini. Viste notturne della facciata illuminata dopo la ristrutturazione ad opera degli architetti Ferrini & Davighi.



Figura 20: Teatro Puccini. Particolari della torre di facciata.

Deutsches Technikumuseum, Berlino, 1982.

Un altro esempio di integrazione di volumi verticali in vetrocemento con altri elementi di facciata è dato dal Deutsches Technikumuseum di Berlino, fondato nel 1982. Come si può vedere in Figura 21 il Museo della Scienza e delle Tecnica della capitale tedesca, può a buon diritto rientrare nell'architettura High-Tech (vedi 2.1).

Si nota in questo caso come le superfici curve in vetrocemento vengano scandite dal reticolo della struttura primaria, per andare a formare una facciata monolitica, che fa pensare ad una posa in opera tradizionale dei mattoni di vetro direttamente in cantiere.



Figura 21: Studio Ulrich Wolf & Helge Pitz, *Deutsches Technikumuseum*, Berlino, 1982.

Edificio Malecòn, Buenos Aires, 1992-1999.

La Torre Malecòn (Figura 23) è un edificio “intelligente” ad alta efficienza energetica che nel 2002 è stata dichiarata, dalla commissione per l’ambiente dell’American Institute of Architects (AIA), uno dei dieci migliori esempi di architettura sostenibile. Si caratterizza per la sua facciata curva, concepita per ottenere la maggior illuminazione naturale possibile, al fine di ottenere un notevole risparmio di energia, e per permettere la visione dello skyline che circonda l’edificio da ogni sua angolazione.

La facciata è costituita da una curtain wall unit system, integrata da grandi pannelli parasole per limitare la radiazione solare incidente (Figura 22).

Gli ascensori e le scale sono collocati in volumi esterni al corpo centrale dell’edificio per garantire una migliore fruibilità degli spazi. In particolare le scale si trovano all’interno di un corpo totalmente rivestito da mattoni di vetro, allo scopo di garantire l’illuminazione naturale.

Questo è un altro esempio di integrazione del vetrocemento in geometrie di facciata differenti, che però vede un uso più marcato del mattone di vetro come segno architettonico rispetto a quelli precedenti. Sono ben distinguibili, in questo caso, i pannelli vetrocementizi (Figura 24) che compongono il rivestimento del vano scale, nonostante rimanga visibile l’orditura strutturale.



Figura 22: Edificio Malecòn. Particolare della facciata continua.



Figura 23: HOK International LTD, Edificio Malecòn, Buenos Aires, 1992-1999.



Figura 24: Edificio Malecòn, Particolari dei pannelli in vetrocemento.

Maison Hermès, Tokyo, 1998-2006.

La Maison Hermès è un edificio di 6000 metri quadri di spazio commerciale, uffici, aree espositive e multimediali, progettato da Renzo Piano, costituito da 15 piani lunghi 45 metri e larghi 11, con le facciate interamente realizzate in mattoni in vetro della misura di 42,8 x 42,8 centimetri, disegnati ad hoc.

Grazie al mattone di vetro, Renzo Piano è riuscito a tessere un “velo di vetro” sull’edificio, creando un continuo e luminoso schermo tra la serenità degli spazi interni e il rumore della città.

“Il progetto dell’architetto Piano per la maison Hermès a Tokio rappresenta il più alto contributo del XX secolo all’architettura del mattone in vetro. La poetica architettonica raggiunta dall’opera è infatti uguagliata solo dalla Maison de Verre (1928 – 1932) progettata da Pierre Chareau”²³.

Occorre sottolineare come, prima della realizzazione del mattone disegnato per la Maison Hermès, il limite tecnologico era rappresentato dalla produzione di un mattone della misura massima di 30 x 30 centimetri.



Figura 25: Renzo Piano, Maison Hermès, Tokyo, 1998-2006.

²³ Enrico Basso, Amministratore Delegato SEVES

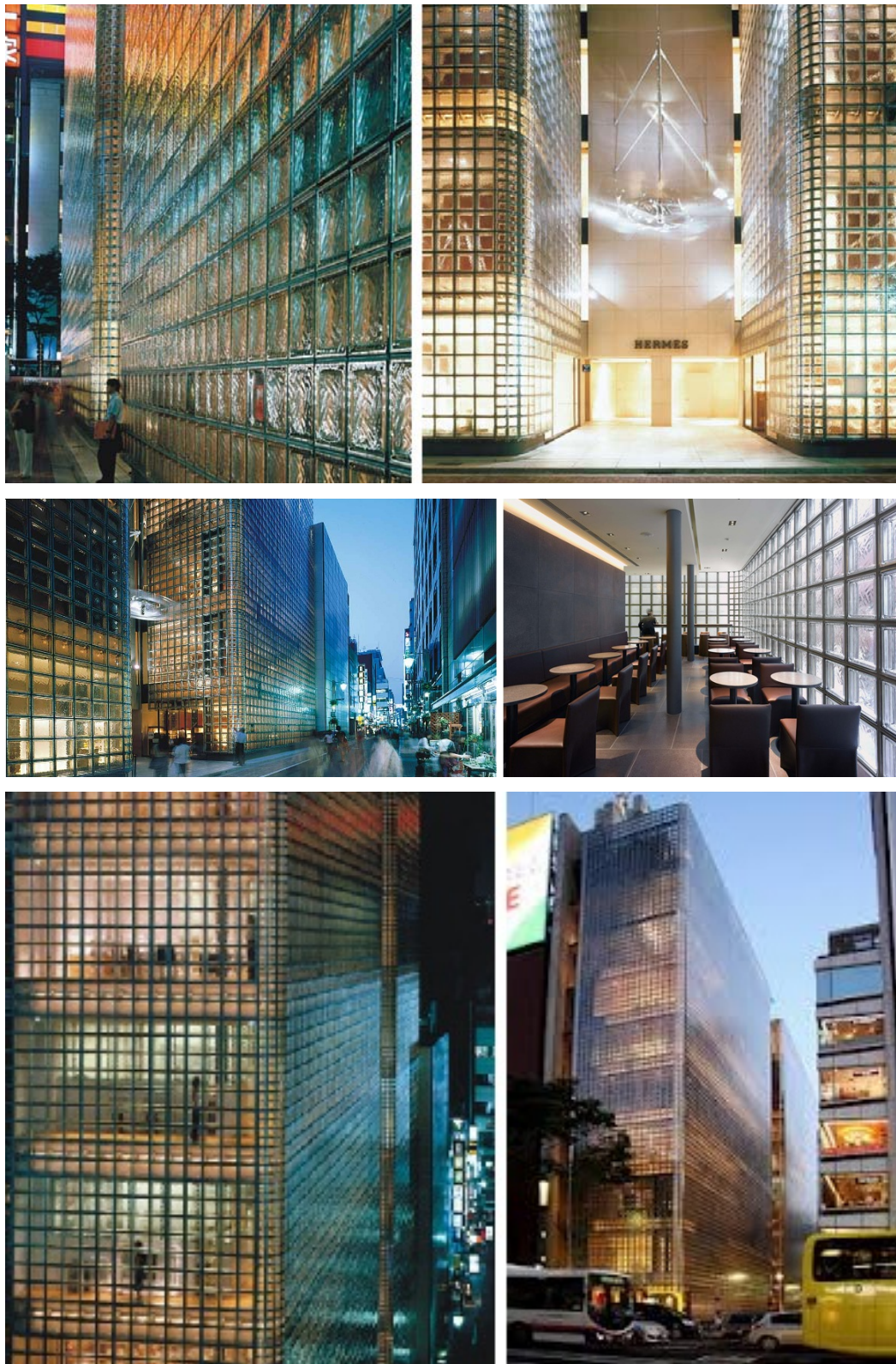


Figura 26: Maison Hermès. Particolari della facciata.

Terme di Tiberio, Panticosa, 2005-2007.

Nel 2005, da alcune necessità imposte dal contesto in cui si colloca la costruzione, nasce un altro esempio straordinario di utilizzo del vetro mattone per facciate di grandi dimensioni: le Terme di Tiberio dello studio Moneo-Brock (Figura 27). Infatti i regolamenti municipali imponevano che la maggior parte della superficie calpestabile fosse disposta sotto il piano di campagna, che si provvedesse senza deroghe all'illuminazione naturale e che la vista sul paesaggio fosse privilegiata: tali costrizioni fecero scegliere ai progettisti l'utilizzo del mattone di vetro.

Per eseguire tale opera il vetro mattone è stato posato con tecnologia tradizionale ad umido secondo due configurazioni differenti: nel primo caso i mattoni sono stati posati in maniera tradizionale realizzando così la parete perimetrale che delimita i volumi interni, nel secondo invece vengono posizionati secondo uno schema a scaglie per formare dei frangisole per la parete retrostante in vetro.



Figura 27: Studio Moneo-Brock, Terme di Tiberio, Panticosa, 2005-2007.

IULM Knowledge Transfer Center, Milano, 2003-2013.

Un altro esempio di utilizzo consistente del mattone di vetro è rappresentato dal Knowledge Transfer Center dell'università IULM di Milano (Figura 28), un edificio di 9950 m² che “sembra essere mimetico rispetto all'intorno. Mattoni, calcestruzzo a vista, vetro, intonaco”²⁴.

Obiettivo dei progettisti era quello di collocare un “nuovo centro” nella periferia urbana, permettendo la comunicazione esplicita tra l'intorno e la modernità attraverso un involucro semi-trasparente.

Il progetto del gruppo 5+1AA prevede l'utilizzo di pannelli prefabbricati in vetrocemento, ancorati ad una sottostruttura metallica, in una configurazione a curtain wall di tipo Panel System.



Figura 28: 5+1AA, IULM Knowledge Transfer Center, Milano, 2003-2013.

²⁴ 5+1AA



Figura 29: IULM Knowledge Transfer Center. Vista dinamica serale.



Figura 30: IULM Knowledge Transfer Center. Contesto.

2.4. Problematiche nella progettazione di facciate in vetrocemento

Il vetrocemento è composto da blocchi di vetro legati tra loro da una matrice di calcestruzzo armato. La sua realizzabilità “è resa possibile dal fatto che il vetro e il calcestruzzo hanno un coefficiente di dilatazione lineare molto simile”²⁵. A fronte di un’apparente semplicità nella composizione del materiale, che a tutti gli effetti si può considerare una muratura, bisogna però fare attenzione ad alcuni fattori progettuali tutt’altro che trascurabili: essendo costituito da materiali diversi aventi caratteristiche reologiche differenti, è necessario considerare tutti i fattori che possano generare problematiche anche a lungo termine.

Il vetro mostra infatti un comportamento fragile per eccellenza. Rispetto ai materiali metallici più comuni, quali l’acciaio e l’alluminio, il comportamento del vetro non presenta una fase plastica e, rispetto ai materiali cosiddetti quasi fragili come il calcestruzzo, esso non è in grado di esibire quelle micro fessurazioni diffuse che consentono ridistribuzioni anelastiche delle tensioni.

Per la mancanza di capacità di adattamento plastico non è lecito trascurare gli effetti locali, come ad esempio le concentrazioni di tensione in prossimità di zone di contatto con gli altri materiali strutturali.

La resistenza del vetro è infatti governata dalla meccanica della frattura ed è fortemente condizionata dalla presenza di difetti. Per limitare l’effetto dovuto a questi difetti e di conseguenza aumentare apparentemente la resistenza a trazione, generalmente si sottopone il vetro ad un processo di tempra, in modo tale da imporre stati tensionali di forte compressione sulle superfici della lastra, grazie ai quali le cricche vengono mantenute “chiuse” impedendone la propagazione fragile della frattura. Nel caso specifico il vetro mattone viene prodotto tramite colatura e pressatura in stampi preformati (vedi 2.6), non è quindi possibile sottoporre il vetro alla tempra. Di conseguenza la resistenza

²⁵ *Enciclopedia Tematica “L’Universale” – Architettura*, Garzanti, 2004, Vol. 2.

ultima risulta inferiore a quella del vetro temprato ed ancor di più dipendente dalla presenza di difetti.

Per evitare la rottura delle formelle di vetro che compongono il mattone è necessario considerare, oltre che una corretta e ponderata movimentazione in cantiere, tre aspetti fondamentali, dipendenti esclusivamente dalle caratteristiche dei materiali che compongono una parete in vetrocemento:

- Effetto del ritiro del calcestruzzo
- Effetti termici
- Tipologia delle connessioni

2.4.1. Effetti dovuti al ritiro del calcestruzzo

Il ritiro del calcestruzzo è una deformazione atensionale differita nel tempo (indipendente dal carico applicato). Consiste in una variazione di volume del conglomerato dovuta ad una progressiva variazione del contenuto d'acqua nella pasta cementizia. Il cambiamento del contenuto d'acqua può essere causato da svariati fattori come, per esempio, l'essiccamento, le reazioni chimiche che avvengono all'interno della pasta, le variazioni di temperatura, ecc...

Nel caso in cui il calcestruzzo maturi in ambienti con umidità relativa inferiore al 95% , la variazione di volume è negativa e di conseguenza si ha una contrazione del getto di calcestruzzo (Figura 31).

A questa contrazione si oppongono gli aggregati, che avendo una struttura solida sono volumetricamente stabili, e i vincoli esterni o interni, che impediscono al getto di muoversi. La presenza di una semplice barra di armatura nel getto costituisce infatti un vincolo che genera un'azione interna al calcestruzzo.

La somma di queste componenti di azione e reazione interne al calcestruzzo, generano stati tensionali che, se troppo elevati (maggiori della resistenza ultima a trazione del calcestruzzo), possono portare alla formazione di microfessure interne o fessure visibili dannose per la durabilità del materiale.

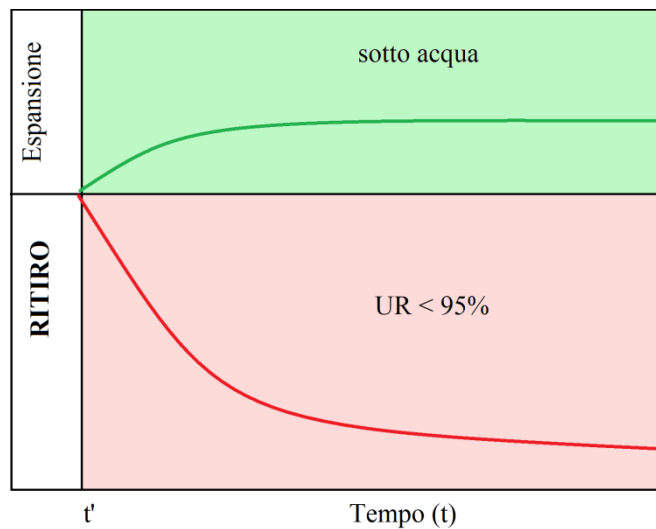


Figura 31: Ritiro del calcestruzzo in ambienti a differenti UR.

Nel caso del vetrocementi bisogna considerare che gli stati di coazione si generano anche all'interfaccia dei materiali. Infatti se i due materiali non vengono desolidarizzati, il vetro aderente al calcestruzzo costituisce un vincolo che genera un'azione iperstatica; tale azione risulta di compressione fin tanto che non si instaura il fenomeno fessurativo nel calcestruzzo, dopo di che diventa di trazione per brusco rilascio delle tensioni.

Si deve dunque valutare l'effetto del ritiro con cautela per evitare il rilascio eccessivo di tensioni sul vetro causato dalla fessurazione.

In Figura 32 vengono mostrati i meccanismi che regolano il fenomeno del ritiro e la successiva fessurazione.

Si può notare come il provino, inizialmente scarico, per effetto del ritiro riduce il suo volume. A causa dei vincoli interni tale deformazione è impedita e ciò genera stati tensionali interni (curva nera). Quando tali sforzi di trazione vengono superati dalla curva degli sforzi teorici calcolati con la legge di Hooke (curva verde), ci si dovrebbe aspettare la fessurazione. Tale fessurazione però viene posticipata a causa dell'effetto di scorrimento e dal rilassamento indotto dal carico esterno.

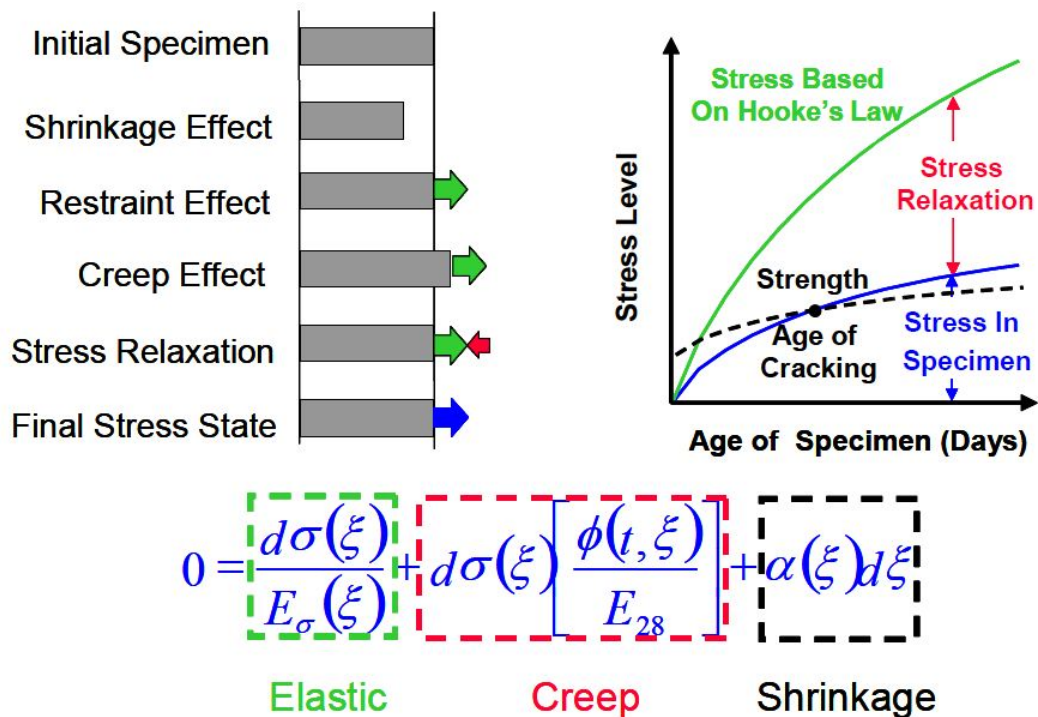


Figura 32: Effetti combinati del ritiro e legge di equilibrio associata al fenomeno.

L'andamento degli sforzi residui nel provino sono indicati dalla curva in blu e si può notare come la fessura si formi quando tale curva supera la curva della resistenza ultima.

La letteratura specializzata differenzia tre tipologie di ritiro: il ritiro plastico, il ritiro igrometrico ed il ritiro autogeno.

2.4.1.1. Ritiro plastico

Il ritiro plastico o a breve termine si verifica a poche ore dal getto nella fase di inizio indurimento, fino a quando il calcestruzzo raggiunge una resistenza di 1 N/m². Questa tipologia di ritiro cresce con l'aumentare del rapporto superficie/volume. Per limitarne gli effetti bisogna garantire una stagionatura protetta del calcestruzzo fin da subito, in modo tale da limitare la migrazione di acqua dalle zone interne del getto.

2.4.1.2. Ritiro igrometrico

Il ritiro igrometrico è il più pericoloso per la durabilità poiché si manifesta in maniera differita nel tempo e durante tutta la fase di indurimento del calcestruzzo. Consiste in una lenta trasmigrazione di acqua all'interno dei pori capillari del getto verso l'ambiente esterno che si trova in una condizione non satura di vapore. La variazione di volume, in questo caso, è generata dalla formazione di menischi interni ai pori capillari che, con la formazione di tensioni superficiali, generano la contrazione della pasta cementizia che si trova in prossimità degli aggregati.

La porosità del calcestruzzo è fortemente condizionata dal rapporto acqua/cemento: maggiore è la quantità d'acqua all'interno dell'impasto, maggiore è la quantità di pori, maggiore il ritiro. Ne consegue che nei calcestruzzi con un basso rapporto a/c, l'effetto del ritiro igrometrico è ridotto.

Il ritiro igrometrico è la principale causa di fessure superficiali ed è fortemente dipendente, oltre che dal rapporto a/c, dalle caratteristiche ambientali in cui si trova a maturare il getto, quali l'umidità relativa, la temperatura esterna e la velocità dell'aria incidente sulla superficie libera.

Si può dedurre quindi come tale effetto sia dovuto ad una concomitanza di vari fattori che sono stati descritti da numerosi ricercatori ed in maniera differente. Per un excursus approfondito su tali studi si rimanda ad articoli specialistici, qui si riporta solamente in Figura 33 una tabella che riassume i principali meccanismi che regolano il ritiro igrometrico, accompagnata da un grafico in cui vengono riportati alcuni esempi di curve di ritiro in funzione dell'umidità relativa estrapolati dalla letteratura.

Per limitare il ritiro igrometrico si possono adottare alcuni accorgimenti come, ad esempio, bagnare costantemente il getto di calcestruzzo, soprattutto nei primi giorni, per consentire una stagionatura umida, e abbassare il rapporto a/c. Un ulteriore accorgimento consiste nell'aumentare il rapporto aggregato/cemento, ma va considerata l'opera che si sta eseguendo in quanto gli aggregati,

opponendosi alla diminuzione di volume, possono portare alla formazione prematura di fessure nel calcestruzzo se il getto non è opportunamente vincolato.

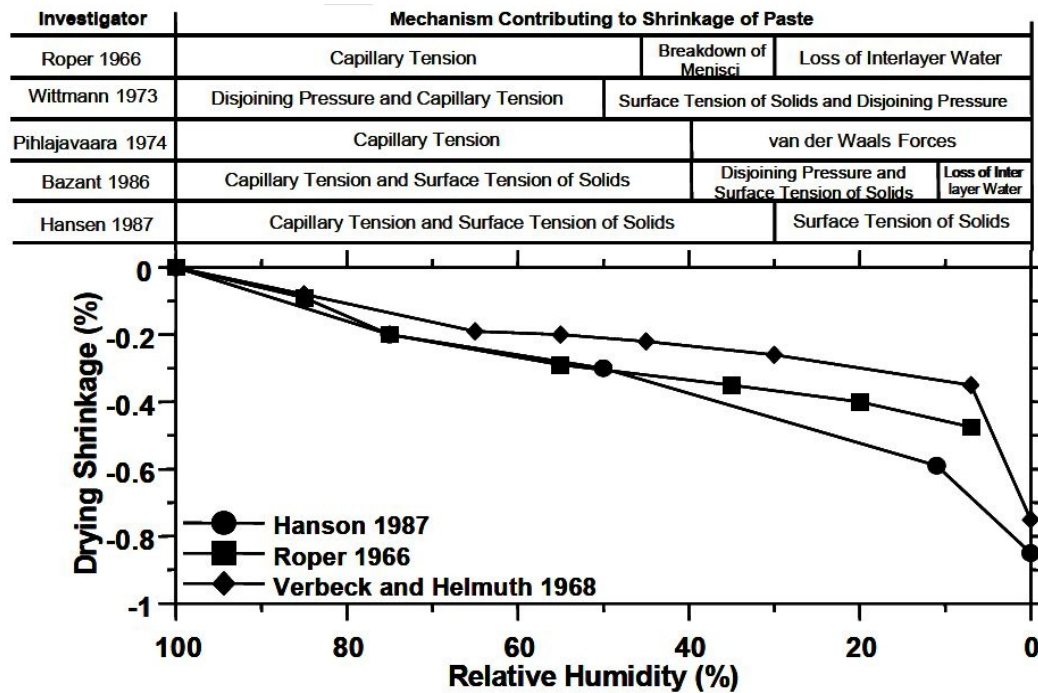


Figura 33: Curve di ritiro ricavate dalla letteratura.

2.4.1.3. Ritiro autogeno

Il ritiro autogeno, che risulta prevalente con rapporti a/c inferiori a 0,42²⁶, è indipendente dalle variazioni igrometriche e termiche ed è dovuto esclusivamente a reazioni chimiche interne indotte dall'idratazione del cemento. Infatti i prodotti dell'idratazione occupano un volume inferiore rispetto a quello dei reagenti costituiti dall'acqua e dal cemento anidro. Con il progredire del processo di idratazione durante l'indurimento si creano così le condizioni ideali per la formazione di pori capillari che porteranno alla successiva migrazione di acqua.

²⁶ Bradley J. Pease, *The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development and cracking*, Faculty of Purdue University, 2005.

Il ritiro autogeno si verifica principalmente quando il calcestruzzo è plastico e deformabile, ovvero nel periodo tra inizio e fine presa.

Questo tipo di ritiro non ha avuto molta importanza fintanto che i calcestruzzi utilizzati mediamente in edilizia necessitavano un alto rapporto a/c per accrescerne la lavorabilità e garantire uniformità del getto. Con lo sviluppo degli additivi WRA (Water Reducing Admixtures) e degli additivi elasticizzanti, tuttavia, il ritiro autogeno ha la necessità di essere considerato nelle nuove strutture con un basso rapporto a/c.

Quindi il ritiro dipende da:

- composizione del calcestruzzo
 - natura mineralogica degli aggregati
 - rapporto acqua/cemento (a/c)
 - proprietà chimiche del cemento
- ambiente di maturazione
 - umidità relativa
 - temperatura esterna
 - velocità dell'aria
- geometria dell'elemento
 - superficie specifica a contatto con l'ambiente esterno
 - dislocazione e percentuale delle armature

2.4.1.4. Prescrizioni per calcestruzzo dei pannelli in mattoni di vetro

Nelle guide tecniche inerenti alla progettazione e alle tecniche di installazione dei vetro-mattoni viene specificato che *“è consigliabile un impiego di malta cementizia tradizionale con impasto di cemento tipo Portland, o analogo, di classe 32.5. La malta deve offrire una buona resistenza meccanica e, al tempo stesso, una buona lavorabilità, per un completo e corretto riempimento di sezioni strette. Inoltre deve possedere caratteristiche di impermeabilità e di basso ritiro durante la maturazione. Un ritiro elevato, infatti, induce tensioni*

*nocive sui mattoni e può provocare fessurazioni nella malta stessa a scapito della impermeabilizzazione*²⁷ e può altresì causare un eccessivo stato di tensioni all'interfaccia col mattone di vetro.

Per la produzione di pannelli di vetrocemento bisognerà dunque accertarsi che il calcestruzzo utilizzato abbia un basso rapporto a/c e che la maturazione del getto avvenga in ambienti termoigrometricamente controllati, possibilmente con una alta umidità relativa, o comunque che garantiscano la possibilità di bagnare il getto costantemente. Qualora il basso rapporto a/c non garantisca la lavorabilità adeguata, si rende necessario considerare l'utilizzo di additivi anti ritiro.

Nella progettazione bisognerà inoltre considerare la geometria della matrice di calcestruzzo del pannello stesso, che dovrà il più possibile limitare le superfici a contatto con l'ambiente esterno.

Per un'analisi dettagliata e riferimenti quantitativi inerenti a tali prescrizioni, si rimanda ai capitoli successivi di questa trattazione, dove viene analizzato un caso reale.

2.4.2. Effetti termici

Per quanto riguarda gli effetti dovuti ad una variazione di temperatura, si distinguono due tipologie di carico termico: uno di tipo istantaneo e uno differito nel tempo, dovuto al ciclo stagionale.

Nel secondo caso tutte le trasformazioni avvengono in condizioni di regime quasi-statico e l'unico effetto misurabile riguarda le deformazioni differite che generano una semplice inversione della freccia (deformata) del pannello stesso, che generalmente non eccedono il millimetro per realizzazioni di pannelli non eccessivamente grandi. Per ovviare a tale problema ed evitare una concentrazione degli sforzi interni, nonché una condizione di vincolo che si opponga in maniera considerevole al fisiologico ritiro (vedi 2.4.1.), è necessario semplicemente imporre condizioni al contorno che permettano le piccole dilatazioni/contrazioni senza opporre resistenza. Infatti, se la dilatazione viene

²⁷ Guida Tecnica SEVES, 2006, pag. 29.

impedita, si genera una tensione che può portare alla rottura del vetro. Inoltre è opportuno non produrre porzioni di parete o pannelli superiori ai 5 m di lunghezza per lato per contenere l'entità delle deformazioni, valutate in termini assoluti e non percentuali.

Per i carichi termici istantanei si devono invece effettuare delle prove specifiche sia sui mattoni singoli, sia sull'opera vetrocimentizia in fase di progettazione.

Le prove da effettuare in laboratorio sono due:

- Prova di shock termico
- Prova di sbalzo termico

Le prove di resistenza allo shock termico vengono effettuate immergendo i mattoni prima in un recipiente di acqua riscaldata e, immediatamente dopo, in un secondo recipiente con acqua a temperatura ambiente (secondo le prescrizioni contenute nella Norma UNI 9303 del 1988).

La prova di sbalzo termico viene effettuata installando un pannello prefabbricato all'interno di una camera climatica in posizione verticale come elemento di separazione di due ambienti (interno – esterno) e viene effettuata in due fasi:

1. esposizione per sette giorni a salto di temperatura ed umidità tra interno ed esterno;
2. esposizione a cicli termici aventi un periodo di 12 ore con temperatura ambiente interno costante ed esternamente a cicli di esposizione di irraggiamento solare, pioggia e raffreddamento (fase di invecchiamento).

Qualora la seconda fase della prova effettuata sul pannello prefabbricato evidenziasse micro fessurazioni nei giunti in corrispondenza dei vertici dei mattoni in vetro, sarà necessario, in fase realizzativa, applicare sulla superficie esterna del getto di calcestruzzo delle soluzioni siliconiche al fine di garantire l'impermeabilità richiesta.

Per una valutazione specifica del carico termico di progetto è inoltre necessario condurre analisi accurate sull'andamento delle isoterme all'interno dei pannelli.

Un pannello in vetrocemento infatti è costituito da materiali che da un punto di vista termico si comportano in maniera molto differente: mentre il mattone di

vetro agisce da cuscino isolante, grazie all'intercapedine tra le formelle di vetro, il calcestruzzo armato è caratterizzato da un'elevata conducibilità e funge da ponte termico. Per questo motivo il flusso termico è veicolato quasi totalmente nella matrice di calcestruzzo (Figura 34) e di conseguenza gli sbalzi termici avvengono non solo tra interno ed esterno, ma anche tra porzioni del manufatto parallele al gradiente di temperatura. Tutto ciò genera un carico non uniforme che deve essere indagato caso per caso.

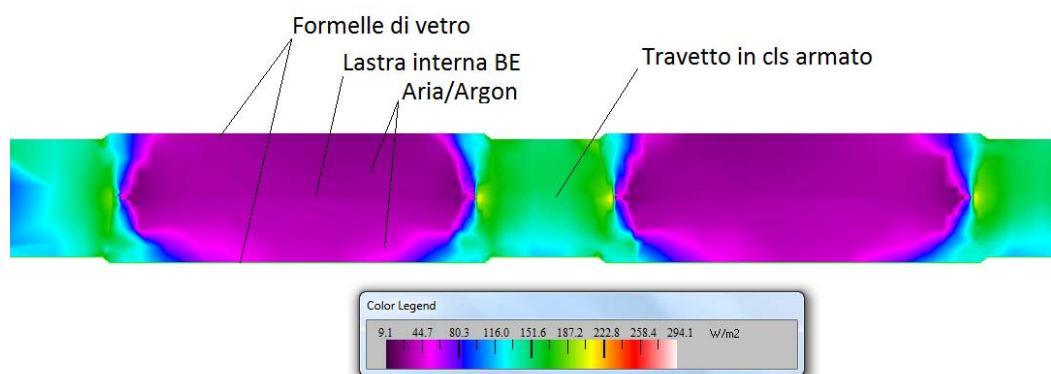


Figura 34: Flusso termico in una parete di vetrocemento standard.

2.4.3. Tipologia delle connessioni

A causa delle caratteristiche eterogenee dei materiali, di cui si è già discusso precedentemente, è necessario in un'opera in vetrocemento evitare condizioni di carico e di vincolo esterne che inducano uno stato coattivo che può risultare critico per il mattone.

A tal fine potrebbe essere opportuno avere strutture di tipo isostatico (Figura 35). Infatti una progettazione che preveda collegamenti iperstatici con strutture primarie molto più rigide e massicce, impedirebbe le deformazioni dovute al ritiro ed alle variazioni di temperatura, generando sollecitazioni che possono causare la formazione prematura di fessure o, addirittura, la rottura completa della matrice di calcestruzzo e lo scalzamento dei mattoni di vetro.

L'esperienza dei costruttori specializzati consiglia *“opere libere di deformarsi e dilatarsi, in modo che le dilatazioni e deformazioni delle diverse parti (strutture in mattoni di vetro e strutture portanti) siano indipendenti tra di loro”*²⁸.

Per poter ottenere strutture di tipo isostatico, da un punto di vista pratico, si possono adottare varie tipologie di vincolo.

Nel caso in cui si tratti di pareti autoportanti all'interno del filo delle strutture primarie, ovvero pareti divisorie o chiusure di tamponamento a parete di tipo standard, l'unico accorgimento da adottare riguarda l'inserimento di guarnizioni in grado di consentire le dilatazioni, e che garantiscano l'impermeabilizzazione (i.e. guarnizioni in EPDM).

Per quanto riguarda i pannelli vetro cementizi di tamponamento di tipo curtain wall, sarà necessario prevedere un sistema di aggancio (Figura 36) composto da perni ed asole opportunamente calibrati sia per consentire l'installazione a controllo di planarità, sia per garantire le dilatazioni/contrazioni del pannello stesso.

Generalmente si posizionano i perni in corrispondenza delle strutture primarie e si annegano delle guide metalliche nella matrice di calcestruzzo in fase di prefabbricazione, prestando attenzione a fare in modo che gli elementi metallici non entrino in contatto con la superficie dei mattoni in vetro. In fase di montaggio si può prevedere anche il serraggio tramite bulloni o la saldatura di un solo vincolo.

Bisogna inoltre impedire il contatto tra gli elementi in vetro ed i ferri di armatura o i profili metallici necessari all'installazione mediante l'utilizzo di opportuni distanziatori.

Va tenuto conto inoltre che i pannelli in vetrocemento non devono assolutamente avere funzioni portanti, ma solo funzioni di tamponamento o divisione.

²⁸ Guida Tecnica SEVES, 2006, pag. 29.

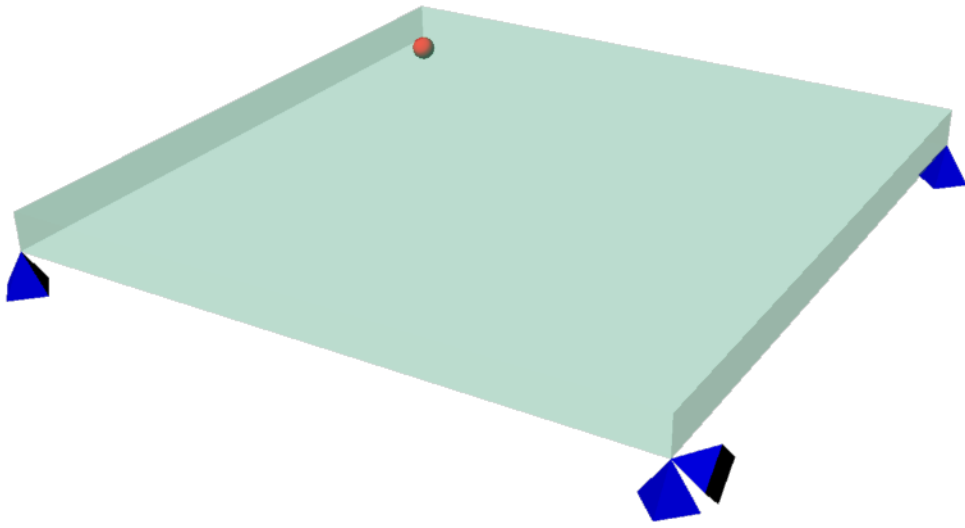


Figura 35: Schema isostatico.

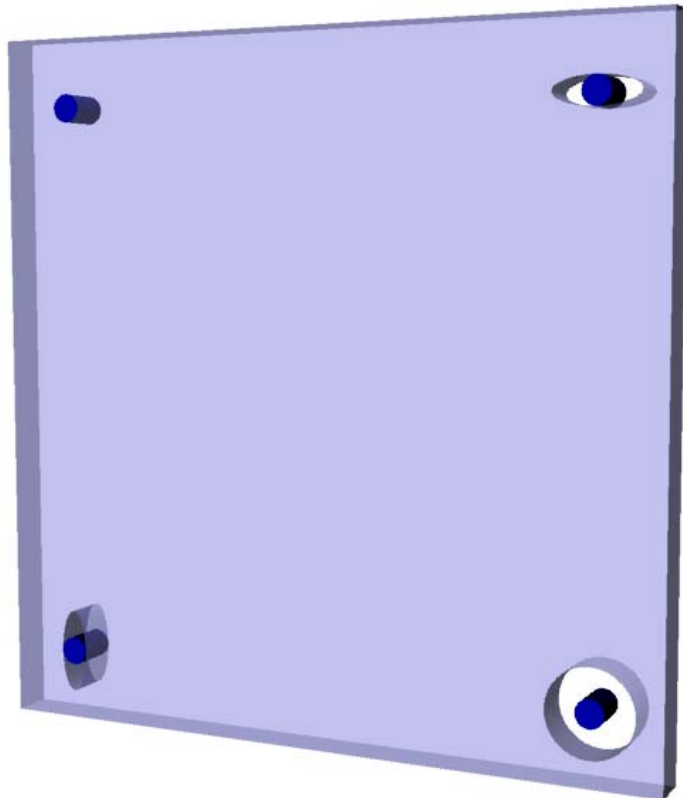


Figura 36: Schema Di Fissaggio Dei Pannelli.

2.5. Resistenza del Vetro

La resistenza del vetro, poiché determinata dalla forte sensibilità alla presenza di micro fessurazioni superficiali, dipende da molti fattori. Le micro fessurazioni, sempre presenti, possono accrescere nel tempo sotto carichi costanti, determinando il degrado delle prestazioni meccaniche degli elementi in vetro (fenomeno di fatica statica). Inoltre i difetti superficiali possono aumentare ed accrescere per fenomeni quali abrasione, serigrafia, smaltatura, ecc. di conseguenza nella calibrazione dei coefficienti parziali di sicurezza devono essere considerate le variazioni di intensità e di durata del carico, le condizioni di finitura e di invecchiamento. Infatti, da un punto di vista pratico, non è possibile determinare in termini assoluti la resistenza ultima di un elemento in vetro, ma piuttosto è possibile determinare un valore che, tramite opportune calibrazioni dei coefficienti di sicurezza, ha una elevata probabilità di trovarsi al di sotto di una soglia di rottura che, come già accennato, dipende dalla presenza di micro fessurazioni.

Il processo di dimensionamento si basa, in genere, su una combinazione di regole semplificate, metodi analitici più accurati e prove sperimentali su prototipi. I metodi approssimati sono utili nella progettazione di massima, per valutare schemi strutturali alternativi o per effettuare una valutazione preliminare dei costi. I metodi analitici più accurati vanno adottati nella progettazione definitiva di dettaglio. Le prove su prototipi sono necessarie per verificare il progetto prima della costruzione per opere con particolare contenuto innovativo.

2.5.1. Struttura chimica del vetro

Il principale componente del vetro è la sabbia silicea (SiO_2). Il suo punto di fusione si situa nell'intorno dei 1700°C e la sua consistenza a questa temperatura è simile a quella del miele liquido.

Per ragioni pratiche ed economiche, il punto di fusione e la viscosità della silice devono essere ridotti per consentire la produzione industriale del vetro.

Le materie prime utilizzate, pertanto, assolvono principalmente a quattro funzioni:

1. Vetrificanti: sostanze che si trasformano, per semplice azione del calore, dalla forma cristallina alla forma vetrosa, amorfa (silice SiO_2 ; anidride borica B_2O_3 ; anidride fosforica P_2O_5);
2. Fondenti: consentono la fusione del vetro a temperature realizzabili nei forni industriali, abbassando il punto di fusione da 1700 C° a 1300 C° circa (carbonato di sodio o soda Solvay Na_2CO_3 ; carbonato di potassio K_2CO_3);
3. Stabilizzanti: rendono il vetro inalterabile e resistente agli agenti atmosferici e chimici (carbonato di calcio CaCO_3 ; dolomite $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$);
4. Affinanti: facilitano l'affinaggio del vetro, aiutando la massa di vetro fuso non omogenea e carica di bolle gassose prodotte dalla fusione, a trasformarsi in un fluido chiaro, trasparente e omogeneo (solfato di sodio Na_2SO_4).

La silice è formata da gruppi SiO_4^{4-} con struttura tetraedrica e al centro l'atomo di silicio; ogni atomo di ossigeno è comune a due tetraedri.

Se la silice viene fusa e poi raffreddata, l'alta viscosità impedisce la ricostruzione del reticolo cristallino.

La struttura vetrosa è caratterizzata dall'esistenza di ordine a corto raggio (si conserva il gruppo tetraedrico), ma non vi è ordine a lungo raggio (Figura 37).

I vetri hanno dunque una struttura amorfa (Figura 38) per molti aspetti più simile alla struttura di un liquido che a quella di un solido (a volte si parla di liquido sotto raffreddato).

Questa struttura si forma perché la fase liquida, molto viscosa, non cristallizza durante un normale raffreddamento. I vetri, infatti, non fondono ad una

temperatura ben definita come i solidi cristallini, ma passano gradualmente dallo stato solido a quello di massa fusa (rammollimento).

Nonostante ciò le caratteristiche meccaniche sono tipiche dello stato solido. La proprietà principale è la fragilità, che si traduce in un'elevata sensibilità alla presenza di difetti.

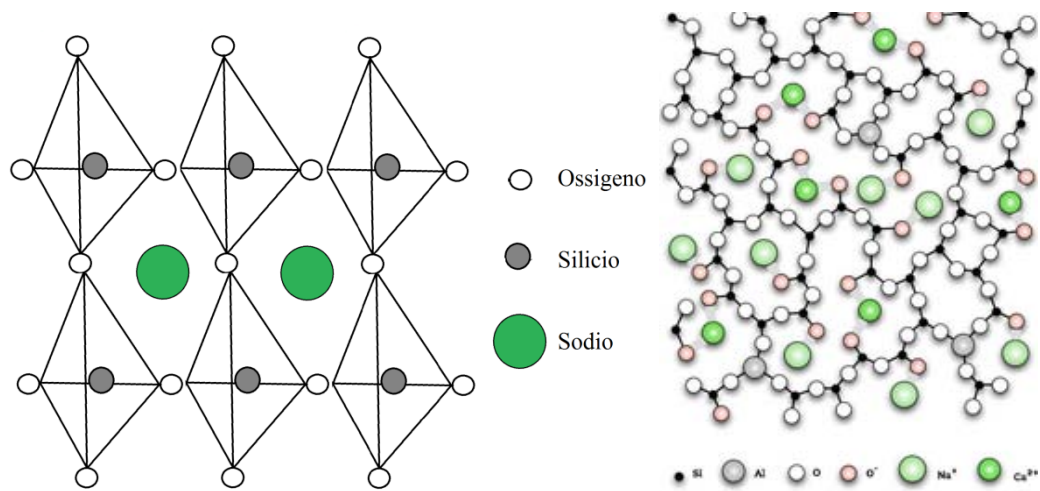


Figura 37: Struttura chimica del vetro. Gruppo tetraedrico (a sinistra) e struttura a lungo raggio (a destra).

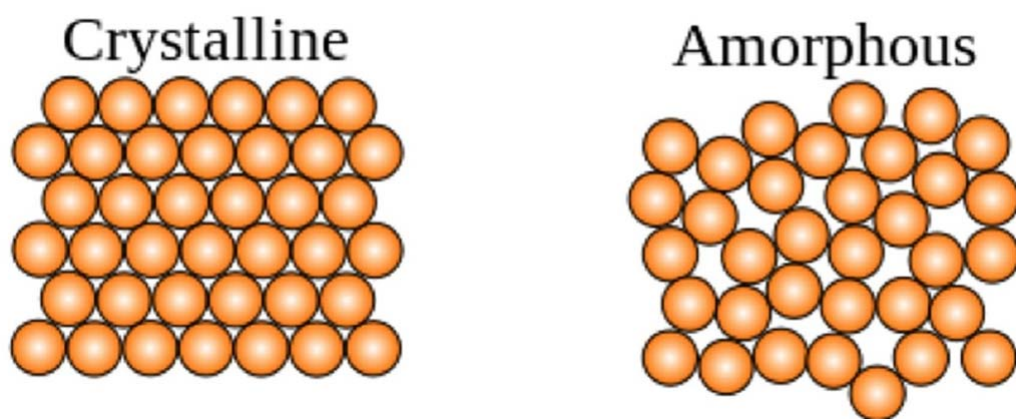


Figura 38: Confronto tra struttura cristallina e struttura amorfa.

2.5.2. Proprietà meccaniche del vetro

Il vetro è un materiale omogeneo e isotropo, il cui comportamento è elastico-lineare sino alla rottura, sia a trazione sia a compressione. La resistenza meccanica del vetro a compressione è sempre molto superiore rispetto alla resistenza meccanica a trazione. Nel vetro sodio-calcico è dell'ordine di 1000 N/mm^2 ; tale valore è però di incerta misurazione perché il contatto non uniforme tra superfici del provino e piastre di prova induce concentrazioni di sforzi che forniscono valori della tensione di rottura molto dispersi.

La resistenza a trazione del vetro risulta pressoché indipendente dalla composizione chimica, ma è influenzata dalle condizioni igrometriche dell'ambiente e dipende inoltre da amplificatori di tensione (microdifetti) presenti generalmente sulla superficie con il processo di formatura e con le successive manipolazioni. Pertanto, la resistenza meccanica del vetro deve essere valutata alla luce di un modello di Meccanica della Frattura.

Tutti i modelli presenti nella letteratura considerano che la rottura a trazione sia associata alla propagazione di una cricca preesistente, propagazione che risulta influenzata del tempo di applicazione del carico.

2.5.2.1. Meccanismi che regolano la resistenza a trazione del vetro

La resistenza a trazione del materiale si misura in genere sul vetro ricotto per poter prescindere da eventuali autotensioni. Il modello utilizzato è di solito quello classico della Meccanica della Frattura Elastica Lineare, per cui il parametro di riferimento risulta essere il fattore di intensificazione degli sforzi K . Dato che le dimensioni delle cricche pre-esistenti sono in genere molto più piccole dello spessore della lastra, il fattore K può essere ricavato dal problema elastico di un semispazio infinito e soggetto ad uno stato di sforzo biassiale, con una cricca penny-shaped che può essere in prima approssimazione ritenuta semiellittica (Figura 39).

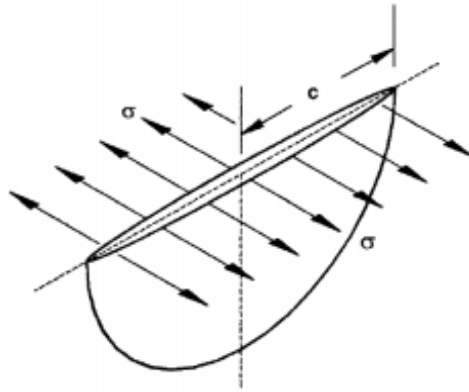


Figura 39: Modello di cricca penny-shaped in un semispazio infinito.

Il fattore K_I di intensificazione degli sforzi in modo I è dato da :

$$K = \sigma_g Y \sqrt{\pi c}$$

dove σ_g è la tensione di trazione agente in direzione normale al piano di giacitura della cricca, c è la lunghezza del più piccolo dei due semiassi dell'ellisse, mentre Y è un coefficiente adimensionale che tiene conto della forma geometrica del fronte di cricca, ricavabile dal grafico riportato in Figura 40.

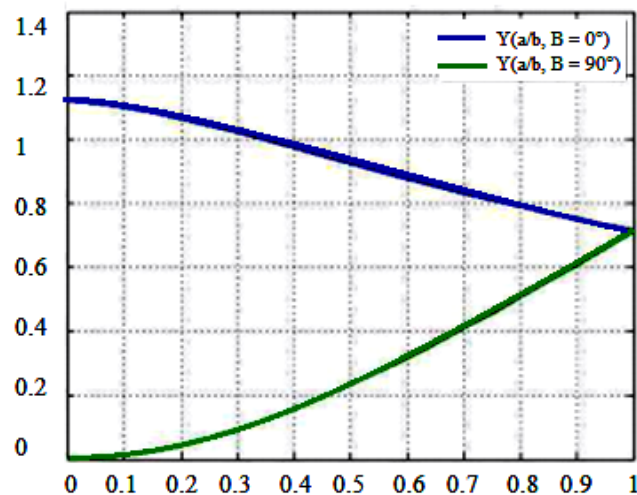


Figura 40: Grafico per la determinazione del coefficiente Y in funzione della forma del fronte di cricca.

Dato che il fattore di amplificazione dello sforzo risulta maggiore lungo l'asse minore che lungo quello maggiore, si può dimostrare che le fessure inizialmente ellittiche tendono ad evolvere verso una frattura circolare. A titolo di esempio, la Figura 41 mostra la tipica forma semicircolare (il bordo è dove il vetro inizia a incresparsi) di una cricca in fase avanzata di propagazione, innescata da una cricca inizialmente di forma grossolanamente semiellittica.

Pertanto, nel processo di propagazione si può ritenere che la cricca superficiale sia semicircolare e quindi utilizzare un fattore di modificazione $Y = 2.24/\pi$ (estremità destra del grafico di Figura 40).

Sono stati individuati due valori limite di K_I che descrivono la modalità di propagazione della cricca: il valore di soglia, K_{I0} , dipendente dalle condizioni ambientali, al di sotto del quale non vi è propagazione; il valore critico, K_{IC} , caratteristico del materiale, al di sotto del quale l'accrescimento è indipendente dalle condizioni ambientali e avviene a velocità tali da determinare la rottura pressoché istantanea. I valori intermedi del fattore di amplificazione degli sforzi definiscono l'intervallo di accrescimento sub-critico della frattura, che porta alla rottura differita nel tempo. Tale fenomeno è chiamato “fatica statica”.



Figura 41: Esempio di cricca in stato avanzato di propagazione.

Il valore critico K_{IC} è definito convenzionalmente come quel valore di K_I per il quale la frattura raggiunge la velocità di propagazione di 1 mm/s. Tale soglia segna il passaggio ad una fase nella quale si determina una drastica accelerazione, con la velocità di propagazione che passa rapidamente da 1 mm/s sino a circa 1500 m/s. Per il vetro silicato-sodico-calcico, si può assumere $K_{IC} = 0,75 \text{ MPa m}^{1/2}$. Tale valore può essere utilizzato anche per il vetro borosilicato utilizzato in edilizia.

Fissate le condizioni ambientali, il valore di soglia K_{I0} , è il più alto K_I per il quale la cricca non propaga. Come ordine di grandezza si può assumere per il vetro silicato-sodo-calcico $K_{I0} = 0.25 \div 0.30 \text{ MPa m}^{1/2}$.

In conclusione, quando $K_I \leq K_{I0}$ non si ha rottura qualunque sia la durata del carico; quando $K_{I0} < K_I < K_{IC}$ si ha rottura differita nel tempo; quando $K_I \geq K_{IC}$, si ha la rottura istantanea.

Il problema maggiore consiste nella valutazione delle dimensioni caratteristiche delle cricche iniziali difficilmente determinabili con indagini al microscopio. Si preferisce di solito utilizzare una valutazione indiretta, basata su un modello di accrescimento della fessura tarato sulla base di prove sperimentali macroscopiche.

2.5.2.2. Definizione del coefficiente K_{mod}

Molte normative (AS 1288-2066, ASTM E1300-09a, prEN 13474) introducono un coefficiente, indicato come K_{mod} nel progetto di norma prEN 13474, che riduce opportunamente la resistenza a trazione del vetro per tenere conto, in modo pratico, del fenomeno della fatica statica. Data la resistenza a trazione f_g del vetro, calcolata secondo la normativa di riferimento e la durata caratteristica t_L dell'azione che provoca la tensione σ_L , supposta costante, si definisce il coefficiente K_{mod} dalla condizione:

$$\sigma_L = K_{mod} f_g \Leftrightarrow c = c_L \text{ per } t = t_L$$

In altre parole, un carico che agisce per una durata t_L e che provoca una tensione minore di $k_{mod} f_g$, non provoca la rottura del materiale.

Utilizzando il valore $f_g = 45$ MPa, valore minimo prescritto nella norma di prodotto per il vetro silicato-sodico-calcico ricotto, si riportano in Tabella 1: Valori di k_{mod} per differenti durate del carico. i valori del coefficiente k_{mod} in funzione di alcune durate t_L di applicazioni del carico, caratteristiche di azioni tipiche sulle costruzioni.

Mediante regressione ai minimi quadrati, per il fattore K_{mod} si può ricavare l'espressione:

$$K_{mod} = 0,585 t_L^{-1/16}$$

Dove t_L rappresenta la durata del carico espresso in ore.

Per i vetri presollecitati, i valori del coefficiente K_{mod} , calcolati sul modello proposto di meccanica della frattura, sono riportati in Figura 42 .

Tabella 1: Valori di k_{mod} per differenti durate del carico.

Tipo di azione esterna	Durata t_L	K_{mod} LEFM	K_{mod} prEN 13474/3
Vento (raffica)	3 ÷ 5 s	0,91 - 0,88	1,00
Transito temporaneo	30 s	0,78	0,89
Vento (cumulato)	10 min.	0,65	0,74
Variazioni temperatura giornaliere	11 ore	0,50	0,57
Neve (1 settimana)	1 sett.	0,42	0,48
Neve (3 mesi)	3 mesi	0,36	0,41
Variazioni temperatura stagionali	6 mesi	0,35	0,39
Peso proprio	50 anni	0,26	0,29

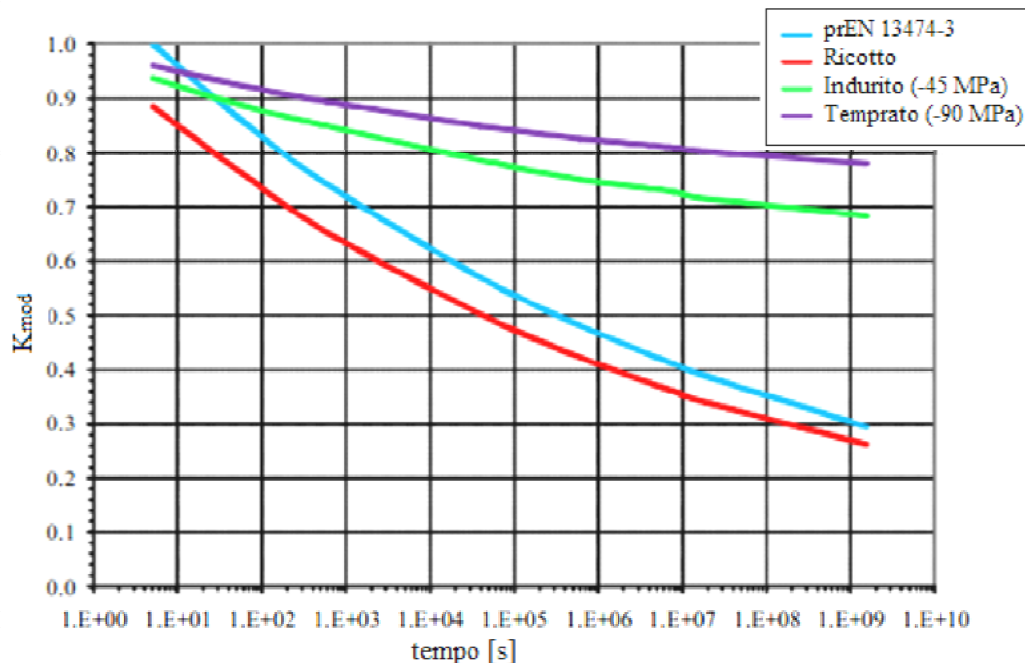


Figura 42: Determinazione di K_{mod} in funzione della durata del carico per vetri presollecitati.

2.5.3. classificazione degli elementi strutturali in vetro

Sulla base delle possibili conseguenze dovute alla crisi degli elementi strutturali in termini economici, sociali, ambientali e perdita di vite umane, nel prospetto B1 della UNI EN1990 si definiscono le classi di conseguenze CC1 e CC2 e CC3, associandole in genere a varie categorie di costruzioni sulla base dell'importanza (ad es., edifici agricoli, edifici residenziali, edifici pubblici suscettibili di grande affollamento). Nel caso dei prodotti da costruzione in vetro si aggiunge la classe CC0, che comprende tutti quegli elementi specificatamente non strutturali.

In conclusione, si definiscono le seguenti classi di conseguenze:

- **CC0**: elementi specificatamente non strutturali. A seguito della crisi, conseguenze trascurabili in termini economici, sociali o ambientali e rischio pressoché nullo per perdita di vite umane.
- **CC1**: a seguito della crisi, conseguenze basse per perdita di vite umane e conseguenze modeste o trascurabili in termini economici, sociali o

ambientali. Fanno parte di questa categoria le strutture degli edifici dove le persone sono presenti solo occasionalmente e, per estensione, quei prodotti da costruzione in vetro la cui crisi strutturale comporta scarse conseguenze.

- **CC2:** a seguito della crisi, conseguenze medie per perdita di vite umane, conseguenze considerevoli in termini economici, sociali o ambientali. Esempi di strutture ricadenti in questa classe sono quelle degli edifici residenziali e uffici. Per estensione, tutti quei prodotti da costruzione la cui crisi comporta conseguenze di livello medio.
- **CC3:** conseguenze alte per perdita di vite umane, conseguenze importanti in termini economici, sociali o ambientali. Ricadono in questa categoria, ad esempio, le strutture di edifici pubblici, palchi e tribune coperte, dove le conseguenze della crisi possono essere elevate (sale da concerto, centri commerciali con grande affollamento etc.). Per estensione, tutti quei prodotti da costruzione la cui crisi comporta conseguenze di livello alto.

Gli elementi strutturali in vetro usati nelle costruzioni civili possono essere distinti in elementi di classe zero, prima classe, seconda classe o terza classe a seconda dell'importanza, secondo le definizioni che seguono.

- 0. Classe zero:** Elementi senza funzione strutturale, con classe di conseguenze CC0.
- 1. Prima classe:** Elementi strutturali con classe di conseguenza CC1.
- 2. Seconda classe:** Elementi strutturali con classe di conseguenza CC2.
- 3. Terza classe:** Elementi strutturali con classe di conseguenza CC3.

Non è in genere possibile associare in maniera univoca a ciascuna categoria strutturale (travi, solai, coperture) una determinata classe di conseguenze. Ad esempio, un parapetto in vetro il cui collasso non comporti rischi di cadute nel vuoto (perché posto ad altezza pressoché nulla, o perché protetto da adeguata struttura metallica di contenimento) potrebbe essere considerato in classe 0; un parapetto geometricamente simile ma posto a grande altezza senza altro presidio

anticaduta, dovrà essere considerato in classe 1 o in classe 2, a seconda delle possibili conseguenze a seguito della crisi.

Si riporta in Tabella 2 una proposta di classificazione sulla base delle condizioni d'impiego più comuni.

Tabella 2: Classificazione degli elementi strutturali in vetro.

Tipo	Classe per verifica pre-rottura	Classe per verifica post-rottura
Elementi verticali ²⁹ vincolati in modo continuo lungo i bordi ³⁰	1/0	1/0
Elementi verticali con vincoli puntuali ³¹	2/1	2/1
Coperture orizzontali	2/1	2/1
Parapetti con pericolo di caduta	2/1	2/1
Pinne di controvento ³²	2	2/1
Solai o travi portanti	2	2
Pilastrini	3 (studi specifici con metodi di livello II o III ³³)	2 (con le azioni della prerottura)

2.5.4. Valutazione probabilistica della sicurezza

Per la verifica della sicurezza si adotta il metodo semiprobabilistico agli stati limite classificato come metodo di livello I [UNI EN 1990]. Il metodo considera coefficienti parziali amplificativi delle azioni e diminutivi delle resistenze, in

²⁹ “Un elemento è considerato verticale se l’angolo che forma con la verticale è inferiore a 15°, altrimenti è considerato orizzontale” (CNR-DT 210/2012)

³⁰ Ad esempio le lastre di una curtain wall Stik System o Unit System (vedi Figura 9).

³¹ Ad esempio le lastre di una facciata continua appesa (vedi Figura 10)

³² Ad esempio le pinne di controvento della facciata della nota precedente

³³ Vedi 2.5.4

modo tale da poter condurre la verifica della sicurezza con un confronto diretto fra i valori pesati di sollecitazioni e resistenze. I coefficienti parziali devono essere calibrati in modo tale che, in una visione probabilistica della sicurezza, tale confronto sia indicativo del livello prestazionale richiesto alla costruzione in termini di probabilità di collasso. Tali livelli prestazionali vengono prescritti dall'Eurocodice [UNI EN 1990] a seconda della vita utile e dell'importanza della costruzione, nonché sulla base delle possibili conseguenze del collasso.

Come stabilito dall'EN1990, il livello di affidabilità strutturale delle costruzioni civili, ovvero la probabilità di collasso, deve essere commisurata alla vita di progetto della struttura, all'importanza dell'opera e alla gravità delle conseguenze (perdita di vite umane e danneggiamento di beni).

La valutazione del livello di rischio considerato accettabile viene condotta sulla base delle classi di conseguenza, (CC1, CC2, CC3), ma dato che l'uso di strutture in vetro resta in generale limitato a porzioni locali della struttura, almeno nelle applicazioni più ricorrenti è sufficiente considerare le classi di conseguenze CC2 e CC1.

In opere particolarmente impegnative, dove la struttura in vetro rimane l'unica struttura portante della costruzione (ad es. telai portanti in vetro), si dovrà considerare la classe di conseguenza CC3. Per questi casi si dovrà assicurare il grado di sicurezza richiesto sulla base di metodi di livello II o di livello III³⁴.

2.5.4.1. Metodo di livello I (o dei coefficienti parziali)

I metodi di livello I sono quelli più usati nella pratica progettuale per la loro semplicità. Secondo questo approccio, partendo dai valori nominali delle variabili di base (cioè azioni, resistenze e proprietà geometriche) attraverso l'utilizzo di fattori parziali per il materiale e per le azioni, si ottengono i valori di progetto con i quali effettuare la verifica delle strutture per garantire che nessuno stato limite relativo sia superato.

³⁴ Per approfondimenti sui metodi di livello III e II si rimanda al cap. 5 del CNR-DT 210/2012

I coefficienti parziali di sicurezza delle resistenze (γ_M) e delle azioni (γ_Q) riportati nelle norme tecniche corrispondono in genere ad una struttura con un valore dell'indice di affidabilità β maggiore di 3,8 per un periodo di riferimento di 50 anni, ossia ad una classe di conseguenze CC2, a cui appartengono gli elementi della seconda classe. Tali coefficienti sono stati tarati assumendo distribuzioni delle resistenze di tipo gaussiano o log-normale. Visto che il vetro segue invece una distribuzione alla Weibull, i coefficienti parziali γ_M delle resistenze dei materiali devono essere appositamente tarati in modo tale da ottenere la probabilità di collasso sopraindicata. I coefficienti parziali γ_Q relativi alle azioni si assumono i medesimi di quelli riportati negli Eurocodici e nella normativa tecnica nazionale. I coefficienti parziali γ_M relativi ai materiali verranno appositamente tarati sulla base della statistica di Weibull per casi paradigmatici della pratica progettuale.

In conclusione, la verifica di sicurezza con metodi di livello I sarà della forma

$$\sigma_{max} = S(\gamma_Q Q) \leq \frac{f_g}{R_M \gamma_M}$$

dove $S(\gamma_Q Q)$ rappresenta la sollecitazione dovuta all'azione Q (moltiplicata per il coefficiente parziale γ_Q), mentre f_g rappresenta genericamente la resistenza del vetro, γ_Q il coefficiente parziale del materiale e R_M il coefficiente che tiene conto, probabilisticamente, del passaggio da verifiche in classe seconda ($R_M = 1$) a verifiche in classe prima ($R_M < 1$).

Le indicazioni CNR propongono per le verifiche in prima classe valori di R_M pari a 0,7 per il vetro ricotto e $R_{M,v} = 0,9$ per quello temprato

Per la calibrazione di γ_M si fa riferimento ai casi di studio consolidati, che riportano a seconda dell'elemento tecnico e del tipo dell'azione, i coefficienti da impiegare.

In linea di massima comunque si possono assumere valori di $\gamma_M = 2,55$ per il ricotto e $\gamma_{M,v} = 1,35$ per il vetro temprato.

I valori di f_g del vetro sono riportati nella Tabella 3:

Tabella 3: Valori della resistenza caratteristica a flessione delle diverse tipologie di vetro.

Tipo di vetro	f_g [N\mm²]
Vetro ricotto	45
Vetro indurito termicamente	70
Vetro temprato termicamente	120
Vetro indurito chimicamente	150

2.6. Il processo produttivo del mattone di vetro

Le materie prime (un vetrificante - sabbia silicea (70/74%), uno stabilizzante - carbonato di calcio (12/13%), un fondente - solfato di sodio (12/13%) . Vedi 2.5.1) vengono inizialmente controllate ed immagazzinate in opportuni contenitori all'interno dell'impianto di composizione (Figura 43) [1], che in modo automatico ne effettua il dosaggio secondo una determinata ricetta. La miscela è avviata al forno di fusione [2] nel quale ad una temperatura di circa 1500° si trasforma in vetro; le modalità di gestione del processo di fusione sono determinanti per garantire i livelli di qualità del vetro richiesti. Successivamente, il vetro fuso è canalizzato verso le linee di produzione, a monte delle quali un impianto denominato "feeder" [3] lo trasforma in "goccia", con peso e frequenze determinati. La "goccia" di vetro cade all'interno di uno stampo [4] dove prende la forma desiderata grazie alla pressione di un pistone, producendo così la prima metà del mattone. Lo stampo da una parte e il pistone dall'altra generano, secondo la loro geometria, il disegno del vetro, la forma e le dimensioni. Le metà di mattone ottenute vengono poi avviate ad una "giostra" dove vengono saldate a fuoco tra di loro, dando così origine al pezzo finito. Una volta saldato, il mattone di vetro prosegue nel tunnel di ricottura [5], dove è raffreddato lentamente, al

fine di evitare la presenza di nocive tensioni residue. Alla fine del tunnel la qualità della produzione è garantita da una serie di controlli strumentali e visivi, prima di essere avviata alle lavorazioni di finitura. La colorazione del vetro si determina attraverso due modalità principali: in “pasta”, a monte della linea di produzione, con l’inserimento nel vetro all’inizio del “feeder” di scaglie di speciali pigmenti vetrosi, chiamate fritte; oppure superficiale, a valle della linea di produzione, mediante un processo di iniezione di vernici particolari all’interno della camera del vetro. Nel primo caso si ottengono prevalentemente colori a tinte tenui, mentre nel secondo le tonalità sono pressoché infinite³⁵.

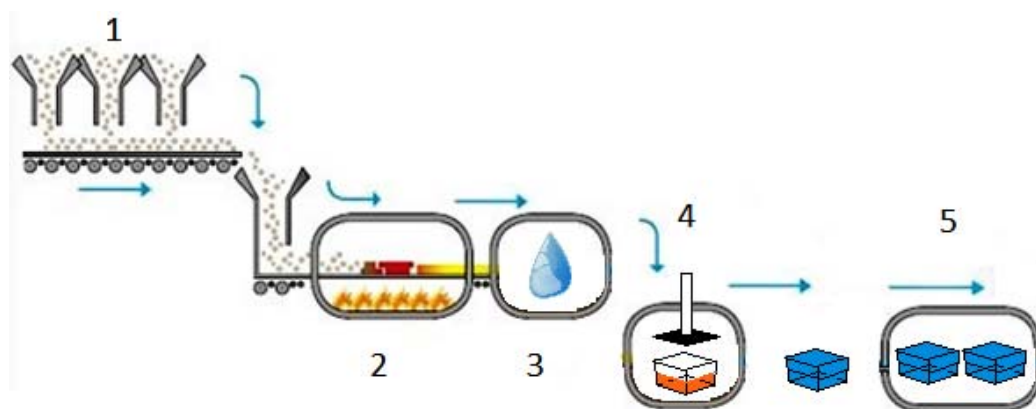


Figura 43: Processo produttivo del mattone di vetro.

³⁵ Le informazioni di tutto il paragrafo 2.6 sono state ricavate da Assovetro (Associazione Nazionale degli Industriali del Vetro - www.assovetro.it).

Capitolo 3

Caso Studio

Per poter procedere ad un'analisi dettagliata degli effetti dovuti alla maturazione del calcestruzzo e alla variazione di temperatura presentati precedentemente, in questo capitolo e in quelli successivi verrà esposto un caso di studio trattato con modelli numerici su cui basare delle prescrizioni pratiche per la progettazione di una facciata in pannelli prefabbricati di vetrocemento.

La scelta di basare le indagini su pannelli prefabbricati è dovuta al fatto che questa tipologia di applicazione del mattone di vetro è sensibile ad errori di progettazione e complessa, sia per quanto riguarda la scelta dei materiali, sia per ciò che concerne le modalità di esecuzione dell'opera stessa.

In questo modo i risultati ottenuti potranno essere di riferimento per altre applicazioni. Infatti, se si prende ad esempio una parete interna, essa non avrà tutte quelle problematiche legate agli aspetti igrometrici o alla tipologia delle connessioni, così come un pannello in vetro mattoni legati da una sottostruttura in legno non presenterà le coazioni tra vetro e cemento tipici di un'opera vetrocimentizia monolitica.

In particolare l'oggetto di studio si basa su un caso reale di pannelli di facciata realizzati con mattoni di vetro, in cui si sono riscontrati cospicui danneggiamenti. Dalla documentazione fornita si evince che dopo otto mesi dall'installazione si sono manifestate alcune fessurazioni delle facce interne dei blocchi in vetro.

Le indagini che seguono avranno lo scopo di identificare le cause che hanno portato al fenomeno osservato e di conseguenza estrapolare delle regole generali per la progettazione.

L'analisi verrà condotta su pannelli di base 189 cm (5 blocchi di vetro) e altezza 195 cm (5 blocchi di vetro). La distanza tra i mattoni in vetro è di 8 cm, lo spessore del calcestruzzo è di 9,5 cm entro il quale sono inseriti due ferri

d'armatura zincati (B450C) di diametro 8 mm, posizionati sia nel travetto verticale che in quello orizzontale. Il copriferro è pari a 15 mm.

Un esempio di geometria del pannello è riportato in Figura 44.

I pannelli sono composti da mattoni 3D COLLECTION DIAMANTE prodotti dalla ditta SEVES, leader nella produzione di mattoni in vetro, che ha fornito tutte le schede tecniche utili all'analisi.

In questo capitolo verranno elencate brevemente le caratteristiche principali dei materiali utilizzati e successivamente verrà presentata la modalità di produzione dei pannelli prefabbricati.

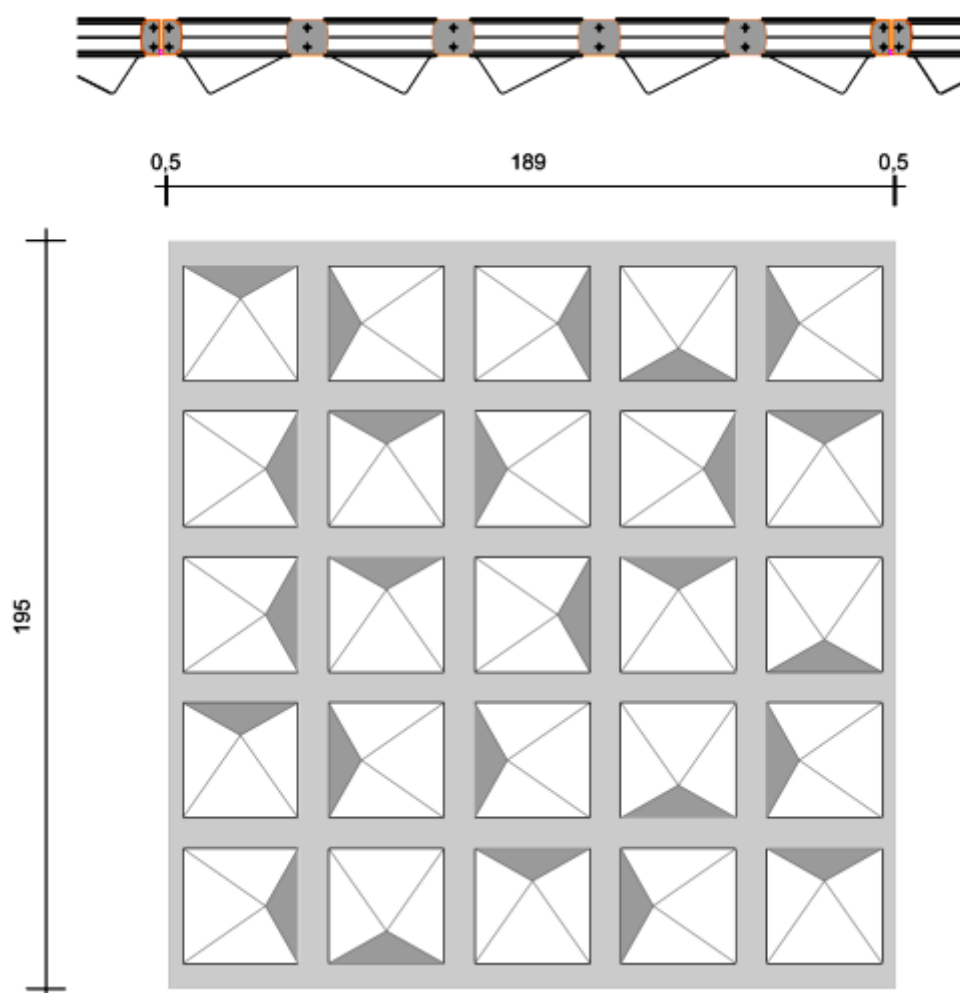


Figura 44: Caso di studio.

3.1. Materiali

Si procede di seguito ad elencare le caratteristiche principali dei materiali utilizzati. Va specificato che ogni dato riportato è estrapolato da prove di laboratorio e certificazioni che ne attestano la veridicità.

3.1.1. Mattoni di vetro

I mattoni sono composti da due formelle di vetro ricotto, di cui una con la caratteristica superficie a diamante, accoppiate con un interlayer costituito da una lastra di vetro basso emissivo. Le cavità sono inoltre riempite da gas Argon per ridurre la trasmittanza complessiva.

Le caratteristiche geometriche e tecniche principali sono mostrate in Figura 45

Tra i documenti pervenuti vi è il Test Report No.103/2010 dell'istituto IKATES (Laboratorio accreditato N° 1139) che ha sottoposto i blocchi a prove di valutazione della trasmittanza termica (in accordo con le EN 673:2002) e a valutazione di conformità (in accordo con le EN1051-2:2008).

Dalla documentazione fornita si evince che la trasmittanza termica risulta pari a $1,4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ valutata in accordo con le EN 673.

I campioni sono stati inoltre sottoposti a prova di compressione secondo l'Appendice A della norma EN1051-1:2005 (area 298x98 mm) e hanno mostrato un valore medio a rottura pari a 10 MPa e deviazione standard pari a 1,22 MPa (coefficiente di variazione pari a 12,22%). Mentre le prove secondo l'Appendice E della norma EN1051-2:2008 (area 40x40 mm) hanno mostrato un valore medio a rottura pari a 27,04 MPa e deviazione standard pari a 5,65 MPa (coefficiente di variazione pari a 20,90%).

Le ultime prove hanno mostrato un valore medio a rottura pari a 16,74 MPa e deviazione standard pari a 4,03 MPa (coefficiente di variazione pari a 24,08%).

I campioni in vetro sono stati inoltre sottoposti a prova di resistenza allo shock termico secondo l'Appendice B della norma EN1051-2:2008 e UNI EN

ISO7459:2004. Le temperature adottate sono state 50°C e 20°C e nessun campione ha mostrato danneggiamenti.

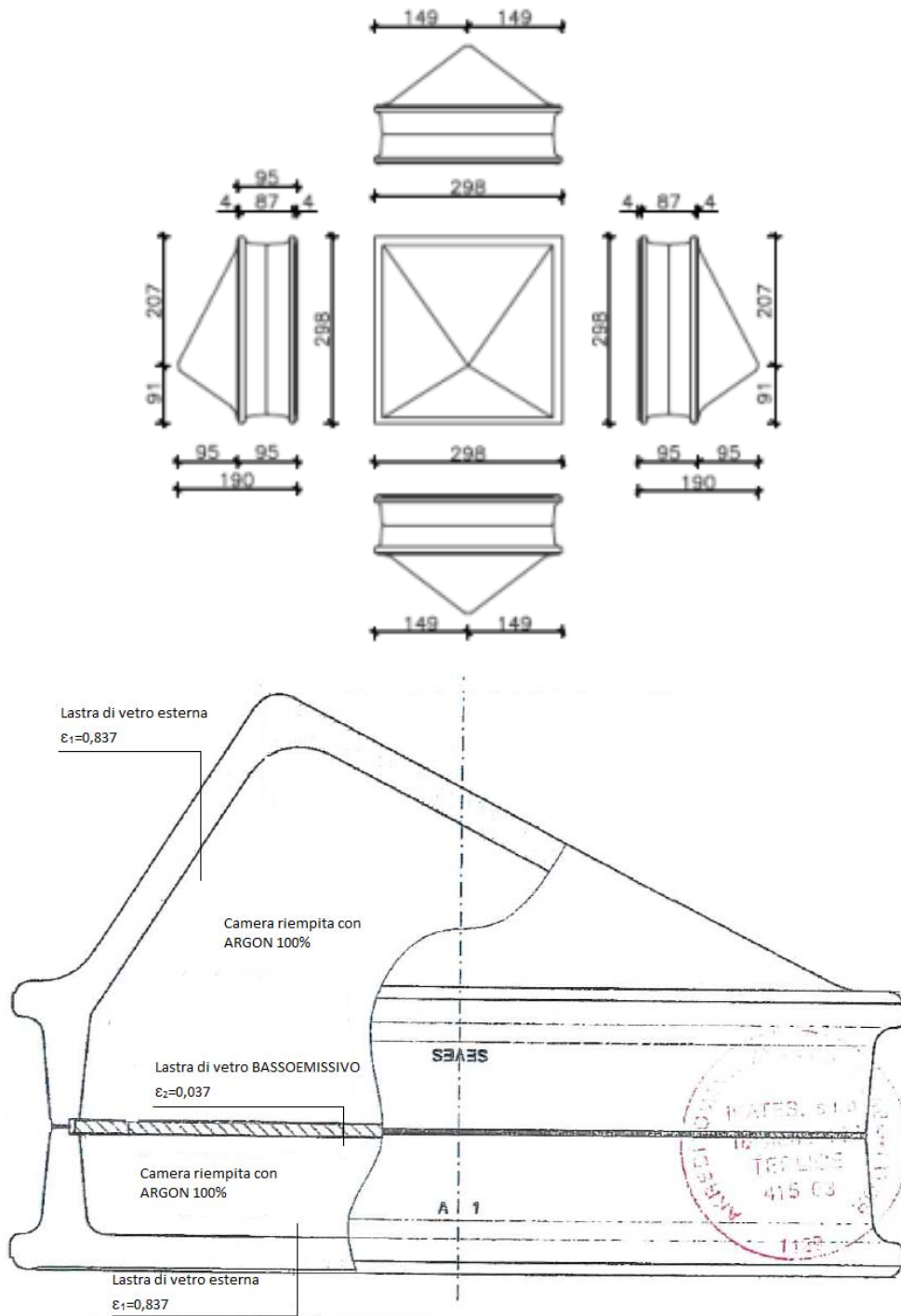


Figura 45: Elemento mattone di vetro DIAMANTE. Caratteristiche tecniche e geometriche..

3.1.2. Calcestruzzo

Il calcestruzzo utilizzato è di classe C32/40 e presenta un diametro massimo dell'aggregato pari a 16 mm, una classe di esposizione XC1 e una classe di consistenza S5. Dalla documentazione si evince che il calcestruzzo è stato realizzato con due tipologie diverse di cemento: tipo CEMII/B-LL 32.5R per i getti realizzati con betoniera in stabilimento e tipo CEMII/A-LL 42.5R per i calcestruzzi realizzati in impianto di betonaggio.

Il tempo intercorso tra il carico e lo scarico della betoniera è variabile tra i 75 e i 90 minuti circa.

Dal rapporto di prova numero 0161-2014 effettuata dall'Istituto di Ricerche e Collaudi M. Masini S.r.l., risulta che la resistenza media calcolata su tre campioni di età variabile tra 454 e 470 giorni risulta pari a 57,17 MPa e la densità media è di 2,25 kN/m³.

3.2. Modalità di produzione dei pannelli

I pannelli in vetrocemento vengono realizzati su casseri metallici costituiti da una lastra in lamiera forata al laser per l'alloggiamento dei vetro mattoni.

Sul cassero si applica un prodotto disarmante e successivamente vengono posizionati i tondini di armatura in acciaio zincato di diametro 8 mm (acciaio tipo B450C), sostenuti da distanziatori in PVC da 15 mm che garantiscono un copriferro uniforme. In particolare si colloca un tondino d'acciaio sia per le fughe orizzontali, sia per quelle verticali (Figura 46). L'incrocio tra i tondini verticali e quelli orizzontali viene legato con filo di ferro per garantire la stabilità durante le operazioni di getto (Figura 49).

A questo punto si inseriscono i mattoni di vetro nelle loro sedi, seguendo lo schema del progetto esecutivo.

Completata questa operazione si posizionano le sponde di contenimento perimetrale costituite da tubolari metallici a sezione rettangolare. Nelle sponde si trovano gli alloggiamenti per posizionare le boccole M12 in acciaio zincato (Figura 47) che restano annegate nel getto in calcestruzzo per consentire il sollevamento, il carico, lo scarico e la movimentazione dei pannelli (Figura 55). Vengono collocate 2 boccole sulla parte superiore del pannello ed ulteriori 2 boccole per ogni lato verticale, per un totale di 6 boccole per pannello.

Completata la fase di preparazione si procede al getto dei pannelli.

Dopo aver disposto sul cassero un sottile strato composto da un impasto fluido di sabbietta e cemento, per ottenere la finitura liscia di fondo cassero, si procede col getto del calcestruzzo avente le caratteristiche riportate in 3.1.2.

L'impasto viene collocato nel cassero manualmente, disposto uniformemente nei singoli travetti tramite cazzuole e successivamente vibrato con ago sottile da 25 mm. Dopo aver vibrato il calcestruzzo, vengono collocati i tondini di armatura della parte superiore del pannello in maniera speculare rispetto a quelli inferiori e successivamente viene completato il getto manualmente (Figura 50).

Tutte le fasi fin qui descritte vengono eseguite la mattina, mentre nel pomeriggio si effettuano le lavorazioni per la stuccatura dei travetti.

Vengono rimossi i residui di calcestruzzo in eccesso dai mattoni di vetro e vengono lisciati i travetti per ottenere una superficie uniforme atta ad accogliere la stesura del materiale di finitura. Tale finitura viene realizzata con un impasto di sabbietta e cemento mediamente denso che viene steso sul pannello.

Dopo aver fatto riposare per breve tempo il materiale, si ripassano tutti i travetti in modo tale da spianare, livellare e rimuovere eventuale materiale in eccesso.

Infine si procede alla pulizia definitiva dei mattoni di vetro tramite la stesura di sabbietta fine e successiva strofinatura mediante una paglietta di legno fine.

Il giorno successivo vengono rimosse le sponde perimetrali e si lasciano i pannelli nei casseri per altri 7 giorni prima di procedere al disarmo (Figura 51).

I pannelli vengono poi sollevati in piano con l'ausilio di un carro ponte e posizionati in verticale per consentire la pulizia dalla parte di fondo cassero da eventuali sbavature (Figura 54).

Terminate le fasi produttive vengono posti due pannelli per ogni cavalletto legati tra loro tramite reggie in plastica e fissati con piatti in ferro, in modo tale da non consentirne il movimento durante le operazioni di carico e scarico.

Il carico viene effettuato tramite carro ponte che solleva il cavalletto e lo posiziona sull'autocarro per la consegna. Vengono caricati quattro cavalletti per ogni viaggio.

3.2.1. Documentazione fotografica



Figura 46: Fasi di preparazione al getto - Posizionamento mattoni, armature e sponde.



Figura 47: Dettaglio - Inserimento delle boccole laterali.



Figura 48: Dettaglio - Posizionamento boccole di fissaggio del pannello.



Figura 49: Dettaglio - Legatura ferri di armatura nel punto di incontro tra correnti verticali e orizzontali.



Figura 50: Dettaglio - Completamento getto superiore.

Figura 51: Fase di maturazione del getto.



Figura 52: Dettaglio – Fine di maturazione del getto.

Figura 53: Dettaglio – Finitura di bordo del pannello.



Figura 54: Posizionamento verticale dei pannelli.

Figura 55: Dettaglio – Movimentazione tramite le boccole perimetrali

Capitolo 4

Elaborazione Dati

In questo capitolo verranno presentate delle analisi propedeutiche, derivanti da un'elaborazione dei dati in possesso, necessarie per poter procedere all'analisi dettagliata agli elementi finiti (FEM³⁶).

In particolare verranno presi in considerazione tutti gli elementi che costituiscono delle problematiche proprie di questa tecnologia, così come è stato esposto nel capitolo 2 (vedi 2.4), ovvero il ritiro del calcestruzzo, il carico termico e la tipologia delle connessioni.

Per quanto riguarda l'effetto dovuto al ritiro del calcestruzzo verrà presentata un modello analitico in campo elastico lineare al fine di determinare un range di risultati attendibili, nonché una previsione teorica di massima dell'evoluzione del fenomeno fessurativo.

L'elaborazione dei dati termoigrometrici verrà invece effettuata sulla base dei dati forniti dall'ARPA³⁷, al fine di poter simulare con maggior precisione possibile l'andamento delle isoterme, responsabili della non linearità del carico termico. Anche le indagini sugli effetti termici verranno effettuate tramite analisi agli elementi finiti, prendendo in considerazione solo le peggiori condizioni di carico, limitandosi ad una valutazione in condizioni stazionarie. Questa semplificazione è giustificata dal fatto che, essendo la resistenza del vetro dipendente dalla durata del carico, la condizione di stazionarietà sarà la peggior configurazione possibile del carico termico (vedi 2.5, Tabella 1).

Infine verranno analizzate le connessioni per poter determinare le condizioni di vincolo da imporre nel modello agli elementi finiti.

³⁶ Finite Element Method: è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche. Il metodo è alla base dell'analisi agli elementi finiti (FEA).

³⁷ Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente – Lombardia.

4.1. Ritiro del calcestruzzo: modello analitico

Al fine di valutare l'evoluzione del fenomeno nel tempo si presenta la seguente formulazione analitica in campo elastico lineare.

Si consideri la porzione di travetto in calcestruzzo adiacente ai blocchi in vetro (Figura 56).

Il ritiro induce una deformazione sul calcestruzzo pari a ε_{sh} . Tale deformazione induce uno stato tensionale di trazione nel calcestruzzo a causa dei vincoli presenti: vetro e acciaio d'armatura.

Insorgono pertanto degli stati coattivi e si possono definire come X_S e X_G le azioni che si scambiano rispettivamente calcestruzzo e acciaio e calcestruzzo e vetro.

Per l'equilibrio l'azione sul calcestruzzo X_C è quindi pari a:

$$X_C = X_S + X_G$$

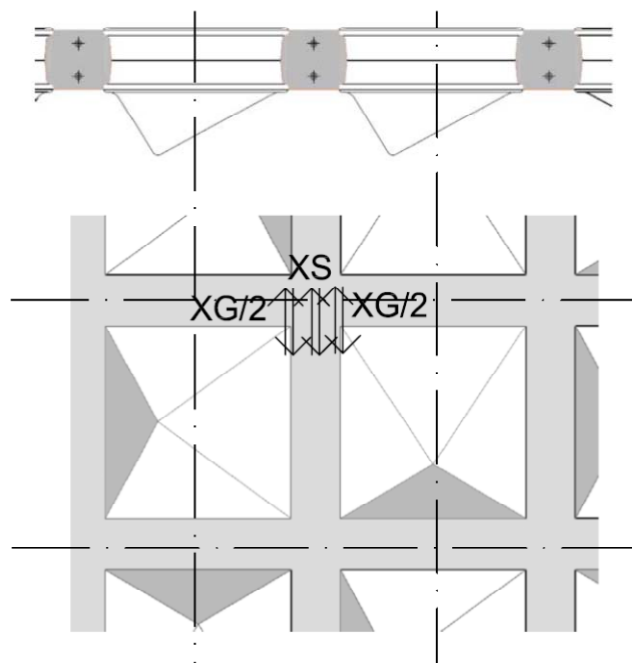


Figura 56: Schema delle coazioni tra cls e vetro.

L'ipotesi di sezioni piane impone che le deformazioni dei tre materiali siano uguali:

$$\varepsilon_C = \varepsilon_S = \varepsilon_G.$$

E' pertanto possibile ricavare le corrispondenti tensioni in vetro, acciaio e calcestruzzo. Tali tensioni non sono ovviamente costanti, ma variano nel tempo in base alla variazione del ritiro. Considerando ad esempio la legge fornita dal bollettino CEB-FIB 2010 si ottengono due risultati diversi a seconda del cemento utilizzato (CEM 32.5 R o CEM 42.5R).

Nei grafici di Figura 57 e di Figura 58 si riportano le tensioni nel vetro (σ_G) e nel calcestruzzo (σ_C) e la resistenza a trazione del calcestruzzo (f_{ctm}).

Come riportato in Figura 32: Effetti combinati del ritiro e legge di equilibrio associata al fenomeno.2.4.1 e facendo riferimento alla Figura 32, si può notare come al superamento da parte della curva delle tensioni interne del limite di resistenza del calcestruzzo, si inneschi la fessurazione dell'elemento.

Si osserva che per il cemento CEM32.5R la fessurazione dovrebbe aver inizio dopo 112 giorni, mentre per il cemento CEM 42.5R la fessurazione ha inizio dopo 58 giorni.

Tali valori sono indicativi in quanto dipendono dal codice normativo scelto, ma soprattutto il ritiro reale è governato da una serie di fattori che non sono stati forniti dalle relazioni tecniche (vedi 2.4.1), nonché dalla resistenza locale del calcestruzzo, che risulta solo teoricamente un materiale omogeneo.

Tuttavia, pur essendo impossibile definire il giorno esatto in cui la fessurazione ha avuto inizio, i valori indicati sono significativi al fine di individuare un range in cui il fenomeno si sia sviluppato.

A partire dal momento della fessurazione il calcestruzzo rilascia le trazioni sul vetro e pertanto l'analisi elastica lineare perde validità.

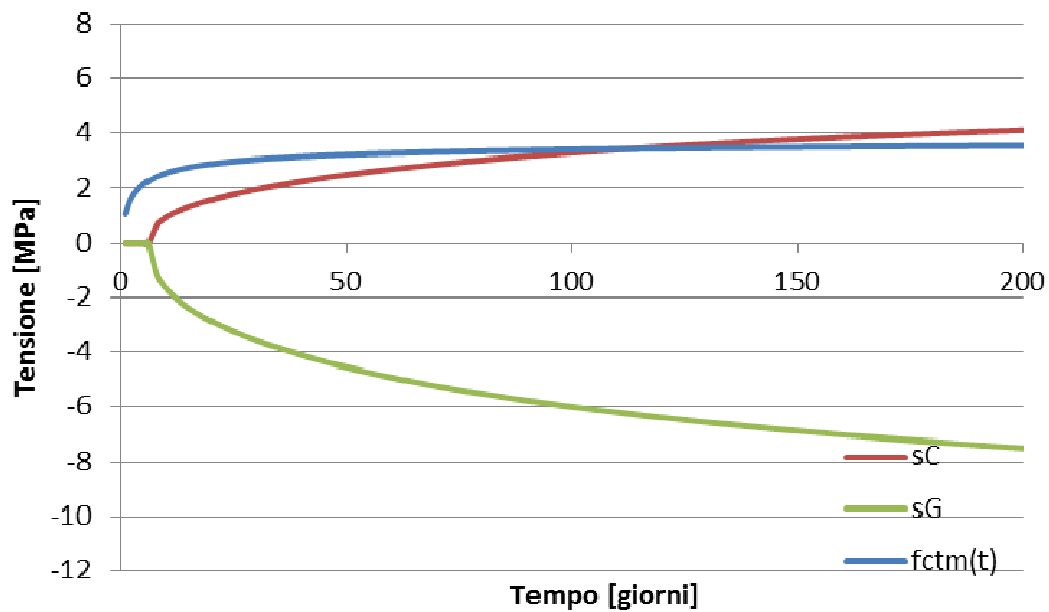


Figura 57: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R

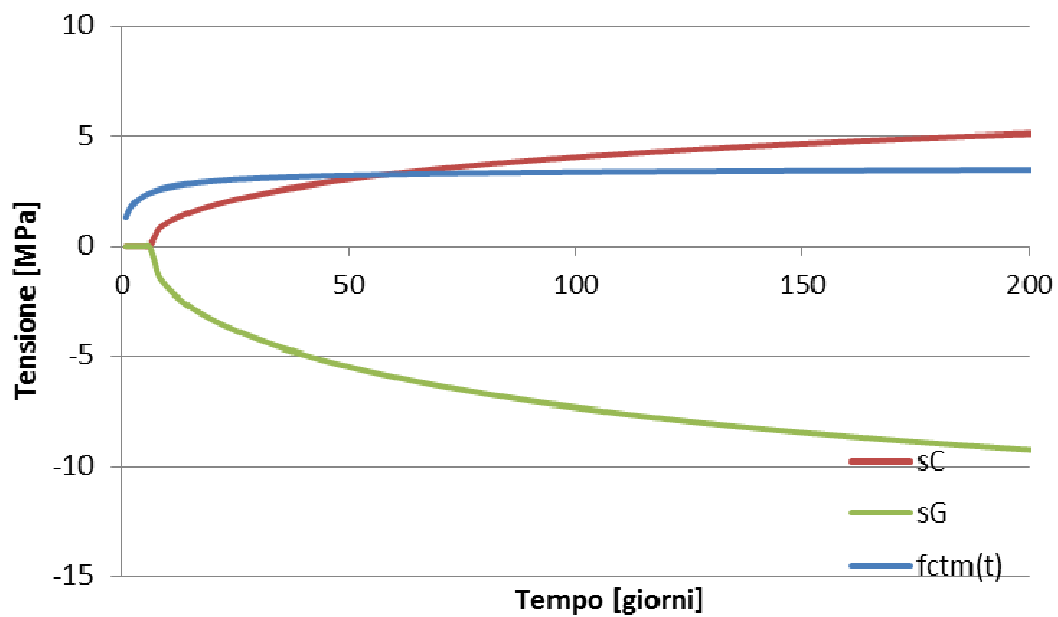


Figura 58: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 42.5R

4.2. Effetti termici

Le analisi termiche condotte e di seguito riportate, sono state effettuate al fine di valutare un possibile effetto della temperatura e dell'umidità relativa sui fenomeni osservati e determinare la mappatura delle temperature all'interno del pannello. Tale mappatura verrà importata nel software di calcolo agli elementi finiti Midas FEA per poter simulare con la massima accuratezza gli sforzi indotti dal carico termico che ne deriva.

Sono stati richiesti ad ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) i dati relativi a tali parametri nel periodo in esame. I valori rilevati sono mostrati in Figura 59 e in Figura 60

In Figura 61 sono riportati i valori massimi, minimi, medi e la deviazione standard di umidità relativa e temperatura in corrispondenza dei periodi in cui sono stati rilevati i danneggiamenti.

Si osserva che nel periodo in cui si è osservato il maggior numero di fessurazioni si è avuta anche una maggior variazione di temperatura e U.R. media.

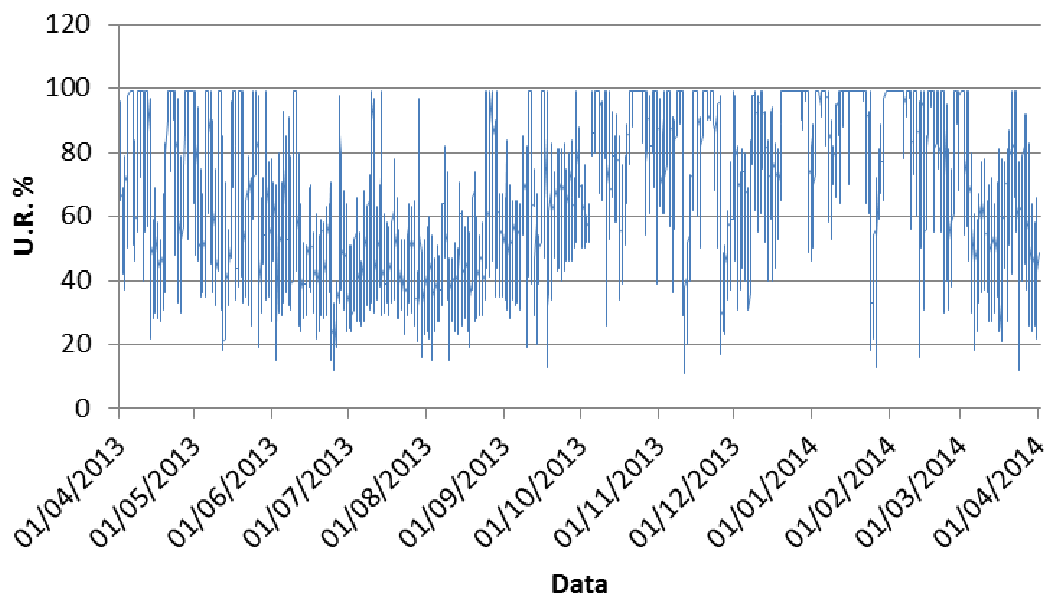


Figura 59: Umidità Relativa (1/4/2013-31/3/2013). Dati forniti dall'ARPA.

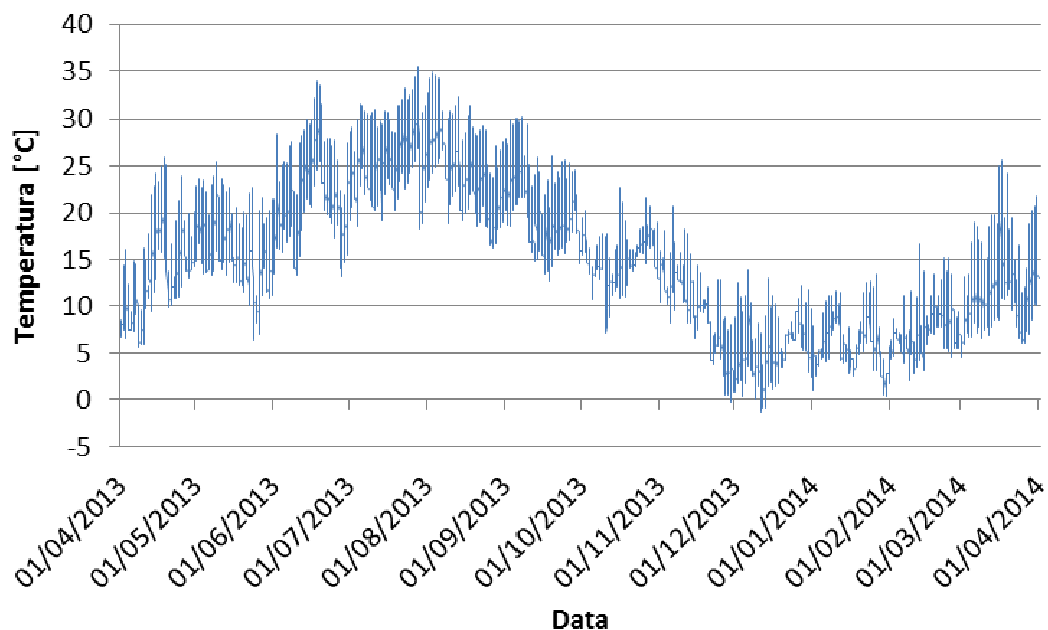


Figura 60: Temperatura (1/4/2013-31/3/2013). Dati forniti dall'ARPA.

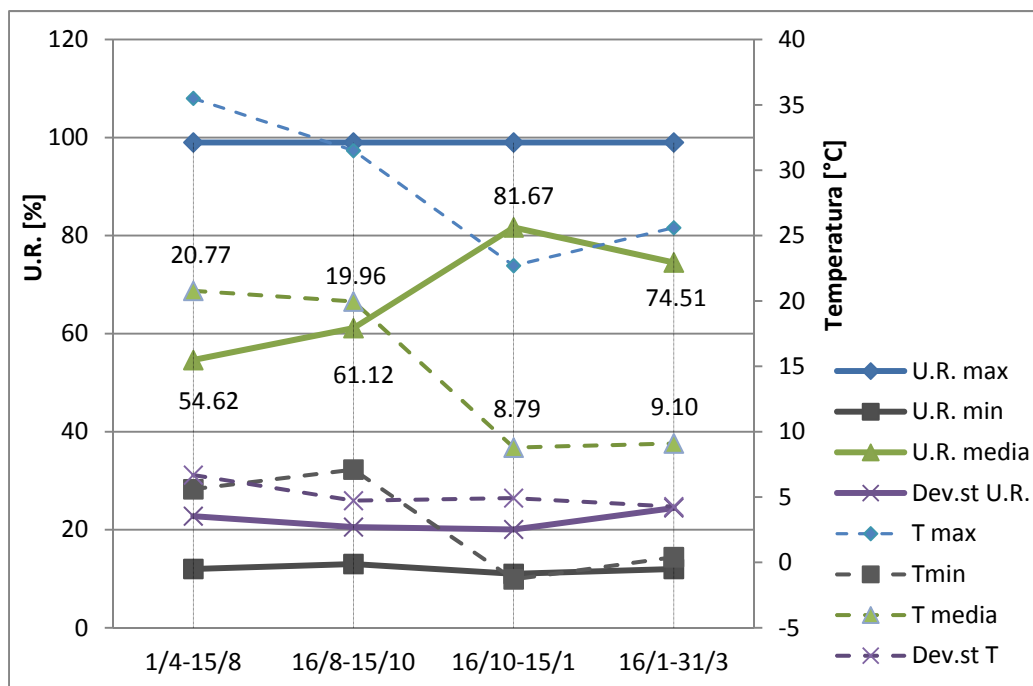


Figura 61: Temperatura e umidità relativa (massima, minima, media e deviazione standard) in diversi periodi.

Come già accennato nei capitoli precedenti, l'analisi dettagliata della distribuzione delle temperature all'interno della struttura solida del pannello di facciata è necessaria a causa della complessità geometrica e la non omogeneità dei materiali che compongono il manufatto.

Infatti, considerando una distribuzione omogeneamente perpendicolare al gradiente termico, si trascurerebbe il flusso non lineare (Figura 62) che si instaura per la reciproca interazione tra calcestruzzo e vetro mattone. Inoltre bisogna considerare la geometria variabile del mattone stesso che offre una diversa resistenza al flusso in ogni suo punto.

E' stata quindi effettuata un'analisi attraverso il software agli elementi finiti THERM 6.3 sviluppato dalla University of California Regents.

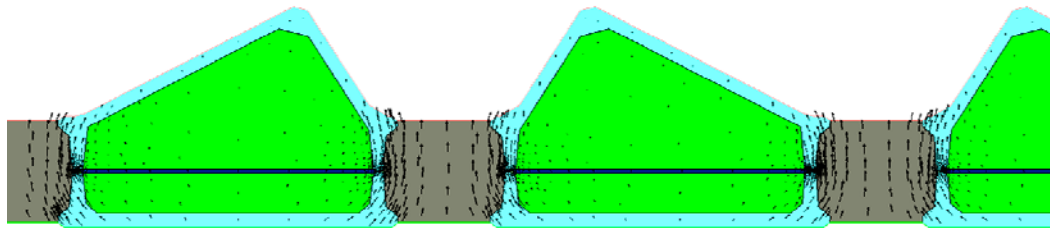


Figura 62: Rappresentazione grafica dei vettori di flusso termico all'interno del pannello (caso invernale).

4.2.1. Modellazione in THERM 6.3

4.2.1.1. Accorgimenti per la modellazione della camera riempita ad Argon

Al fine di ottenere una mappatura delle temperature il più possibile corrispondente alla realtà, si procede, prima della modellazione vera e propria tramite il software THERM, al calcolo della resistenza equivalente R_{eq} della camera stagna riempita da gas Argon. Tale semplificazione permette di considerare contemporaneamente tutti gli effetti dovuti alla presenza congiunta dello strato basso emissivo e della resistenza al flusso termico derivante

dall'averne un gas con densità inferiore a quella dell'aria. In pratica si modella la cavità come un materiale solido con la stessa densità del gas Argon e avente una resistenza equivalente tale da mantenere la stessa trasmittanza complessiva fornita dal rapporto di prova:

$$U = 1,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

L'analisi così condotta si riduce in tal modo ad un semplice caso di pura conduzione, concentrando in R_{eq} gli effetti radiativi e convettivi, così come avviene per le resistenze liminari.

Un'approssimazione del genere è ammissibile dal momento in cui non è necessario valutare una distribuzione reale delle temperature all'interno della camera riempita di Argon, quanto invece è richiesta una valutazione del carico termico essenzialmente all'interno della formella di vetro interna.

Le caratteristiche termofisiche dei materiali e le geometrie in analisi sono state ricavate dalla scheda materiale n°C-023 del 06/04/2012 fornita.

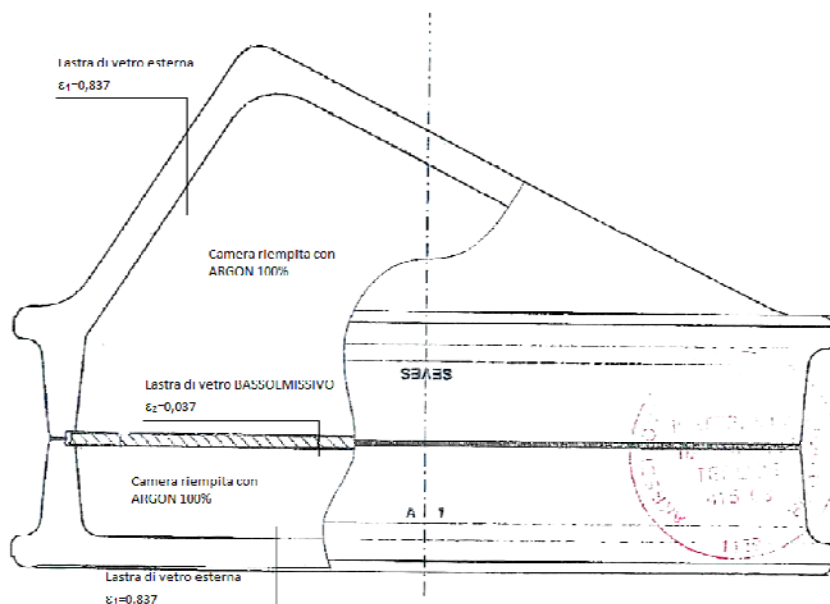


Figura 63: Mattone in vetro SEVES modello Diamante, sezione.

Orientamento

Orientamento verticale (il flusso è orizzontale) .

- Coefficiente liminare esterno: $h_e = 23 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
- Coefficiente liminare interno: $h_i = 8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Vetromattone

- Conduttività λ_g del vetro: $\lambda_g = 1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Emissività ϵ vetro
 - Superficiale: $\epsilon_1 = 0,837$
 - Intermedio (glass silverstar EN plus): $\epsilon_2 = 0,037$
- Riempimento a gas Argon 100%

Linearizzazione delle geometrie e calcolo di A'

Per poter calcolare la R_{eq} è necessario ridursi al caso di geometrie piane aventi caratteristiche equivalenti a quello reale. A tal fine dopo aver semplificato la geometria reale (Figura 64), si procede al calcolo di un'area della sezione pari a quella del caso semplificato (Figura 65), ovvero $A' = A$.

Trattandosi di figure molto semplici risulta evidente come si debba considerare un rettangolo di altezza pari alla metà di quella del triangolo.

In tal modo è come se si fosse uniformata la trasmittanza della camera riempita da gas Argon, avente una geometria relativamente complessa e di conseguenza una resistenza al flusso non uniforme, ad una situazione di parete piana con flusso uniforme monodirezionale e resistenza omogenea (Figura 65).

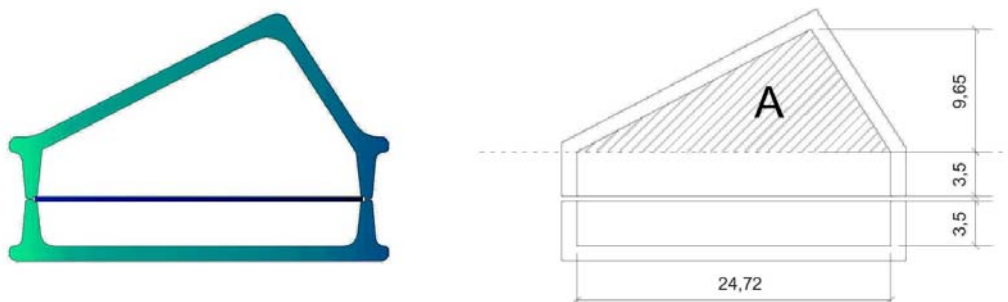


Figura 64: Semplificazione della geometria reale.

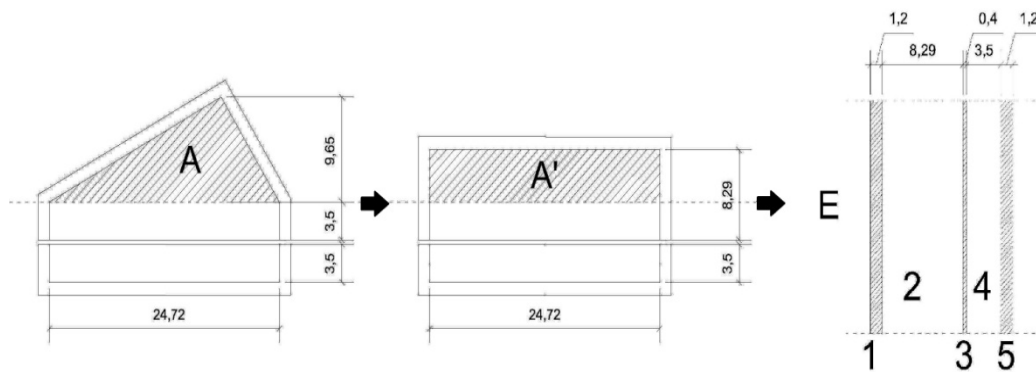


Figura 65: Calcolo dell'area equivalente $A'=A$ e riduzione a caso di parete piana.

Calcolo di R_{eq} e Λ_{eq}

A questo punto è possibile calcolare la resistenza equivalente R_{eq} del cuscino di gas Argon a partire dalla trasmittanza complessiva misurata, attraverso la formula:

$$U_{calc} = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{s_1}{\lambda_g} + R_2 + \frac{s_3}{\lambda_g} + R_4 + \frac{s_5}{\lambda_g} + \frac{1}{h_i}}$$

Come già specificato precedentemente, i dati di input sono i seguenti:

$$h_e = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$h_i = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\lambda_g = 1 \text{ W/m K}$$

$$U_{calc} = 1,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

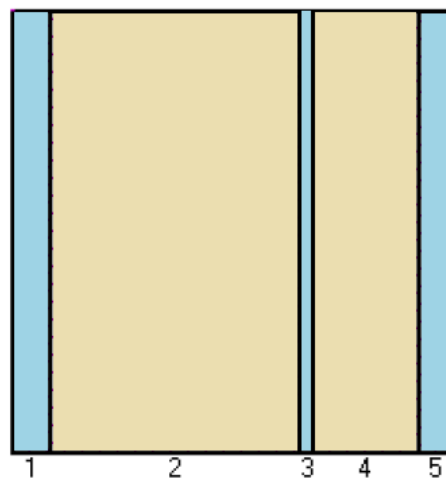
$$s_1 = 0,012 \text{ m}$$

$$s_2 = 0,0829 \text{ m}$$

$$s_3 = 0,004 \text{ m}$$

$$s_4 = 0,035 \text{ m}$$

$$s_5 = 0,012 \text{ m}$$



Di conseguenza si hanno in output i seguenti risultati:

$$R_{know} = R_e + R_1 + R_3 + R_5 + R_i = 0,196 \frac{m^2 K}{W};$$

$$R_{eq} = R_2 + R_4 = 0,517 \frac{m^2 K}{W};$$

$$\lambda_{eq} = \frac{s_2 + s_4}{R_{eq}} = 0,227 \frac{W}{m K};$$

Dopo aver effettuato i calcoli manualmente si è utilizzato il software IsoRef, certificato dall'ANIT, per la verifica a ritroso della trasmittanza, introducendo come dati di input quelli ottenuti dall'output dei calcoli a mano. Il software utilizza per il calcolo della trasmittanza delle pareti il procedimento di calcolo imposto dalla norma EN ISO 6946, e la verifica ha restituito un esito positivo, rilevando un errore trascurabile pari allo 0,3% (Figura 66).

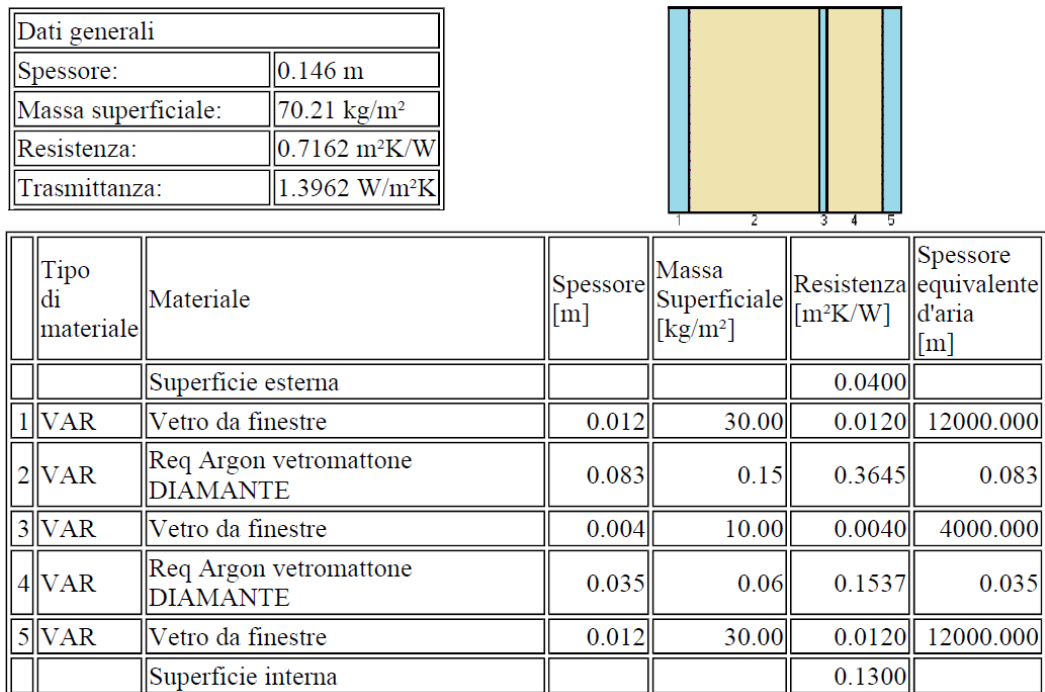


Figura 66: Verifica calcolo λ_{eq} tramite isoRef

4.2.1.2. Importazione delle geometrie e assegnazione dei materiali

Le geometrie sono state elaborate con programma di disegno CAD, partendo dai disegni forniti ed effettuando rielaborazioni manuali per riportarle al caso reale. Sono state effettuate in seguito misurazioni di controllo direttamente sul campione in nostro possesso. La sezione del pannello così ottenuta è stata poi importata in modalità automatica nel programma, in modo tale da non indurre semplificazioni geometriche rilevanti (Figura 67).

I materiali assegnati hanno caratteristiche di conducibilità λ ricavati da quanto esposto nei precedenti paragrafi, per quanto riguarda tutti i componenti del vetromattone Diamante, e dalla UNI 10351 per quanto riguarda i travetti di calcestruzzo armato. Per questi ultimi elementi è stato considerato un materiale omogeneo ed uniformemente distribuito, con una conducibilità mediata tra quella del calcestruzzo e quella dei ferri di armatura pari a $\lambda_c = 2,3$ W/m K.

Si è scelto di analizzare tre mattoni Diamante in condizioni differenti, ovvero sia il mattone generico centrale, sia quello ad angolo con il travetto adiacente ad un solo mattone, sia un mattone non adiacente ad un elemento in calcestruzzo; in questo modo si possono osservare separatamente i diversi effetti dovuti alla presenza di un materiale con conducibilità elevata come il calcestruzzo armato.

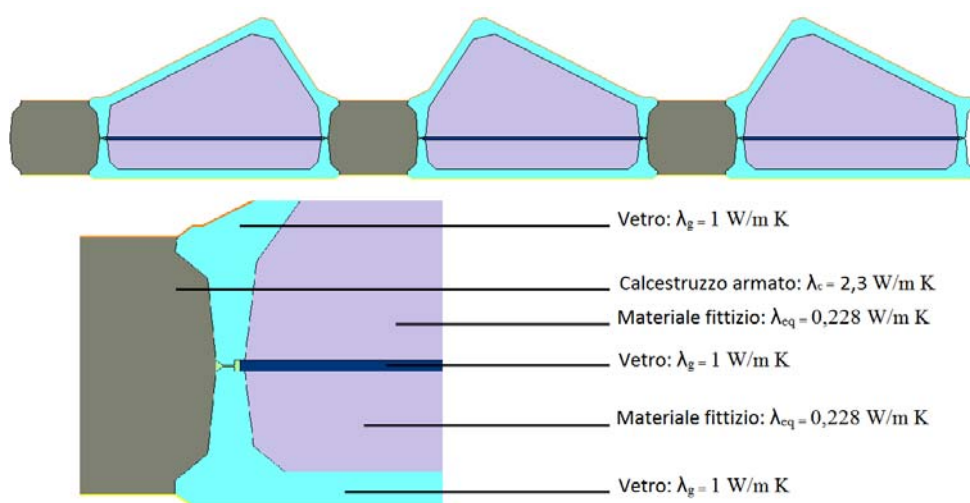


Figura 67: Geometria importata e conducibilità assegnate.

4.2.1.3. Determinazione delle Boundary Condition

Nella determinazione delle Boundary Condition si è fatto riferimento ai dati ricevuti dall'ARPA (Figura 59, Figura 60 e Figura 61), per la determinazione delle condizioni termoigrometriche dell'ambiente esterno, e alle normative EN ISO 10077 e EN ISO 6946, per la determinazione dei coefficienti di resistenza liminare.

Analizzando i dati ricevuti dall'ARPA si ottengono delle temperature di picco dell'ambiente esterno pari a -2°C per il caso invernale e 35°C per il caso estivo. La temperatura minima esterna del caso invernale, tuttavia, è stata scelta seguendo le indicazioni della normativa UNI EN 12831, che per il calcolo del carico termico di progetto impone -5°C . Tale scelta si ritiene valida anche in virtù del fatto che in condizioni reali la temperatura esterna operante, riferita alla facciata in esame, sia sicuramente inferiore alla temperatura ambiente esterna, a causa dello scambio radiativo con la volta celeste.

Per gli ambienti interni sono state considerate le temperature di progetto di 20°C d'inverno e 26°C durante l'estate. Si è inoltre deciso di effettuare un'analisi aggiuntiva considerando un caso invernale con ambiente interno non riscaldato con temperatura pari a 10°C , poiché si è notato che i problemi di rottura si sono riscontrati anche nel periodo in cui gli ambienti interni non erano riscaldati. Il caso estivo non climatizzato non è stato analizzato in quanto si ritiene che, avendo il pannello una massa superficiale relativamente bassa, la legge di sfasamento porterebbe a differenze di temperatura superficiale tra interno ed esterno trascurabili.

Le caratteristiche delle Boundary condition imposte dal programma agli elementi finiti sono di tipo "comprehensive", ovvero tengono conto separatamente della non linearità del fenomeno convettivo e di quello radiativo. Va infatti considerata soprattutto la diversità di assorbimento della radiazione solare da parte del calcestruzzo, nel quale avviene superficialmente, e dei vari strati di vetro, in cui tale assorbimento si traduce in una generazione di calore interna al mattone di vetro che può generare stati tensionali significativi.

Caso Invernale riscaldato

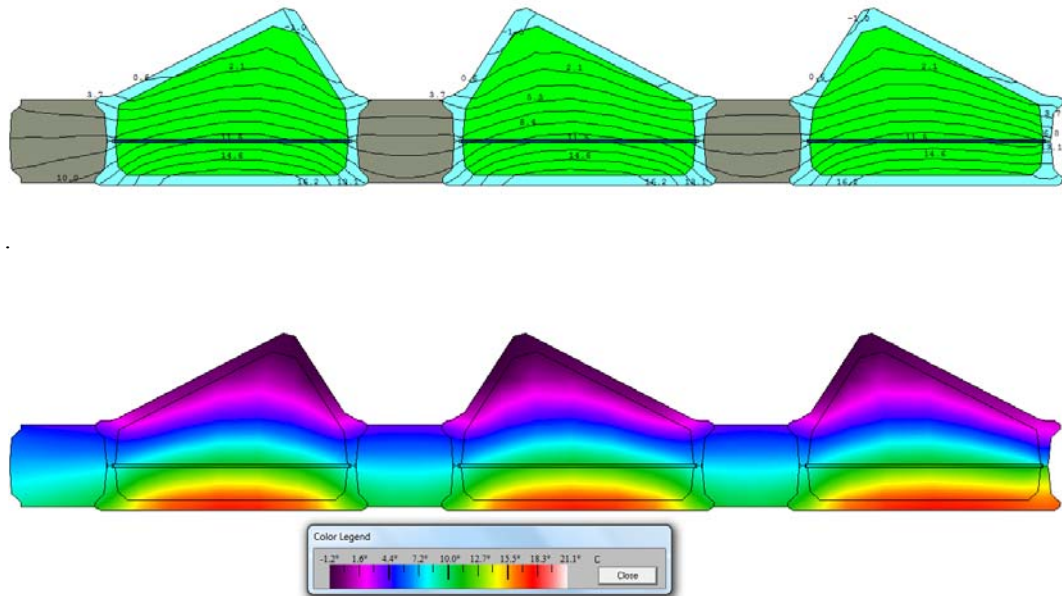


Figura 70: Isotherme e Infrarosso caso invernale con ambiente interno riscaldato.

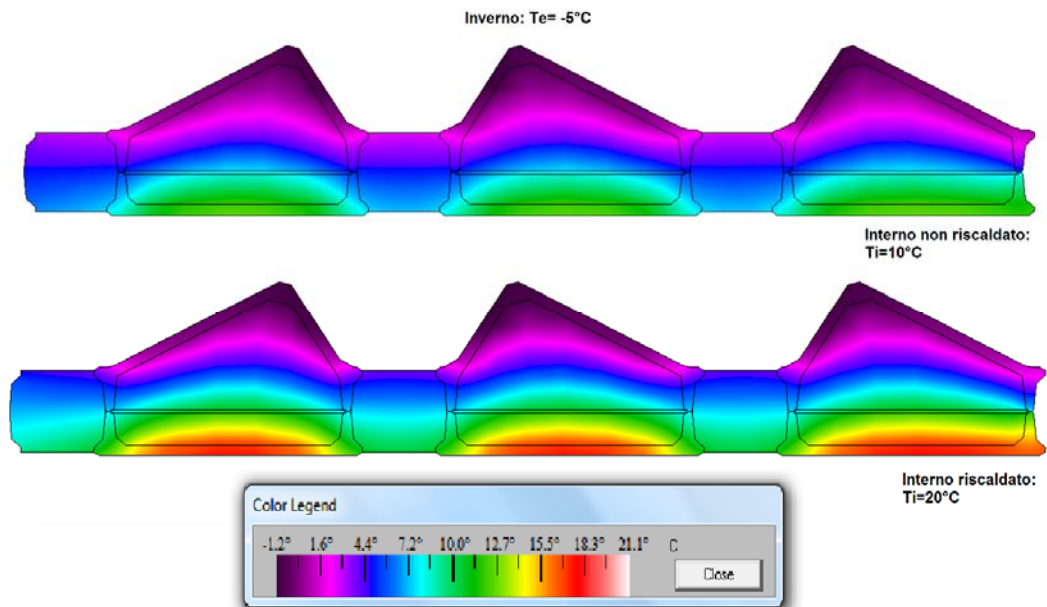


Figura 71: Confronto tra i due casi invernali.

4.2.2. Linearizzazione delle isoterme

I risultati vengono re-importati in un programma di disegno CAD per determinare le distanze effettive tra le isoterme e conseguentemente rielaborati tramite MathLab per generare una maglia tridimensionale con le temperature specifiche in ogni nodo delle mesh di Midas FEA.

Si riporta in Figura 72 un esempio di linearizzazione delle isoterme. I numeri in rosso si riferiscono alle temperature ottenuti in THERM, mentre i numeri blu sono stati ricavati tramite interpolazione lineare.

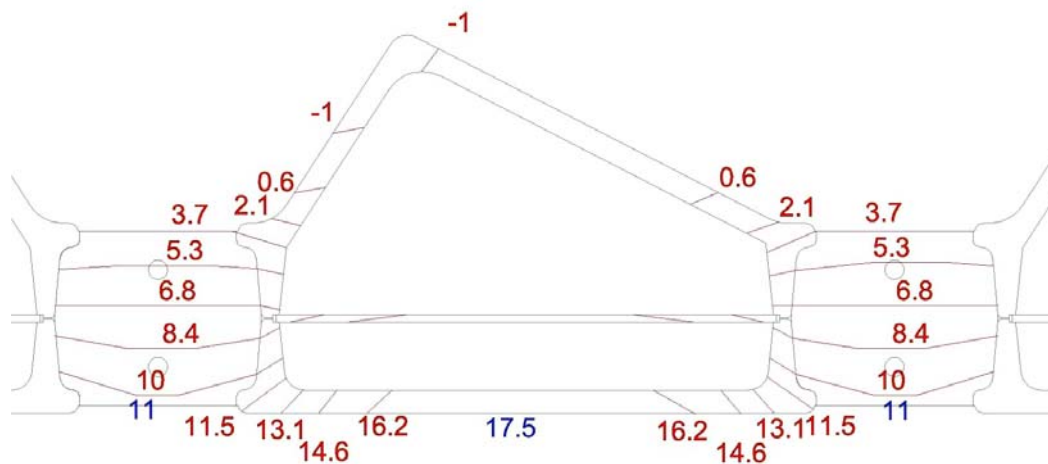


Figura 72: Linearizzazione delle isoterme in CAD.

4.2.3. Considerazioni finali

Alla luce dei risultati ottenuti delle analisi sopra riportate si evince che la condizione di peggior carico termico indotto dal gradiente di temperatura si ha nel caso invernale con ambiente interno riscaldato. Infatti si può notare come sulla faccia interna della formella di vetro vi sia una differenza di temperatura di circa 6°C, a fronte di una differenza di 3°C nel caso invernale senza riscaldamento e 4°C per quello estivo con ambiente interno climatizzato.

Va inoltre considerato che le deformazioni sono opposte per i casi invernali e per quello estivo. Infatti, mentre durante l'inverno il pannello si trova sottoposto a

trazione sulla faccia interna, durante l'estate le superfici interne si trovano in compressione, ovvero una condizione migliorativa per le caratteristiche del vetro.

Le analisi vengono dunque condotte partendo dal caso di carico peggiore, al fine di valutare un eventuale contributo significativo del carico termico.

4.3. Connessioni

Per poter simulare il sistema di vincoli nel modello FEM è necessario conoscere non solo le modalità di aggancio dei pannelli alla sottostruttura, ma anche le varie fasi di lavorazione e produzione dei pannelli, in modo tale da poter ricreare le fasi costruttive che concorrono a indurre stati tensionali interni.

Le modalità di produzione dei pannelli sono riportate al paragrafo 3.2, da cui si evince che per i primi sette giorni essi sono stati tenuti in posizione orizzontale per consentire un'adeguata maturazione del getto. Nella prima fase verranno dunque imposti dei semplici vincoli appoggio su tutta la faccia interna del pannello.

Successivamente vengono messi in posizione verticale e posizionati su dei cavalletti: in questa posizione il vettore di gravità cambia direzione ed il peso proprio esercita un'azione differente sulla struttura.

Infine i pannelli vengono bullonati su di una sottostruttura a telaio tubolare di cui si riporta il sistema di aggancio in Figura 73.

Nella documentazione fornita viene inoltre specificato che i dadi dei bulloni sono stati saldati per evitarne lo svitamento.

Si evince dunque come la tipologia di vincolo in questo caso sia un puro incastro e di conseguenza verrà modellato come tale.

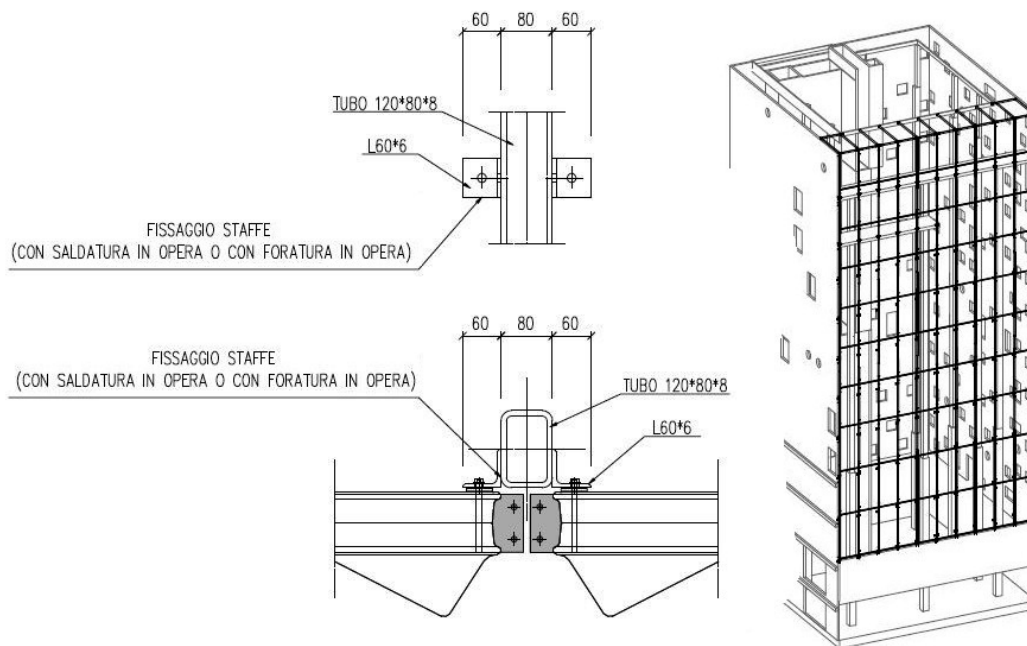


Figura 73: Schema di fissaggio dei pannelli di facciata.

Per concludere l'analisi del sistema di ancoraggio si sono guardati i sistemi di giunto tra pannello e pannello, per verificare che non vi fossero interazioni tra di essi successive alla posa in opera.

I giunti tra pannello e pannello sono stati eseguiti mediante sigillante silconico (Figura 74) che è in gradi di assorbire dilatazioni e scorrimenti, di conseguenza si può scongiurare un'ulteriore eventuale interazione tra i vari pannelli che compongono la facciata.



Figura 74: Giunto silconico tra i pannelli che compongono la facciata.

4.4. Resistenza del mattone di vetro

Le caratteristiche intrinseche del materiale vetro non permettono una determinazione specifica della resistenza ultima. L'unico modo per poterne prevedere il comportamento sarebbe quello di indagare ogni elemento al microscopio, per verificare la presenza o meno di difetti e per determinare l'eventuale consistenza della cricca (vedi 2.5.2).

Ovviamente tale procedimento non si può prendere in considerazione e ci si deve ridurre a delle semplificazioni. Imponendo dei coefficienti che diminuiscono la resistenza di riferimento caratteristica, si determina una soglia di sicurezza al di sotto della quale la probabilità di trovare un determinato elemento difettoso è particolarmente bassa.

Facendo riferimento a quanto visto in 2.5.4 ed in particolare alla Tabella 3 si può dire che nel caso in esame, trattandosi di vetro semplicemente ricotto e ipotizzando una classe di verifica di livello 1 (vedi Tabella 2), debba risultare:

$$\sigma_{max} \leq \frac{f_g}{R_M \gamma_M} = \frac{45 \text{ MPa}}{0,7 \cdot 2,55} = 25 \text{ MPa}$$

Se infatti la resistenza di riferimento del vetro ricotto è di 45 MPa, è comunque alta la probabilità che uno specifico elemento difettoso abbia una resistenza propria inferiore a 30 MPa (a parità di tipologia di carico). Imponendo un limite di rottura a 25 MPa si è certi dunque che tale elemento non si rompa.

A questo punto è possibile fare una prima considerazione, preliminare alle analisi agli elementi finiti.

Per limitare la dispersione dei risultati ed uniformare la resistenza dei vari elementi, sarebbe lecito sottoporre i mattoni di vetro ad un processo di tempra, in modo tale da "chiudere" le cricche superficiali e aumentare apparentemente la resistenza ultima. Tenendo conto delle modalità di produzione dei vetro mattoni

(vedi 2.6), l'unico processo realizzabile sarebbe quello della tempra chimica che porterebbe la soglia di sicurezza sopra menzionata a:

$$\sigma_{max} \leq \frac{f_g}{R_M \gamma_M} = \frac{150 \text{ MPa}}{0,9 \cdot 1,35} = 124 \text{ MPa}$$

Come si può notare, non solo la resistenza di riferimento del vetro temprato è molto più elevata, ma i coefficienti di sicurezza tengono anche conto di una minor dispersione dei risultati di prova, a conferma di una maggior uniformità di comportamento del materiale, che risulta apparentemente più uniforme.

Nella Figura 75 si riporta l'andamento delle tensioni all'interno di una lastra di vetro temprata chimicamente grazie al quale è facile intuire come migliori in maniera significativa il comportamento dell'elemento.

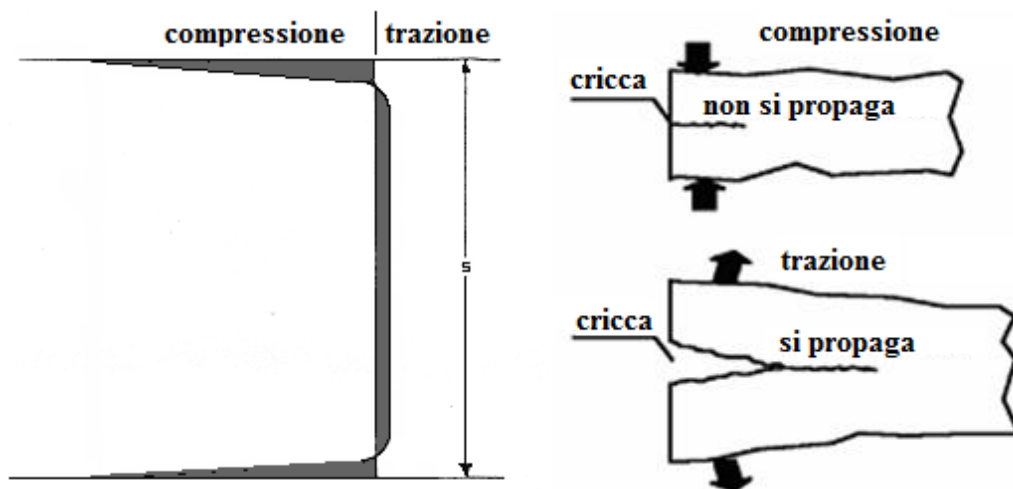


Figura 75: Distribuzione delle tensioni in un elemento temprato chimicamente.

Capitolo 5

Analisi agli Elementi Finiti dei Pannelli

Al fine di valutare le cause che hanno portato ai fenomeni di danneggiamento osservati si è svolta un'analisi del pannello mediante il programma ad elementi finiti MIDAS FEA.

I modelli creati sono di vario tipo, sia lineari che non lineari, e le indagini sono state eseguite sia su porzioni di pannello riguardanti i singoli mattoni, sia sul pannello intero.

Come si evince dal Capitolo 4 le azioni considerate, oltre al peso proprio del pannello, sono il ritiro del calcestruzzo e l'azione termica indotta dal gradiente di temperatura che si genera tra l'interno e l'esterno dell'edificio.

Le fasi considerate sono:

- **Fase 1** – Pannello in orizzontale – Azione applicata: peso proprio
- **Fase 2** – Pannello in orizzontale – Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro
- **Fase 3** – Pannello in verticale - Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti
- **Fase 4** – Pannello in verticale - Età 180 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti
- **Fase 5** – Pannello in verticale - Età 180 giorni - Azione applicata: peso proprio, ritiro, carico termico – periodo invernale riscaldato, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti.

Di seguito verranno elencate brevemente le modalità di generazione del modello e successivamente verranno presentati in maniera dettagliata i risultati delle analisi effettuate.

5.1. Generazione del modello

5.1.1. Modellazione geometrie

Il modello è stato generato utilizzando elementi mesh regolari di tipo brick, impostando un automesh per la punta a diamante del mattone e impostando invece una maglia regolare per tutto il resto del modello (Figura 76).

Sono stati adottati alcuni accorgimenti manuali per garantire la continuità dei nodi di interfaccia tra i differenti componenti ed in particolare per l'inserimento delle barre di armatura alla giusta distanza dal fondo cassero.

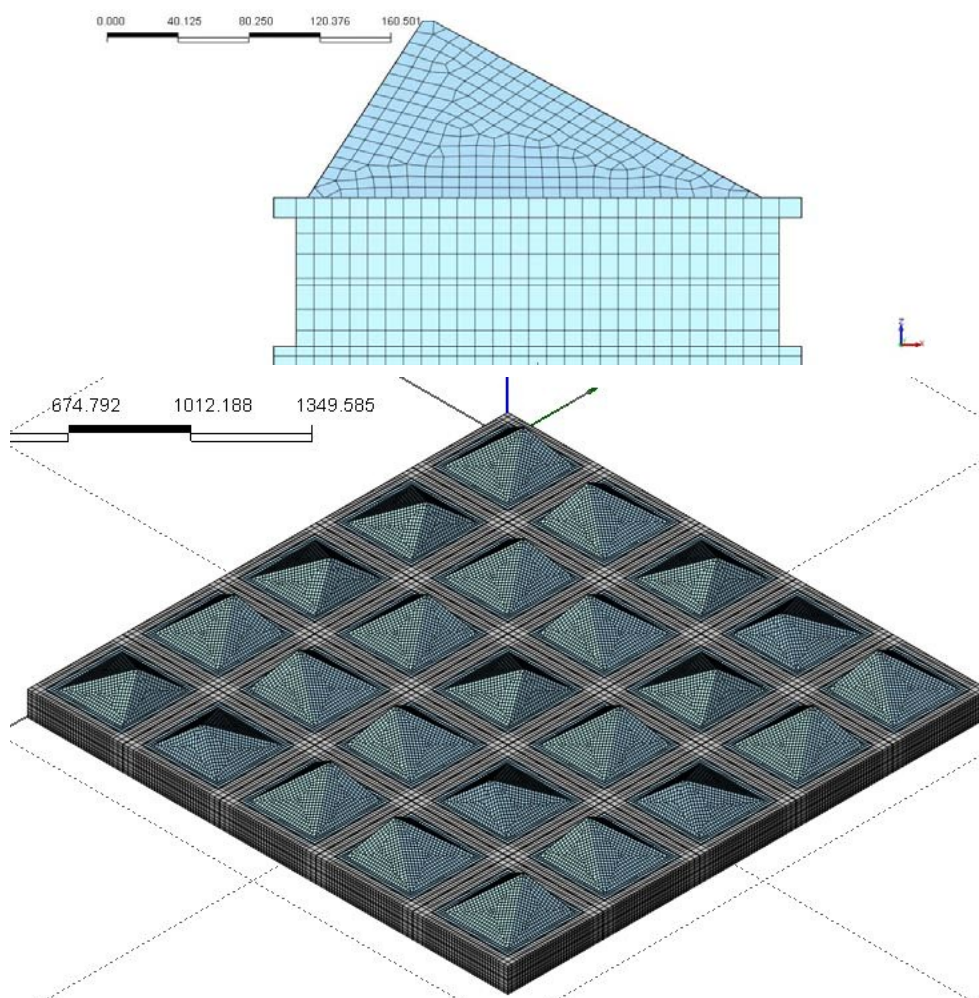


Figura 76: Modello 3D del pannello di facciata e del mattone di vetro.

Tra i correnti in calcestruzzo e i mattoni di vetro si trovano le barre di armatura e le boccole di fissaggio, così come sono state descritte nelle modalità di produzione dei pannelli (Figura 77).

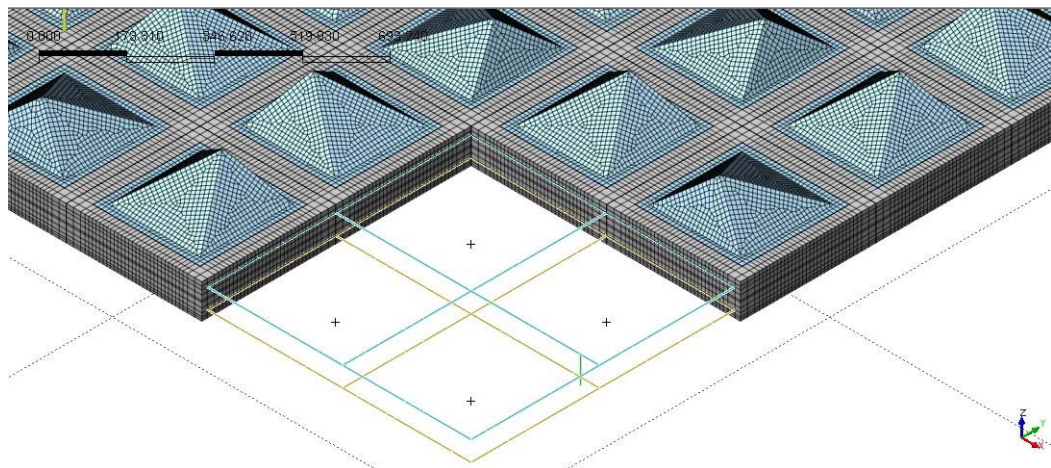


Figura 77: Particolare dell'inserimento dei ferri di armatura e del posizionamento delle boccole nel modello.

Essendo i ferri e le boccole elementi beam sono state assegnate a questi ultimi le proprietà geometriche ad essi associate ricavate dagli elaborati grafici, come si evince dalla Figura 78

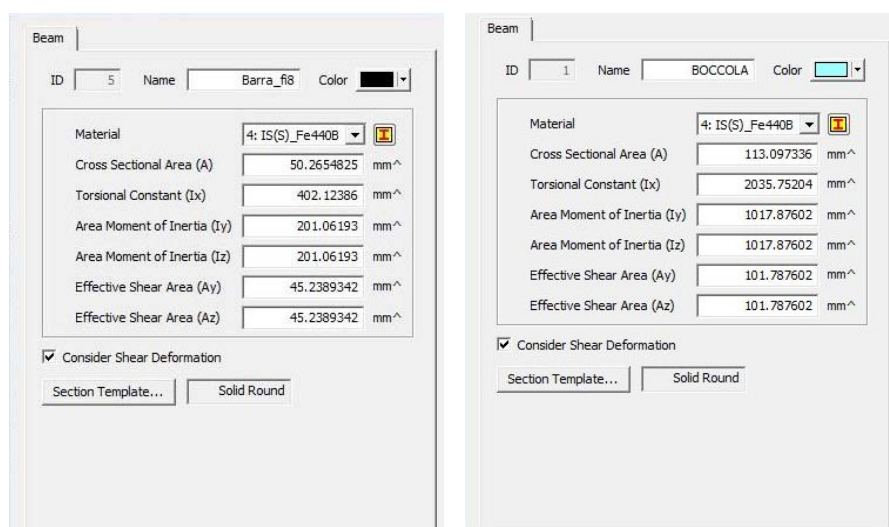


Figura 78: Proprietà geometriche degli elementi beam.

5.1.2. Assegnazione delle proprietà dei materiali

Nell'assegnazione delle proprietà meccaniche si è tenuto conto sia delle schede tecniche allegate ai prodotti, sia delle normative tecniche vigenti per la valutazione della curva di ritiro del calcestruzzo.

Non avendo a disposizione ulteriori informazioni rispetto a quelle riportate in 3.1.2, si è considerato un calcestruzzo C32/40.

Per il calcestruzzo sono quindi stati utilizzati i valori mostrati in Figura 79

The screenshot shows a software dialog box for defining material properties for concrete. The dialog is titled "Isotropic" and contains the following sections:

- General:** ID: 2, Name: C32/40, Color: Black.
- Structural:**
 - Elastic Modulus: 34600 N/mm²
 - Poisson's Ratio: 0.2
 - Shear Modulus: 14416.6667 N/mm²
 - Expansion Coeff.: 1e-005
 - Weight Density: 2.3536e-00 N/mm³ (selected)
 - Mass Density: 0 N/mm³/g
- Constitutive Model:** Model Type: Elastic
- Temperature Dependent Properties:** Elastic Modulus, Poisson's Ratio, and Expansion Coeff. are all set to "None".
- Time-Dependent Behavior:** Creep/Shrinkage: C32/40_MC.2010; Compressive Strength: None.

Buttons for "Thermal..." and "DB >" are visible at the bottom.

Figura 79: Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo.

Come si può notare nella parte bassa sotto la denominazione di “Time-Dependent Behavior” è stata inserita la legge di ritiro associata al materiale.

Si osserva che il nuovo bollettino CEB-FIB 2010 distingue diversi valori di ritiro per le due tipologie di cemento utilizzate (32.5R e 42.5R) inoltre l'entità del ritiro è influenzata da numerosi fattori, come riportato in 2.2.1, che non sono stati forniti. L'analisi analitica presente in 4.1, è stata svolta in accordo con il CEB-FIB 2010, mentre l'analisi con MIDAS prevede l'utilizzo del bollettino CEB-

FIB 1990 che impone uno sviluppo del ritiro più limitato rispetto a quello del CEB-FIB 2010.

La legge utilizzata nel modello FEM è riportata in Figura 80.

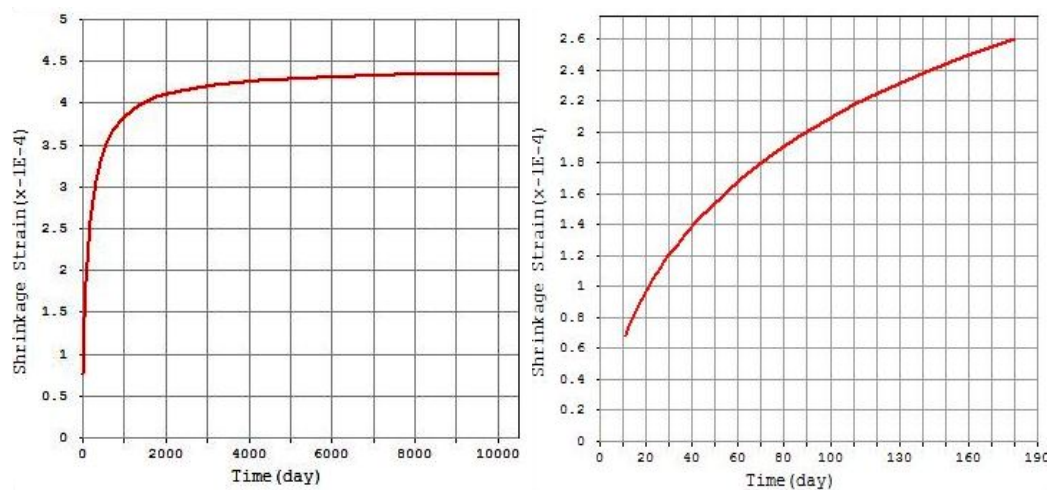


Figura 80: Curve di ritiro del calcestruzzo a 10000 e 180 giorni ricavate da CEB-FIB 1990.

Di seguito vengono riportati in Figura 81 le caratteristiche meccaniche del vetro che di cui sono composti i mattoni e dell'acciaio delle barre di armatura e delle boccole di ancoraggio. Come si può notare questi materiali non hanno assegnata alcuna funzione dipendente dal tempo o dalla temperatura.

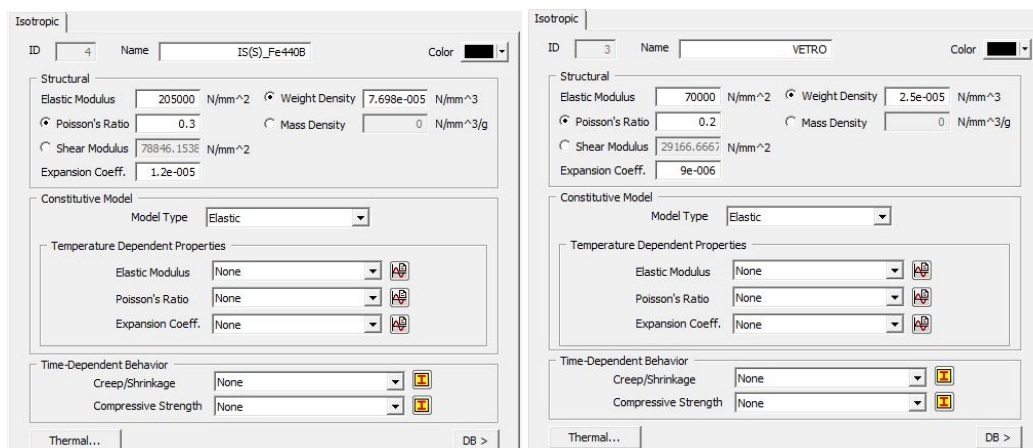


Figura 81: Proprietà meccaniche del vetro e dell'acciaio.

5.1.3. Step costruttivi e tipologie di vincolo

Come già anticipato l'analisi effettuata tiene conto di tutti gli step costruttivi in successione. In Figura 82 ne viene mostrato lo schema ad albero che mostra le 5 fasi descritte precedentemente.

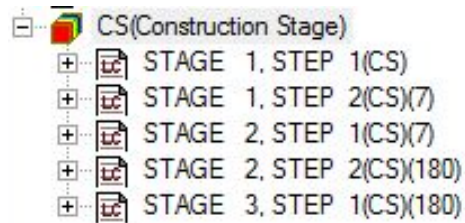


Figura 82: Schema ad albero degli step costruttivi.

Lo Stage 1 si riferisce al pannello in posizione orizzontale con le punte dei diamanti rivolti verso il basso, così come si può vedere da 3.2.1; lo Step 1 e lo Step 2 sono rispettivamente riferite all'istante iniziale e finale di tale Stage, ovvero a 0 e 7 giorni dopo l'ultimazione del getto di calcestruzzo.

In questo caso il pannello è appoggiato a terra e i vincoli sono dunque di semplice appoggio (Figura 83).

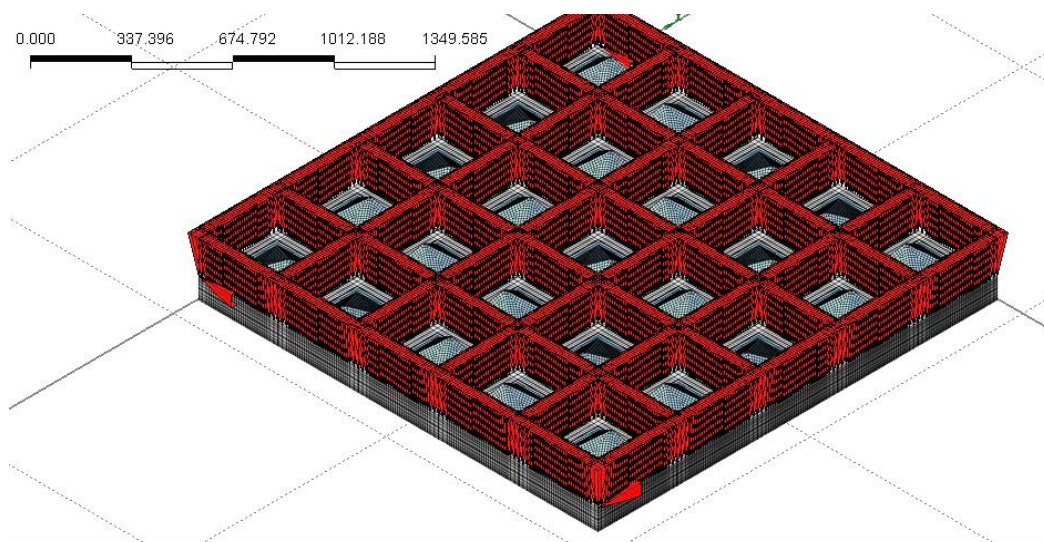


Figura 83: Stage 1 – Schema vincolare.

Lo Stage 2 si riferisce invece al pannello in posizione verticale; lo Step 1 e lo Step 2 sono nuovamente l'istante iniziale e finale di tale Stage, ovvero a 7 e 180 giorni dopo l'ultimazione del getto di calcestruzzo, momento in cui si ritiene trascurabile un ulteriore effetto dovuto al ritiro del calcestruzzo.

In questo caso il pannello è in posizione verticale e già posto in opera mediante le boccole di fissaggio, dunque il vincolo è di tipi incastro per quattro punti, così come riportato in 4.3 (Figura 84).

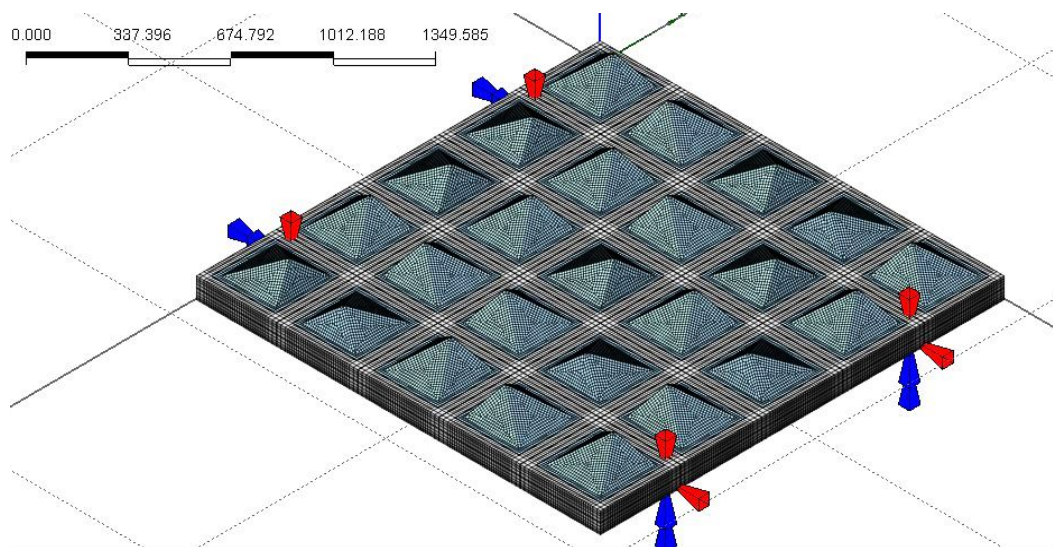


Figura 84: Stage 2 – Schema vincolare.

Lo stage 3 riguarda la semplice introduzione del carico termico dovuto alla mappa delle temperature importate nel programma tramite il procedimento esposto in 4.2. In questa situazione quindi non varia la tipologia di vincolo ma solo il tipo di carico.

5.2. Risultati dell'analisi FEM lineare

Fase 1 - Pannello in orizzontale - Azione applicata: peso proprio

In questa fase il pannello è appoggiato a terra, rivolto verso il basso. Come si può notare in Figura 85 i risultati riportano correttamente deformazioni nulle.

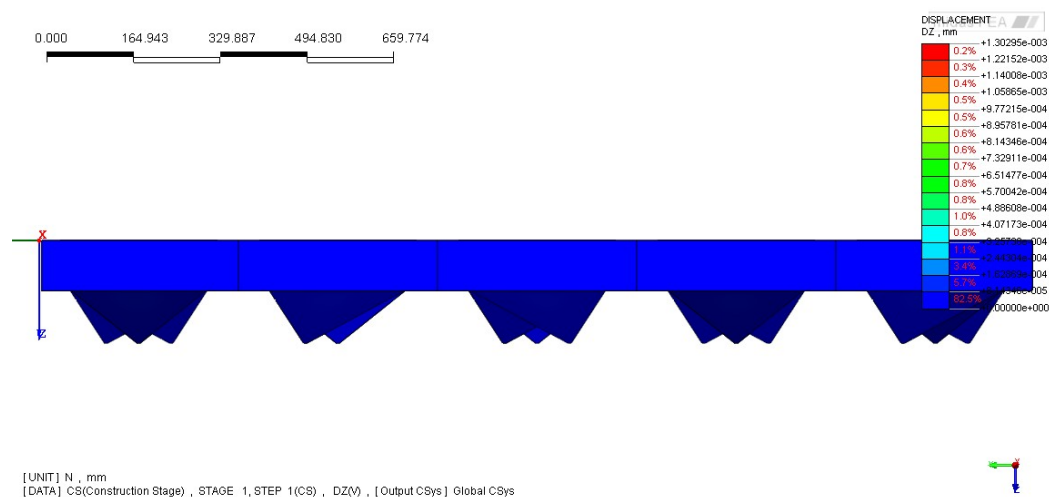


Figura 85: Fase 1 – Deformata.

In Figura 86 e in Figura 87 vengono riportati gli andamenti degli sforzi all'interno dei materiali. Come si può osservare i valori delle tensioni massime interne sono dell'ordine di 0,1 MPa e quindi ampiamente al di sotto dei limiti di resistenza a trazione e compressione dei materiali.

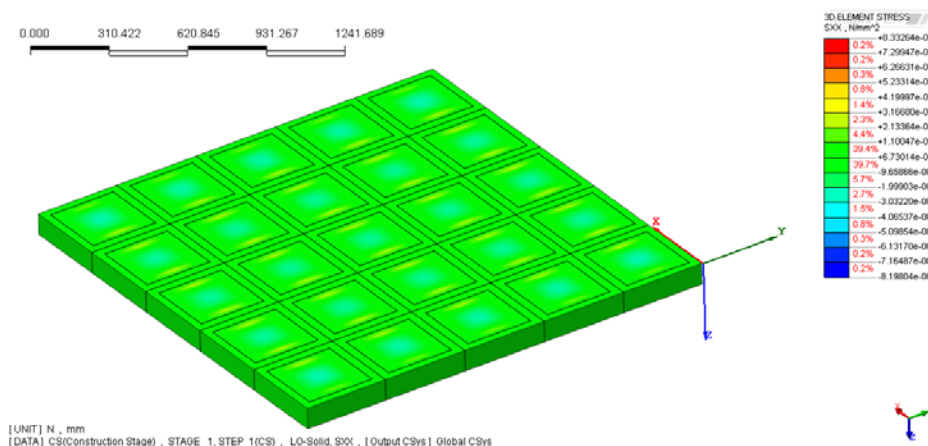


Figura 86: Fase 1 – Andamento degli sforzi lungo l'asse x.

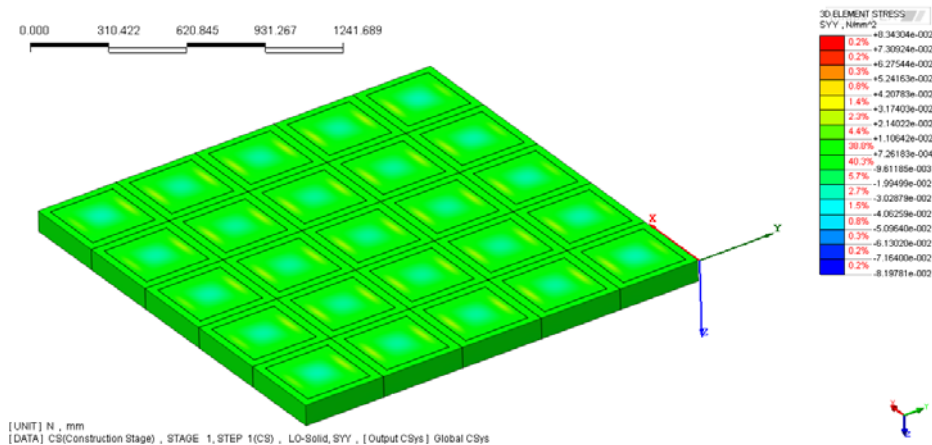


Figura 87: Fase 1 – Andamento degli sforzi lungo l'asse y.

Fase 2 - Pannello in orizzontale - Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro

Successivamente, a seguito del ritiro del calcestruzzo, il pannello subisce una contrazione, visibile nella Figura 88.

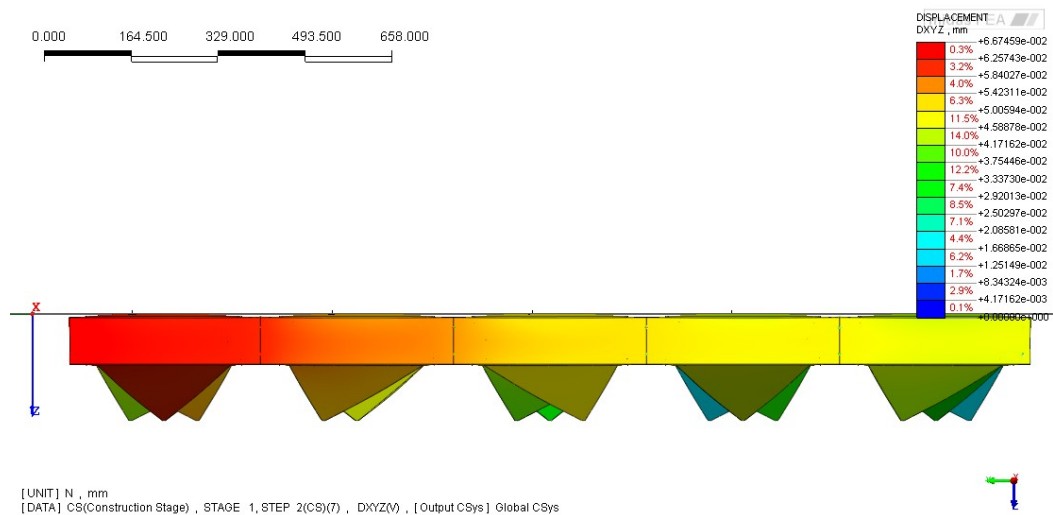


Figura 88: Fase 2 – Deformata.

A 7 giorni dal getto i valori di trazione nel calcestruzzo si attestano attorno a 1,2 MPa. Tale valore risulta ancora inferiore al limite di resistenza del materiale

(3,02 MPa) ma evidenzia un primo stato di coazione significativo all'interno dell'elemento strutturale. Coerentemente, le barre di armatura all'interno delle fughe e i bordi dei blocchi in vetro sono sollecitati a compressione (Figura 89 e Figura 90).

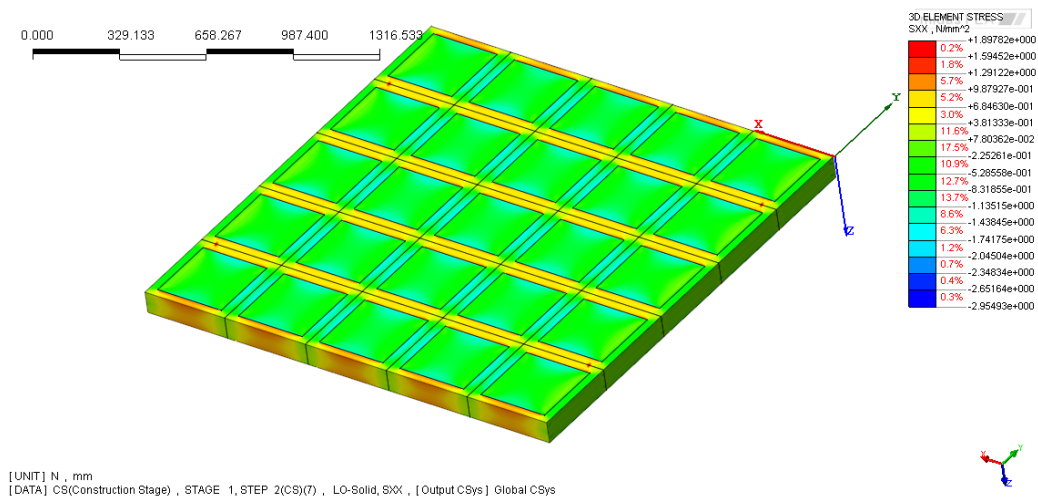


Figura 89: Fase 2 – Andamento degli sforzi lungo l'asse x.

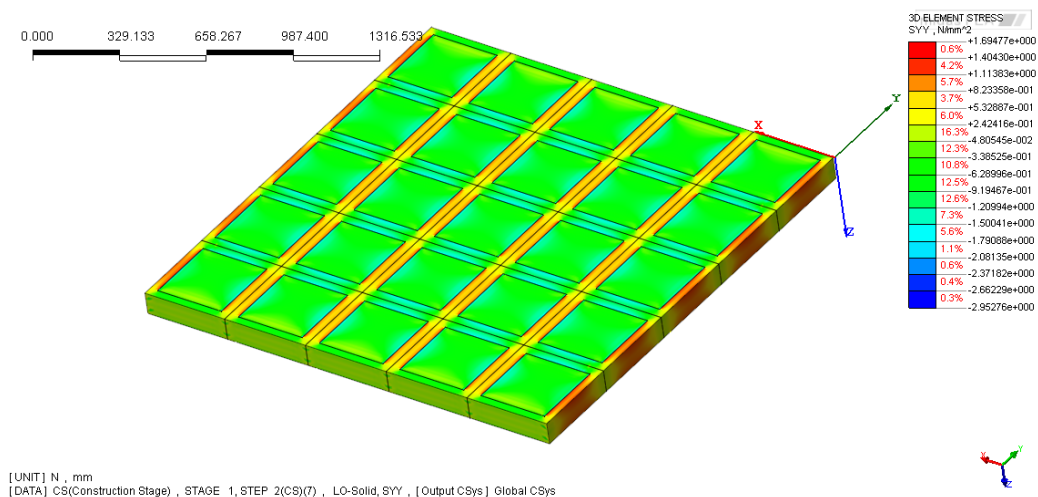


Figura 90: Fase 2 – Andamento degli sforzi lungo l'asse y.

Fase 3 - Pannello in verticale - Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti

Nella fase di sollevamento del pannello le tensioni risultano pressoché invariate a meno dei punti di aggancio del pannello che risentono di un'intensificazione di sforzo a seguito del vincolo di incastro. Tali valori risultano in ogni modo non significativi dal punto di vista dell'analisi.

In Figura 91 e in Figura 92 vengono mostrati i valori dell'andamento degli sforzi in cui si nota il picco circoscritto alla zona di aggancio, rimarcato anche dalle percentuali mostrate nella zona destra delle immagini.

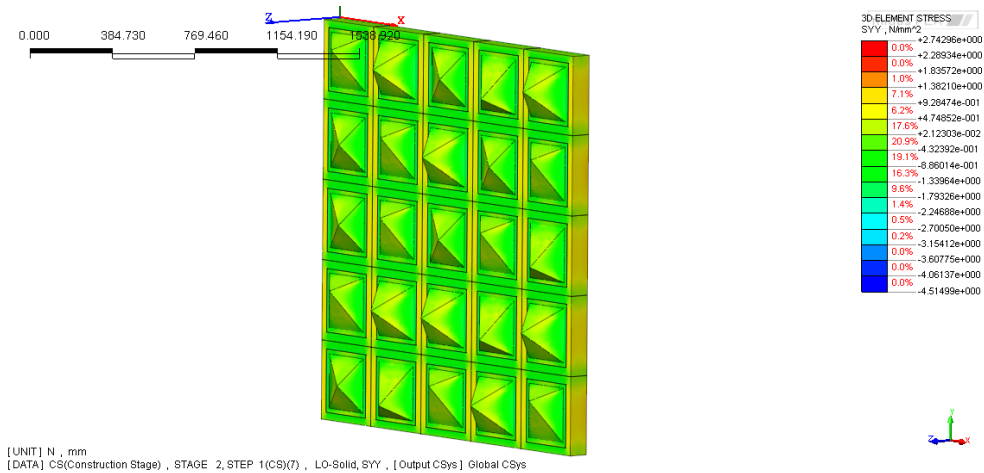


Figura 91: Fase 3 – Andamento degli sforzi lungo l'asse y.

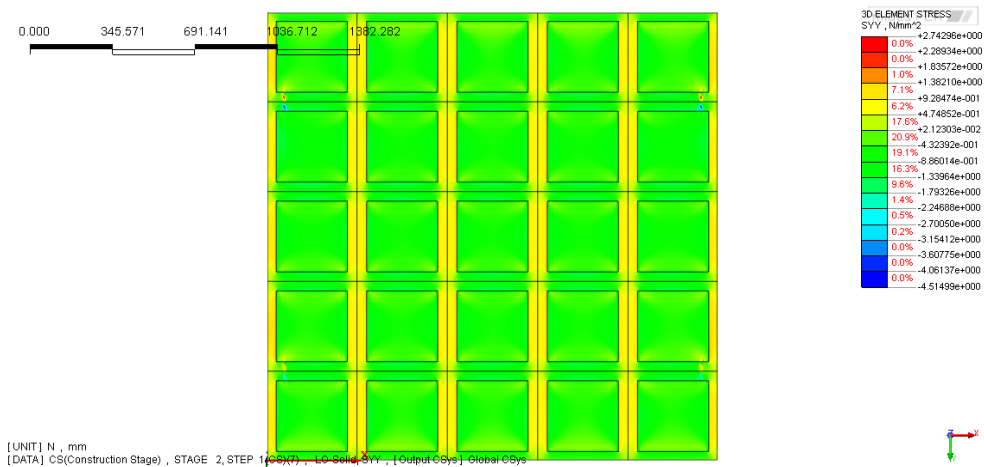


Figura 92: Fase 3 – Andamento degli sforzi lungo l'asse x (picchi dovuti ai vincoli incastro).

Fase 4 - Pannello in verticale - Età 180 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti

Nella Figura 93 si riportano i quadri di tensione nell'elemento centrale del pannello a seguito del ritiro a 180 gg. Come si può osservare, il livello di coazione dei due materiali aumenta ulteriormente. In particolare lo sforzo di trazione nel calcestruzzo raggiunge i 10 MPa: il materiale risulta quindi fessurato avendo ampiamente superato il valore limite di resistenza. Per brevità si riportano i risultati riferiti allo sforzo in direzione X (essendo la direzione Y all'incirca analoga).

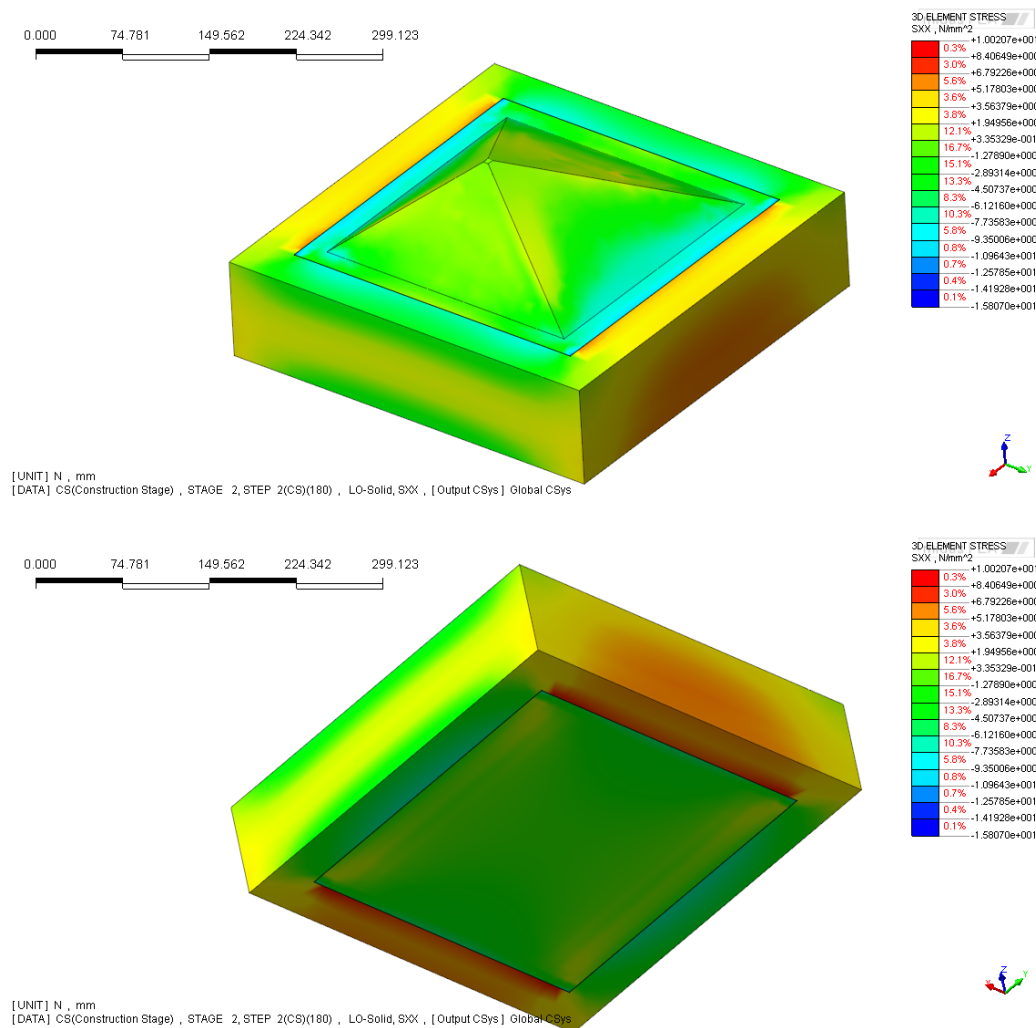


Figura 93: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (fronte e retro).

Fase 5 - Pannello in verticale - Età 180 giorni - Azione applicata: peso proprio, ritiro, carico termico - periodo invernale riscaldato, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti

Nell'ultima fase è stata applicata una distribuzione di temperature in accordo con l'analisi termica riportata in 4.2.

In Figura 94 si può osservare la deformazione ultima dovuta all'effetto combinato di ritiro e carico termico e si nota come essa sia comunque molto limitata. Si può dedurre da questa immagine come l'effetto dovuto ai vincoli di incastro sia trascurabile poiché le contrazioni in termini assoluti non mostrano valori significativi.

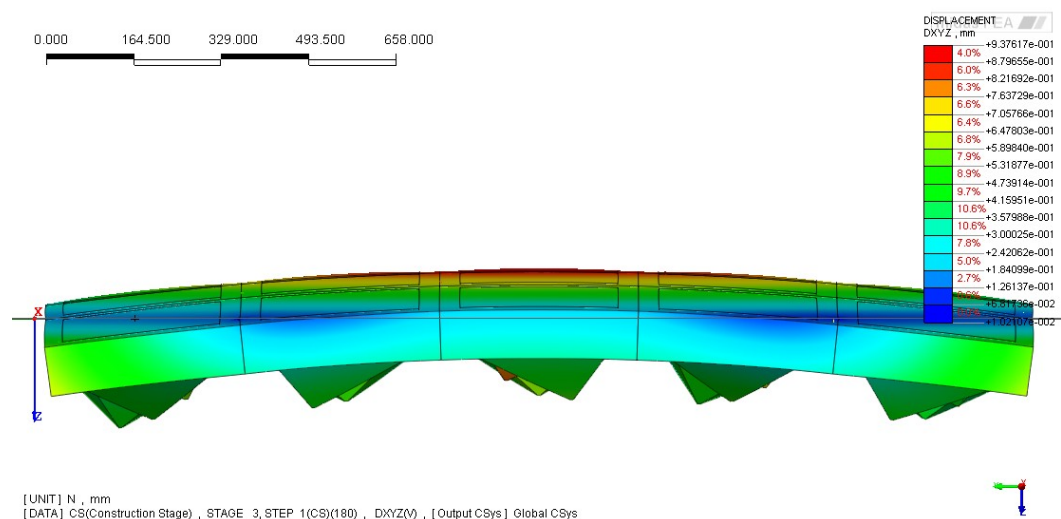


Figura 94: Fase 5 – Deformata.

Come si può osservare in Figura 95 il livello di trazione massima in direzione X nel calcestruzzo raggiunge 10,4 MPa. Si può dunque considerare ininfluente ai fini di questa analisi anche l'effetto dovuto al carico termico.

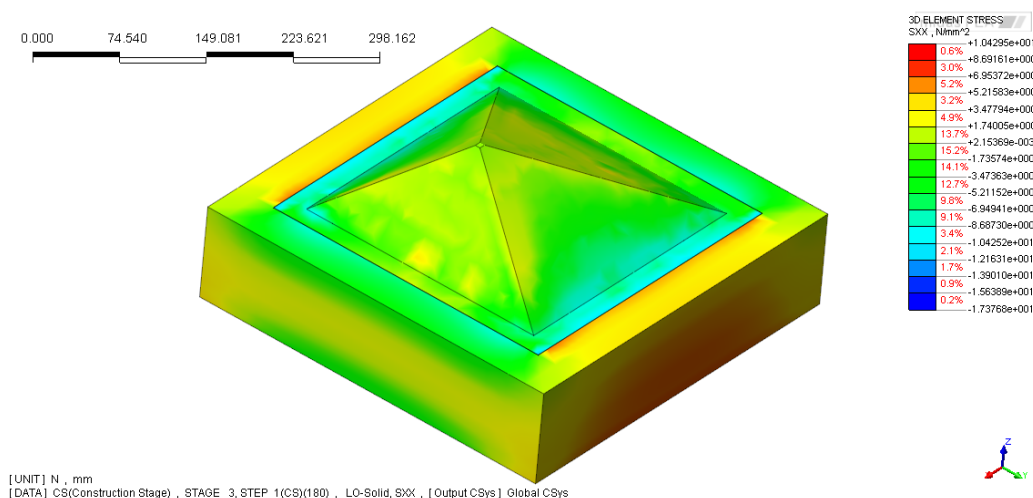


Figura 95: Fase 5 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello.

5.2.1. Considerazioni sui risultati dell'analisi FEM Lineare

Si può notare come le prime tre fasi di analisi non risultino significative al fine dell'esame dei fenomeni di danneggiamento osservati, ma sono altresì necessarie per poter determinare i punti di partenza degli stati tensionali delle analisi successive, essendo un'indagine eseguita per step costruttivi. Si osserva inoltre che l'effetto sia del carico termico sia dei vincoli di aggancio dei pannelli risulta marginale.

L'effetto del ritiro a 180 giorni risulta invece particolarmente significativo e di notevole interesse ai fini delle indagini.

In particolare il fenomeno del ritiro a 180 giorni induce elevate tensioni di trazione nel calcestruzzo (≈ 10 MPa) e di compressione nell'elemento in vetro. Per le caratteristiche meccaniche del materiale si può constatare che la compressione nel vetro è ovviamente benefica, tuttavia il risultato dell'analisi FEM lineare non trova corrispondenza nella realtà in quanto il calcestruzzo considerato ha certamente una resistenza a trazione inferiore ai valori osservati, pertanto risulta fessurato (fenomeno peraltro osservato sui pannelli). La fessurazione determina, nella sezione in cui avviene, un completo rilascio delle

trazioni del calcestruzzo, che verranno assorbite in parte dal vetro ed in parte dall'armatura. Queste tensioni di trazione possono indurre nel vetro la fessurazione osservata, sia in corrispondenza della fessura da ritiro, sia in corrispondenza del punto più prossimo a tale fessura caratterizzato dalla presenza di un difetto superficiale del vetro.

Alla luce di quanto esposto risulta dunque necessaria un'analisi di tipo non-lineare, per poter indagare a fondo il fenomeno fessurativo osservato.

5.3. Risultati dell'analisi FEM Non-Lineare

Per valutare il comportamento dell'elemento strutturale in caso di fessurazione da ritiro del calcestruzzo è stato implementato un modello ridotto non-lineare sul quale sono state definite quattro superfici di interfaccia che resistono elasticamente fino ad una trazione di 3,02 MPa (resistenza ultima del cls) e successivamente si rilasciano in modo fragile.

Nella Figura 96 viene mostrata una vista del modello in cui si notano le 4 superfici di interfaccia.

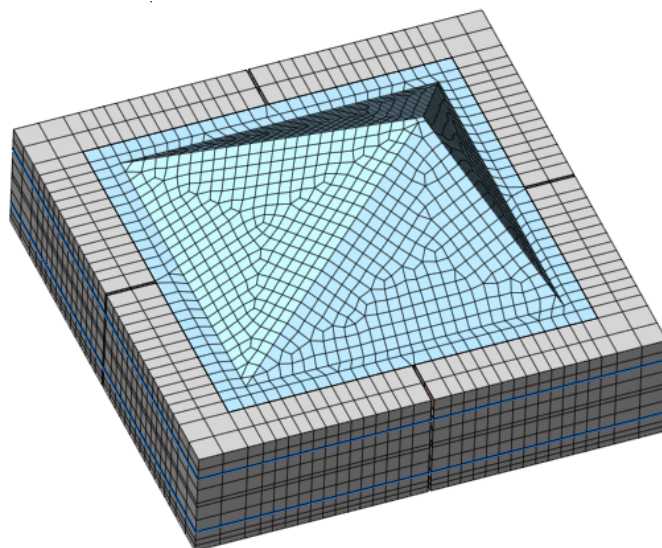


Figura 96: Vista del modello Non-Lineare.

Ai fini delle indagini è necessario estrapolare i risultati dello stato pre-fessurativo, per vedere come evolve il fenomeno nel tempo agli istanti significativi.

Nelle figure seguenti viene mostrato lo stato tensionale dei diversi componenti in analisi all'istante immediatamente precedente all'innescarsi della frattura all'interno del travetto di calcestruzzo.

Le barre di armatura (Figura 97), considerando l'area del tondino di acciaio, si trovano in una condizione di sforzo massimo di compressione pari a 17,4 MPa.

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{437,6 \text{ N}}{8\pi^{38} \text{ mm}^2} = 17,4 \text{ MPa}$$

Come su può notare da Figura 98 e Figura 99 lo stato di coazione dei tre materiali è caratterizzato da una trazione del calcestruzzo e una compressione del vetro e nell'acciaio, coerentemente con l'analisi elastica precedentemente esposta.

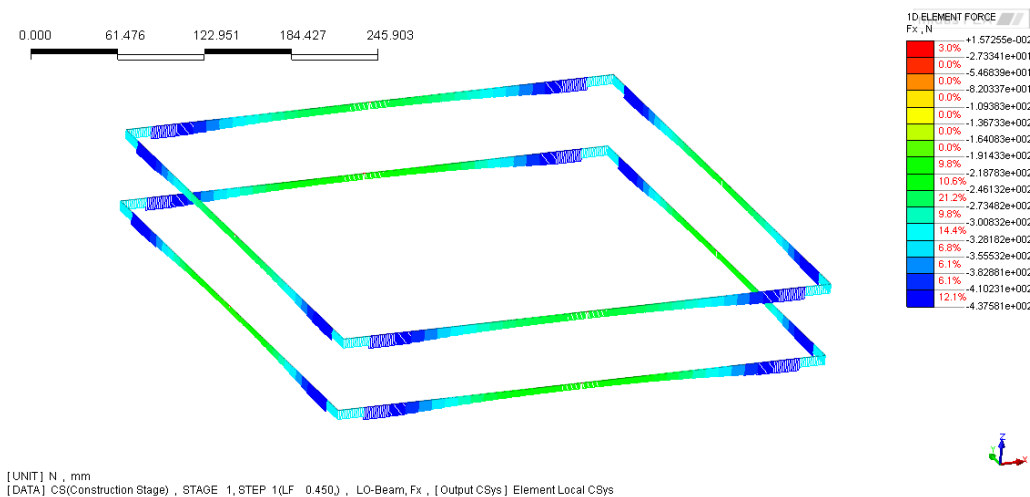


Figura 97: Stato tensionale pre-fessurazione delle barre di armatura.

³⁸ Si considera la metà dell'area del tondino poiché il blocco è preso in mezziera dell'armatura

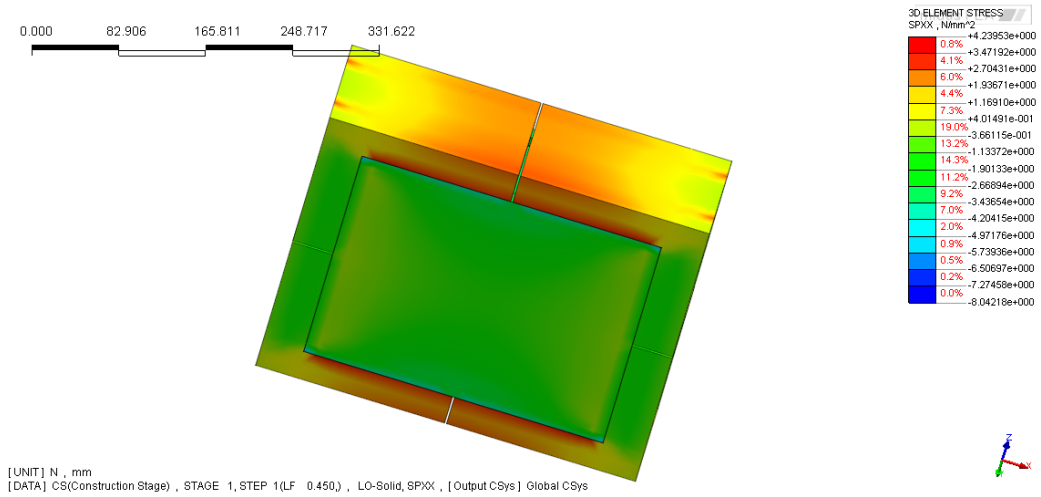


Figura 98: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (retro).

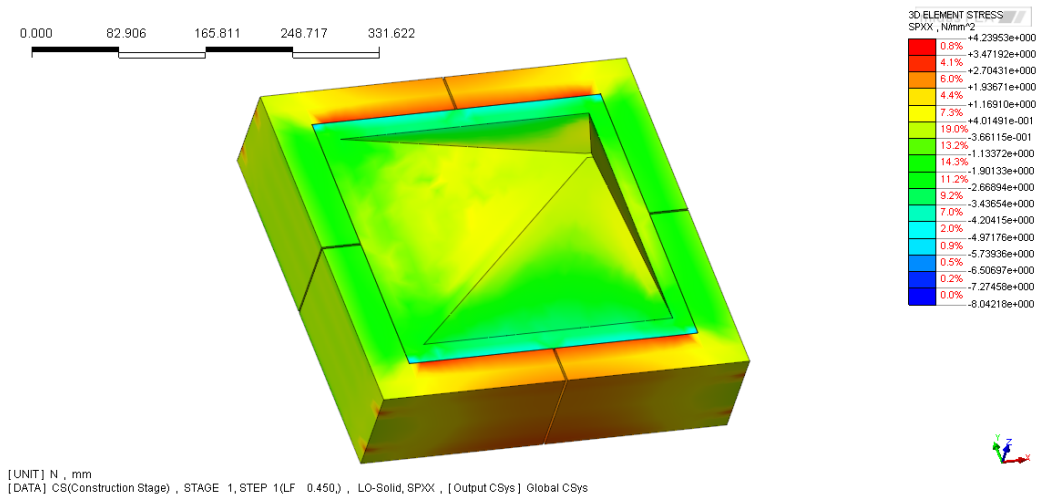


Figura 99: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (fronte).

Una volta raggiunta, in corrispondenza della superficie di interfaccia, la trazione limite di 3,02 MPa il calcestruzzo si fessura provocando un completo rilascio delle tensioni: la congruenza tra i tre materiali si traduce in un picco di trazione nell'acciaio e nel vetro.

Come si può notare dalle figure seguenti, gli stati tensionali dei materiali cambiano bruscamente.

Considerando i ferri di armatura (Figura 100) si vede come lo sforzo massimo sia diventato ora di trazione ed è pari a 113,2 MPa.

In Figura 101 è molto evidente l'effetto localizzato dello sforzo di trazione nel vetro all'interfaccia con la fessura che si innesca nel calcestruzzo a seguito del ritiro.

Lo sforzo localizzato di trazione del vetro in corrispondenza della fessura risulta pari a 57,8 MPa, ovvero uno sforzo notevole che il vetro ricotto sicuramente non può sopportare.

Ripetendo l'analisi con un'unica superficie di interfaccia si riscontra un fenomeno del tutto analogo.

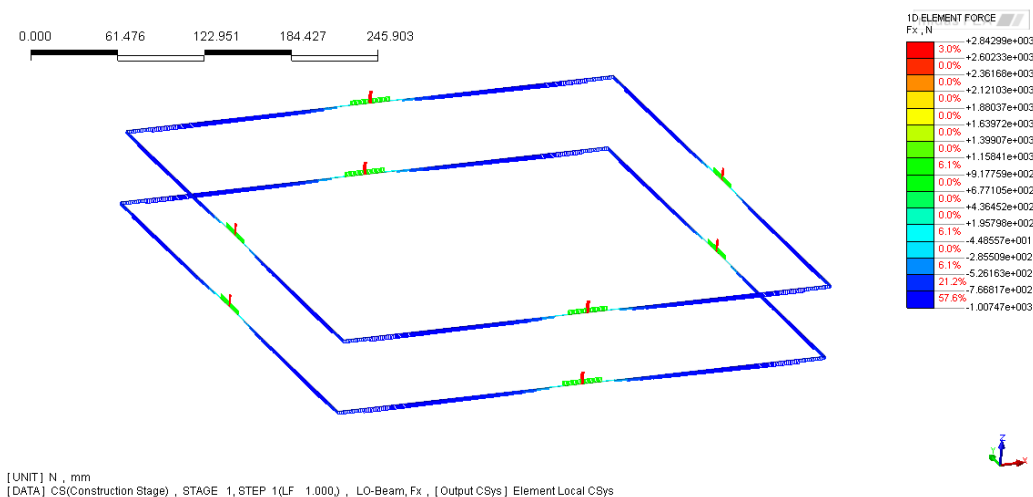


Figura 100: Stato tensionale post-fessurazione delle barre di armatura.

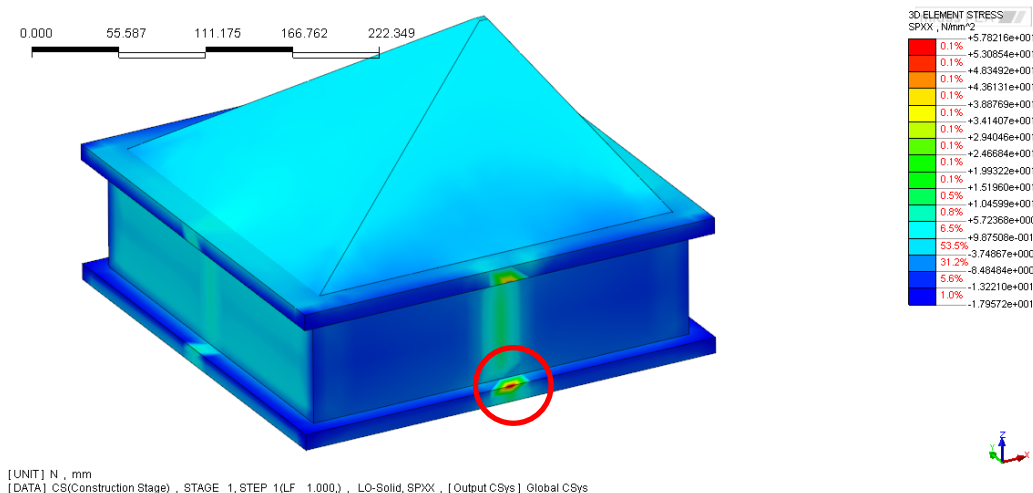


Figura 101: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione del cls.

5.3.1. Considerazioni sui risultati dell'analisi FEM Non-Lineare

Come previsto nel punto cerchiato in rosso della Figura 101, o comunque in un punto del mattone adiacente a tale zona di concentrazione degli sforzi in cui vi sia la presenza di un difetto, si innesca la rottura del vetro che provoca il danno osservato.

Nella realtà si osserva che la crepa sulla formella interna del mattone di vetro si arresta e non propaga lungo tutta la superficie.

Tale comportamento è giustificato solamente dal fatto che, a parte la zona in cui si innesca la cricca, tutto il resto del materiale si trova ancora in uno stato di compressione tale da garantire la resistenza.

In particolare in Figura 102 si osserva uno spaccato dell'elemento in vetro: le zone di trazione sono circoscritte alla parete laterale in corrispondenza della frattura del calcestruzzo con tensioni massime sul bordo inferiore (zona rossa).

Lo stato di sollecitazione nella rimanente parte di vetro (zona blu) è di compressione: tale risultato giustifica quanto affermato precedentemente.

In questa immagine risulta inoltre ancora più chiaro come la parte interna del mattone sia più sollecitata rispetto a quella esterna nella zona di contatto con la fessura, di conseguenza la cricca partirà proprio dalla formella interna, così come si è osservato.

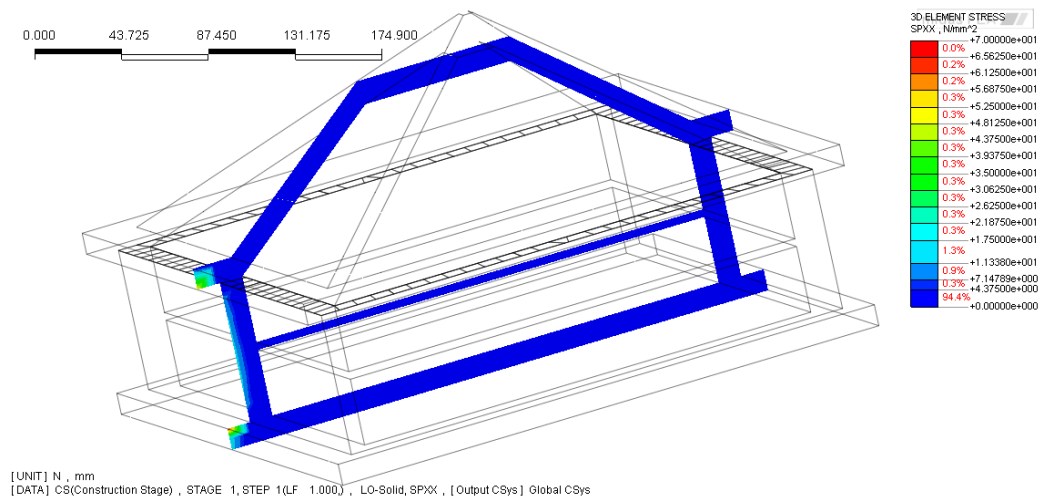


Figura 102: Spaccato 3D dello stato post-fessurazione nella zona di contatto con la fessura.

Capitolo 6

Valutazione Influenza dello Spessore del Calcestruzzo

I risultati delle analisi precedenti mostrano in maniera molto dettagliata i motivi per cui si sono innescate le rotture dei mattoni di vetro.

Alla luce di tali risultati risulta chiaro come le cause siano unicamente da imputare agli effetti dovuti al ritiro del calcestruzzo. Infatti né gli aspetti termici, né le condizioni di vincolo risultano di significativo interesse.

Si può ipotizzare che le tensioni dovute agli incastri vengano ridistribuite all'interno della matrice di calcestruzzo, non creando situazioni critiche. Tale ipotesi è supportata da ulteriori analisi, che di seguito non verranno riportate, effettuate sui pannelli in assenza di vincoli incastro, ma con uno schema vincolare isostatico (come in Figura 35) e che hanno mostrato gli stessi risultati riportati al capitolo 5.

Il carico termico invece mostra un effettivo incremento degli sforzi; d'altro canto il suo contributo è assolutamente non influente rispetto a quello dato dal ritiro e quindi non è di certo la causa principale del fenomeno di danneggiamento.

Per evitare la rottura dei mattoni di vetro bisogna dunque variare le caratteristiche della matrice di calcestruzzo. Seguendo le indicazioni delle guide tecniche di installazione dei maggiori produttori di mattoni di vetro, che consigliano spessori esigui dei correnti di malta, e le prescrizioni riportate in 2.4, si provvederà a diminuire l'area di calcestruzzo a contatto con l'aria.

In questo capitolo vengono presentate alcune analisi in cui si mostra il miglioramento delle condizioni di sforzo come conseguenza di una riduzione dello spessore dei travetti di calcestruzzo.

In particolare viene ridotta la superficie a contatto con l'aria esterna, portandola da 8 cm a 4 cm. Successivamente verrà ulteriormente dimezzata a 2 cm.

6.1. Analisi dei pannelli con travetti da 4 cm

Di seguito verranno presentati i risultati delle stesse analisi presentate nel Capitolo 5.

Variando solamente lo spessore del travetto, verranno trascurate le fasi di generazione del modello, poiché assolutamente identiche, ed alcune fasi intermedie non significative, come per esempio le informazioni relativi alle deformazioni, che come si è già visto non sono rilevanti.

Per valutare un'ipotesi di miglioramento delle condizioni, è stata eseguita un'analisi preliminare in cui vengono isolati solamente due mattoni in un modello lineare semplificato, sia per la condizione con travetto da 8 cm, sia per la nuova da 4 cm. Il modello semplificato è caratterizzato dalle stesse 5 fasi del modello lineare completo, in maniera tale da poter monitorare anche l'evoluzione del fenomeno di ritiro.

Le condizioni di vincolo invece sono state cambiate ed è stato imposto semplicemente uno schema isostatico. In tal modo si sono escluse eventuali interazioni ed è stata fatta agire solamente la legge di ritiro.

In Figura 103 viene mostrato il modello con travetto da 8 cm col relativo schema vincolare e il confronto con quello da 4 cm.

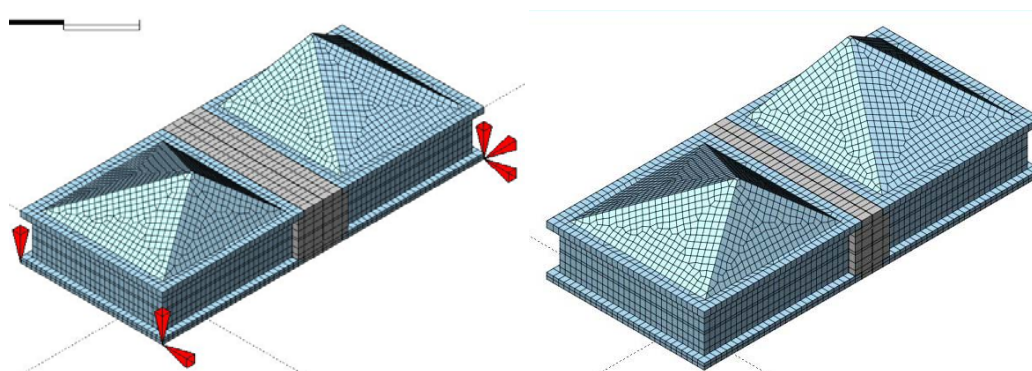


Figura 103: Modello lineare semplificato - Schema vincolare e confronto tra travetto da 8 cm e 4 cm

Per verificare la bontà del modello è stata eseguita una verifica sulla condizione di sforzo nella fase 2 della configurazione con 8 cm di travetto, in cui, passata la fase 1 in cui le azioni devono essere per forza nulle (vedi Figura 86), il pannello deve trovarsi in una situazione in cui non si sono ancora innescate le azioni combinate dovute alla ripetitività degli elementi. Come si può notare in Figura 104 i risultati sono gli stessi della fase 2 di 5.2.

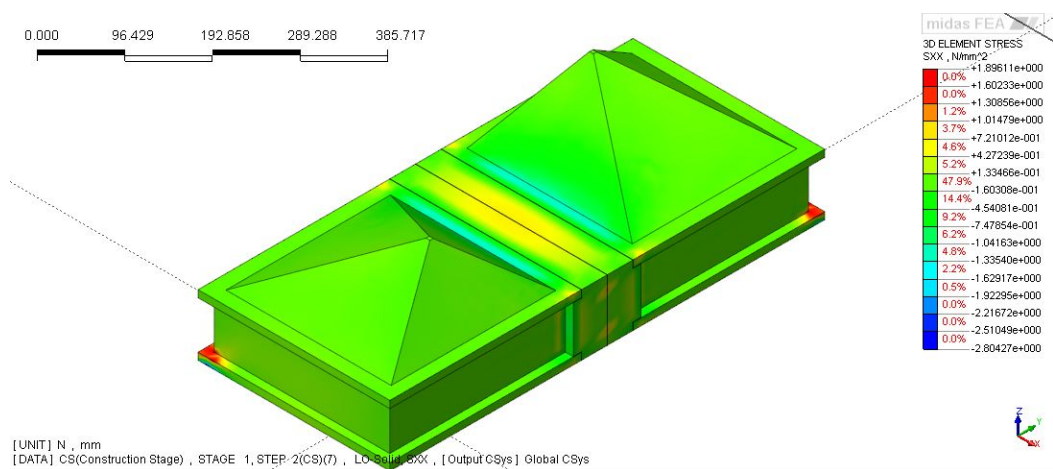


Figura 104: Fase 2 - stato tensionale del modello lineare semplificato.

Come si può vedere in Figura 105 e in Figura 106 i risultati mostrano un complessivo incremento degli sforzi interni alla matrice di calcestruzzo, sia nella fase 3 in cui il pannello viene posto in posizione verticale a 7 giorni dal getto, sia nella fase 4, ovvero quella conclusiva a 180 giorni (si ricorda che la fase 5 verrà trascurata da qui in avanti in quanto non particolarmente significativa).

In particolare si osserva come nella fase 3 si abbia un incremento assai modesto (1.3 MPa a fronte di 1.1 MPa), mentre nella fase 4 si passa dai 5.8 MPa ai 7 MPa, ovvero un incremento degli sforzi pari al 18%.

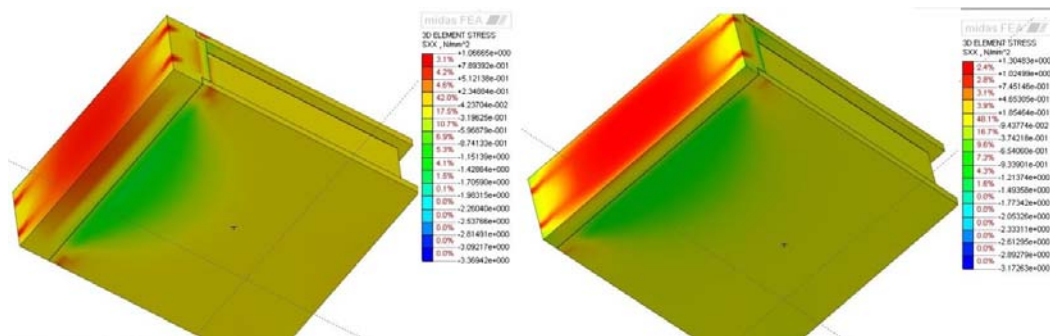


Figura 105: Modello semplificato - Fase 3 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 8 cm e 4 cm.

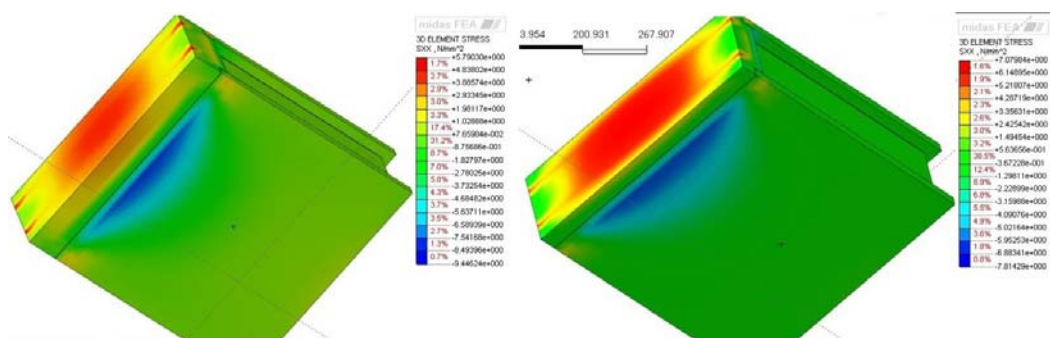


Figura 106: Modello semplificato - Fase 4 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 8 cm e 4 cm.

Tale risultato potrebbe risultare ingannevole, in quanto si potrebbe pensare che un aumento degli sforzi interni possa essere riconducibile ad un peggioramento delle condizioni.

Se però si legge il risultato globalmente (Figura 107) si può notare come tale supposizione sia errata, infatti analizzando i valori in termini di azioni e non di sforzi interni si nota come il blocco di vetro sia meno sollecitato nella configurazione con travetto da 4 cm.

Si ha semplicemente:

$$F = \sigma \cdot A$$

L'area del travetto in calcestruzzo è pari a 6800 mm² per la configurazione da 8 cm e pari a 3400 mm² per quella da 4 cm, dunque:

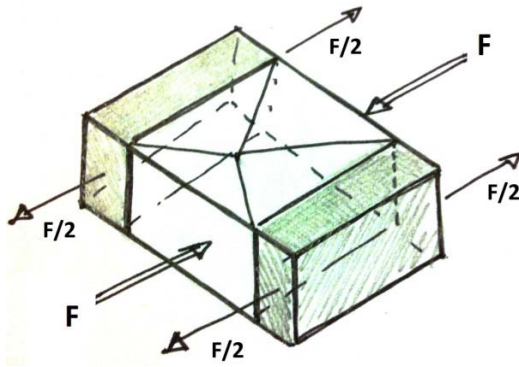


Figura 107: Schema delle azioni sul blocco di vetro.

$$F_{8cm} = 39,44 \text{ kN} > F_{4cm} = 23,80 \text{ kN}$$

Questi semplici passaggi mostrano come, da un punto di vista teorico, tale riduzione sia potenzialmente benefica per il mattone di vetro.

Di seguito si riportano le analisi eseguite sul pannello con travetti da 4 cm.

6.1.1. Analisi Lineare

Fase 1 - Pannello in orizzontale - Azione applicata: peso proprio

In questo caso i valori delle tensioni massime nei materiali sono dell'ordine di 0,1 MPa e quindi molto inferiori rispetto al caso precedente.

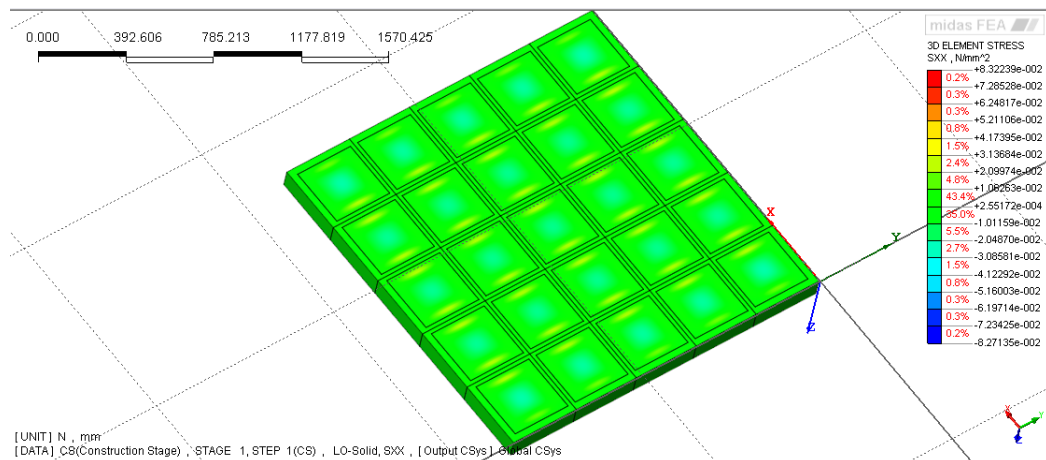


Figura 108: Fase 1 - Andamento degli sforzi lungo l'asse x (travetto da 4 cm).

Fase 2 – Pannello in orizzontale – Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro

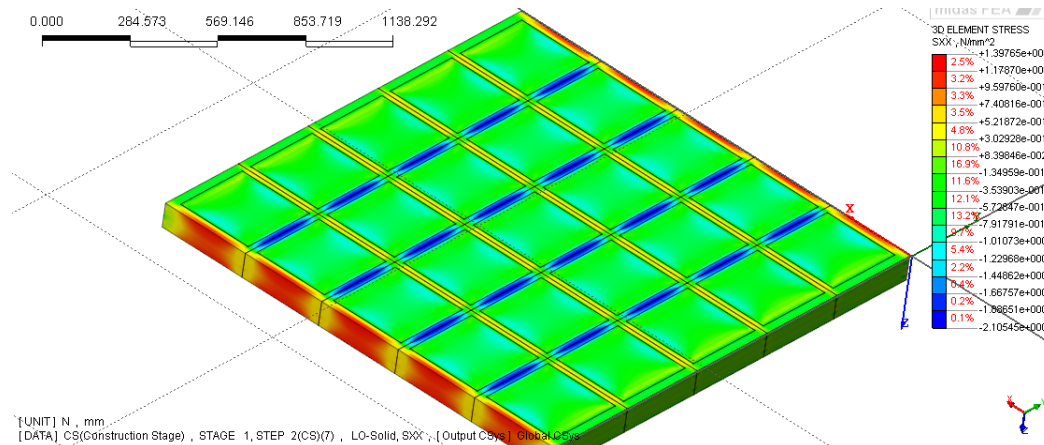


Figura 109: Fase 2 - Andamento degli sforzi lungo l'asse x (travetto da 4 cm).

Fase 3 – Pannello in verticale - Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti

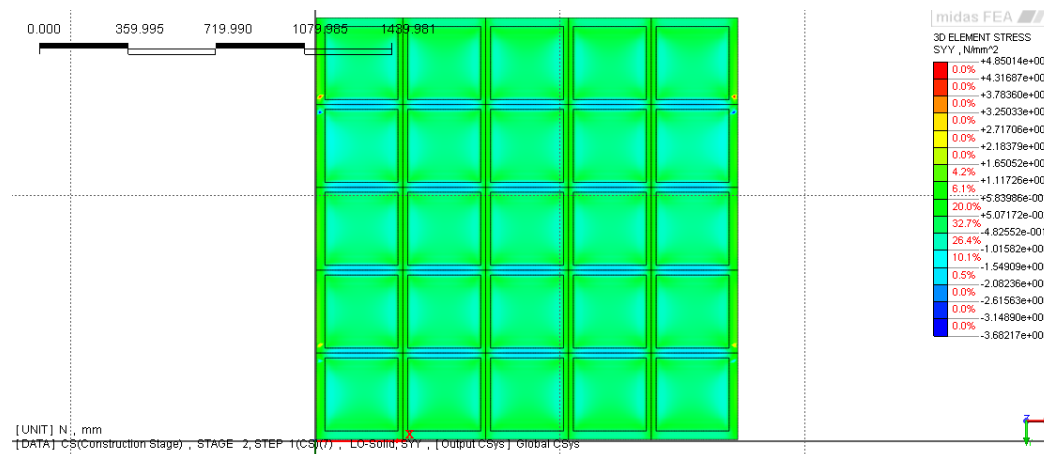


Figura 110: Fase 3 - Andamento degli sforzi lungo l'asse y (travetto da 4 cm).

Nella fase 3, fatta eccezione per i vincoli incastro, che in questa configurazione sono stati spostati ai lati del pannello, i valori si attestano intorno a 1,6 MPa, di

poco superiori agli 1,3 MPa del caso precedente e comunque ancora molto inferiori alla resistenza ultima del calcestruzzo. In questa fase non avrà quindi ancora raggiunto la fessurazione.

Fase 4 – Pannello in verticale - Età 180 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti

A 180 giorni dal getto si mostra in Figura 111 come il valore degli sforzi sia alquanto superiore rispetto al caso precedente, avendo raggiunto, in condizioni di analisi lineare, gli 8 MPa.

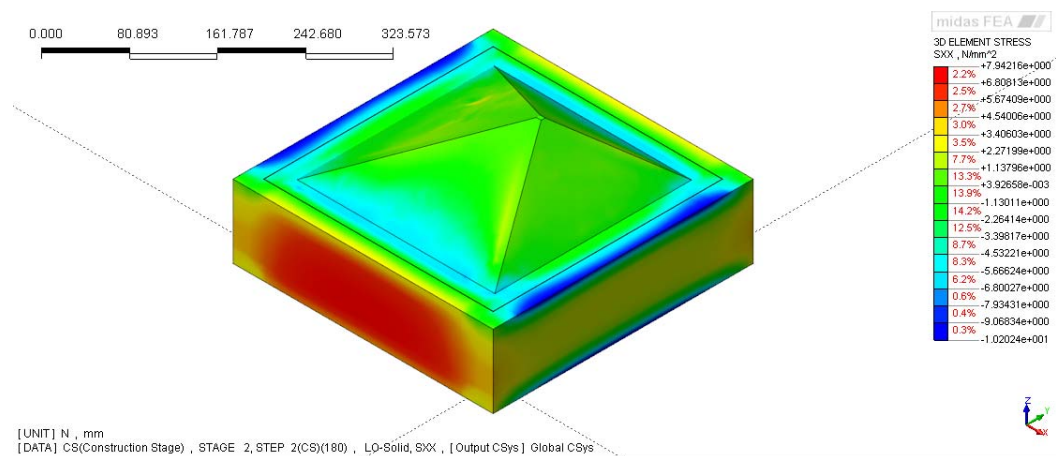


Figura 111: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 4 cm).

Osservando l’evoluzione degli sforzi interni si può dedurre dunque come il calcestruzzo arrivi prima a fessurazione, rispetto al caso precedente, rilasciando di conseguenza delle azioni inferiori sul mattone di vetro, come si è già visto.

Ciò è confermato dalla formulazione analitica riportata in Figura 112 in cui si mostra come a parità di tipologia di calcestruzzo, variando semplicemente lo spessore del travetto da 8 a 4 cm, la fessurazione avvenga a circa 48 giorni dal getto, contro i 112 del caso precedente.

È quindi necessario eseguire nuovamente le analisi non-lineari, poiché il modello lineare perde significato dal momento in cui si innesca la fessurazione.

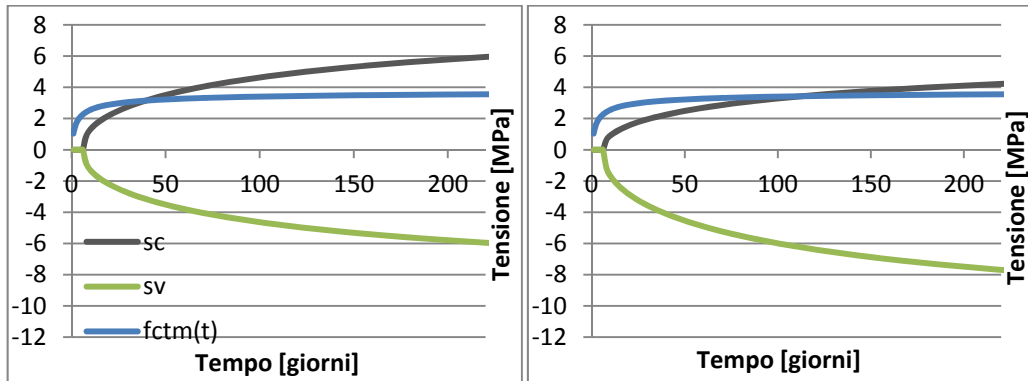


Figura 112: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Confronto tra casi con travetti da 4 cm a destra e 8 cm a sinistra.

6.1.2. Analisi Non-Lineare

Come previsto la fessurazione del calcestruzzo avviene prima e nell'istante immediatamente prima dell'innesco della rottura le barre si trovano in una condizione di sforzo massimo di compressione pari a:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{305,6 N}{8\pi mm^2} = 12,16 MPa$$

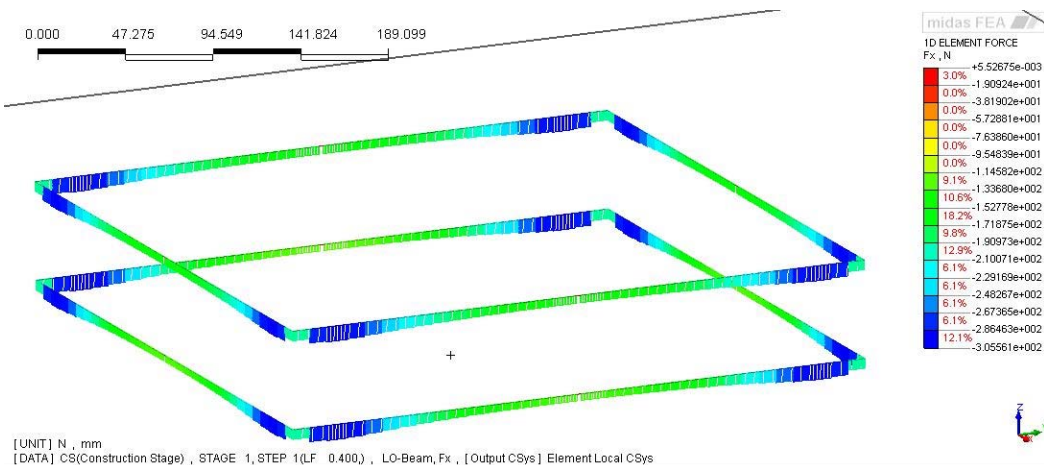


Figura 113: Stato tensionale pre-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 4 cm).

Ovvero circa 5 MPa inferiore rispetto alla configurazione precedente (Figura 113).

Il blocco centrale si troverà invece nella condizione mostrata in Figura 114.

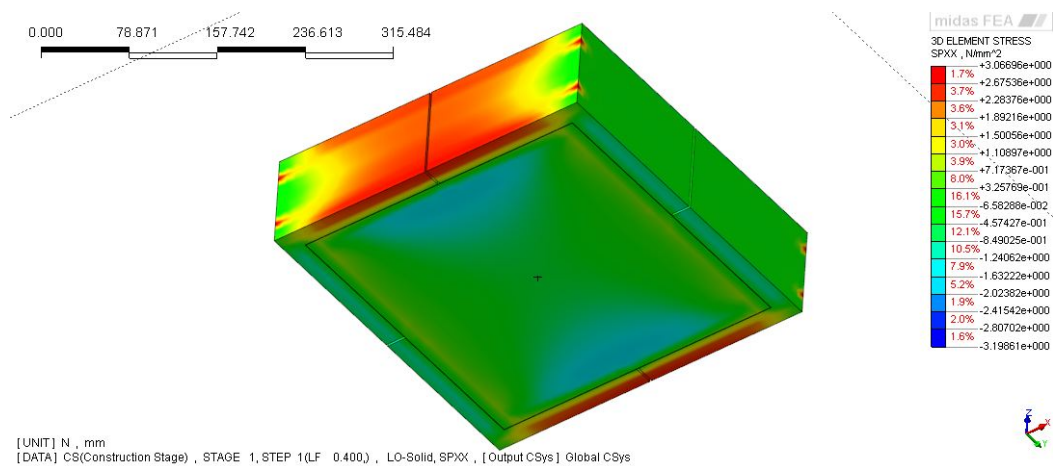


Figura 114: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (travetto da 4 cm).

Al momento del brusco rilascio delle tensioni si ha uno stato tensionale nelle barre (Figura 115) con sforzi pari a:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1727,7 N}{8\pi \text{ mm}^2} = 68,74 \text{ MPa}$$

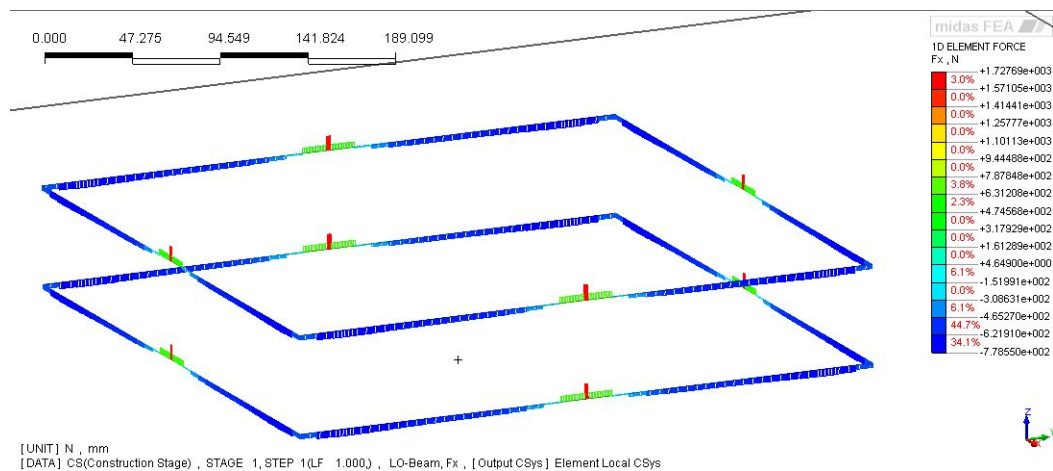


Figura 115: Stato tensionale post-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 4 cm).

Lo sforzo localizzato sul mattone di vetro risulta invece pari a 44.7 MPa (Figura 116).

Anche in questo caso, come ci si doveva aspettare, tutto il resto del mattone risulta sottoposto a compressione.

Si può notare come le considerazioni in merito al miglioramento delle condizioni dello stato tensionale del vetro siano state verificate, infatti si passa dai 57,8 MPa ai 44,7 MPa, riscontrando un abbassamento delle tensioni del 23%. Tale dato è di notevole interesse, ma il valore assoluto risulta ancora troppo alto per poter essere sopportato da un vetro ricotto.

Si procede dunque eseguendo le medesime analisi, dimezzando ulteriormente lo spessore del calcestruzzo armato.

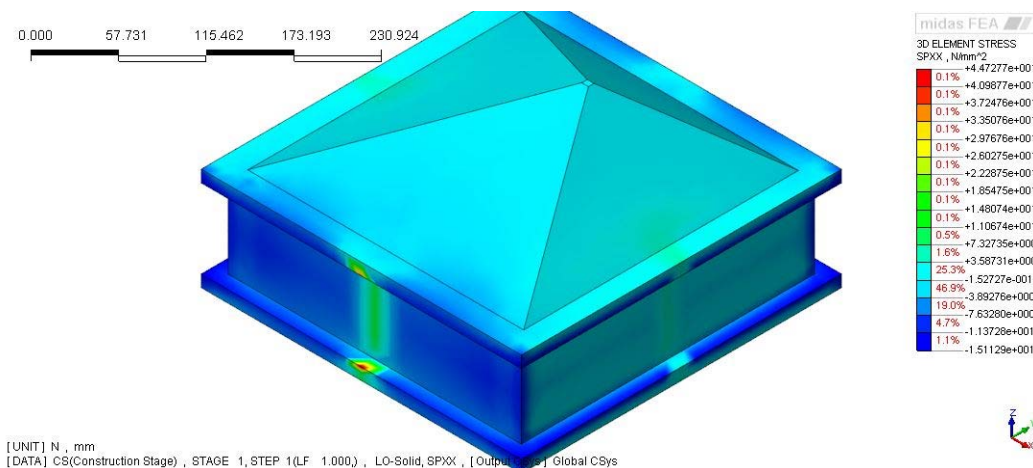


Figura 116: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 4 cm).

6.2. Analisi dei pannelli con travetti da 2 cm

Si procede anche in questo caso con l'analisi preliminare che, come nel caso precedente, mostra un aumento complessivo degli sforzi interni (Figura 117 e Figura 118), ma un miglioramento delle azioni sul mattone di vetro.

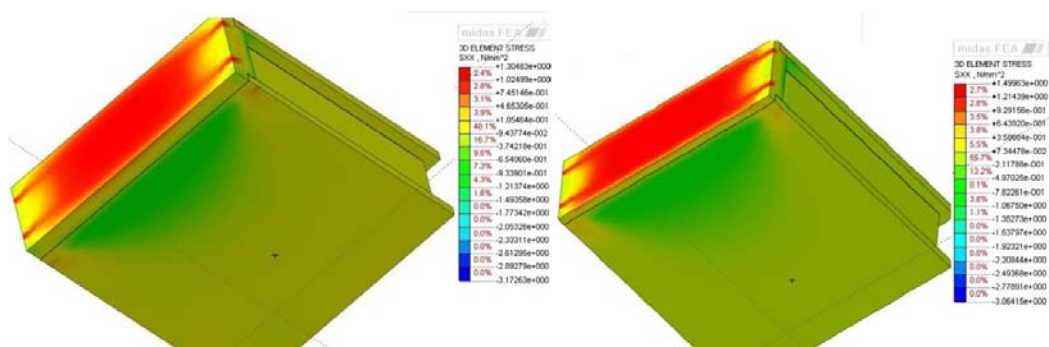


Figura 117: Modello semplificato - Fase 3 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 4 cm e 2 cm.

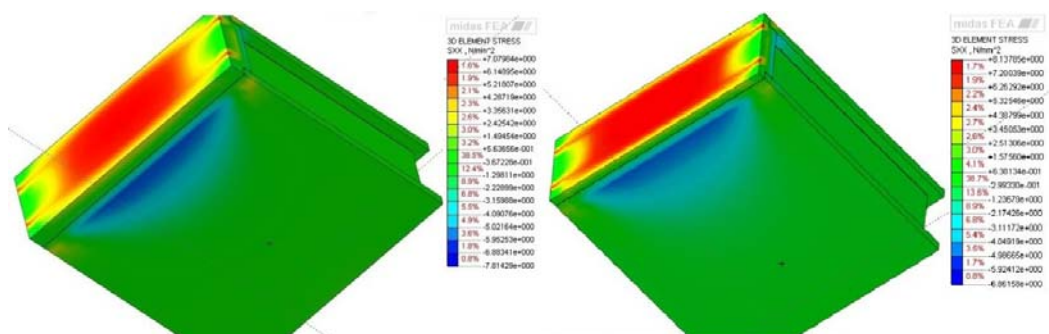


Figura 118: Modello semplificato - Fase 4 - Confronto tra andamento degli sforzi con travetto da 4 cm e 2 cm.

L'area del travetto in questo caso risulta pari a 1700 mm², dunque:

$$F_{4\text{cm}} = 23,80 \text{ kN} > F_{2\text{cm}} = 13,82 \text{ kN}$$

Di seguito si riportano le analisi lineari eseguite sul pannello con travetti da 2 cm.

6.2.1. Analisi Lineare

Fase 2 – Pannello in orizzontale – Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro

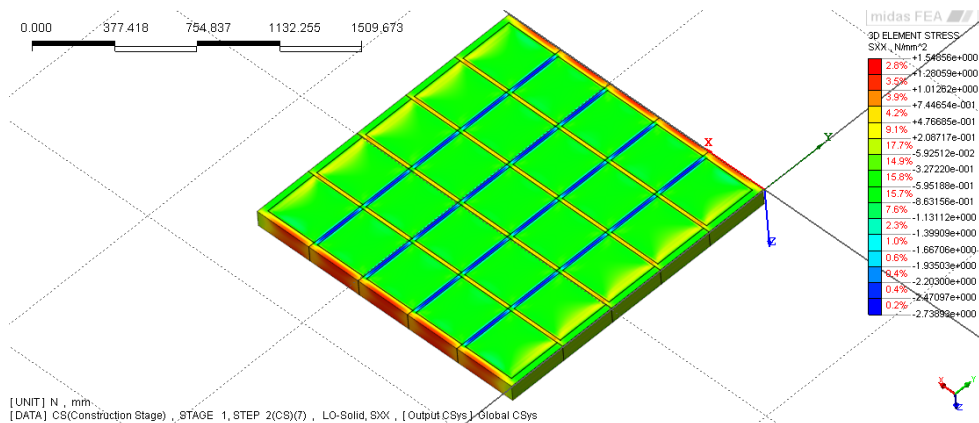


Figura 119: Fase 2 - Andamento degli sforzi lungo l'asse x (travetto da 2 cm).

Fase 3 – Pannello in verticale - Età 7 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti

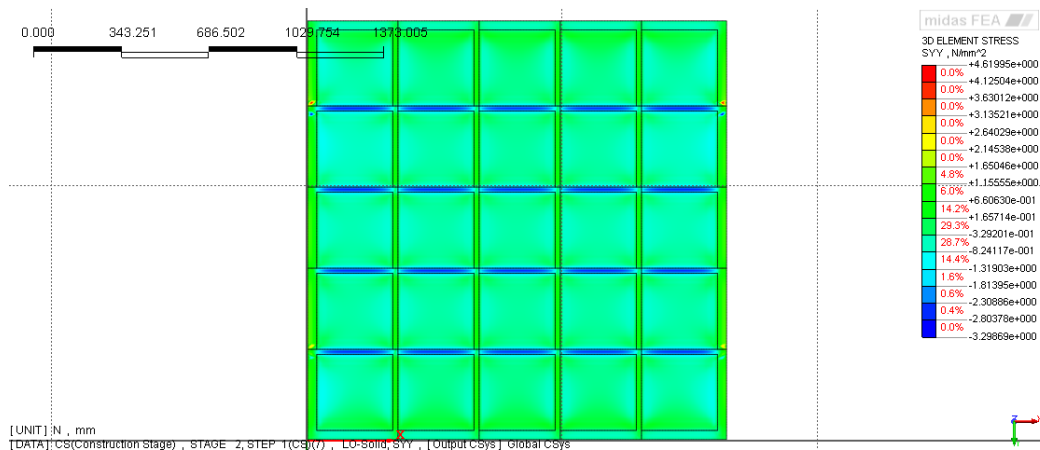


Figura 120: Fase 3 - Andamento degli sforzi lungo l'asse y (travetto da 2 cm).

Fase 4 – Pannello in verticale - Età 180 giorni - Azione applicata: peso proprio e ritiro, pannello appeso per i 4 vincoli esistenti

A 180 giorni dal getto invece i valori sono notevolmente superiori sia alla resistenza ultima del calcestruzzo, sia agli sforzi osservati nei casi precedenti (Figura 121).

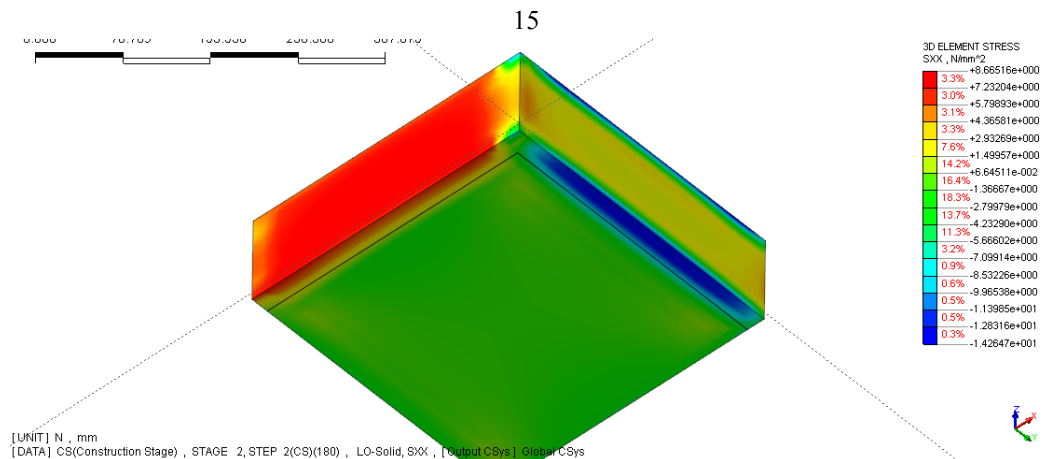


Figura 121: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 2 cm).

Anche in questo caso, gli sforzi aumentano più velocemente rispetto alla configurazione con travetto da 4 cm, di conseguenza la fessurazione avverrà ancora prima come viene mostrato in figura.

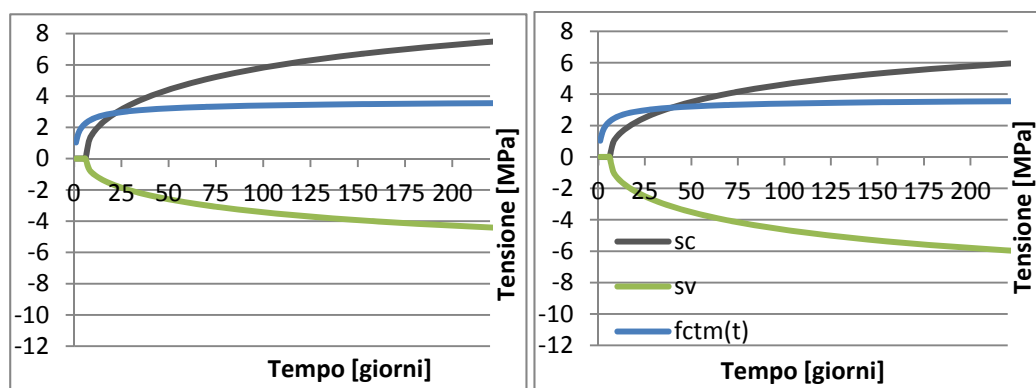


Figura 122: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Confronto tra casi con travetti da 2 cm a destra e 4 cm a sinistra.

6.2.2. Analisi Non-Lineare

Come previsto la fessurazione del calcestruzzo avviene prima. Le barre, all'istante pre-fessurazione, si trovano in una condizione di sforzo massimo di compressione pari a 8,30 MPa; circa 4 MPa inferiore rispetto alla configurazione precedente (Figura 123).

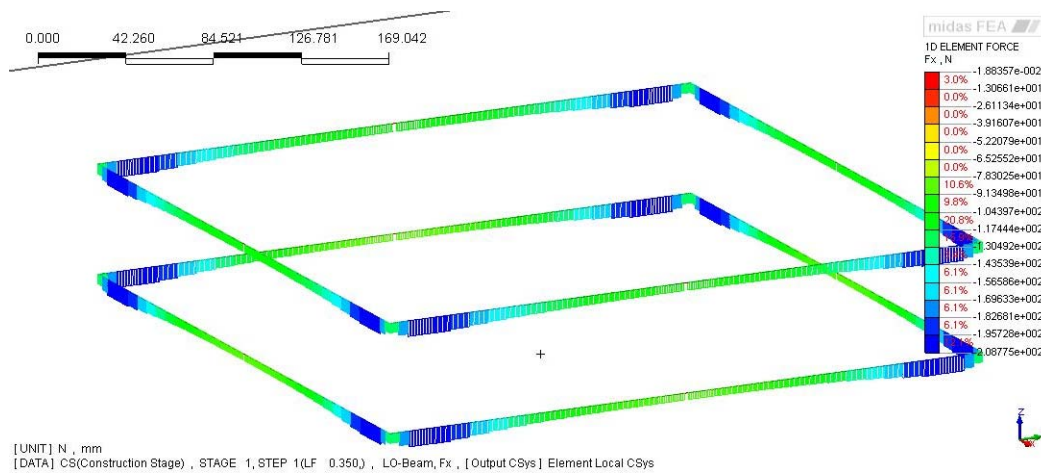


Figura 123: Stato tensionale pre-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 2 cm).

Il blocco centrale si troverà invece nella condizione mostrata in Figura 124

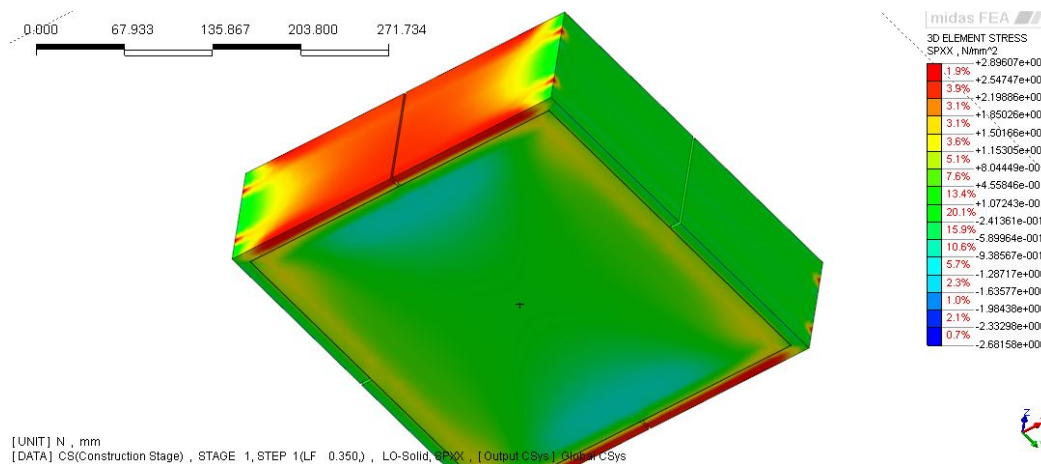


Figura 124: Stato tensionale pre-fessurazione del blocco centrale del pannello (travetto da 2 cm).

Al momento del brusco rilascio delle tensioni si ha uno stato tensionale nelle barre con sforzi pari a 41,39 MPa.

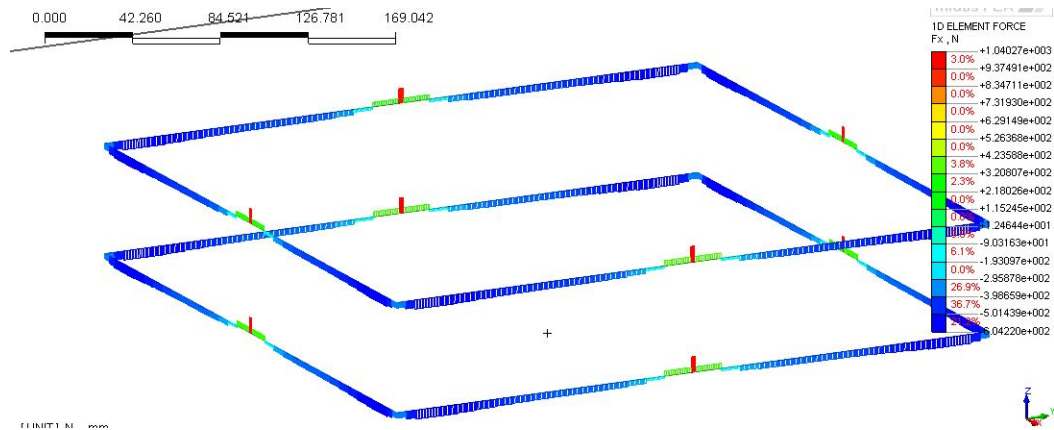


Figura 125: Stato tensionale post-fessurazione delle barre di armatura (travetto da 2 cm).

Lo sforzo localizzato sul mattone di vetro risulta invece pari a circa 32 MPa (Figura 126).

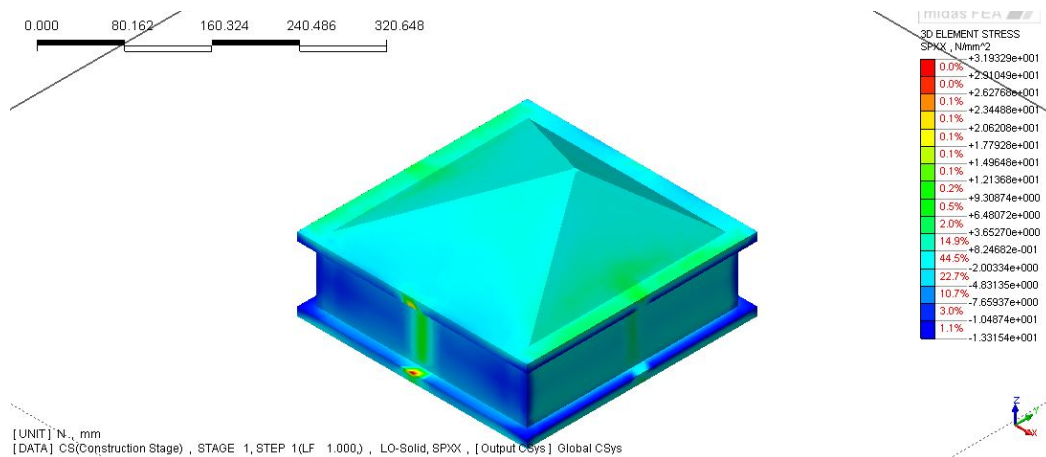


Figura 126: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 2 cm).

6.3. Considerazioni riguardo all'influenza dello spessore di calcestruzzo.

Dopo aver constatato che il fenomeno di danneggiamento osservato è dovuto essenzialmente alle caratteristiche del calcestruzzo, si può osservare che una semplice variazione geometrica del travetto porta ad un effettivo miglioramento delle condizioni di stress del mattone di vetro.

Attraverso una rielaborazione dei dati sin qui ottenuti, si può ricavare il grafico della Figura 127, che mostra l'andamento dei picchi di trazione nel vetro al verificarsi del fenomeno fessurativo del calcestruzzo, in funzione dello spessore dei travetti di calcestruzzo.

Si nota altresì che, nonostante i miglioramenti, i valori delle tensioni sono ancora abbastanza elevati per poter scongiurare del tutto l'ipotesi di una rottura del mattone di vetro.

Nel grafico si nota come i valori delle tensioni che assicurerebbero un'elevata sicurezza corrispondano ad uno spessore di calcestruzzo inferiore al centimetro.

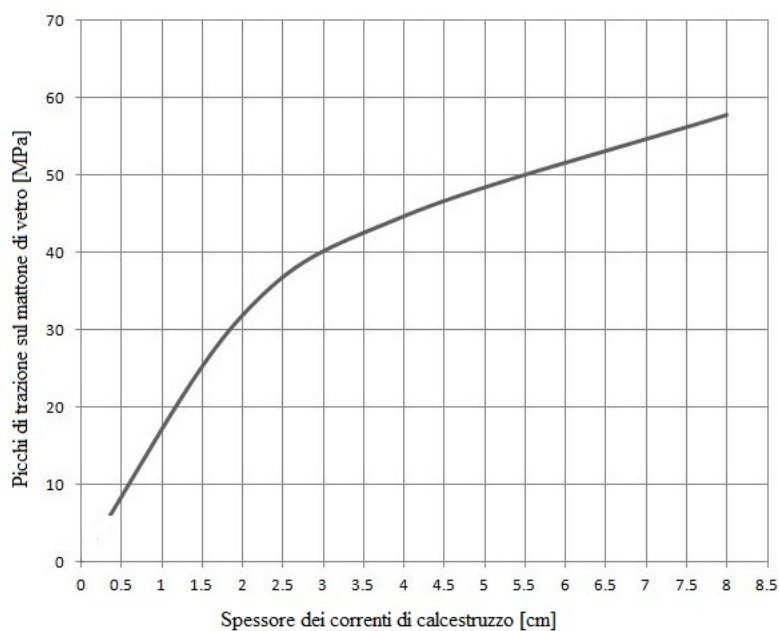


Figura 127: Andamento dei picchi di tensione sul vetro in funzione dello spessore di cls.

Capitolo 7

Valutazione Influenza della Legge di Ritiro del Calcestruzzo

Nei capitoli precedenti si è visto come il fenomeno di danneggiamento sia dovuto unicamente alle caratteristiche fisico-geometriche dei travetti di calcestruzzo.

Si è visto come ad una semplice variazione geometrica, ovvero la diminuzione dello spessore del calcestruzzo, corrisponda un miglioramento dello stato tensionale del vetro mattone. Tale accorgimento però non scongiura la possibilità che si verifichi una rottura, se non per spessori di calcestruzzo talmente piccoli da non permettere il posizionamento delle barre di armatura $\phi 8$.

Una configurazione corretta imporrebbe dunque spessori di pochi millimetri con barre di armatura $\phi 6$.

Questa configurazione però non si addice ad un'installazione di pannelli prefabbricati, appesi ad una sottostruttura metallica, che fungano da facciata. Essi infatti, seppur non siano elementi strutturali portanti, sono comunque sottoposti alle azioni del vento e alle differenze di pressione. Inoltre non essendo posti all'intradosso delle solette, bensì in una configurazione a cortina, dovranno comunque essere garantiti adeguati livelli di sicurezza.

Per mantenere spessori dei travetti superiori al centimetro vanno quindi variate le caratteristiche fisiche del calcestruzzo, ovvero la legge di ritiro.

Vengono dunque rieseguite le analisi FEM, simulando l'effetto di un additivo SRA (Shrinkage Reducing Admixture) variando la curva di ritiro del calcestruzzo.

In questo capitolo vengono presentati i risultati di tali analisi.

7.1. Variazione della curva di ritiro

Per simulare la presenza di un additivo antiritiro si è deciso di variare le caratteristiche igrometriche dell'ambiente di maturazione del getto. Tale semplificazione è lecita in quanto il ritiro stesso, come presentato in 2.4.1, dipende fortemente dall'umidità relativa. In questo modo, inoltre, le analisi esposte di seguito risultano valide sia per un'ipotesi di aggiunta di SRA, sia per il caso di maturazione a getto bagnato. Ovviamente la scelta di una o dell'altra alternativa dipenderà fortemente dai tempi di maturazione.

In definitiva, come mostrato in Figura 128, si è ottenuta una curva di ritiro con una contrazione ultima di circa la metà rispetto a quella del caso di studio.

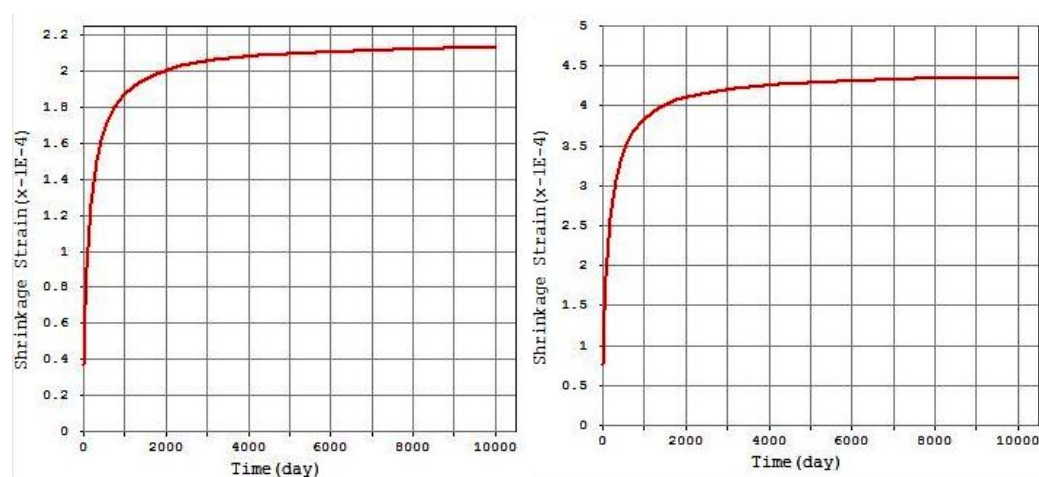


Figura 128: Curve di ritiro del calcestruzzo a 10000 giorni, con SRA a destra e senza a sinistra, ricavate da CEB-FIB 1990.

Le analisi di seguito riportate sono analoghe a quelle precedenti e si articolano ancora su tre step successivi di indagine:

- Modello semplificato lineare per una valutazione di massima.
- Modello generale lineare per valutare l'evoluzione globale del comportamento fino al verificarsi della fessurazione.
- Modello non lineare per le valutazioni post-fessurazione.

Di seguito si riporteranno solamente i risultati inerenti alla fase 4, ovvero quella conclusiva, in quanto tutte le considerazioni inerenti all'evoluzione degli stati di sforzo sono analoghe ai casi precedentemente riportati.

L'unico dato utile da qui in avanti è dunque lo stato ultimo dell'elemento.

7.2. Analisi dei pannelli con travetti da 8 cm con SRA

L'analisi preliminare (Figura 129) mostra valori molto interessanti, infatti lo sforzo massimo si attesta proprio intorno alla resistenza ultima del calcestruzzo, ovvero 3,02 MPa.

Ciò significa che la legge di ritiro implementata risulta proprio una condizione limite per il verificarsi della fessurazione.

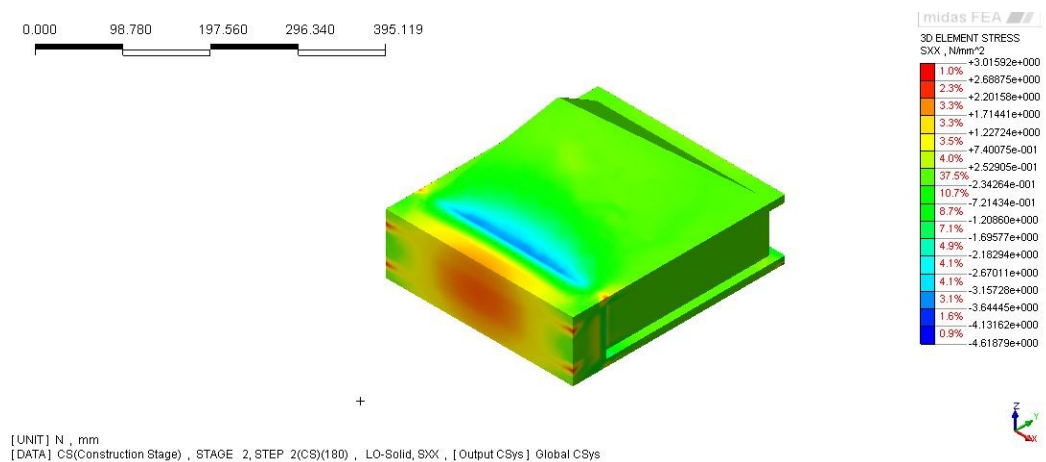


Figura 129: Modello semplificato - Fase 4 - Andamento degli sforzi - Caso di studio con aggiunta di SRA.

Ciò è supportato dal modello analitico lineare di Figura 130 dove si può notare come la resistenza ultima del calcestruzzo f_{ctm} risulti una condizione pressoché asintotica rispetto agli sforzi interni al calcestruzzo.

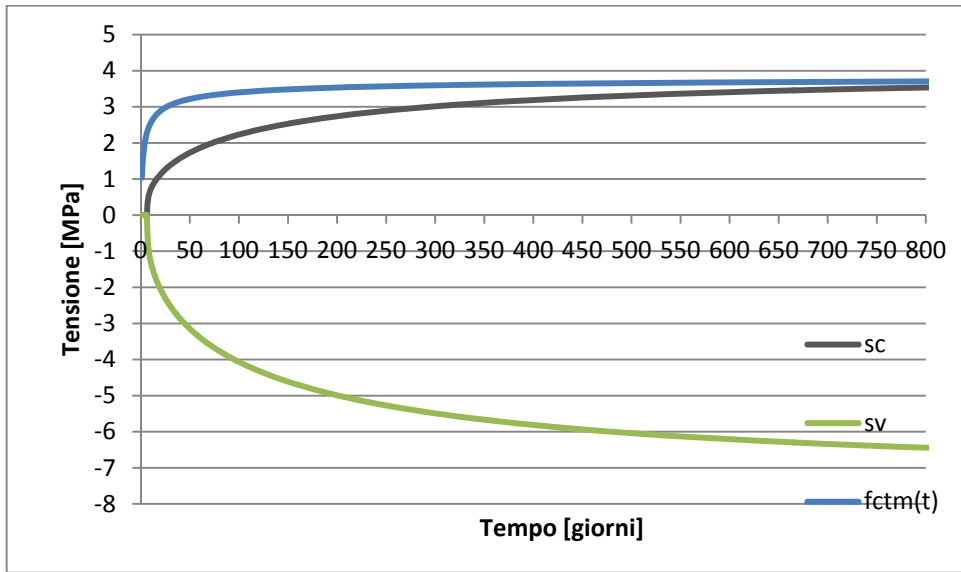


Figura 130: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Aggiunta di SRA al caso di studio.

7.2.1. Analisi Lineare

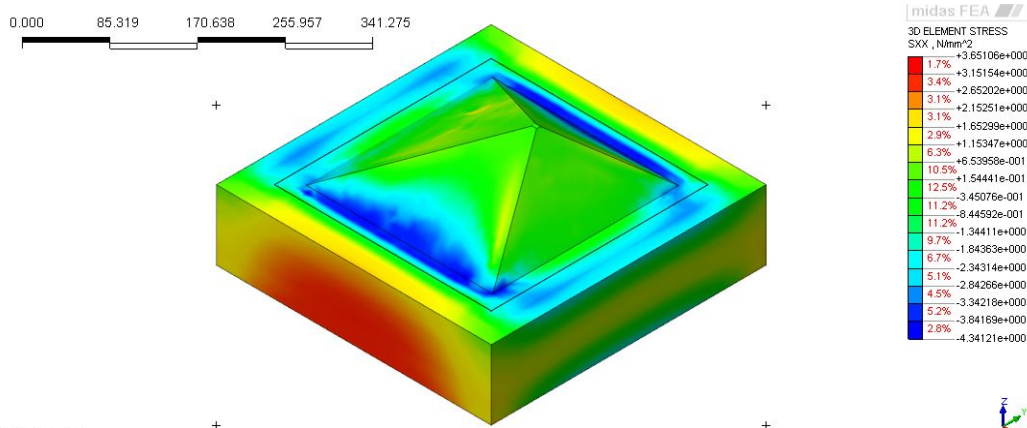


Figura 131: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (caso di studio con SRA).

L'analisi lineare (Figura 131) in questo caso mostra valori di sforzo interno di poco superiori alla resistenza ultima del calcestruzzo. Ciò significa che la fessurazione avverrà comunque a tali condizioni, ma basterebbe aumentare

semplicemente lo spessore del travetto di pochi millimetri e/o cambiare lo schema di vincolo rendendolo isostatico, per scongiurarla con buona probabilità. In questa configurazione il mattone rimarrebbe quindi tutto in compressione, senza mostrare i picchi di trazione all'interfaccia della fessura, con valori massimi assai inferiori alla resistenza ultima ricavata dalle prove di laboratorio (vedi 3.1.1).

Come si può vedere infatti lo sforzo di compressione del mattone si attesterebbe intorno ai 4,5 MPa.

Non potendo però in questo caso specifico scongiurare la fessurazione per pochi decimali, si riportano di seguito i risultati nel caso in cui tale evenienza si verifichi.

7.2.2. Analisi Non-Lineare

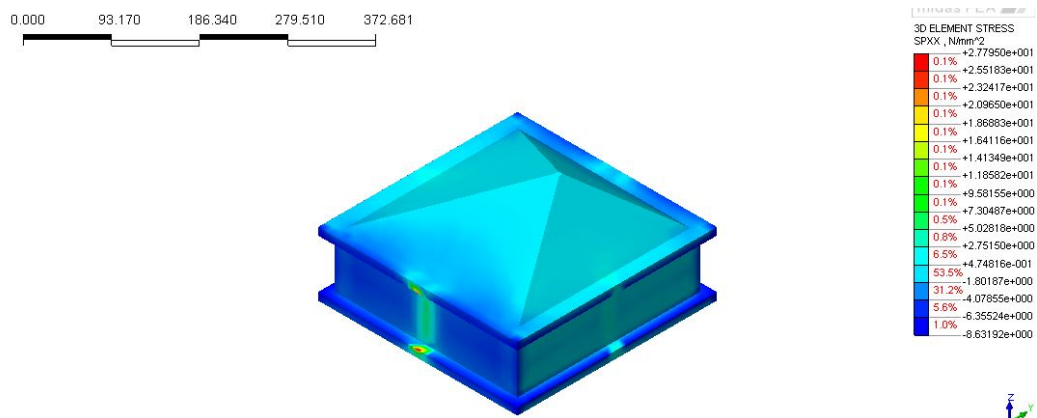


Figura 132: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione (caso di studio con SRA).

Come si può vedere in Figura 132, qualora avvenga la fessurazione, le tensioni all'interfaccia sarebbero di 27,8 MPa, molto inferiori a quelle che si avrebbero senza l'aggiunta di un additivo atiritiro (57,8 MPa), ma non ancora tali da scongiurare definitivamente la rottura del mattone.

7.3. Analisi dei pannelli con travetti da 4 cm con SRA

Il modello semplificato (Figura 133) riporta valori di poco superiori al caso precedente.

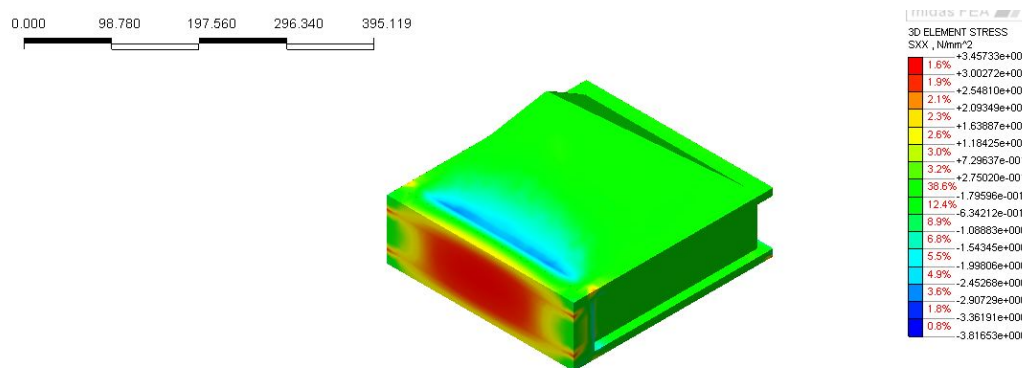


Figura 133: Modello semplificato - Fase 4 - Andamento degli sforzi - Modello con travetto da 4 cm con aggiunta di SRA.

Il modello analitico di Figura 134 anche in questo caso conferma i risultati dell'analisi del modello semplificato. Si nota come l'inizio della fessurazione avvenga ad un periodo di gran lunga maggiore rispetto ai casi senza aggiunta di additivi, infatti in questo caso si manifesterebbe tra i 400 e i 450 giorni dal getto. Non si può quindi ipotizzare che il calcestruzzo non si fessuri come nel caso precedente.

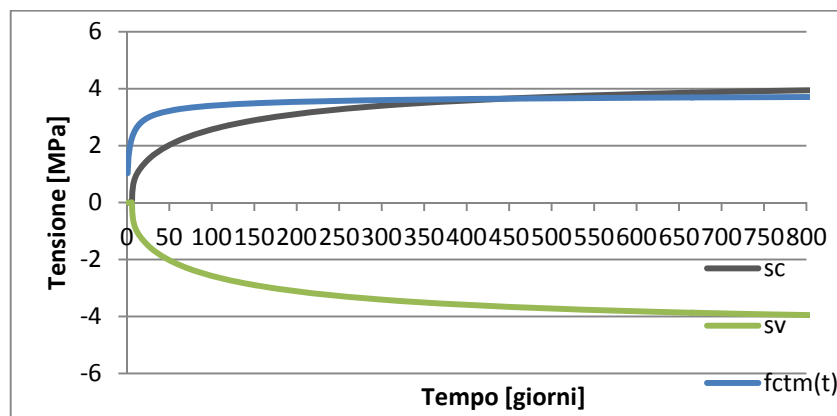


Figura 134: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Aggiunta di SRA al caso con travetto da 4 cm.

7.3.1. Analisi Lineare

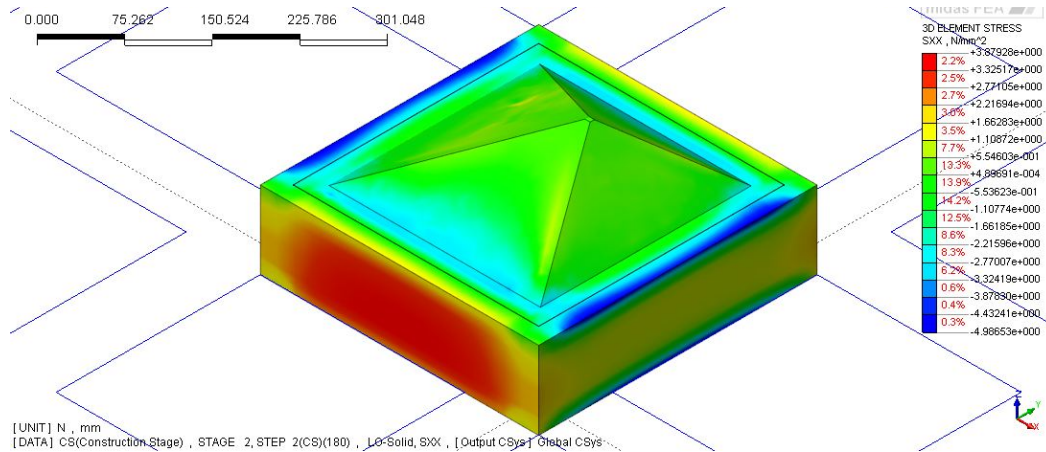


Figura 135: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 4 cm con SRA).

L'analisi effettuata sul pannello mostra valori degli sforzi sul blocco centrale (Figura 135) superiori all'analisi del modello semplificato di circa il 10%.

7.3.2. Analisi Non-Lineare

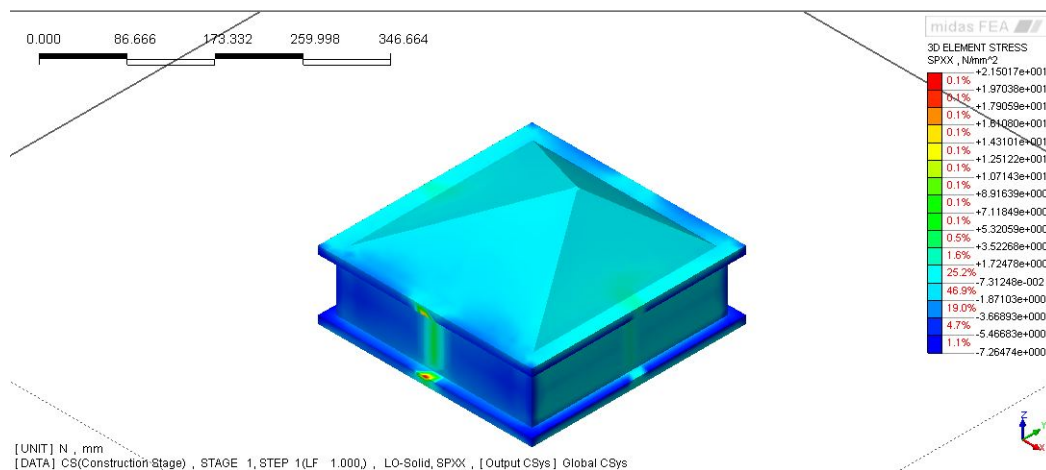


Figura 136: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 4 cm con SRA).

In questo caso i valori di tensione sul mattone di vetro nell'intorno della fessura si attestano intorno ai 20 MPa.

Dunque la rottura non può essere scongiurata con certezza assoluta, ma c'è una altissima probabilità che non si verifichi, o che comunque si verifichi per un numero molto limitato di mattoni.

7.4. Analisi dei pannelli con travetti da 2 cm con SRA

Per quanto riguarda l'ultimo caso in analisi, il modello semplificato riporta, come atteso, valori intorno ai 4 MPa, certamente superiori al limite di fessurazione (Figura 137).

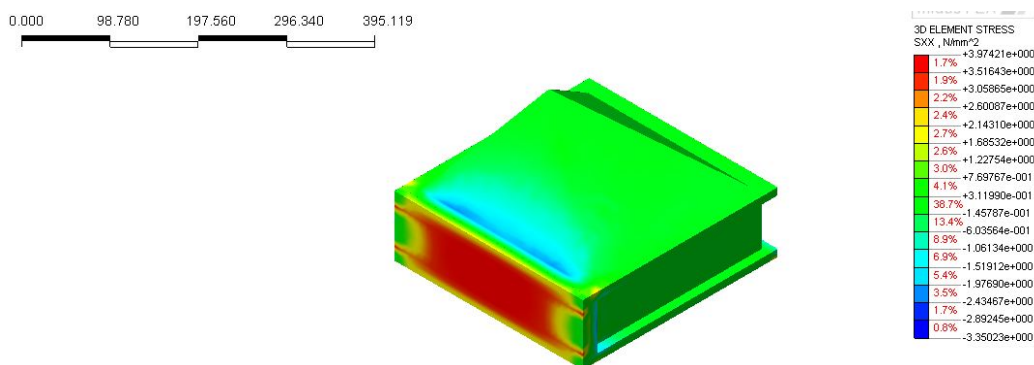


Figura 137: Modello semplificato - Fase 4 - Andamento degli sforzi - Modello con travetto da 2 cm con aggiunta di SRA

Il modello analitico mostra che l'inizio della fessurazione avviene a circa 120 giorni dal getto.

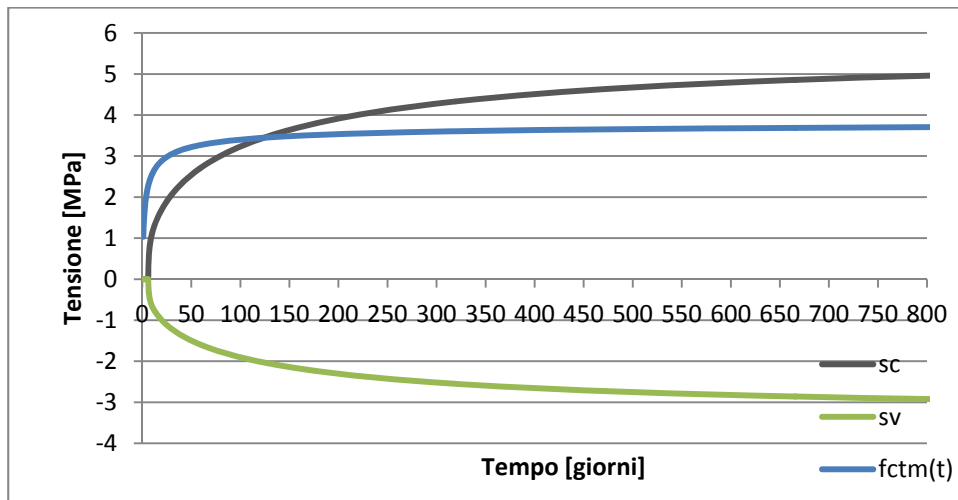


Figura 138: Tensioni nel calcestruzzo (sC) nel vetro (sG) e resistenza a trazione del calcestruzzo (fctm(t))- Cemento CEM 32.5R – Aggiunta di SRA al caso con travetto da 2 cm.

7.4.1. Analisi Lineare

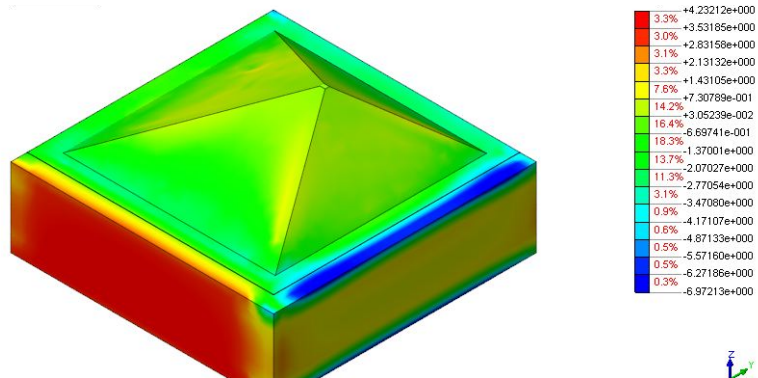


Figura 139: Fase 4 – Andamento degli sforzi nel mattone centrale del pannello (travetto da 2 cm con SRA).

7.4.2. Analisi Non-Lineare

Il risultato delle analisi non lineari mostra sforzi di tensione di picco di 15,5 MPa.

In questo caso la rottura del vetro è certamente scongiurata.

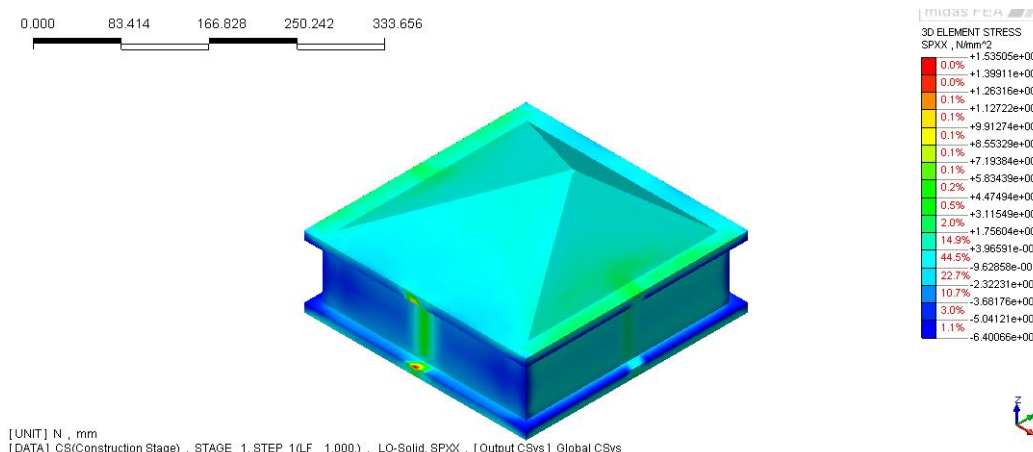


Figura 140: Stato tensionale post-fessurazione del blocco di vetro all'interfaccia con la superficie di fessurazione (travetto da 2 cm con SRA).

7.5. Considerazioni riguardo all'influenza della legge di ritiro del calcestruzzo.

La variazione combinata sia delle caratteristiche geometriche della matrice, sia di quelle fisiche del calcestruzzo stesso, ovvero la legge che ne governa il ritiro durante la maturazione, portano a dei netti miglioramenti delle prestazioni globali dei pannelli. Infatti con l'aggiunta di additivi anti ritiro si può scongiurare definitivamente la rottura dei mattoni di vetro limitando il rilascio delle tensioni sul vetro a seguito dell'innescò della fessurazione stessa (adottando correnti di calcestruzzo di spessore inferiore a 6 cm).

Nel grafico di Figura 141 si riporta un riepilogo di tutti i risultati ottenuti dalle analisi agli elementi finiti dei capitoli 5, 6 e 7. Vengono mostrate in particolare le curve dell'andamento dei picchi di tensione nel vetro in funzione dello spessore di calcestruzzo nel caso di utilizzo e non di additivi antiritiro.

Come si può osservare, gli additivi antiritiro portano dei consistenti miglioramenti del comportamento globale dei pannelli, infatti si vede come l'utilizzo di additivi SRA porti quasi ad una rototraslazione della curva degli andamenti degli sforzi verso valori di picco molto più bassi.

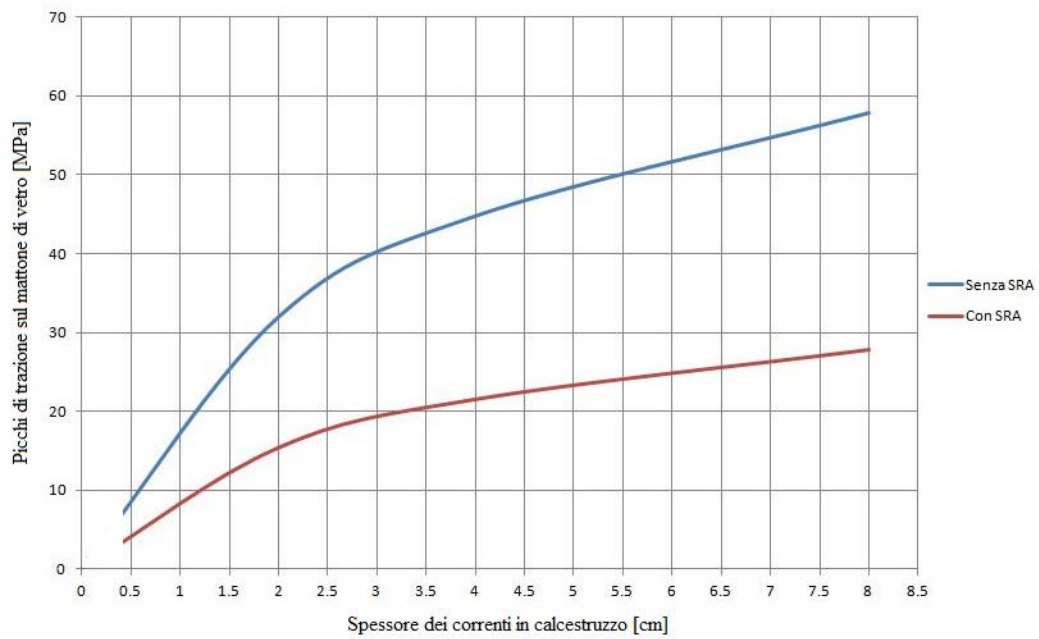


Figura 141: Andamento dei picchi di tensione sul vetro in funzione dello spessore di cls, con aggiunta di SRA (rosso) e senza additivi antiritiro (blu).

Capitolo 8

Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è stato quello di indagare i possibili fattori che possano causare la rottura dei mattoni di vetro di un'opera in vetrocemento di facciata, al fine di ottenere delle prescrizioni utili per eventuali progetti futuri.

Tale ricerca è giustificata dal sempre crescente interesse per il vetro mattone da parte dei progettisti.

Attraverso un esame generale sul mondo delle facciate ed in particolare su quelle in vetrocemento, si sono discusse le esigenze comunicative e funzionali dei progettisti. Inoltre si è effettuata una classificazione di massima delle facciate in vetrocemento, differenziandole per la tipologia di posa in opera e per la configurazione rispetto alla struttura primaria. Sono state così discusse le peculiarità di comportamento degli elementi costitutivi (mattone di vetro e calcestruzzo) in modo da indirizzare lo studio su un caso particolarmente problematico che possa permettere di ottenere dei risultati di riferimento, anche per casi più semplici.

Successivamente sono state quindi effettuate delle analisi agli elementi finiti su pannelli prefabbricati in calcestruzzo in una configurazione particolarmente critica (curtain wall panel system ad elementi saldati in maniera iperstatica ad una sottostruttura metallica), con lo specifico obiettivo di indagare gli effetti negativi dovuti principalmente al ritiro del calcestruzzo, alla differenza di temperatura e alle condizioni di vincolo.

I risultati ottenuti hanno mostrato come la tipologia delle connessioni e gli effetti termici non siano le cause principali del fenomeno di danneggiamento dei mattoni di vetro, ma rimangono degli aspetti marginali che, nonostante debbano essere limitati il più possibile tramite accurate scelte progettuali, non creano situazioni di criticità.

Il ritiro del calcestruzzo è risultata la causa principale degli effetti negativi, anche a lungo termine, che generano stati tensionali critici per il vetro.

Attraverso analisi accurate agli elementi finiti, effettuate variando le caratteristiche del calcestruzzo e gli spessori delle “fughe”, sono stati ottenuti dei risultati utili e di riferimento.

Le soluzioni conformi all’ottenimento degli obiettivi si possono articolare su 3 punti.

1. La resistenza del vetro ricotto ha una forte dipendenza dalla presenza di difetti che, come è noto, può essere estremamente variabile da mattone a mattone. Questo non permette di definire una specifica resistenza ultima dei mattoni di vetro.

Infatti, per poter prevedere con precisione l’evoluzione del fenomeno di propagazione della cricca attraverso il modello della Meccanica della Frattura Elastica Lineare, bisognerebbe determinare l’entità dei difetti superficiali su ogni elemento.

Nel caso pratico ci si riduce invece a delle semplificazioni, applicando dei coefficienti correttivi che determinano una soglia di sicurezza al di sotto della quale è molto bassa la probabilità che si verifichi la rottura di un elemento difettoso.

Poiché il vetro semplicemente ricotto è soggetto ad una notevole dispersione dei risultati, sia la resistenza di riferimento, sia i coefficienti di sicurezza portano a rendere accettabili, in termini probabilistici, delle sollecitazioni interne assai inferiori a quelle che si avrebbero per i vetri presollecitati.

Sottoporre i mattoni di vetro ad un processo di **tempra chimica**, renderebbe le probabilità di collasso quasi nulle.

Tale soluzione però può risultare economicamente non praticabile o comunque eccessivamente dispendiosa.

2. In genere è necessario considerare l'utilizzo di **additivi antiritiro**.
Questo accorgimento permette di limitare il rilascio di tensioni eccessive sugli elementi in vetro, a seguito della fessurazione del calcestruzzo. Infatti, mentre in un primo momento i mattoni sono sollecitati a compressione per valori al di sotto del limite di rottura, con l'instaurarsi di una fessura nei correnti di calcestruzzo, si invertono bruscamente gli stati coattivi che portano a trazione il vetro con conseguente criticità. In particolare l'utilizzo di additivi antiritiro garantiscono una configurazione accettabile per spessori dei travetti inferiori a 6 cm. Per spessori superiori non viene invece garantita con sufficiente probabilità l'integrità dell'opera.

3. Risulta che per un corretto utilizzo del mattone di vetro può essere suggerita una posa in opera tradizionale ad umido, con **spessore dei correnti di calcestruzzo non superiori ai 15 mm**. Quest'ultima osservazione è supportata anche dai produttori di vetro mattoni, che a seguito di un'esperienza diretta e maturata negli anni, non producono distanziatori con spessori maggiori di 16 mm.

Bibliografia

AA.VV., *Guida tecnica SEVES*, 2006.

AA.VV., *Lezioni di scienza delle costruzioni*, Milano, Città studi Edizioni.

AA.VV., *Technology reviews: Dynamic Curtain Wall System*. Berkeley: University of California, settembre 1992.

AA.VV., *Aluminum Curtain Wall Design Guide Manual*, Palatine, Illinois, U.S.A., AAMA, 1994.

AA.VV., CNR-DT 210/2012: *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*, Roma, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 5 luglio 2012.

AA.VV. , *Façades: Principles of Construction*, Basilea, Birkhäuser Verlag AG, 2007.

AA.VV., *Guida all'uso dell'Eurocodice 2. Vol 1 - 2*, Roma, aicap, 2006.

AA.VV., *Manuale dei materiali per l'ingegneria*, Milano, McGraw-Hill, 1996.

AA.VV., *Manuale del vetro. Proprietà e funzioni del vetro*, Milano, Saint-Gobain Glass Italia Spa, 1997.

AA.VV., *Manuale del vetro. Questioni tecniche e posa in opera*, Milano, Saint-Gobain Glass Italia Spa, 1997.

Baccarelli P., La prefabbricazione delle facciate continue. *Aprire* , 1993, n.3.

Benevolo L., *Storia dell'architettura moderna*, Bari, Laterza, 1960.

Bertolini L., *Materiali da costruzione*. Torino, Città Studi Edizioni, 2006.

Brookes A. J., *Cladding of Buildings*. Londra, U.K., Construction Press, 1983.

Carotti A., *Vetro Strutturale e Facciate Continue*. Milano, Edizioni Tecnos Srl, 2003.

Çengel Y.A., *Termodinamica e Trasmissione del Calore*, Milano, Mc Graw Hill, 2005.

Corrao R., *Glassblock and Architecture: evoluzione del vetro mattone e recenti applicazioni*. Firenze, Alinea Editrice, 2010.

Enciclopedia dell'Architettura moderna, Garzanti, 1967.

Enciclopedia dell'Arte, Garzanti, 2002.

Enciclopedia Tematica "L'Universale". Architettura, Garzanti, 2004.

midas FEA, *Analysis an Algorithm*.

midas FEA, Manual.

Gottfried A., Di Giuda G.M., *Ergotecnica Edile*, Bologna, Esculapio, 2011.

Gottfried A., *Ergotecnica Edile*. Milano, Hoepli, 2013.

Guglielmini G., Colombo P., *Introduzione alla trasmissione del calore*. Milano, CEA, 2002.

Loughran P., *Failed Stone: Problems and Solutions with Concrete and Masonry*, Basilea, Birkhäuser – Publishers for Architecture, 2007.

Mehta P.K., Monteiro P.J.M., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill, 2014.

Mola F., Pellegrini L.M., *The new model for creep of concrete in fip model code 2010*, 37th Conference on "Our World in Concrete & Structures", Singapore, 29 - 31 agosto 2012.

Muntoni A., *Lineamenti di storia dell'architettura*. Bari, Laterza, 1997.

Naso V.D., Seminario: Facciate continue in vetro e metallo, 2005.

Ouroussoff N., *The Best House in Paris*. *New York Times*, 26 agosto 2007.

Pease B.J., *The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development and cracking*, Faculty of Porude University, 2005.

Pevsner N., Flemming J., Honour H., *Dizionario di Architettura*, Torino, Einaudi, 1981.

Pizzi E., *I sistemi di facciata. Guida alla progettazione*, Milano, BEMA, 1987.

Rigone P., *I sistemi di facciata continua: classificazione ed analisi funzionale*. Milano, UNCSAAL, 2003.

Rossetti M., Tatano. V., *Seminario. Le facciate continue*, 25 ottobre 2007.

Scarinci G., Colombo P., *Il vetro in edilizia*. Padova, Libreria progetto, 1993.

Tecnologiques, *l'Architecture d'Aujourd'hui*, n. 237, febbraio 1985.

Verre et acier, *l'Architecture d'Aujourd'hui*, n. 212, dicembre 1980.

NORMATIVA TECNICA

UNI 7440:75 "Vetri per vetrocemento armato"

DIN 18175:77 "Glasbausteine: Anforderungen, Prufung"

DIN 4243:78 "Betonglaser: Anforderungen, Prufung"

DIN 4242:79 "Glasbaustein - Wände: Ausfufung und bemessung"

UNI 8290:81: Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia”

UNI 8369/2:87 “Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia”

UNI 9303:88 “Glass containers. Determination of thermal shock resistance”

UNI 10351:94 “Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore”

EN ISO 6946:99 “Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica Metodo di calcolo”

ISO 7459:2004 “Glass containers - Thermal shock resistance and thermal shock endurance - Test methods”

EN 673:2005 “Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo di calcolo”

EN ISO 10077-1:2006 “Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General

prEN 13474:2009 “Glass in building - Determination of the strength of glass panes”

EN ISO 10077-2:2012 “Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames”

UNI EN 1051-1:2005 “Diffusori di vetro per pareti e pavimentazioni - Parte 1: Definizioni e descrizione”

UNI EN 1051-2:2008 “Vetro per edilizia. Diffusori di vetro per pareti e pavimentazioni – Parte 2: Valutazione di conformità/Norma di prodotto”

UNI EN 12831 “Metodo Di Calcolo Carico Termico”

UNI EN 1990 “Action on structures”

UNI EN 1991 “Basis of structural design”

ASTM E1300-09 “Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings

CEB-FIB 1990 (model for the long-term behaviour of concrete)

CEB-FIB 2010 (model for the long-term behaviour of concrete)

