

Ing. Matteo Lai
Strada Fiorani 22 - 37029 San Pietro In Cariano (VR) ing.matteolai@gmail.com

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

1		
0	11.06.2019	Prima emissione
Revisione	Data	Descrizione

INDICE

1. Premesse.....	3
2. Materie prime e produzione	3
2.1. Materie prime	3
2.2. Costruzione dei manufatti	7
3. Collegamenti ed ancoraggi.....	8
3.1. Fissaggi pannello-pannello.....	8
3.2. Fissaggi pannello-sottostruttura	9
4. Caratteristiche meccaniche, chimiche e termiche del materiale PRFV	10
4.1. Normativa di riferimento.....	11
4.2. Resistenza a trazione	12
4.2.1. Prova a trazione diretta	13
4.2.2. Prova a trazione per flessione.....	14
4.3. Resistenza e conduttività termica.....	15
4.4. Massa volumica.....	16
4.5. Coefficiente di dilatazione lineare.....	16
4.6. Contenuto in resina.....	16
4.7. Durezza Barcol	17
4.8. Valori di calcolo	17
5. Calcolo strutturale e sicurezza.....	17
6. Conclusioni.....	21

* * *

1. Premesse

La società Delta Cover srl è specializzata nella realizzazione di coperture in materiale composito, generalmente definito con la sigla PRFV che sta per “Plastica rinforzata con fibre di vetro”.

Generalmente le strutture di coperture sono costituite da elementi prefabbricati di varia geometria:

- Tegoli bombati a pianta rettangolare
- Tegoli bombati a settore circolare
- Pannelli piani

Ovviamente l'utilizzo di tali elementi dipende dalla forma della copertura, se rettangolare o circolare, se a pianta irregolare, fissa oppure mobile.

Di seguito verranno valutate le scelte costruttive del produttore specificando punto per punto le caratteristiche del prodotto e ove necessario si suggeriranno o specificheranno eventuali linee guida da adottare per garantire l'idonea realizzazione e progettazione delle coperture in PRFV.

2. Materie prime e produzione

2.1. Materie prime

Il materiale “PRFV”, realizzato da DELTA COVER, viene ottenuto mediante l'unione di fibre in vetro e resine poliestere. Per l'ottenimento dei manufatti vengono utilizzate le seguenti tipologie di fibre:

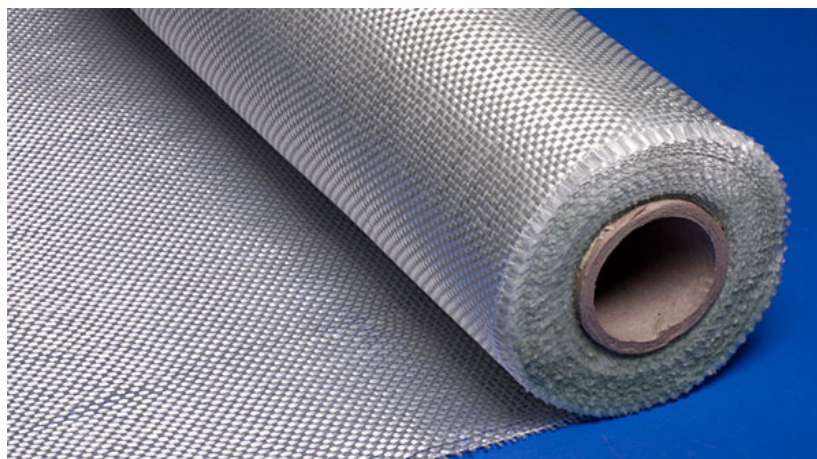
- MAT (tipo E) A FILI TAGLIATI: composto da fili tagliati di lunghezza 5 cm, uniformemente distribuiti in ordine sparso su un piano senza orientamento preferenziale. È il rinforzo per eccellenza, concepito per la stratificazione a mano, maggiormente impiegato nel settore nautico e nelle costruzioni in vetroresina in generale.

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV



<i>Grammatura gr/mq.</i>	<i>Caratteristiche e settori di impiego</i>
150 225	MAT leggeri di facile impregnazione, usati in prevalenza come primo strato nello stampaggio per contatto; per piccoli oggetti o pezzi molto elaborati che richiedono elevata deformabilità.
300 375	MAT dotati da buona adattabilità e bagnabilità, sono i rinforzi di media grammatura maggiormente utilizzati nella costruzione di pezzi in composito di piccola e media dimensione.
400 450 600	MAT di grammatura elevata adatti per realizzare manufatti di grossa mole; laminati di forte spessore; pannelli; costruzioni nautiche; elementi per edilizia.

- STUOIE: ottenute mediante la tessitura di roving (bobine di filo di lana di vetro). Le stuoie vengono generalmente impiegate in combinazione con i MAT, hanno minor deformabilità ed aumentano notevolmente la resistenza del laminato secondo gli assi di orientamento delle fibre.



VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

gr/mq.	Caratteristiche e impiego
280 300	Stratificati leggeri; canoe, piccole imbarcazioni, stampi
420 510	Pannelli; manufatti medio grandi; costruzioni di vasche. Frapposizione agli strati di MAT per rinforzo stampi di grosse dimensioni e manufatti in vetroresina in genere.
280 280 400	Consolidamento di soffitti a volta "camera a canne". Fasciature di rinforzo e riparazioni di tubi in PVC e VTR; avvolgimenti; rivestimenti protettivi di <i>pipe-line</i> .

Le fibre appena descritte devono essere impregnate con resina: tale resina, della tipologia poliestere insatura, consiste in un polimero ottenuto dalla reazione di policondensazione tra poliacidi e polialcoli. È un polimero liquido facilmente stampabile che una volta indurito (reticolato con stirene, mediante l'uso di particolari sostanze, perossidi organici, dette indurenti) si mantiene solido conservando la forma assunta nello stampo. I manufatti così realizzati, hanno caratteristiche di eccezionale resistenza e durata. È utilizzata con grande successo in molteplici settori industriali (edilizia, arredamento, automotive, sportivo-acquatico per la creazione di windsurf e imbarcazioni).

Principali caratteristiche:

Da liquide, nel loro impiego:

- Scarso ritiro lineare
- Eccellente bagnabilità delle fibre e delle cariche
- Reticolazione a caldo o a freddo tramite aggiunta di indurente
- proprietà tissotropica

Da solide, dopo la reticolazione:

- Eccezionale leggerezza
- Rigidità
- Buon isolamento elettrico
- Stabilità dimensionale a fronte di sbalzi di temperatura
- Un rapporto resistenza/peso più elevato di quello dell'acciaio
- Resistenza agli agenti chimici
- Eccellente finitura superficiale

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

- Idrorepellenza
- Resistenza all'usura e alle alte temperature
- Buona resistenza meccanica

Le tipologie fondamentali di resina utilizzata da DELTA COVER nella produzione degli elementi di copertura sono:

- ORTOFTALICA: è una resina di uso comune, adatta per stratificare con MAT e stuoie in fibra di vetro, **ideale per la realizzazione di manufatti in vetroresina**. Possiede buone caratteristiche meccaniche ed elevato potere bagnante nei confronti della fibra. La proprietà tissotropica riduce al minimo la tendenza alle colature nella stratificazione in verticale. Si catalizza con 2% di MEKP.
- VINILESTERE: possiede elevate doti di resistenza meccanica e ottime caratteristiche alla temperatura di distorsione al calore di (oltre 110° C). Grazie alle sue caratteristiche e alla facilità di utilizzo, paragonabile ad una poliestere, la resina vinilestere viene utilizzata nel settore dei compositi nelle applicazioni più impegnative, sia con fibre di vetro che con quelle ad alto modulo come carbonio e Kevlar.
Questa resina viene impiegata nella costruzione di marmitte per moto, scocche, carenature, manufatti resistenti al calore, barche da competizione, ecc.
Ha inoltre un'ottima resistenza agli aggressivi chimici e agli acidi concentrati, è quindi adatta anche per rivestimenti anticorrosivi strutturali in vetroresina, di vasche e serbatoi nell'industria chimica e petrolifera. **Lo strato interno di tutti gli elementi costituenti le coperture viene protetto con un coating a base di resina vinilestere, conferendo grande resistenza agli agenti chimici.**
Resina tissotropica preaccelerata. Si catalizza con 2-3% di MEKP.
Nel periodo invernale si aggiunge 0,5% di promotore NNDA.
- GELCOAT ISOFTALICO-NEOPENTILICO: con il termine “gelcoat” si indica uno strato esterno di finitura, in media 700 g/mq, utilizzato per ricoprire manufatti in materiale composito a base vinilestere o poliestere; viene applicato direttamente sullo stampo, prima della formatura del manufatto stesso. È costituito da resine isoftaliche neopentiliche, dove la presenza di neopentil glicole ne migliora le caratteristiche di resistenza chimica e agli agenti atmosferici. **Il ruolo fondamentale del gelcoat è fornire protezione da agenti esterni, come agenti atmosferici e raggi ultravioletti, è impermeabile all'acqua e resistente ai processi di osmosi e saponificazione.**

2.2. Costruzione dei manufatti

La realizzazione del manufatto avviene unicamente con la seguente modalità:

- **STAMPAGGIO CON METODO MANUALE:** ideale per la realizzazione di pezzi che richiedono particolari caratteristiche meccaniche. Sistema impiegato per la realizzazione di pezzi medio-grandi. Mediante la stesura di fogli di tessuto (MAT e stuoie) e l'impregnamento manuale con resina, questo metodo di stratificazione garantisce certezza dello spessore da realizzare poiché la quantità del tessuto è stata definita e preparata in precedenza. **È il metodo ideale e quindi utilizzato per la realizzazione degli elementi di copertura.**



- **STAMPAGGIO CON METODO TAGLIO-SPRUZZO:** **non viene utilizzato per la realizzazione degli elementi di copertura**, dato che la precisione dello spessore da realizzare dipende molto dall'abilità dell'operatore (la stesura del materiale avviene per mezzo di una macchina che spruzza resina e tessuto allo stesso tempo). Questo metodo di stratificazione garantisce velocità di realizzazione ma può considerarsi un sistema ideale solo per la realizzazione di pezzi medio-piccoli o pezzi molto sagomati e per la realizzazione di articoli che non richiedono particolari caratteristiche meccaniche.

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV



La stratificazione prevista dell'elemento in PRFV finito sarà quindi la seguente:

STRATO PROTETTIVO ESTERNO	Gelcoat isoftalico-neopentilico ad alta resistenza ai raggi UV.
COLORE LAYER ESTERNO	Tutte le tinte RAL
STRATIFICAZIONE MANUALE	Tessuti in fibra di vetro MAT/STUOIE + Resina ortoftalica poliestere
STRATO PROTETTIVO INTERNO	Top-coat di resina vinilestere contro la corrosione.

3. Collegamenti ed ancoraggi

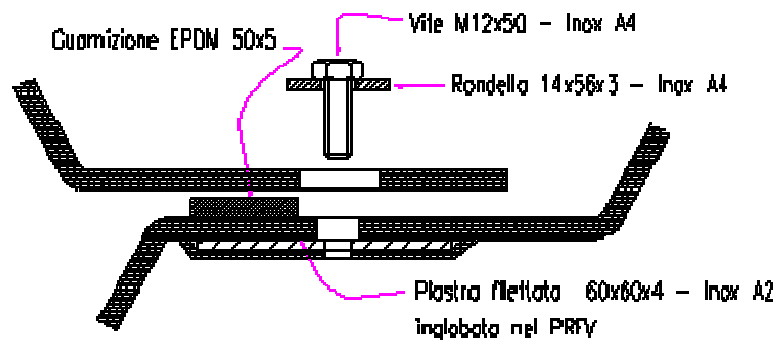
3.1. Fissaggi pannello-pannello

Il sistema studiato da DELTA COVER per il fissaggio tra pannelli in PRFV prevede l'interposizione di guarnizione in EPDM 50x5h mm a garanzia di tenuta delle sostanze maleodoranti.

Il collegamento tra i pannelli viene realizzato con i seguenti elementi:

- Bulloni T.E. M12X50 in AISI 316
- Rosette piane maggiorate in AISI 316 di dimensioni $\varnothing 56 \times 14 \times 3$ mm
- Piastre 60x60x4 mm in AISI 304 filettate M12, annegate nella resina

Dettaglio giunzione tra pannelli



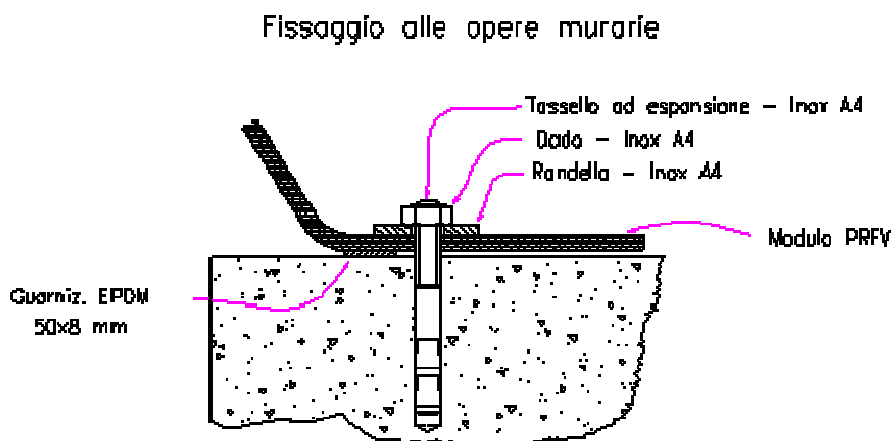
La presenza di una grande piastra annegata permette anche una maggiore diffusione degli sforzi ed una maggiore resistenza del collegamento anche a rifollamento. Le forature in corrispondenza dei fissaggi vengono consigliate con diametri maggiorati pari a 40 mm: questo particolare facilita il montaggio e consente alle coperture movimenti di assestamento (ad esempio dovuti a variazioni di temperatura).

L'interasse tra i fissaggi è consigliato pari a 30 cm, misura che fornisce grande resistenza al collegamento ed una tenuta ottimale nei confronti delle sostanze contenute nelle vasche e relativi odori.

Il sistema di fissaggio così concepito garantisce facilità e velocità di montaggio/smontaggio: la piastra filettata annegata nella resina permette infatti di fissare i pannelli senza la necessità di accedere al lato inferiore. Ciò fornisce il vantaggio di poter operare solo da sopra, anche a vasca piena.

3.2. Fissaggi pannello-sottostruttura

Anche in questo caso il sistema di fissaggio messo a punto da DELTA COVER prevede l'interposizione di guarnizione in EPDM 50x5h mm a garanzia di tenuta delle sostanze maleodoranti. Il fissaggio a sottostrutture in acciaio prevede l'utilizzo di bulloni in acciaio inossidabile AISI 316, mentre nel caso di sottostrutture in cemento armato prevede l'utilizzo di tasselli ad espansione, in acciaio inossidabile AISI 316 completi di rosetta piana maggiorata.



In ogni progetto viene verificata la posizione dell'ancoraggio che deve sempre rispettare le minime distanze dal bordo; in casi di carichi particolarmente onerosi può essere previsto un ancoraggio di tipo chimico.

Le forature in corrispondenza dei fissaggi alla sottostruttura dovranno avere diametri maggiorati di minimo 3 volte il diametro dell'ancorante: questo facilita il montaggio e consente alle coperture movimenti di assestamento senza comportare carichi aggiuntivi sugli ancoraggi.

4. Caratteristiche meccaniche, chimiche e termiche del materiale PRFV

La conoscenza di tutte le caratteristiche del materiale che si sta utilizzando per la realizzazione di ogni opera è un aspetto fondamentale per poter proporre sempre il giusto prodotto e per poter definire di volta in volta una geometria precisa ed ottimizzata di ogni elemento costituente le coperture. Per perseguire tale obiettivo è stata eseguita una complessa campagna di prove sperimentali presso i laboratori dell'Istituto Giordano spa, azienda leader nel settore delle certificazioni e delle prove sperimentali.

NB: per tutti i dettagli aggiuntivi delle prove, come la modalità di esecuzione e tipologia dei provini si deve fare riferimento ai certificati di prova ufficiali rilasciati da Istituto Giordano spa.

4.1. Normativa di riferimento

Per la determinazione delle caratteristiche meccaniche del materiale:

- UNI EN 527-1: *“Determination of tension properties of plastics. Part 1: General principles”*.
- UNI EN 527-2: *“Determination of tension properties of plastics. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics”*.
- UNI EN 527-4: *“Determination of tension properties of plastics. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites”*.
- UNI EN 178:2013 *“Plastics. Determination of flexural properties”*.

Per la determinazione della procedura di invecchiamento si è fatto riferimento al paragrafo D.4 della seguente:

- UNI EN 9142:2004 *“Adhesive. Guide to the selection of standards laboratory ageing conditions for testing bonded joints”*.

Per la determinazione della resistenza e conduttività termica:

- ASTM E1530-11 *“Standard test method for evaluating the resistance to thermal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique”*.

Per la determinazione della massa volumica:

- UNI EN ISO 1183-1:2013 *“Methods for determining the density of non-cellular plastics -Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method”*.

Per la determinazione del contenuto in resina:

- ASTM D-2584-18 *“Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins”*.

Per la determinazione del coefficiente di dilatazione termica lineare:

- ASTM D-696 *“Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30°C and 30°C with a Vitreous Silica Dilatometer”*.

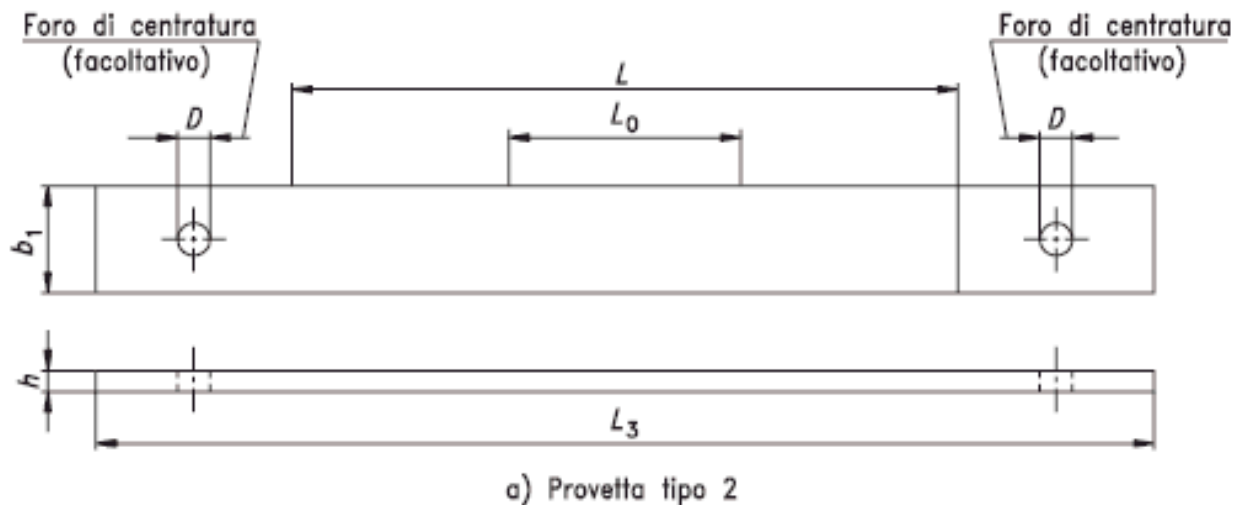
Per la determinazione della durezza Barcol:

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

- UNI EN 59:2013 “Glass reinforced plastics - Determination of indentation hardness by means of a Barcol hardness tester”.

4.2. Resistenza a trazione

La determinazione della resistenza a trazione è stata ottenuta con 5 provini per la prova a trazione diretta e 5 provini per la prova di trazione per flessione. I provini sono caratterizzati dalla seguente geometria:



Dimensioni in mm		
	Tipo 2	Tipo 3
L_3 Lunghezza totale	≥ 250	≥ 250
L_2 Distanza tra i talloni	-	150 ± 1
b_1 Larghezza	$(25 \pm 0,5) \text{ o } (50 \pm 0,5)$	$(25 \pm 0,5) \text{ o } (50 \pm 0,5)$
h Spessore	da 2 a 10	da 2 a 10
L_0 Lunghezza del tratto utile (raccomandato per estensimetri)	50 ± 1	50 ± 1
L Distanza iniziale tra i morsetti	150 ± 1	136 (nominale)
L_T Lunghezza dei talloni	-	≥ 50
h_T Spessore dei talloni	-	da 1 a 3
D Diametro dei fori di centratura	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

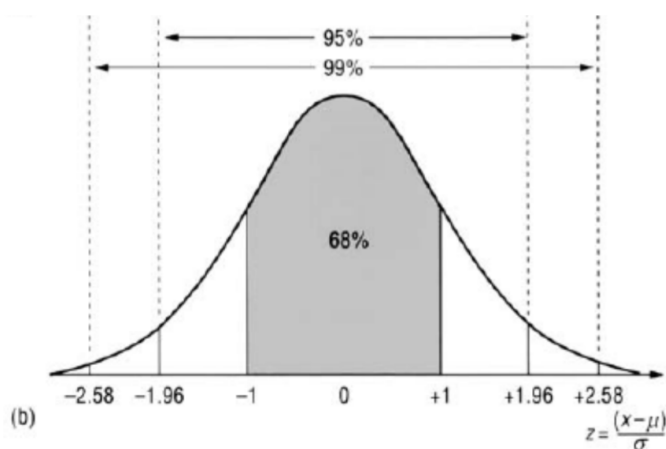
Nota - I requisiti sulla qualità delle provette e il parallelismo sono dati in 0.

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV**4.2.1. Prova a trazione diretta****Risultati**

Prova di trazione							
Provetta	Spessore misurato "H"	Larghezza misurata "L"	Area resistente "A"	Forza "F"	Carico unitario* "σ"	Allungamento a rottura "ε"	Modulo a trazione "E _t "
[n.]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[%]	[MPa]
1	4,20	24,71	103,78	16638,79	160,32	1,98	12140,26
2	4,21	24,62	103,65	20354,31	196,38	2,07	12356,30
3	3,92	24,69	96,78	20125,73	207,94	2,04	13779,53
4	4,08	24,68	100,69	21763,30	216,13	2,14	13547,29
5	3,90	24,50	95,55	22650,15	237,05	2,19	15336,10
Media	4,06	24,64	100,09	20306,46	203,56	2,08	13431,90
Deviazione standard	0,15	0,09	3,81	2296,85	28,37	0,08	1283,10

(*) il carico unitario a trazione a rottura "σ_s" e il carico unitario a trazione massimo "σ_M" coincidono.

Volendo determinare una resistenza a trazione caratteristica da utilizzare nel calcolo, si costruisce la relativa distribuzione normale e si determina il frattile 5% che stabilisce il valore di resistenza a trazione al disotto del quale ci si può attendere di trovare al massimo il 5% della popolazione di tutte le resistenze ottenute nelle prove.



Si ottiene il seguente valore (dove "s", σ in figura, è la deviazione standard e f_{tm} è il valore medio):

$$f_{tk} = f_{tm} - 1.64 \cdot s = 157.03 \text{ N/mm}^2 \quad \text{valore di resistenza caratteristica (trazione pura)}$$

Per una stima più corretta della distribuzione normale, potendo contare su una popolazione di soli 5 provini, si è fatto riferimento alla deviazione standard corretta:

$$s = [\sum_i (f_{t,i} - f_{tm})^2 / (n-1)]^{0.5}$$

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

Nel caso dei campioni sottoposti ad invecchiamento, soggetti a 21 cicli di condizionamento basati su norma UNI EN ISO 9142 (per simulare il deterioramento del materiale soggetto all'azione degli elementi negli anni) si ottengono i seguenti risultati:

Prova di trazione							
Provetta	Spessore misurato "H"	Larghezza misurata "L"	Area resistente "A"	Forza "F"	Carico unitario* "σ"	Allungamento a rottura "ε"	Modulo a trazione "E _t "
[n.]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[%]	[MPa]
1	4,23	24,72	104,57	17379,15	166,20	2,11	12650,01
2	4,39	24,66	108,26	18102,72	167,22	1,97	12490,74
3	4,00	24,73	98,92	19985,96	202,04	2,11	12677,73
4	4,16	24,62	102,42	14902,04	145,50	1,67	12972,80
5	4,13	24,87	102,71	16805,72	163,62	2,03	11931,13
Media	4,18	24,72	103,38	17435,12	168,92	1,98	12544,48
Deviazione standard	0,14	0,09	3,41	1855,28	20,52	0,18	384,52

Si ottiene il seguente valore di resistenza caratteristica:

$$f_{tk} = f_{tm} - 1.64 \cdot s = 135.27 \text{ N/mm}^2$$

Nel caso di provini invecchiati si ottiene una resistenza a trazione caratteristica pari a circa l'86% della resistenza ottenuta sui provini vergini. Nella determinazione del valore da utilizzare nel calcolo si terrà quindi conto anche della riduzione di resistenza provocata dall'invecchiamento in opera.

4.2.2. Prova a trazione per flessione

I risultati ottenuti sono i seguenti:

Prova di flessione							
Provetta	Spessore misurato "H"	Larghezza misurata "L"	Area resistente "A"	Forza "F"	Carico unitario "σ _{fc} "	Allungamento a rottura "ε _f "	Modulo a flessione "E _f "
[n.]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[N]	[MPa]	[%]	[MPa]
1	4,17	9,83	40,99	449,7	227,3	2,1	10222,2
2	4,12	9,85	40,58	420,7	195,9	2,1	9579,4
3	4,11	9,77	40,15	505,8	293,5	2,9	10532,3
4	4,16	9,82	40,85	465,2	279,1	2,6	10208,7
5	4,15	9,83	40,79	507,5	300,5	2,9	9215,2
Media	4,14	9,82	40,67	469,8	259,3	2,5	9951,6
Deviazione standard	0,03	0,03	0,33	37,3	45,6	0,4	537,9

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

$$f_{tk} = f_{tm} - 1.64\sigma = 184.52 \text{ N/mm}^2 \quad \text{resistenza caratteristica (trazione per flessione)}$$

Il valore nella prova a trazione per flessione risulta sempre maggiore a causa della minor probabilità che nella porzione tesa del provino ci siano difetti in grado di innescare la rottura e alla presenza di uno stato di sforzo composto (azione assiale e taglio).

Nel caso di campioni sottoposti ad invecchiamento:

Prova di flessione							
Provetta	Spessore misurato	Larghezza misurata	Area resistente	Forza	Carico unitario	Allungamento a rottura	Modulo a flessione
[n.]	"H" [mm]	"L" [mm]	"A" [mm ²]	"F" [N]	"σ _{fc} " [MPa]	"ε _f " [%]	"E _f " [MPa]
1	4,13	9,81	40,52	462,8	277,7	3,5	10379,5
2	4,00	9,86	39,44	411,1	246,7	3,1	10523,4
3	4,13	9,81	40,52	607,1	358,1	3,3	11305,5
4	4,15	9,8	40,67	526,9	316,1	3,4	10001,9
5	4,02	9,82	39,48	479,5	287,7	3,2	11462,9
Media	4,09	9,82	40,12	497,5	297,3	3,3	10734,6
Deviazione standard	0,07	0,02	0,61	73,9	42,1	0,2	625,3

$$f_{tk} = f_{tm} - 1.64\sigma = 228.26 \text{ N/mm}^2$$

4.3. Resistenza e conduttività termica

Si riassumono i valori ottenuti nelle prove sperimentali:

Risultati

Provetta	Resistenza termica	Conduttanza termica	Conduttività termica equivalente
[n.]	"R _s " [m ² · K/W]	"C _s " [W/(m ² · K)]	"λ _{eq} " [W/(m · K)]
1	0,0070	142,6	0,230
2	0,0121	82,8	0,253
3	0,0168	59,4	0,247
Media	0,0120 *	95 *	0,24 *

(*) valore arrotondati come richiesto dalla norma ASTM E1530.

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

4.4. Massa volumica

Si riassumono i valori ottenuti nelle prove sperimentali:

Provetta	Massa apparente delle provette in aria a 23 °C	Massa apparente delle provette immerse in acqua distillata a 23 °C	Massa volumica delle provette a 23 °C
[n.]	$m_{s,A}$ [g]	$m_{s,IL}$ [g]	ρ_s [g/cm ³]
1	19,528	7,100	1,567
2	18,125	6,582	1,566
3	19,179	7,048	1,577
Media	-	-	1,570

4.5. Coefficiente di dilatazione lineare

Si riassumono i valori ottenuti nelle prove sperimentali:

Dati di prova

Provetta	Lunghezza a temperatura ambiente “L ₀ ”	Variazione di lunghezza tra -30 °C e 30 °C “ΔL”
[n.]	[mm]	[μm]
1	20,82	34
2	28,02	42

Risultati

Differenza di temperatura “ΔT”	Provetta	Coefficiente di dilatazione termica lineare
[K]	[n.]	[μm/(m · K)]
60	1	27,4
	2	25,2
	Media	26

4.6. Contenuto in resina

Si riassumono i valori ottenuti nelle prove sperimentali:

SAMPLE	Laminate with gel coat
Resin content	1 st = 54,65 2 nd = 54,19 3 rd = 53,46
%	Mean value = 54,1

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

4.7. Durezza Barcol

Si riassumono i valori ottenuti nelle prove sperimentali:

Risultati

Area misurata	Durezza Barcol
Superficie vetroresina (lato verde)	48,5 ± 3

4.8. Valori di calcolo

Considerando quindi i risultati ottenuti, nel calcolo delle strutture costituite da laminati in PRFV verranno adottati i seguenti valori delle caratteristiche meccaniche e termiche:

Resistenza a trazione caratteristica	$f_{tk} = 130 \text{ N/mm}^2$
Modulo elastico	$E = 12.000 \text{ N/mm}^2$
Modulo di Poisson	$\nu = 0.35$
Modulo di elasticità trasversale	$G = E / [2(1+\nu)] = 4444 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente di espansione termica lineare	$\alpha = 26 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}^{-1}$
Densità	$\rho = 1.570 \text{ kg/m}^3$
Durezza Barcol	48.5 ±3
Resistenza termica	$R_s = 0.0120 \text{ m}^2\text{K/W}$
Conduttanza termica	$C_s = 95 \text{ W/m}^2\text{K}$
Conduttività termica equivalente	$\lambda_{eq} = 0.24 \text{ W/mK}$

5. Calcolo strutturale e sicurezza

Le coperture in PRFV sono generalmente impiegate in ambito industriale, per la copertura di impianti e di vasche per il trattamento delle acque, in ambienti più o meno aggressivi dal punto di vista chimico. In questi contesti è sicuramente possibile considerare basso il rischio conseguente ad un eventuale collasso strutturale, tuttavia si consiglia di trattare e dimensionare ogni copertura come strutture civili ordinarie, in ottemperanza alle vigenti norme nazionali ed europee.

Per le strutture su territorio italiano le normative di riferimento sono:

- Legge 1086 - 5/11/1971: “*Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso, ed a struttura metallica*”.
- D. M. Infrastrutture e Trasporti 17/01/2018: “*Norme tecniche per le costruzioni*”.

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

- Circ. Min. 21/01/2019, n.7 C.S.LL.PP: *Istruzioni per l'applicazione dell' «Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17/01/2018* .

- CNR-DT 207-2008: *“Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni”*.

Per disposizioni non affrontate nella legislazione tecnica italiana ci si riferisce a:

- UNI EN 1991-1-4: *“Eurocode 1. Azioni sulle strutture - Parte 1-4: Azioni in generale – Azioni del vento”*.

Per eventuali rinforzi e strutture accessorie realizzate in acciaio (S235, S275 e S355 zincato oppure acciai inossidabili AISI 304 e AISI 316) oltre che alla normativa nazionale si fa sempre riferimento all'Eurocodice 3 e relativi annessi. Ovviamente ogni opera può essere certificata in ottemperanza alle normative vigenti del paese del sito di costruzione.

La progettazione ed il dimensionamento devono valutare sempre la presenza di tutte le tipologie di carico:

- Pesi propri e permanenti delle strutture: generalmente di entità molto bassa anche per tegoli di grande luce, data la leggerezza del materiale PRFV;
- Carichi di servizio distribuiti e concentrati: viene sempre considerato un carico distribuito e concentrato di manutenzione, quest'ultimo collocato in vari punti sensibili della copertura.
- Carico di neve: sempre determinato in relazione alla precisa ubicazione dell'opera, considerando anche eventuali fenomeni di accumulo dovuto alla particolare configurazione della struttura oggetto del calcolo e di quelle limitrofe esistenti;
- Carico di vento: sempre determinato in relazione alla geometria, alla precisa ubicazione dell'opera e alla conformazione del territorio circostante: vengono sempre considerati eventuali fenomeni di depressione sulla copertura (al fine di annullare il rischio di sollevamento e scoperchiamento durante la vita di esercizio della struttura);
- Azione sismica: data la loro leggerezza, le coperture in PRFV risultano una scelta ideale in zone ad alto rischio sismico, infatti nella quasi totalità dei casi le azioni dovute al terremoto risultano non dimensionanti. La valutazione dell'entità delle azioni sismiche viene comunque sempre implementata nel calcolo;
- Pressioni interne: su richiesta del cliente;

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

- Carichi termici: eventuali deformazioni dovute alle temperature possono essere sempre valutate nel calcolo.

Altre importanti caratteristiche che devono essere tenute in considerazione quando viene realizzata una copertura in PRFV sono:

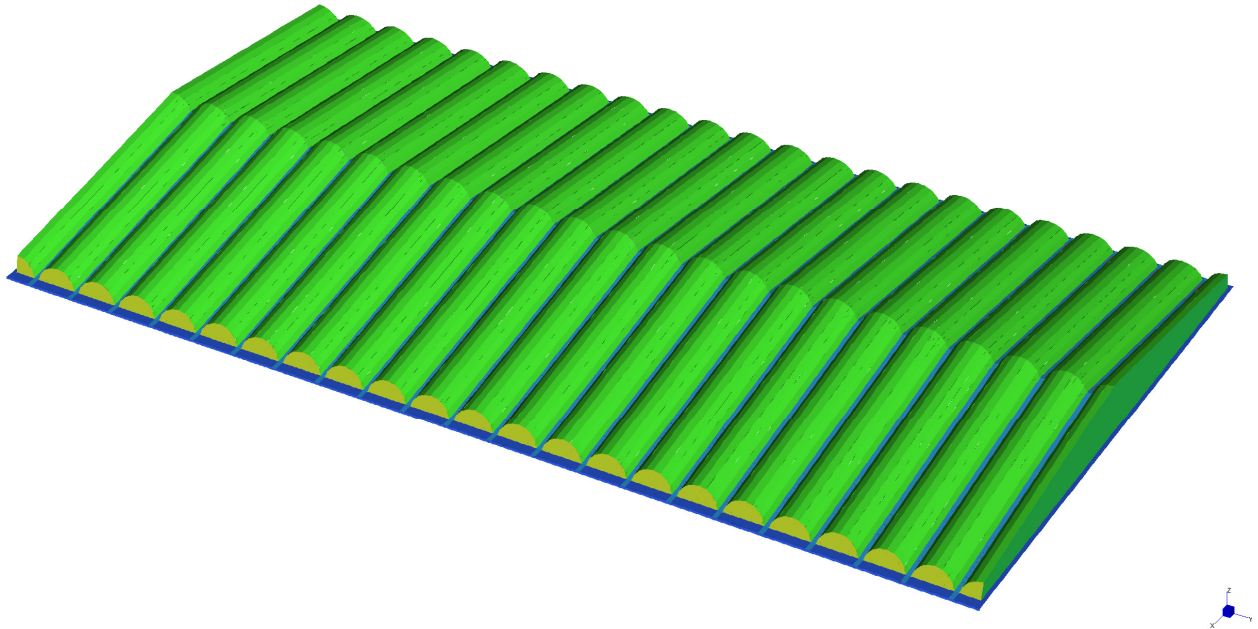
- Pedonalità: tale requisito viene sempre garantito per ogni elemento costituente la copertura: lo stato limite di esercizio associato richiede un controllo della deformabilità, quindi tutte le geometrie sono studiate per assicurare non solo la resistenza ma anche il corretto comportamento sotto carichi concentrati. Nel caso di pannelli piani vengono previste nervature trasversali in relazione alla dimensione.
- Isolamento: diversamente dai materiali metallici, il materiale composito PRFV risulta un ottimo isolante elettrico. Questa caratteristica permette di escludere sempre il rischio di dispersioni elettriche e quindi folgorazioni dovute a contatti indesiderati conseguenti a danneggiamenti di impianti ed apparecchiature o operazioni di manutenzione. Anche l'accumulo di cariche elettrostatiche viene evitato dai numerosi ancoraggi metallici presenti su tutto il perimetro delle vasche.
- Resistenza alla grandine e agli urti: per ragioni di deformabilità e di resistenza una copertura realizzata con elementi in PRFV viene sempre realizzata con spessori non inferiori ai 4-5 mm: la resistenza del materiale e lo spessore conferiscono una notevole resistenza agli urti, anche nel caso di oggetti piccoli ed appuntiti.
- Riparabilità: nel caso di rotture, cricche e danni di qualsiasi tipo è sempre possibile intervenire riparando l'area danneggiata ripristinando l'aspetto e la resistenza originaria. È inoltre possibile effettuare modifiche geometriche, inserire botole, forature e nuovi elementi in qualunque momento successivo alla prima realizzazione dell'opera.

Il calcolo dovrà sempre essere effettuato con software ad elementi finiti, modellando la geometria in ambiente 3D e considerando quindi ogni peculiarità dell'opera oggetto del calcolo. **Tale approccio garantisce un'ottimizzazione degli spessori degli elementi costituenti la copertura.**

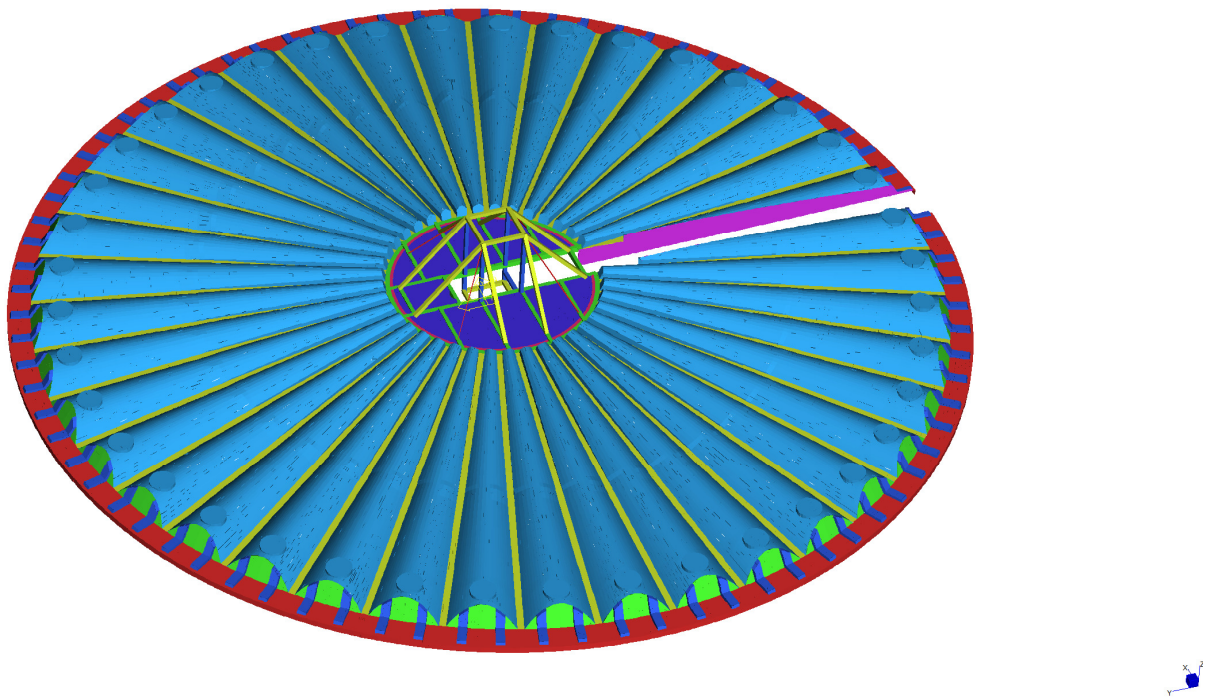
Alcuni esempi di modellazione FEM 3D di coperture in PRFV:

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

- Copertura a pianta rettangolare con luce di circa 20 m (senza sottostrutture di sostegno intermedie):

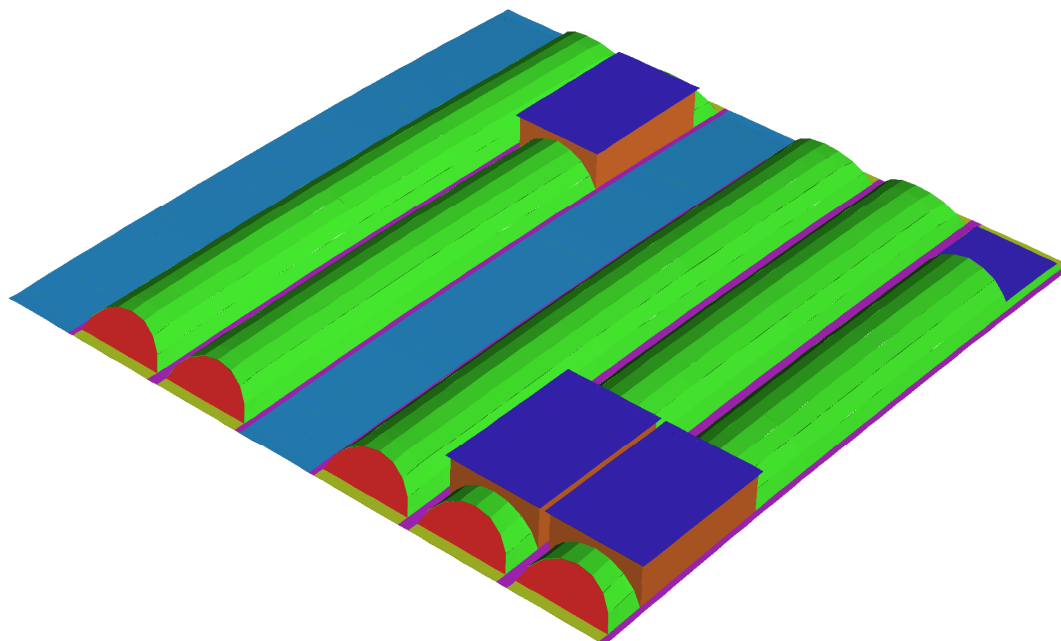


- Copertura di una vasca a pianta circolare di diametro 24 m, rotante, con passerella di accesso e struttura centrale in acciaio inossidabile:



VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

- Copertura rettangolare di luce 10 m, con elementi piani nervati e botole:



La modellazione 3D permette infatti di cogliere eventuali concentrazioni di sforzo in zone a geometria particolare come botole, rientranze, raccordi ecc. e quindi di poter prescrivere aumenti localizzati di spessore o particolari rinforzi aggiuntivi come costolature e nervature.

6. Conclusioni

Il materiale PRFV testato è definibile come materiale composito ottenuto dall'unione di tessuti in fibra di vetro e resina poliestere. Le fibre di vetro vengono disposte su più strati intervallati dalla resina ed orientate in tutte le direzioni, in modo tale da far assumere al materiale un comportamento il più possibile isotropo nel piano dell'elemento così ottenuto.

Nelle strutture in opera, lo stato di sforzo in un generico elemento infinitesimo facente parte del guscio, è frutto di diverse azioni agenti in tutte le direzioni: si può affermare con ragionevolezza che il caso di trazione pura in una sola direzione preferenziale non sia mai presente nelle strutture reali, se non in zone locali della struttura non significative ai fini del dimensionamento.

Le peculiarità principali del materiale quali resistenza, leggerezza e resistenza all'aggressione degli agenti chimici in generale implicano che le coperture in PRFV siano ideali in ambito industriale e quando il contatto diretto con agenti chimici aggressivi risulti inevitabile, oltre ovviamente ad ambienti naturali particolarmente severi come quelli marini.

La possibilità di realizzare di volta in volta elementi della grandezza e geometria desiderata permette di adeguare la copertura a qualsiasi geometria di partenza e sottostruttura.

VALUTAZIONI E SPECIFICHE TECNICHE DELLE COPERTURE IN PRFV

Il calcolo dovrà essere condotto con un approccio agli stati limite e le relative verifiche di resistenza dovranno essere condotte da un punto di vista tensionale, controllando che lo sforzo in ogni punto della copertura sia sempre sotto il valore di progetto: in fase di calcolo e verifica delle strutture, in base ai valori caratteristici determinati con le prove sperimentali, viene suggerito l'utilizzo di un coefficiente parziale di sicurezza $\gamma_M = 2$. Tale valore vuole riflettere l'entità della dispersione dei dati rilevata durante la campagna di prove sperimentali tenendo anche conto del valore scelto per la resistenza a trazione caratteristica (si osserva infatti che il minimo valore osservato nelle prove di trazione, nel caso di provini sottoposti ad invecchiamento, è pari a 145.5 N/mm², quindi maggiore del valore di f_{tk} di riferimento per le verifiche).

Il calcolo effettuato con tale approccio conservativo garantisce grande sicurezza e durabilità delle strutture così concepite.

* * *