

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN ARCHITETTURA E PROCESSO EDILIZIO

I MATERIALI COMPOSITI AVANZATI
(FRP - FRG)
CLASSIFICAZIONE E APPLICAZIONI
NEL RESTAURO E RICOSTRUZIONE POST-SISMA

Elaborato finale in:

Qualità Tecnologica della Progettazione

Relatore:

Prof. Ernesto Antonini

Presentato da:

Albicini Laura

Correlatore:

Prof. Marco Boscolo

Sessione II

Anno Accademico 2016-2017

RINGRAZIAMENTI

per il principio *“dei compositi”*

- *la forte fibra di*

Alida e Daniele
la mia famiglia
gli amici
i colleghi

- *nella matrice di*

un vecchio desiderio
un forte impegno
un ambiente favorevole
un po' di fortuna

- *con le opportune “correzioni” di*

Prof. Ernesto Antonini
Prof. Marco Boscolo

sono giunta a *“comporre”* questo
lavoro a chiusura del ciclo di studi
“cambiata” e felice di questo.

INTRODUZIONE	<i>pag. 5</i>
1.0 <u>MATERIALI COMPOSITI</u>	<i>pag. 7</i>
1.0.1 EVOLUZIONE TECNOLOGICA	<i>pag. 7</i>
1.0.1.1 <i>CENNI STORICI</i>	
1.0.1.2 <i>LO SVILUPPO DEI MATERIALI COMPOSITI</i>	
1.0.1.3 <i>MATERIALI AVANZATI O INNOVATIVI</i>	
1.0.1.4 <i>LA RICERCA DI FRONTIERA: I NANO-COMPOSITI</i>	
1.0.2 INTRODUZIONE AI COMPOSITI	<i>pag.16</i>
1.0.2.1 <i>QUANDO UN MATERIALE È UN “COMPOSITO”?</i>	
1.0.2.2 <i>MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI</i>	
1.0.2.3 <i>LE PROPRIETÀ DEI COMPOSITI</i>	
2.0 <u>CLASSIFICAZIONE DEI COMPOSITI</u>	<i>pag.19</i>
2.0.1 CLASSIFICAZIONE IN BASE AL MECCANISMO DI “RESISTENZA”	<i>pag.20</i>
2.0.1.1 <i>TIPOLOGIE DELLE FIBRE</i>	
2.0.1.1.1 <i>FIBRE DI VETRO</i>	
2.0.1.1.2 <i>FIBRE DI CARBONIO</i>	
2.0.1.1.3 <i>FIBRE DI BASALTO</i>	
2.0.1.1.4 <i>FIBRE D’ ARAMIDE</i>	
2.0.1.1.5 <i>FIBRE D’ ACCIAIO</i>	
2.0.1.1.6 <i>ALTRE TIPOLOGIE DI FIBRE (FIBRE NATURALI)</i>	
2.0.1.2 <i>ALCUNI CONFRONTI TRA DIFFERENTI FIBRE ANALIZZATE</i>	
2.0.2 CLASSIFICAZIONE IN BASE AL MECCANISMO DI “RESILIENZA”	<i>pag.50</i>
2.0.2.1 <i>TIPOLOGIE DI MATRICI</i>	
2.0.2.1.1 <i>MATRICE METALLICA</i>	
2.0.2.1.2 <i>MATRICE CERAMICA</i>	
2.0.2.1.3 <i>MATRICE POLIMERICA</i>	
2.0.2.1.4 <i>MATRICE CEMENTIZIA</i>	
2.0.3 CLASSIFICAZIONE IN BASE AGLI “ELEMENTI COSTITUENTI”	<i>pag.66</i>
2.0.3.1 <i>FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS O PLASTIC)</i>	
2.0.3.2 <i>SRP (STEEL REINFORCED POLYMERS O PLASTIC)</i>	
2.0.3.3 <i>FRG (FIBER REINFORCED GROUT)</i>	
2.0.3.4 <i>SRG (STEEL REINFORCED GROUT)</i>	
3.0 <u>PROCESSI E PRODOTTI COMPOSITI</u>	<i>pag.69</i>
3.0.1 TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE	<i>pag.69</i>
3.0.1.1 <i>PROCESSI MANUALI</i>	
3.0.1.1.1 <i>LAMINAZIONE MANUALE “A FORMA LIBERA”</i>	
3.0.1.1.2 <i>LAMINAZIONE MANUALE “IN STAMPO”</i>	
3.0.1.1.3 <i>PROCESSO A SPRUZZO “SPRAY UP”</i>	
3.0.1.2 <i>PROCESSI AUTOMATICI</i>	
3.0.1.2.1 <i>PULTRUSIONE</i>	
3.0.1.2.2 <i>FILAMENT WINDING (FW)(</i>	
3.0.1.2.3 <i>RESIN TRANSFER MOULDING (RTM)</i>	
3.0.2 PRODOTTI	<i>pag.78</i>
3.0.2.1 <i>I TESSILI</i>	
3.0.2.2 <i>I PREFORMATI</i>	

4.0	<u>GENERALITÀ SULLA MECCANICA DEI COMPOSITI</u>	pag.88
4.0.1	ANALISI MICROSCOPICA: L'ETERogeneità	pag.91
4.0.2	ANALISI MACROSCOPICA: L'ANISOTROPIA	pag.93
4.0.3	MECCANICA DEI LAMINATI	pag.94
4.0.4	MECCANISMI DI CRISI	pag.99
4.0.4.1	MECCANISMI DI CRISI NEI RINFORZI A MATRICE POLIMERICA	
4.0.4.2	MECCANISMI DI CRISI NEI RINFORZI A MATRICE CEMENTIZIA	
5.0	<u>IL TEMA DELLA DURABILITÀ DEI MATERIALI COMPOSITI</u>	pag.105
5.0.1	EFFETTI TERMICI	pag.105
5.0.2	UMIDITÀ	pag.107
5.0.3	ALCALI	pag.107
5.0.4	CREEP-RILASSAMENTO	pag.108
5.0.5	RADIAZIONI UV	pag.108
6.0	<u>SISTEMI COMPOSITI NEL RESTAURO E RICOSTRUZIONE POST-SISMA</u>	pag.109
6.0.1	CENNI IN MATERIA DI GESTIONE DEL RISCHIO SISMICO	pag.110
6.0.1.1	L'AZIONE SISMICA	
6.0.1.2	L'AZIONE SISMICA SULLE COSTRUZIONI	
6.0.1.3	LA PERICOLOSITÀ SISMICA	
6.0.1.4	IL MOTO SISMICO	
6.0.1.5	IL RISCHIO SISMICO	
6.0.2	NORMATIVA PER L'APPLICAZIONE DEI COMPOSITI IN EDILIZIA	pag.118
6.0.2.1	I LAVORI DEI TAVOLI TECNICI: NON SOLO FRP	
6.0.3	APPLICAZIONI	pag.124
6.0.3.1	NEL RESTAURO E RICOSTRUZIONE	
6.0.3.2	PRESIDI DI SICUREZZA POST-SISMA	
6.0.3.3	SISTEMI COMPOSITI VS SISTEMI TRADIZIONALI	
7.0	<u>CASO STUDIO</u>	pag.129
7.0.1	PROGETTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO: PALAZZO PESARINI	pag.129
7.0.1.1	CONOSCENZA	
7.0.1.2	VALUTAZIONE	
7.0.1.3	ANALISI NUMERICA	
7.0.1.4	IPOTESI E SCELTA PROGETTUALE	
7.0.1.5	SCHEMI INTERVENTI	
	CONCLUSIONI	pag.150
	BIBLIOGRAFIA	pag.152

INTRODUZIONE

“I limiti dell’immaginazione dell’uomo sono dati dai materiali di cui dispone”

Leonardo da Vinci

Questa trattazione mira alla conoscenza e all’approfondimento tecnologico ed applicativo dei materiali compositi fibrorinforzati in ambito edilizio in quanto:

“È sensazione comune, da parte di quanti sono impegnati in attività di ricerca o di progettazione nel campo del consolidamento con materiali compositi fibrorinforzati, che l’Italia stia assumendo una posizione particolare in ambito internazionale, sia per il valore dei contributi di conoscenza forniti, sia per la presenza di un patrimonio edilizio particolarmente vario ed importante. ...omissis...L’interesse scientifico verso le applicazioni innovative inerenti i materiali fibrorinforzati per la riabilitazione strutturale, da un lato, e la peculiarità del patrimonio edilizio italiano, ampiamente variegato, dall’altro, hanno attirato negli ultimi anni l’attenzione di numerosi ricercatori operanti nei settori della Meccanica delle Strutture, delle Costruzioni, della Riabilitazione Strutturale e dell’Ingegneria Sismica”.¹

Dal punto di vista tecnologico con il termine compositi ci si riferisce a quella famiglia di materiali derivati dalla combinazione di due o più componenti di diversa natura allo scopo di ottenere un prodotto finale di prestazioni più elevate rispetto ai singoli materiali costituenti.

In considerazione dell’elevato numero dei materiali costituenti, delle loro possibili combinazioni e della continua evoluzione della ricerca, parte sostanziale dell’elaborato verte sulla sistematizzazione delle informazioni reperibili sul mercato, dallo studio alla loro produzione.

Questo lavoro prende il via da una ricerca storica che tratteggia l’evoluzione dei materiali compositi e del loro utilizzo, dai primi impieghi ad oggi, con particolare riferimento all’ambito architettonico.

Il passo successivo è stato analizzare i possibili prodotti finali destinati all’edilizia seguendo una precisa logica di trattazione, che va dalla descrizione dei singoli elementi che lo compongono, all’esposizione più articolata delle caratteristiche meccaniche del composito, con l’obiettivo di giungere ad una sua catalogazione.

¹ CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche- Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni, (2004), Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati CNR-DT 200/2004.

L'analisi passa poi ad esaminare le caratteristiche meccaniche, i meccanismi di crisi e le possibili metodologie applicative del materiale a disposizione del progettista il cui ambito si estende dal rinforzo strutturale, al delicato problema del restauro e della conservazione del patrimonio edilizio esistente e degli interventi post sisma.

In sintesi il presente lavoro mira a:

- **descrivere, classificare e catalogare il materiale ad oggi disponibile sul mercato**
- **individuare gli ambiti e i limiti applicativi, in edilizia, dei sistemi compositi**
- **analizzare in termini di “vantaggio e svantaggio” le possibili metodologie applicative: Sistemi Compositi vs Sistemi Tradizionali**
- **presentare un caso studio:**
 - ✓ **proposta d'intervento di miglioramento sismico:** Palazzo Pesarini - località San Piero in Bagno (Comune di Bagno di Romagna)



1.0 I MATERIALI COMPOSITI

1.0.1 EVOLUZIONE TECNOLOGICA

La ricerca tecnologica ha tra le sue principali finalità quella di giungere a poter disporre di “nuovi materiali”, in grado di soddisfare le richieste da parte dei progettisti di vari ambiti applicativi (medico, aerospaziale, aeronautico, automobilistico, edilizio, ecc.), in termini di caratteristiche meccaniche sempre più elevate, di tenuta nel tempo in condizioni sempre più gravose ed, a volte, di caratteristiche funzionali esaltate sul piano quantitativo.

In questo contesto, che punta allo sviluppo di materiali sempre più nuovi ed avanzati, i compositi hanno occupato un posto di particolare rilievo in virtù sia delle forti caratteristiche innovative da loro possedute sia della possibilità di progettare il materiale in base alle specifiche funzionali dell'applicazione a cui sono destinati:

“Essi rappresentano l'evoluzione della scienza e delle tecnologie dei materiali fondendo al loro interno le migliori caratteristiche di più componenti, prodotti con tecnologie innovative che ne determinano le elevatissime caratteristiche fisico-meccaniche.”²

1.0.1.1 CENNI STORICI

In campo più specificatamente architettonico uno dei più antichi materiali da costruzione composito³, risalente all'epoca egizia (5.000-3.000 a.C.), è un impasto di paglia ed argilla miscelate al fine di ottenere mattoni da costruzione più resistenti di quelli costituiti dal solo fango (*Esodo 5, 15-18*):



“Allora gli scribi dei figli d’Israele vennero dal Faraone a reclamare dicendo: perché tratti così i tuoi servi? Paglia non vien data ai tuoi servi, ma: i mattoni, ci si dice fateli! Ed ecco i tuoi servi sono bastonati e la colpa è del tuo popolo! Rispose: Fannulloni siete, fannulloni! Per questo dite: “Vogliamo partire, dobbiamo sacrificare al Signore. Ora andate, lavorate! Non vi sarà data paglia, ma voi darete lo stesso numero di mattoni!”

² Cfr. Di Tommaseo, A., Prof. Ordinario di Scienza delle Costruzioni, Istituto Universitario di Architettura di Venezia, Docente alla Facoltà d’Ingegneria dell’Università di Bologna e Consulente del Ministero dei Beni Culturali. prefazione al libro Fiber reinforced Plastics.

³ Bertolini, L., Bolzoni, F., Cabrini, M., Pedefferri, P., (2001), “Tecnologia dei Materiali. Ceramiche, polimeri e compositi”, CittàStudiEdizioni (A cura di) Torino.

È probabile che lo scopo di mettere paglia sbriciolata nei mattoni egizi fosse lo stesso dei Maya (intorno al 2.000 a.C.), che mettevano fibre nelle loro ceramiche per prevenire la fessurazione quando l'argilla veniva rapidamente essiccata al sole.

“Quanto ai mattoni cotti, quelli che si trovano nelle rovine di Babilonia e le descrizioni che di questa città famosa hanno lasciato i più antichi scrittori, provano che l'uso di essi risale alle età più lontane. Lo smalto onde alcuni di questi mattoni sono coperti ed i loro vivi colori indicano un grado di perfezionamento che fa risalire quest'invenzione a molti secoli innanzi che sorgesse quella città. Tersan possedeva nel suo museo d'antichità uno di questi mattoni inverniciati che l'abate Beauchamp recò dalle rovine di Babilonia; ed è colorato di giallo e turchino a strisce ondulate. Sembra che questi mattoni abbiano servito al rivestimento dei muri interni di un grande edificio, che nel paese si crede avanzo del palazzo di Nabuccodonosor”⁴

L'enorme porta di Ishtar, noto monumento dell'Era Mesopotamica, è un ottimo esempio della tecnica costruttiva del tempo e un'ottima testimonianza dello spirito di ricerca del materiale da costruzione “composito”.



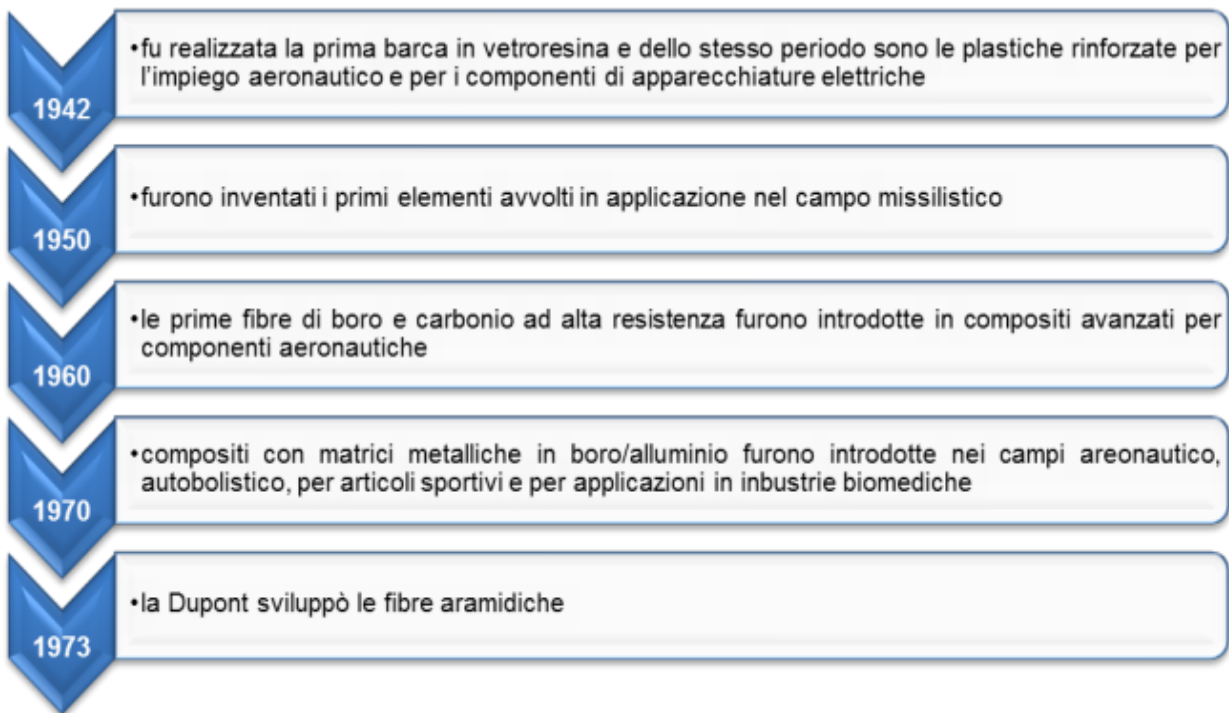
Particolari del monumento noto come la Porta di Ishtar proveniente da Babilonia, (VII secolo a.C.)

L'idea di fondo di allora è esattamente quella degli attuali compositi avanzati ovvero quella di un prodotto di sintesi in grado di sfruttare la resistenza a tensione delle fibre (la paglia), lasciando ad una matrice di qualità meccanica inferiore (l'argilla), il compito di tenerle nella forma voluta.

⁴ Lenormand, Payen, Morland Jeunne, Laugier, Francoeur, Robiquet, Dfresnoy, ecc., (1845), “Supplemento al Nuovo Dizionario Universale Tecnologico o di arti e Mestieri”, Giuseppe Antonelli (A cura di) Venezia.

1.0.1.2 LO SVILUPPO DEI MATERIALI COMPOSITI

Come già accennato il concetto di rinforzo con fibra è assai vecchio, i materiali compositi si sono rivelati particolarmente adatti nel tempo nelle applicazioni di ordine strutturale, dai “biblici” rinforzi dei laterizi con paglia, dell’antico Egitto, alle barrette di ferro utilizzate per rinforzare le murature nel XIX secolo, antenati del ben più noto cemento armato in epoca moderna, alle resine fenoliche rinforzate con amianto del XX secolo.

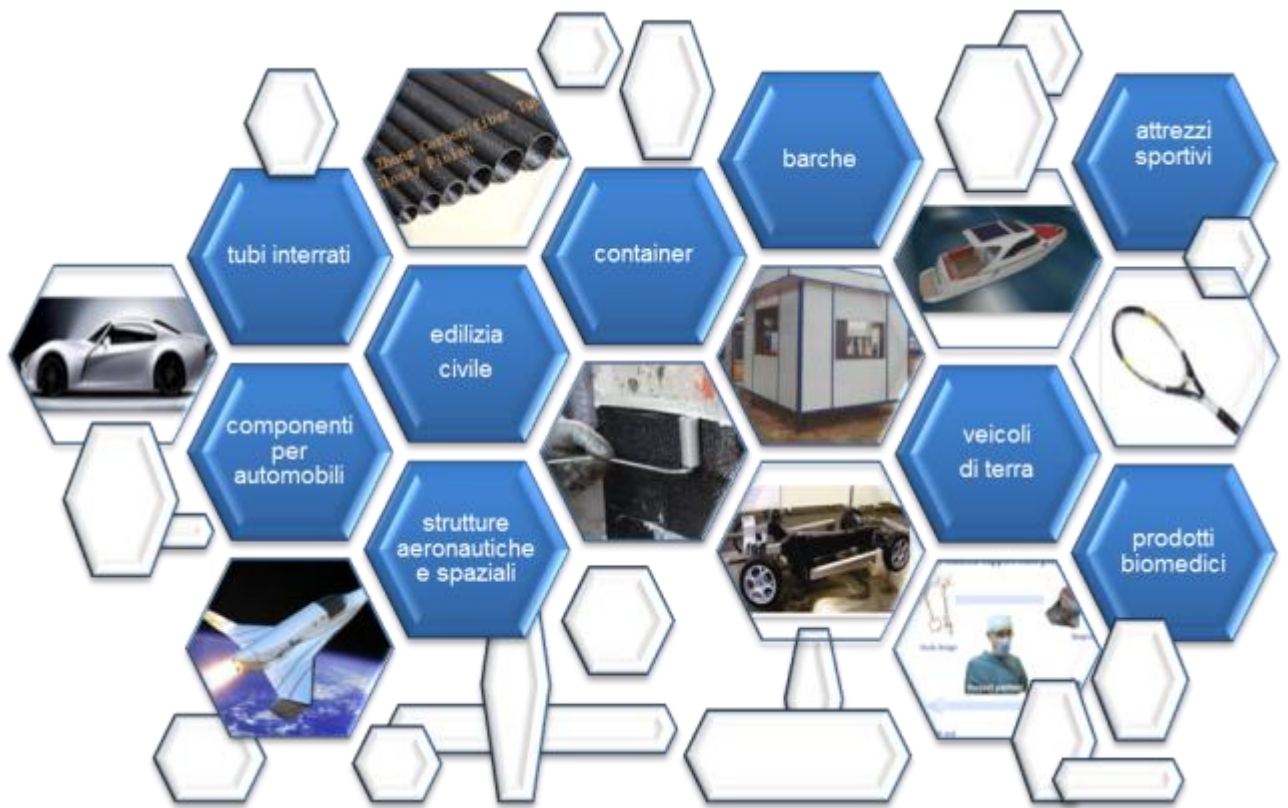


Lo sviluppo è stato legato essenzialmente alle industrie aerospaziali ed aeronautiche, dove la possibilità di utilizzare materiali ad elevate proprietà meccaniche con un peso specifico contenuto ne ha decretato un successo straordinario.

Negli anni '70 gli elementi strutturali in materiali compositi sono stati utilizzati in veicoli militari, per i quali gli elevati costi di produzione non erano considerati deterrenti per l'applicazione.

Infatti l'altissimo valore aggiunto metteva in secondo piano le considerazioni economiche relative agli elevati costi di produzione.

Nel tempo le caratteristiche di processabilità industriale, con operazioni energeticamente sempre più efficienti, hanno reso questa classe di materiali interessante per un'applicazione più diffusa in diversi campi d'industria da quella automobilistica, sportiva, elettrotecnica all'edilizia.



Nel campo edilizio un esempio “storico” delle potenzialità dei compositi è il ponte pedonale di Aberfeldy, costruito nell'estate del 1992, presso l' "Aberfeldy Golf Club" in Scozia.⁵



Panoramica del ponte pedonale di Aberfeldy - "Aberfeldy Golf Club", Scozia

⁵ Steve, A.,(2013), "The Aberfeldy FootBridge at 20", (A cura di) *Composites and architecture*
<http://compositesandarchitecture.com/?p=2398>

Il ponte è interamente costruito in materiale composito, in particolare profili pultrusi in fibra di vetro con matrice poliestere.

La parte sospesa ha una lunghezza complessiva di 113m ed una campata centrale di 63m tra due laterali di 17,5m. La struttura è sostenuta da due torri ad "A" in composito ed è stata installata senza l'utilizzo di gru nell'arco di sei settimane. La carreggiata è sospesa da tiranti realizzati in composito con fibre di Kevlar.

Le prestazioni del ponte di Aberfeldy, ad oggi più che 20enne, sono continuamente controllate per la creazione di una banca dati sugli elementi strutturali utilizzati.

Nel 2012, il Dr. Tim Stratford della Facoltà di Ingegneria, Università di Edimburgo ha pubblicato uno studio frutto di sondaggi e sulla base di ispezioni effettuate nel 2004, 2008, 2010 e 2011, premesso che il manufatto abbia ricevuto poca manutenzione nei oltre 20 anni d'esercizio, ha affermato nelle conclusioni che:

*"La struttura primaria del ponte continua a funzionare bene, senza segni visivi di deterioramento strutturale complessivo".*⁶

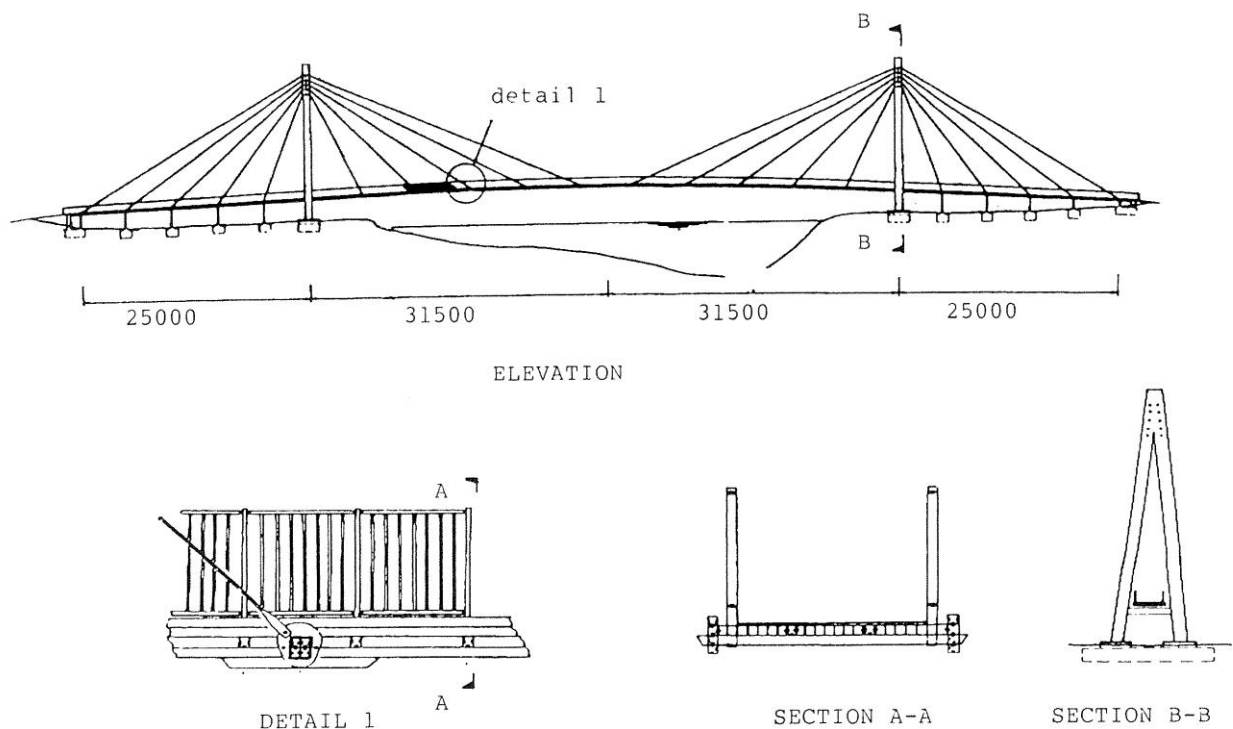


Figure 1. General Arrangement of Aberfeldy Bridge

⁶ Per ulteriori approfondimenti:

- *The Condition Of The Aberfeldy Footbridge After 20 Years Of Service* by Dr. Tim Stratford http://www.research.ed.ac.uk/portal/files/3582804/CGB_STRAT.pdf
- *Aberfeldy Bridge – An Advanced Textile Reinforced Footbridge*, C.J. Burgoyne and P.R. Head <http://www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/cp25.pdf>

1.0.1.3 MATERIALI AVANZATI O INNOVATIVI

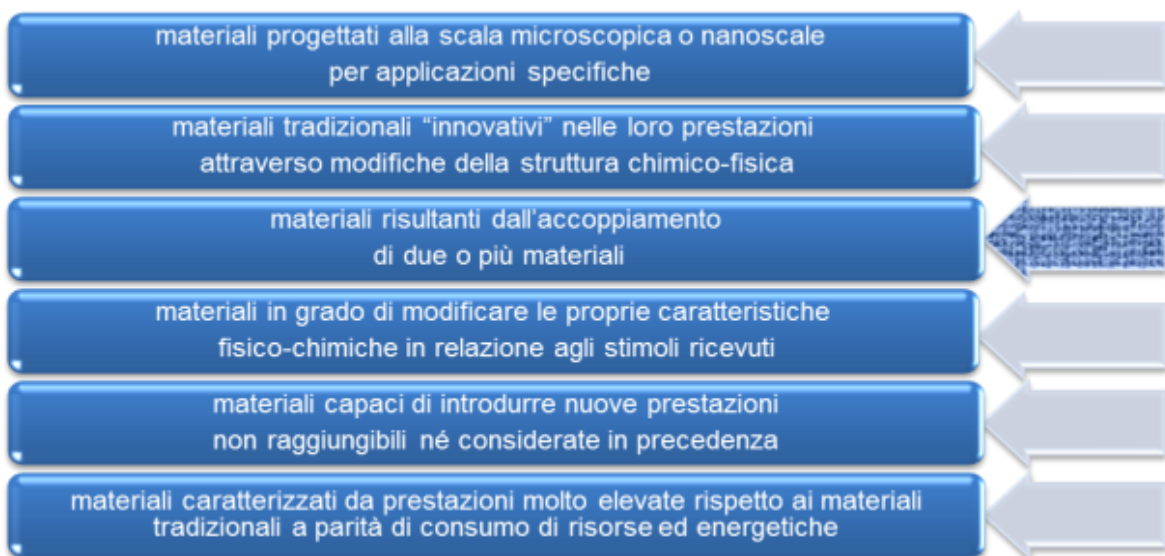
Per materiali avanzati o innovativi s'intendono quella famiglia di materiali che rappresentano un'alternativa ai materiali definiti tradizionali. Per quanto concerne la definizione di "materiale avanzato", ancora oggi non vi è una definizione ufficiale che permetta d'individuare le molteplici classi di materiali da includere in questo gruppo piuttosto articolato.

A tal proposito, per riuscire a comprendere di cosa si tratta, in questa sede, si prende a riferimento la definizione enunciata da Michael Bever nella sua *Encyclopedia of Advanced Materials*, dove i materiali avanzati si definiscono:

“quei materiali la cui caratteristica principale riguarda la capacità di sintesi e di controllo della struttura della materia al fine di ottenere un preciso insieme di proprietà su misura, finalizzate ad applicazioni su richiesta”⁷

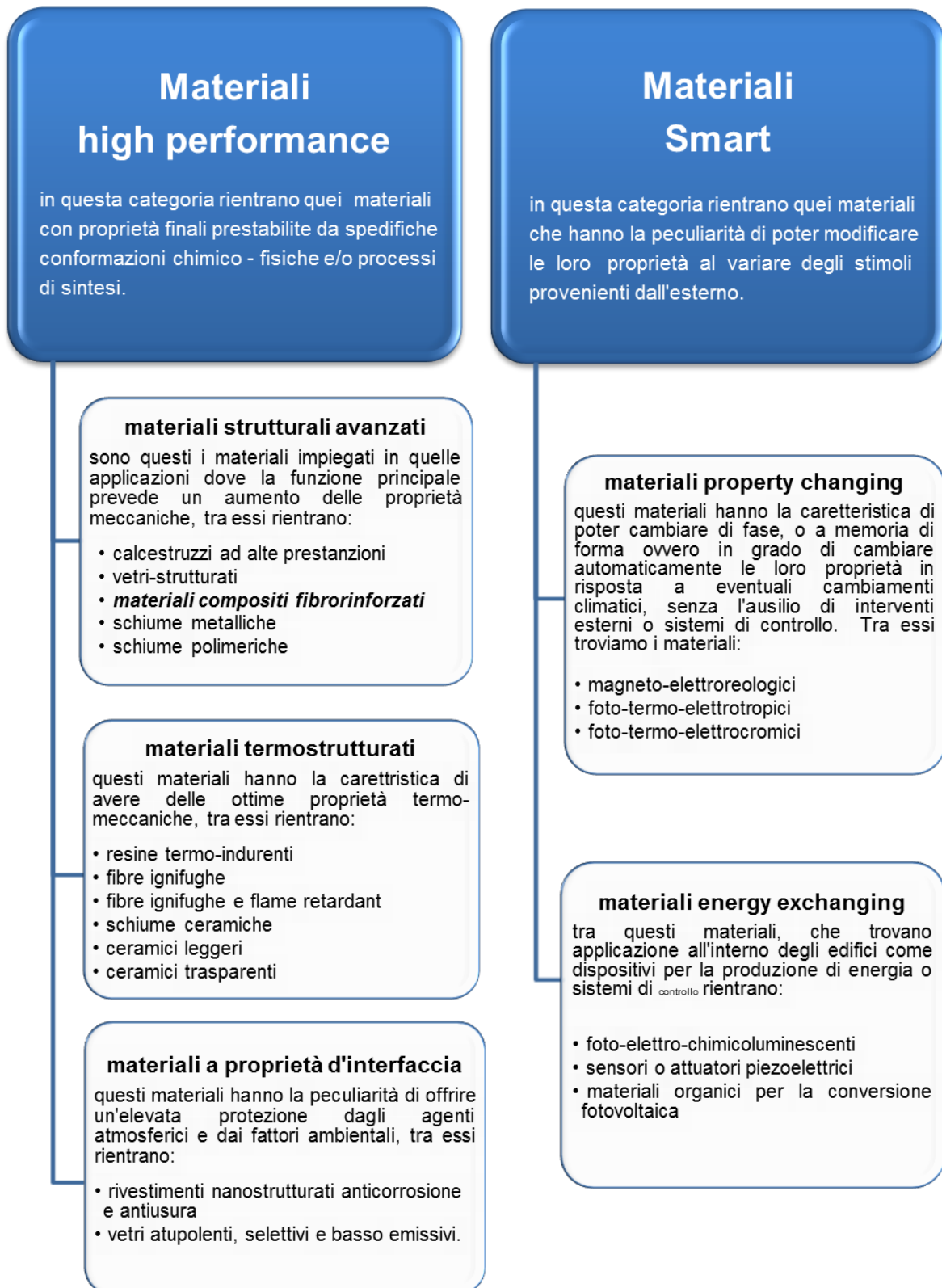
Spesso a materiali innovativi è associato l'aggettivo “avanzati” in quanto possiedono proprietà meccaniche, termiche, chimiche ed elettriche superiori rispetto ai materiali tradizionali unitamente ad elevati livelli prestazionali con impatti ambientali minimi, derivanti da particolari e innovative conformazioni chimico-fisiche ed una progettazione su misura per specifiche esigenze.

Sintetizzando quanto sopra descritto si può definire “materiale da costruzione avanzato” un materiale o una classe di materiali che rientrano in una o più delle seguenti categorie:



⁷ Cfr. Bever, M., Bloor, D., Cahn, R.W., (1994), “The Encyclopedia of Advanced Materials”, Pergamon Press, (A cura di) Oxford.

Nell'ultimo decennio i materiali avanzati sono stati sempre più utilizzati in ambito architettonico; i principali di essi possono essere suddivisi in due gruppi:



1.0.1.4 LA RICERCA DI FRONTIERA: I NANO-COMPOSITI

Negli anni 2000 la ricerca⁸ si è applicata sui materiali nano-strutturati, o nano-materiali, inizialmente limitata ai soli settori aerospaziale e biomedico, ha cominciato ad interessare in maniera crescente il campo dei prodotti per l'edilizia.

Anche nel settore edilizio infatti cominciano ad essere impiegate varie tipologie di prodotti innovativi che sfruttano le proprietà peculiari delle nano-strutture.

Appartengono alla classe dei nano-materiali i cosiddetti nano-compositi; questo genere di materiali è del tutto simile ai normali compositi, infatti anch'essi sono formati da una matrice, generalmente in materiale polimerico, ceramico o metallico, all'interno della quale è disperso un rinforzante che ha lo scopo di migliorare le proprietà meccaniche della matrice o di conferirgliene di nuove.

Le nano-scienze e le nano-tecnologie costituiscono un nuovo approccio scientifico e tecnologico finalizzato a controllare la struttura e il comportamento fondamentale della materia a livello atomico e molecolare.

Dal punto di vista concettuale il termine nanotecnologie rimanda alla scala nanometrica degli atomi e delle molecole ed alle nuove proprietà che possono essere comprese e controllate operando in questo campo.

Tali proprietà possono essere utilizzate e sfruttate su scala microscopica per sviluppare materiali e dispositivi caratterizzati da nuove funzioni e prestazioni.

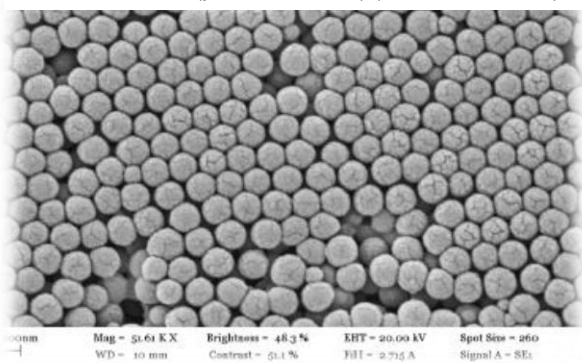
Nell'ultima decade i nano-materiali sono stati oggetto di enorme interesse ed è comunemente diffusa l'idea che possano provocare una vera e propria rivoluzione tecnologica, al pari dell'avvento dell'elettronica e dell'informatica.

Ciò che differenzia un nano-composito da un composito comune risiede soltanto nella "grandezza" del rinforzante, che per almeno una delle sue tre dimensioni deve rientrare nell'ordine di grandezza di pochi nanometri, ed è proprio questa caratteristica che rende interessante questo genere di materiali.

Il prefisso "nano" indica 10^{-9} , ossia un miliardesimo d'unità ($=0,000000001$); un nanometro (nm) equivale quindi ad un miliardesimo di metro, una dimensione decine di migliaia di volte inferiore al diametro di un capello umano.

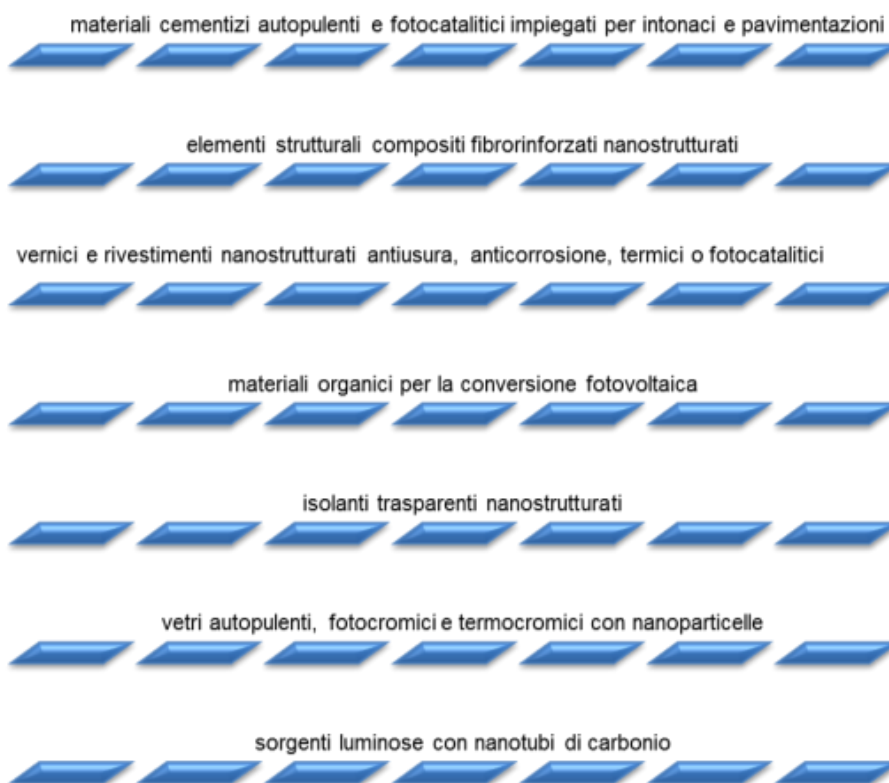
⁸ Russo M.V., Fratoddi I., Venditti I., (2014), "*Materiali nanostrutturati innovativi a base polimerica, nanoparticelle metalliche e loro compositi come assorbitori di etilene rilevabile da variazioni di proprietà elettroniche*", report di ricerca (A cura di) Dipartimento di Chimica, Università Sapienza di Roma.

Immagine SEM (Microscopio Elettronico a Scansione) di nanosfere di PPA (polifenilacetilene) (diametro= 250 nm)



Le dimensioni minute garantiscono un contatto intimo fra la matrice ed il rinforzante ed è proprio in virtù di esso che nascono le straordinarie proprietà meccaniche di questo genere di materiali. A titolo di esempio è noto come sia sufficiente aggiungere pochi grammi di nano-particelle di silice ad una matrice polimerica per quintuplicarne il modulo elastico.

Attualmente le principali sperimentazioni in ambito edilizio riguardano le seguenti tipologie di prodotti:



L'accenno dovuto a questo ambito di ricerca tecnologica, per quelli che sono gli scopi del presente lavoro, resta tale e si ferma qui meritando i nano-materiali approfondimenti e classificazioni proprie che esulerebbero dalle premesse di questa tesi.

1.0.2 INTRODUZIONE AI COMPOSITI

Per distinguere i materiali compositi naturali da quelli artificiali, combinati secondo le caratteristiche sopraesposte al fine di ottenere le prestazioni globali più elevate, si è introdotta la denominazione Materiali Compositi Avanzati (*Advanced Composite Materials*).

1.0.2.1 QUANDO UN MATERIALE È UN “COMPOSITO”?

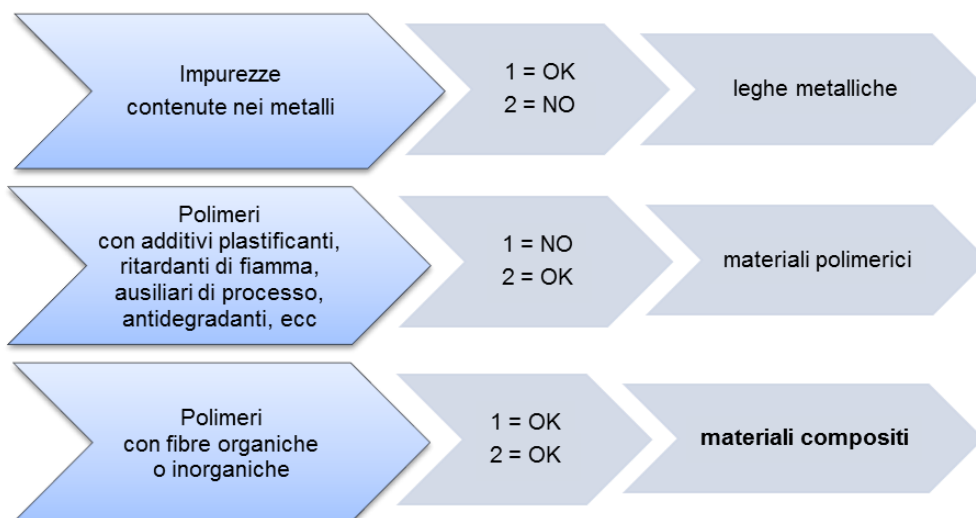
In ragione di quanto introdotto nel paragrafo precedente si può operare un'ulteriore caratterizzazione di ciò che definirò nel testo con la dicitura “materiali compositi”, ovvero tutti quei materiali che possiedono entrambe le seguenti caratteristiche:

condizione 1) sono costituiti da 2 o più materiali (fasi) di natura diversa

condizione 2) almeno due delle fasi presenti hanno proprietà fisiche “sufficientemente” diverse tra loro, in modo da impartire al composito proprietà diverse da quelle dei costituenti

Materiali che non soddisfino entrambe le condizioni non sono da considerarsi strettamente appartenenti alla categoria dei materiali compositi:

Alcuni esempi:



1.0.2.2 MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI

Con il termine di compositi si vuole indicare:

“una miscela di due o più componenti che, pur conservando ciascuno la propria identità chimica contribuiscono mutuamente a fornire proprietà meccaniche e fisiche complessivamente molto superiori a quelle dei singoli elementi come entità separate”⁹

In ogni materiale composito, seppur in percentuale volumetrica variabile in base al tipo, si possono identificare le seguenti categorie di componenti (dette anche fasi):

- 1. MATRICE** (fase continua): è la parte di miscela identificabile come un elemento senza soluzione di continuità che generalmente né definisce forma e volume;
- 2. INTERFASE:** a causa di interazioni chimiche od altri effetti, esiste tra rinforzo e matrice una fase aggiuntiva chiamata “inter-fase”.
- 3. RINFORZO** (fase fibrosa): è l'insieme di entità multiple (fibre o particelle) diffuse più o meno uniformemente nella matrice;

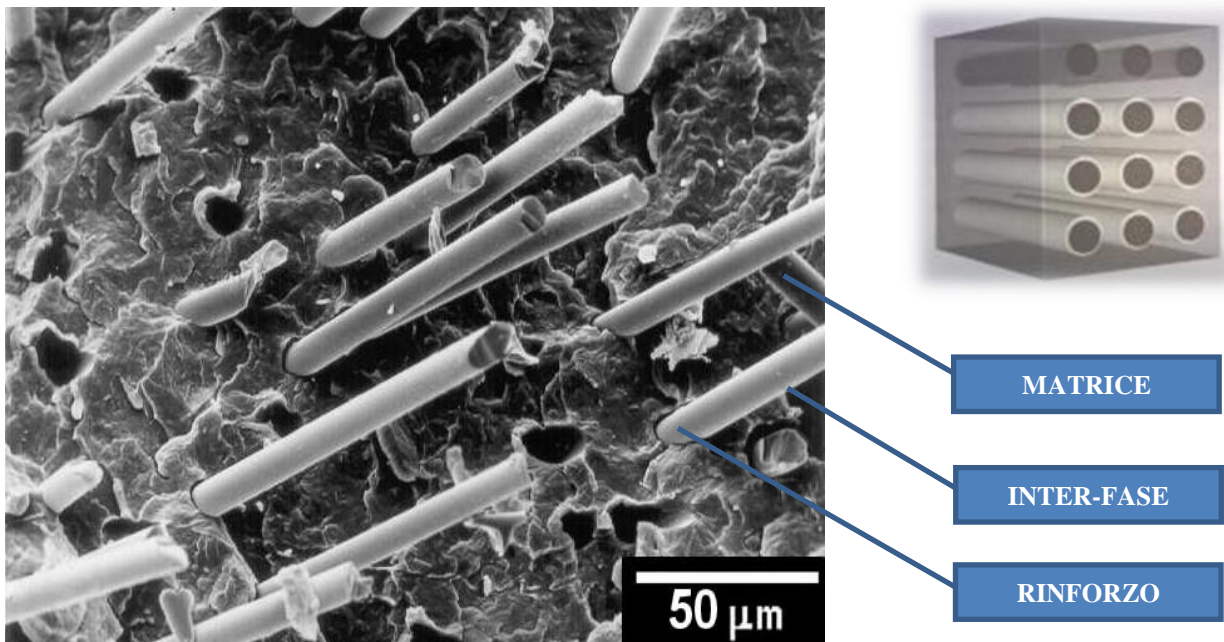





Immagine al microscopio e schematizzazione fasi di un materiale composito

⁹ Brigante. D, (2012), “Rinforzo strutturale con materiali compositi”, Graffil (A cura di) Torino.

1.0.2.3 LE PROPRIETÀ DEI COMPOSITI

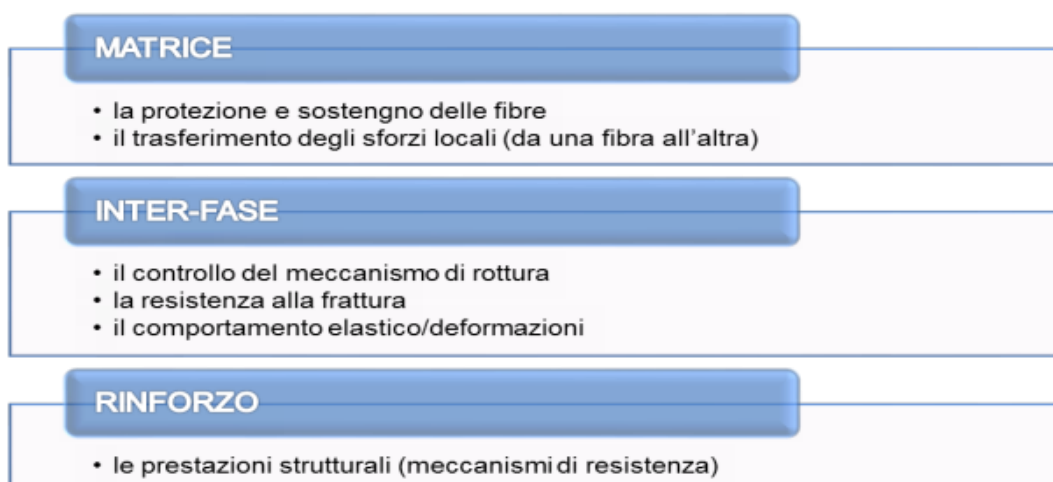
Di norma il termine composito è ristretto ad una categoria di materiali, non naturali, che risponde a tre requisiti:

- 1  consistono di due o più materiali fisicamente distinti
- 2  i materiali costituenti sono dispersi l'uno nell'altro in modo controllato
- 3  il materiale risultante presenta una combinazione di proprietà superiore a quella della somma dei singoli materiali componenti

Le proprietà degli elementi costituenti un composito determinano:

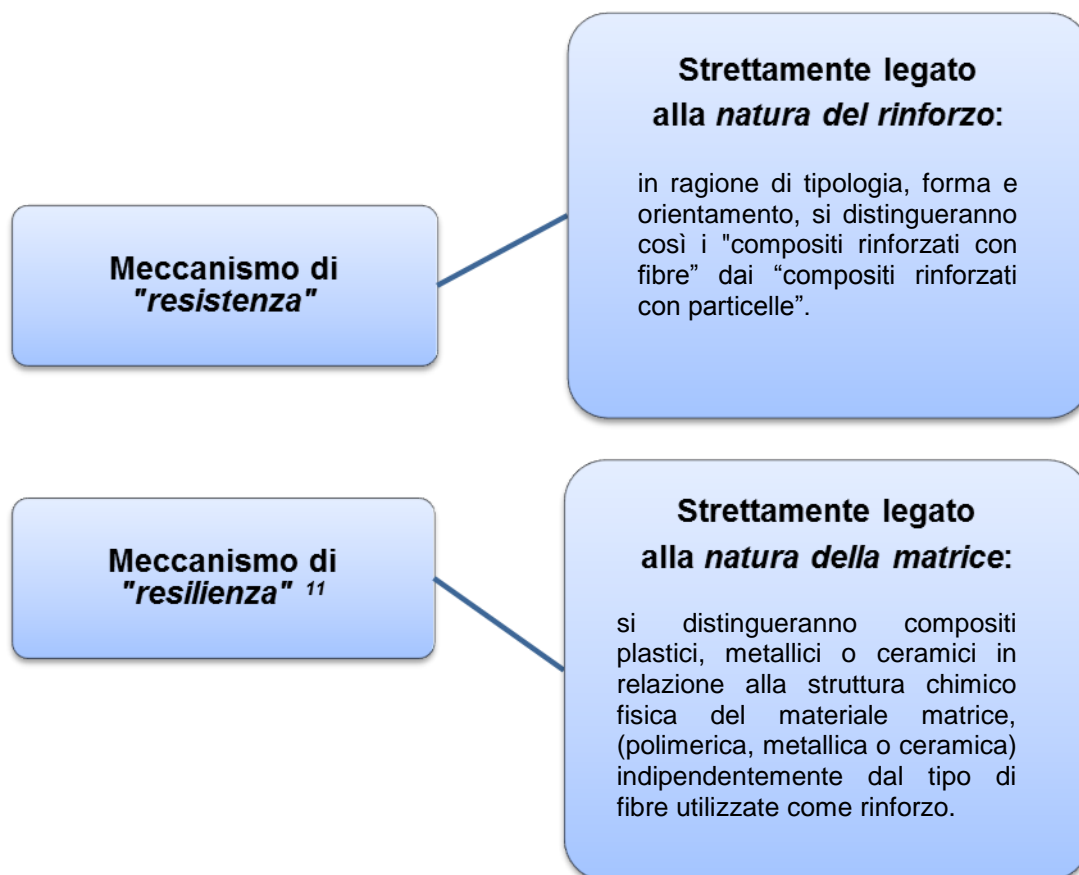


Le fasi costituenti un composito influenzano:



2.0 CLASSIFICAZIONE DEI COMPOSITI

Tra le possibili classificazioni dei materiali compositi si preferisce riportare le due più comuni presenti in letteratura¹⁰ in cui il composito è caratterizzato in funzione dei seguenti funzionamenti:

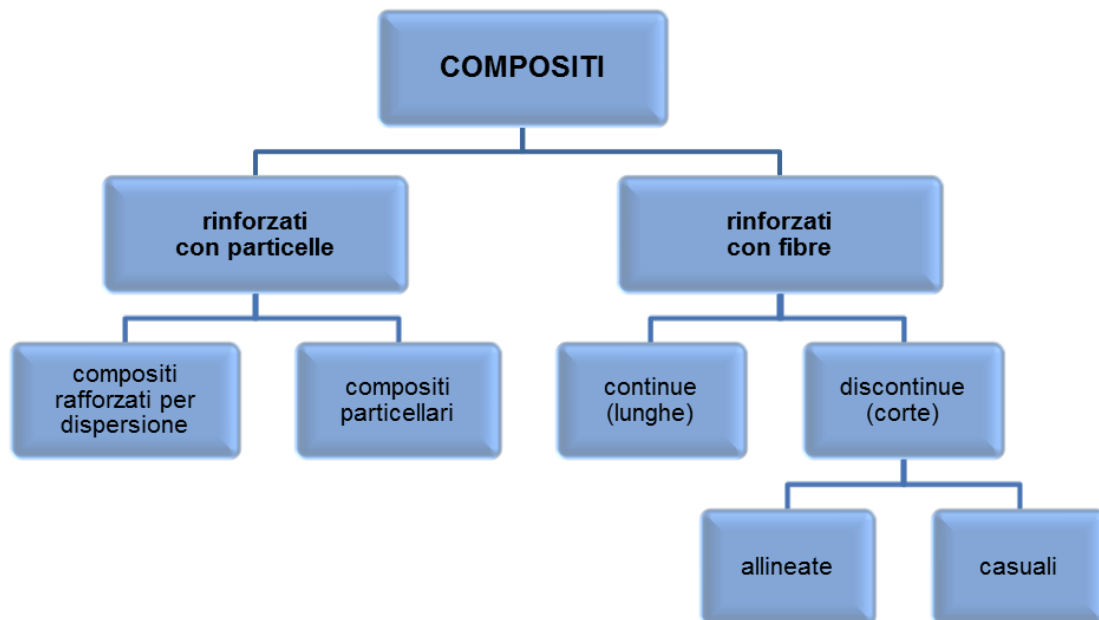


¹⁰ Le classificazioni sono elaborate traendo il materiale da:

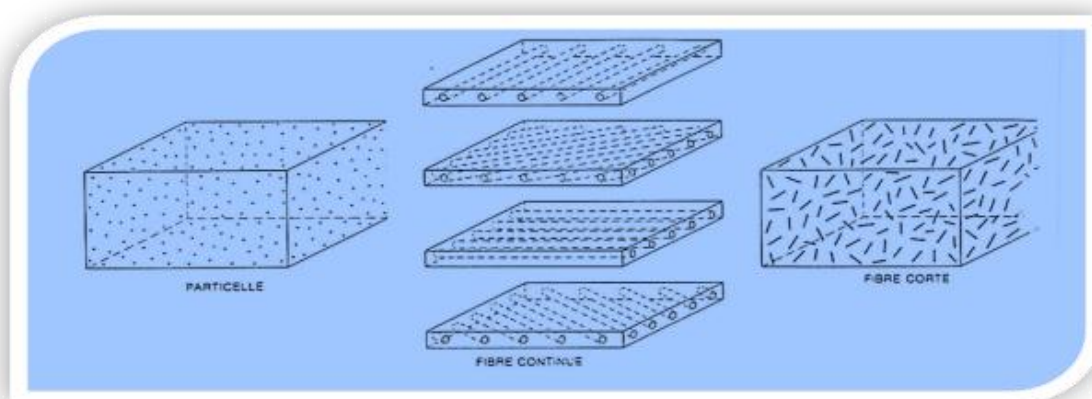
- Bertolini, L., Bolzoni, F., Cabrini, M., Pedferri, P., (2001), "Tecnologia dei Materiali. Ceramiche, polimeri e compositi", CittàStudiEdizioni (A cura di) Torino.
- Brigante, D., (2012), "Rinforzo strutturale con materiali compositi", Graffil (A cura di) Torino..
- Carotenuto, G., Giordano, M., Nicolais, L., (2014), "Materiali Compositi: sviluppi e prospettive" report di ricerca (A cura di) Università di Napoli.Knipppers. J, Cremers. J, Gabler. M, Lienhard. J, (2011) "Atlante delle Materie plastiche", Utet Scienze Tecniche", (A cura di) collana manuali Grande Atlante di Architettura, Milano
- Mariani, M., (2016), "Sisma Emilia 2012 - Dall'evento alla gestione tecnica dell'emergenza" (A cura di) Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Regione Emilia-Romagna, Consiglio Nazionale degli Ingegneri, Federazione Ordini degli Ingegneri dell'Emilia-Romagna. Minguzzi. G, (1998), "Fiber Reinforced Plasctics. Utilizzo dei materiali composite a matrice polimerica in edilizia civile", Alinea Editrice (A cura di) Firenze.
- Viskovic, A., Bozzetti, A., (2014), "FRP e FRCM: le normative sull'impiego di materiali compositi e innovativi" report di ricerca (a cura di) membri della Commissione: materiali compositi e innovativi dell' Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.Frassine R. (2000), "Tecnologie e proprietà dei materiali compositi" - professore ordinario del Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica del Politecnico di Milano, estratto della Docenza in Materiali polimerici e compositi, (A cura di) Promaplast srl su iniziativa di: Assocomaplast
- Lenormand, Payen, Morland Jeunne, Laugier, Francoeur, Robiquet, Dfresnoy, ecc., (1845), "Supplemento al Nuovo Dizionario Universale Tecnologico o di arti e Mestieri", Giuseppe Antonelli (A cura di) Venezia.
- [http://www.treccani.it/enciclopedia/ Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica/](http://www.treccani.it/enciclopedia/Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica/)

2.0.1 CLASSIFICAZIONE IN BASE AL MECCANISMO DI “RESISTENZA”

Una prima classificazione del materiale oggetto del presente studio può essere rappresentata in ragione della **tipologia degli elementi di rinforzo**:



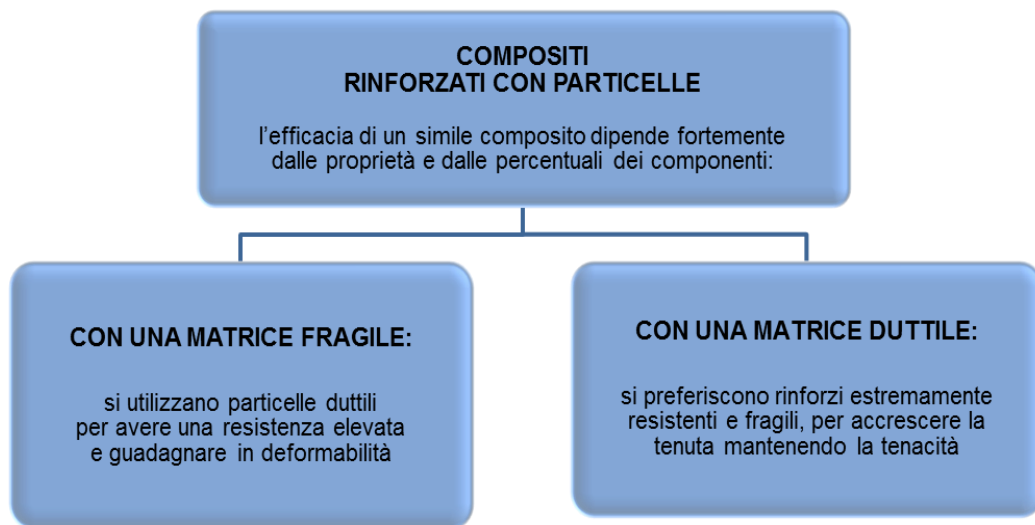
Schematizzazione dei possibili sistemi di rinforzo:



¹¹

resilienza: capacità di un materiale di assorbire energia elasticamente quando sottoposto a un carico o a un urto prima di giungere a rottura. definizione di resilienza relativamente i materiali in edilizia, Enciclopedia della Scienza e della Tecnica (2008) in http://www.treccani.it/enciclopedia/resilienza_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/

Nel caso di compositi in ambito edilizio, finalizzati ad alte prestazioni strutturali, il rinforzo è normalmente costituito da fibra “continua-lunga”, determinando la rigidità e la resistenza del materiale nella direzione della stessa.



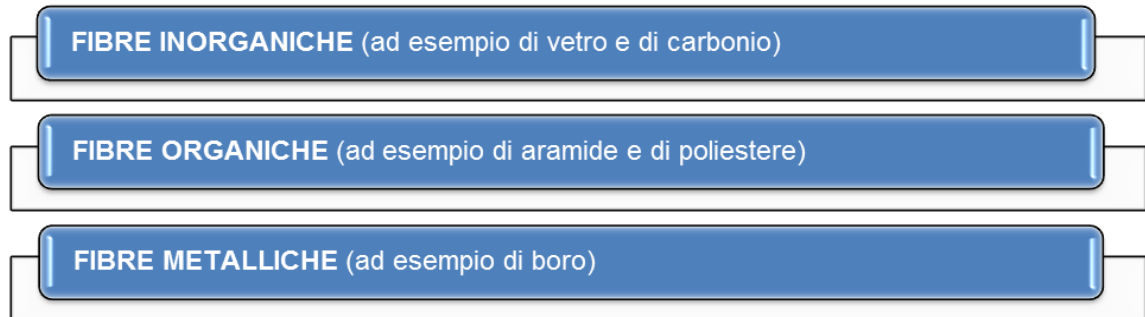
Esempio di composito a particelle disperse: l'allumina, presenta normalmente un comportamento isotropo e le proprietà meccaniche finali del prodotto variano sensibilmente al variare delle percentuali di matrice e rinforzo.



Esempio di compositi con fibre: cellulosa nella lignina, un caso naturale al quale s'ispirano quelli artificiali, in esso le fibre conferiscono resistenza elevata ma solo nella propria direzione, mentre in tutte le altre direzioni la resistenza rimane molto bassa.

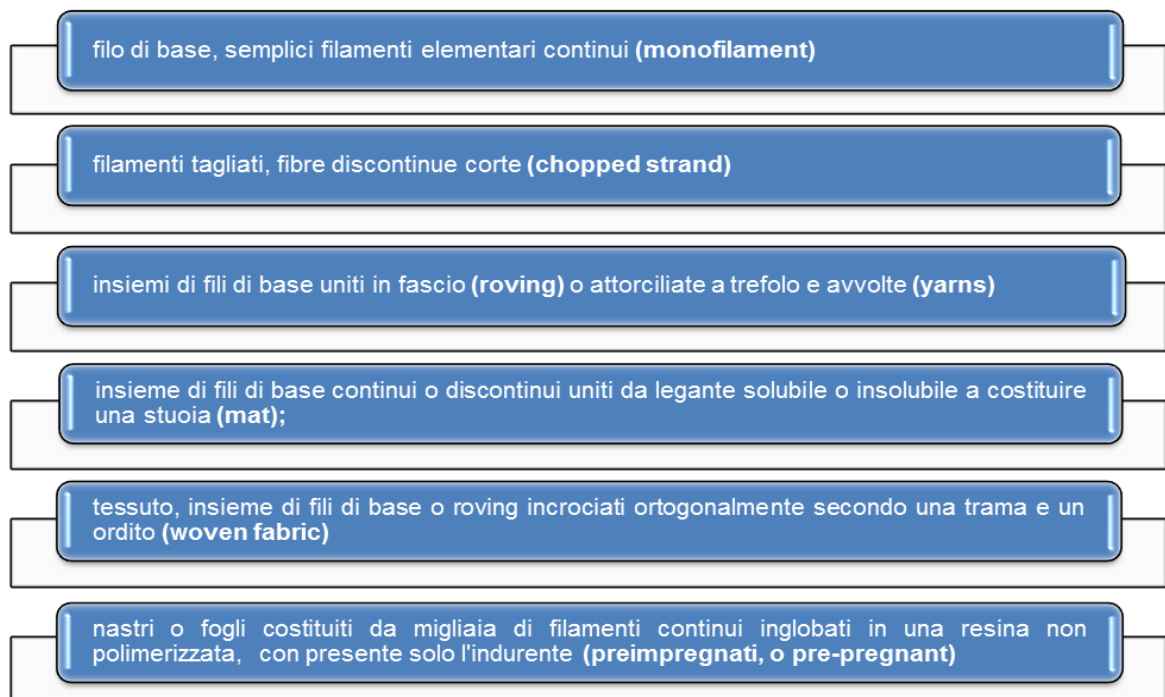
2.0.1.1 TIPOLOGIE DELLE FIBRE

Le fibre utilizzate per la realizzazione dei materiali compositi hanno varia natura:



In generale sono di diametro non superiore al 0,1mm; oltre alle fibre di sezione circolare si trovano fibre dalla sezione molto appiattita, a sezione triangolare ed anche elementi, che pur identificati con il nome di fibre, in realtà sono formazioni cristalline dallo sviluppo prevalentemente uni-direzionale.

Le fibre si presentano come filamenti continui molto sottili di materiale, al punto da poter essere considerati monodimensionali e si possono presentare come:





Le **fibre corte** sono ottenute dalla tranciatura dei filamenti elementari continui e vengono utilizzate per essere immerse in modo del tutto casuale e disordinato (random orientation) all'interno della matrice, consentendo di generare così un manufatto dal comportamento “pseudo-isotropo”.

I **roving**, insiemi di fili base, vengono forniti in rotoli e possono essere utilizzati per ottenere fibre corte, per realizzare tessuti, oppure per produrre componenti tramite processi automatizzati (pultrusione, filament winding, ecc)

I **mats**, insiemi di fili uniti da leganti, possono essere costituiti da fibre continue, (continuous strand mat) e discontinue (chopped strand mat), e sono prodotti in nastri di lunghezza potenzialmente indefinita e di larghezze diverse, generalmente comunque non superiori ai 50mm.

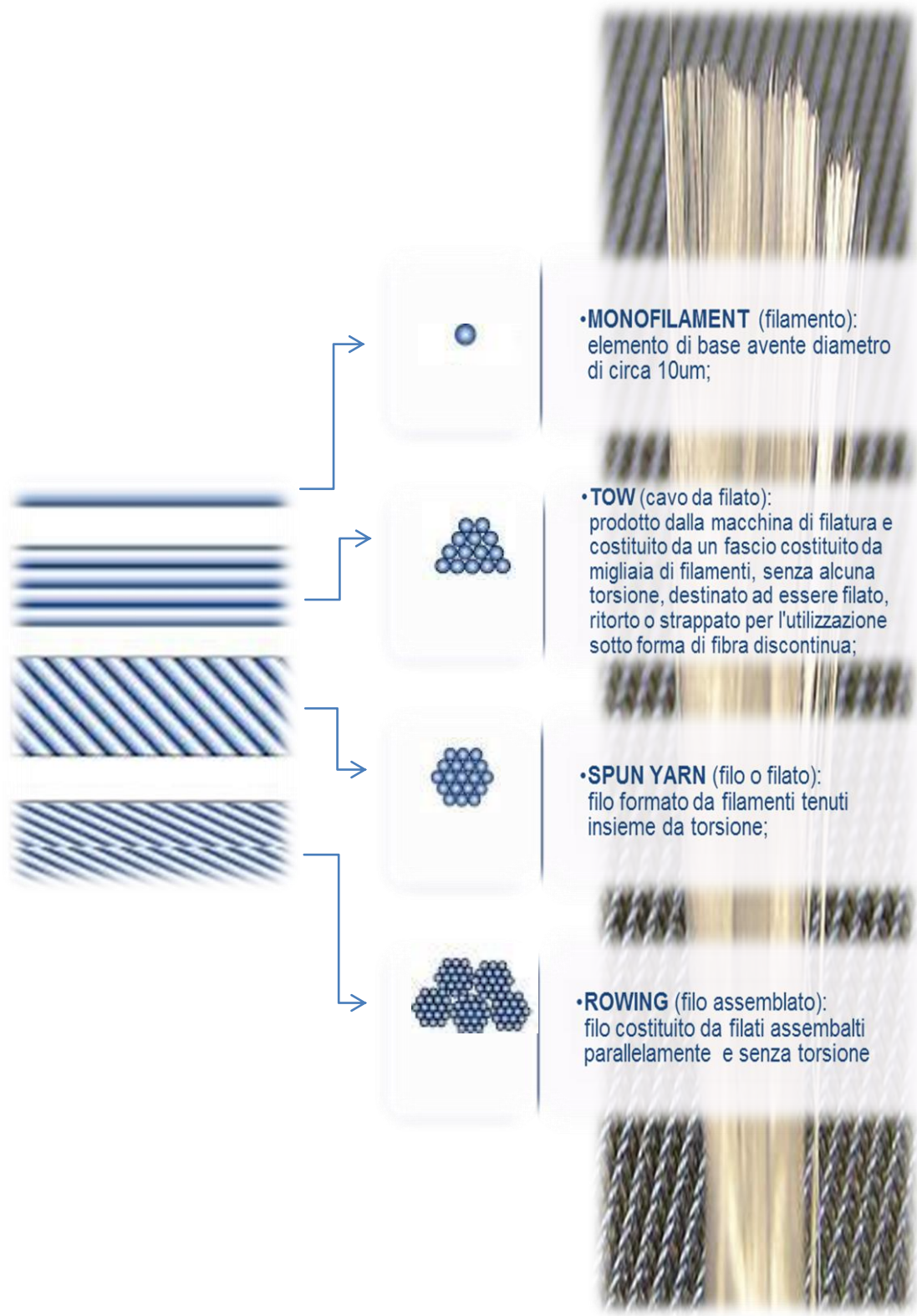
I mats a fibre continue sono utilizzati per realizzare, in unione ai roving, componenti pultrusi stampati per compressione (paragrafo 4.0.2.2) mentre i mats a fibre corte sono impiegati per ottenere manufatti stratificati a mano (laminati) o pannelli a lastra.

I **tessuti** (paragrafo 4.0.2.1) possono essere prodotti in diverse configurazioni ed avere caratteristiche differenti a seconda di come vengono intrecciate le fibre in trame e orditi ed in relazione alla loro composizione (possono essere intrecciate fibre di natura diversa ottenendo tessuti cosiddetti ibridi).

I **pre-preg**, sono invece dei componenti tessili pre-impregnati, generalmente sotto forma di nastri (di lunghezza compresa tra i 10mm ed i 80 mm circa) o fogli (di lato fino anche 2m) in cui l'insieme delle fibre è mantenuto da resine non polimerizzate ma in cui è presente l'indurente; il pre-preg si consolida sotto l'azione di pressione e/o calore.

Infine le fibre, in forma di filamenti elementari continui, possono essere utilizzate anche direttamente nella realizzazione dei **elementi compositi a fibre lunghe** mediante processi di pultrusione o avvolgimento filamentare (paragrafo 4.0.1) oppure sfruttate come componenti di base per la fabbricazione di prodotti più complessi simili ai tessuti come yarns, rovings, mats o woven fabrics.

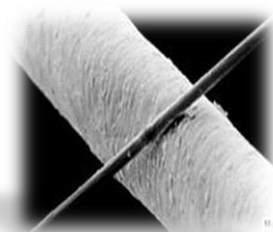
Schema riassuntivo delle principali tipologie di filati disponibili in commercio:



Tra le fibre più diffuse per la realizzazione dei compositi in campo edilizio troviamo:



fibre di vetro



fibre di carbonio



fibre di basalto

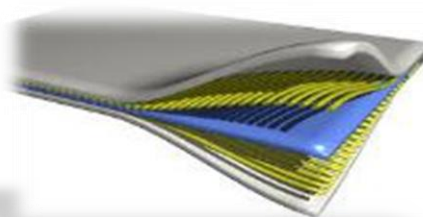


fibre d'aramide



fibre d' acciaio

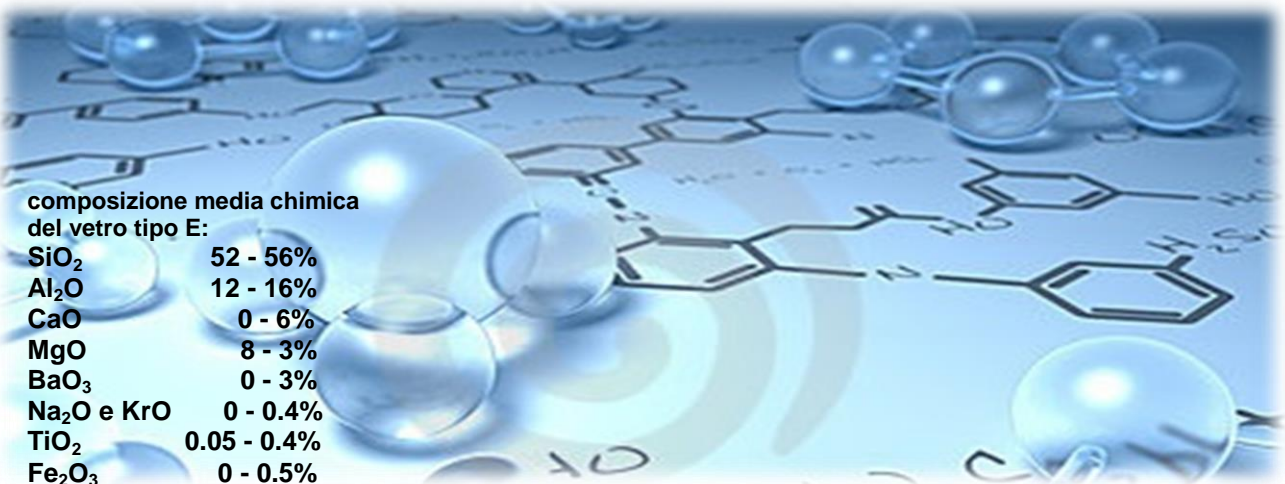
**altre tipologie di fibre
(es. fibre naturali)**



2.0.1.1.1 FIBRE DI VETRO

La produzione industriale delle fibre di vetro ebbe inizio negli anni '30 per realizzare isolanti elettrici fondendo elementi dalla differente natura quali: ossido di calcio, ossido di silicio, ossido di magnesio, ossido di alluminio e ossido di boro.

Il primo tipo di vetro prodotto fu il vetro E, noto essenzialmente per applicazioni elettriche, e la sua composizione è:



composizione media chimica del vetro tipo E:	
SiO ₂	52 - 56%
Al ₂ O ₃	12 - 16%
CaO	0 - 6%
MgO	8 - 3%
BaO ₃	0 - 3%
Na ₂ O e KrO	0 - 0.4%
TiO ₂	0.05 - 0.4%
Fe ₂ O ₃	0 - 0.5%

La materia prima ottenuta dalla fusione dei vari elementi in gioco alla temperatura di 1550 °C, viene fatta raffreddare fino a 1250°C, successivamente viene introdotta e lavorata attraverso una filiera, all'uscita della quale viene bruscamente raffreddata generando un filamento continuo, sottile e molto resistente, di lunghezza variabile; si producono anche fibre più corte con una lunghezza che va da 203 a 381 mm.

Per la trafilatura di solito si usano biglie di vetro di 3/4 di pollice di diametro che vengono fuse elettricamente e fatte passare ad un setaccio con 204 o più orifizi. La quantità di vetro sopra gli orifizi, la viscosità del fuso, il numero e la grandezza degli orifizi e la velocità con cui i fili vengono trafilati influiscono sul diametro dei filamenti prodotti.

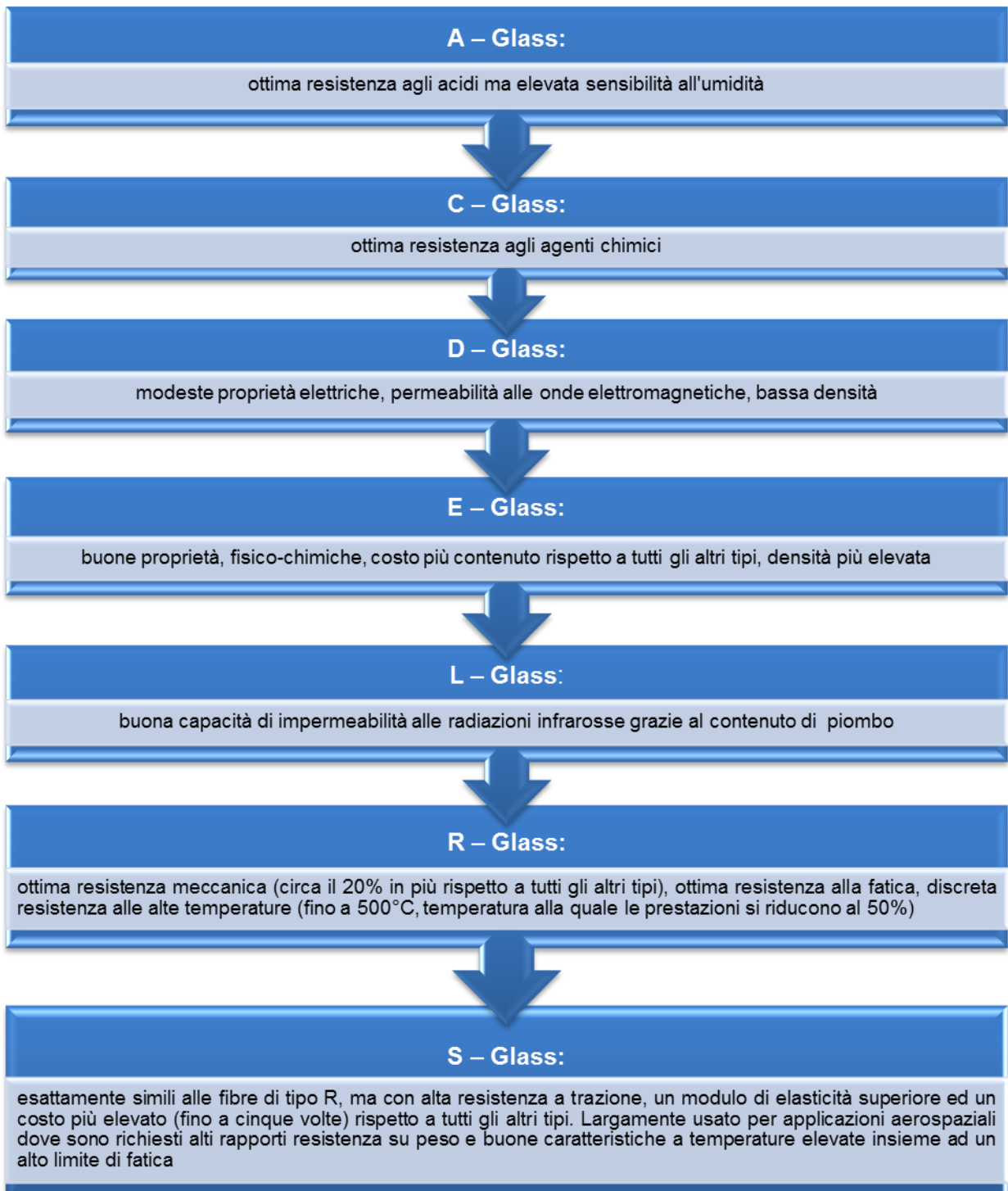
Appena tolto il setaccio viene applicato ad ogni filamento un composto chimico chiamato "sizing" avente tre funzioni: lubrificare, proteggere il filamento dall'abrasione ed ottimizzare l'interfaccia con la matrice.

Dopo questa operazione i filamenti vengono uniti in un fascio detto "strand" che a sua volta viene fatto passare in un avvolgitore formandone una bobina.

Al termine di questa operazione viene posto in un forno per rimuovere il solvente o l'acqua associata con l'applicazione del "sizing".

È possibile trafilare molti tipi di vetro di varie composizioni in filamenti continui, con caratteristiche e proprietà differenti (diversa resistenza meccanica, diverso comportamento elettrico ecc.) che vengono contraddistinte da una lettera.

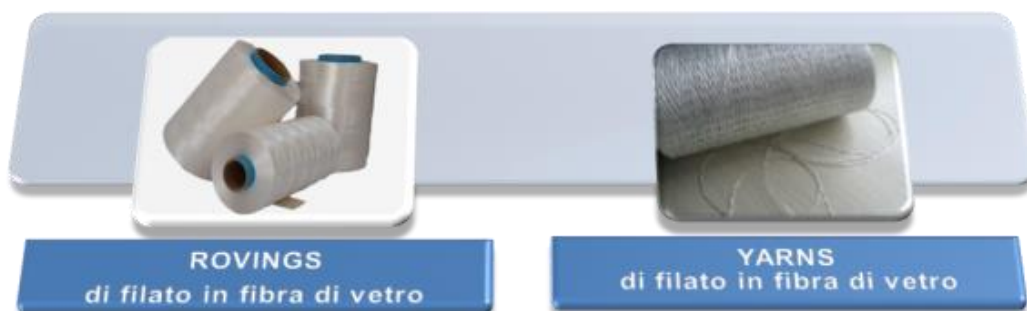
Si hanno così sul mercato **sette tipi di vetro**:



Si possono comunque evidenziare le caratteristiche generali comuni a tutti i tipi:



Le forme più comuni in cui si possono trovare i filamenti di vetro sono i rovings e gli yarns:



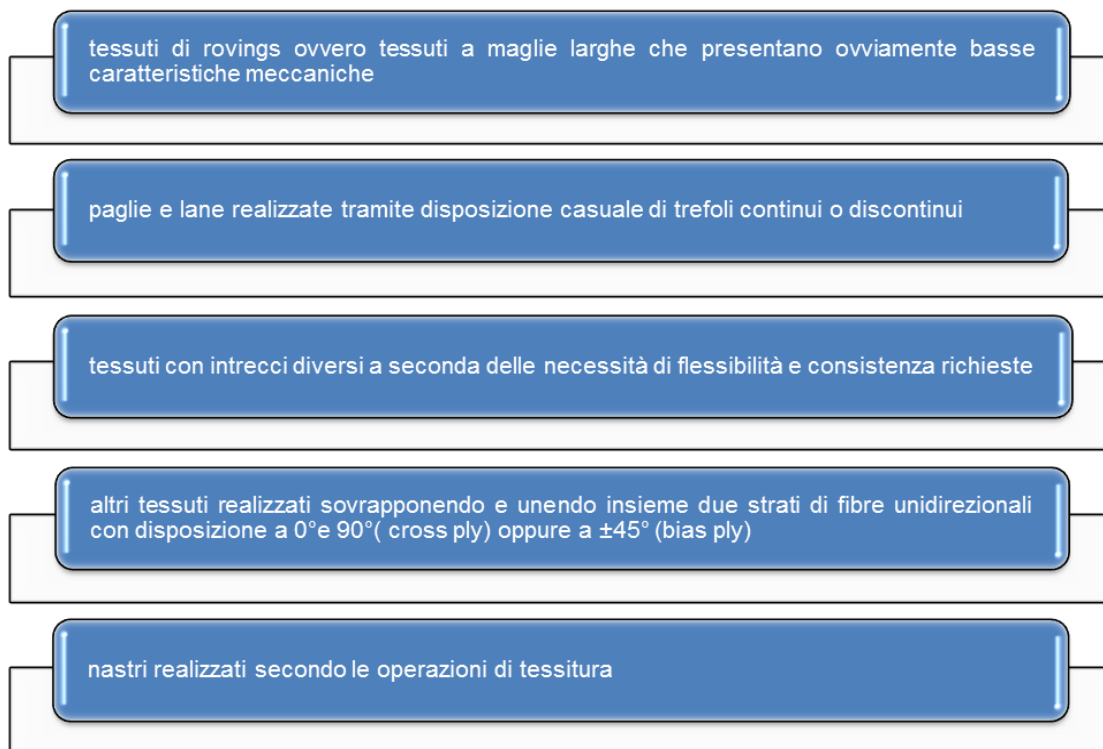
Roving: è praticamente un gruppo di strand paralleli di vetro uniti in un gomito o avvolti su un tubo cilindrico, usati per prodotti a filamento avvolto come gli involucri motore di razzi e serbatoi.

Yarn: il più semplice yarn è un unico strand di fibre di vetro, chiamato comunemente single yarn, yarns più pesanti sono formati da più strands torti ed uniti a trefolo; vi sono yarns torti ad S e yarns torti a Z.

L'operazione di costruzione del trefolo permette di evitare la formazione di attorcigliamento degli yarns poiché singoli yarns a S vengono uniti con yarns a Z per formare uno yarn bilanciato.

Le operazioni di costruzione degli yarns e dei trefoli variano la resistenza, il diametro e la flessibilità degli stessi e sono tappe importanti nella produzione e diversificazione di una varietà notevole di prodotti.

Altre forme in cui si può trovare il vetro sono:

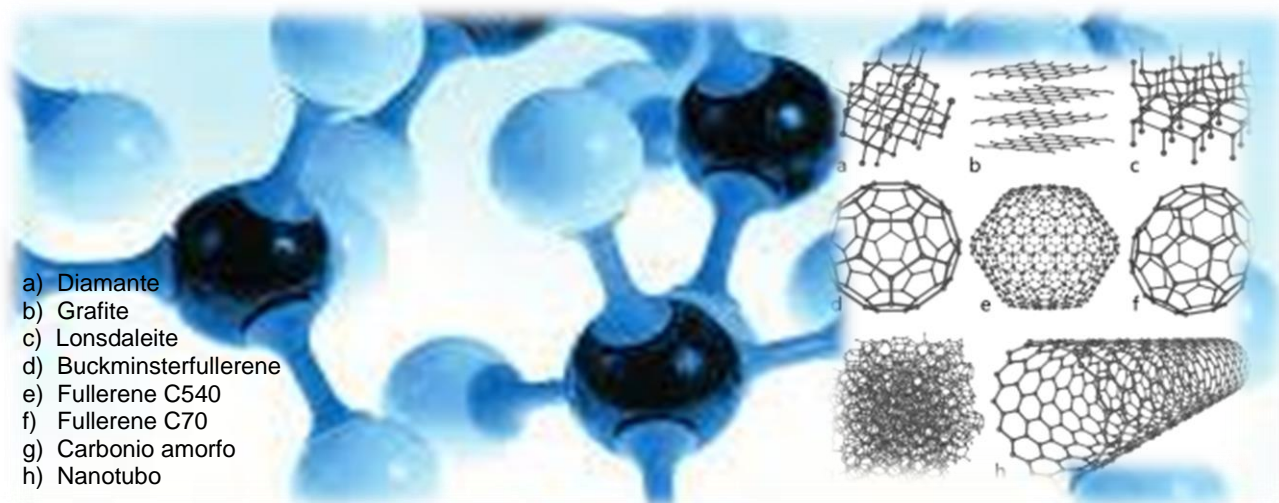


Le fibre di vetro rappresentano i rinforzi più noti ed utilizzati nei materiali compositi a matrice polimerica (paragrafo 2.0.2) in quanto:

- **hanno un vantaggioso rapporto prestazione/costo** (il più alto rispetto a quello di altre fibre utilizzabili nella realizzazione di compositi)
- **facilità di produzione delle fibre ed alla compatibilità con molti tipi di matrici.**

2.0.1.1.2 FIBRE DI CARBONIO

Le fibre di carbonio, scoperte nel 1878 da Edison per realizzare la prima lampada ad incandescenza, sono state prodotte commercialmente solo in un secondo momento (dal 1960) in ambito aeronautico, secondo un procedimento messo a punto da William Watt per la Royal Aircraft nel Regno Unito.



Varie forme allotropiche¹² del carbonio

Struttura della molecola di carbonio

Le fibre di carbonio hanno iniziato l'era dei materiali compositi negli ambiti militare o aeronautico ed in seguito anche per prodotti dell'industria automobilistica e per il tempo libero.

Esse rappresentano il punto di separazione tra le fibre organiche e le fibre inorganiche in quanto generate dalla degradazione controllata di fibre organiche o da peci organiche con trattamento termico detto di **pirolisi controllata**.

La generazione di queste fibre avviene all'interno di una camera detta di pirolisi, ovvero un ambiente in cui le condizioni di temperatura e pressione sono accuratamente verificate ed in cui le fibre sono costantemente mantenute in tensione adeguata per permettere alle molecole di assumere una configurazione spaziale opportuna.

In seguito a questo processo le fibre organiche presentano, rispetto al loro stato originario, una densità sensibilmente ridotta ed acquistano una eccellente resistenza alla trazione (notevolmente superiore a quella delle fibre di vetro) ed un elevato modulo elastico.

Uno dei primi precursori (termine con il quale in gergo viene indicato il componente da sottoporre a pirolisi) fu il Rayon e successivamente il Nylon.

¹² Allotropia: (dal greco allos, altro, e tropos, modo), è una denominazione applicata da Jons Jacob Berzelius alla proprietà di esistere in diverse forme.

Il precursore maggiormente utilizzato nel corso tecnologico di queste fibre è il poliacrilonitrile (PAN), una particolare fibra acrilica che permette di ottenere filamenti ad elevatissime prestazioni. Recentemente sono state introdotte fibre di carbonio e di grafite ottenute da residui della distillazione del petrolio o del catrame (PITCH).

La struttura rigida delle molecole ad anelli ciclici a nastro o a scala a pioli, delle fibre di carbonio, ha suggerito come costruire molecole organiche aromatiche per ottenere fibre ad elevate prestazioni quale che sia il precursore d'origine.

La terminologia fibre di carbonio si alterna, nella pratica comune, a quella di fibre di grafite.

In realtà il primo termine dovrebbe essere applicato a fibre trattate fino a circa 2000 °C, riservando il termine "grafite" a quelle trattate ad almeno 2500 °C, anche se la struttura di queste ultime non corrisponde alla tipica struttura cristallina tridimensionale della grafite.

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite: quanto più si riesce in fase di produzione ad ottenere una valida struttura cristallina, (fase di carbonizzazione), tanto più si ottiene un materiale dalle caratteristiche notevoli.

Un cristallo di grafite, ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio.

I legami fra atomi dello stesso piano sono forti (legami covalenti) mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli (legami Van der Waals): è evidente come i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e sarà compito del processo di fabbricazione disporre la struttura cristallina nella direzione voluta.

Naturalmente ciò non è facile e praticamente non si riescono mai ad ottenere cristalli perfetti e con precisione di orientamento per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche.

Il processo di produzione/conversione definito il precursore, (rayon, PAN, poliammidi aromatiche, resine fenoliche, ecc..) la scelta dell'uno o dell'altro dipende dal costo di produzione, dalla complessità del processo, dalla rapidità di lavorazione e così via) comincia con la trafilatura, ovvero la sua riduzione in fibre, a cui segue poi uno stiramento alla temperatura di 200°C.

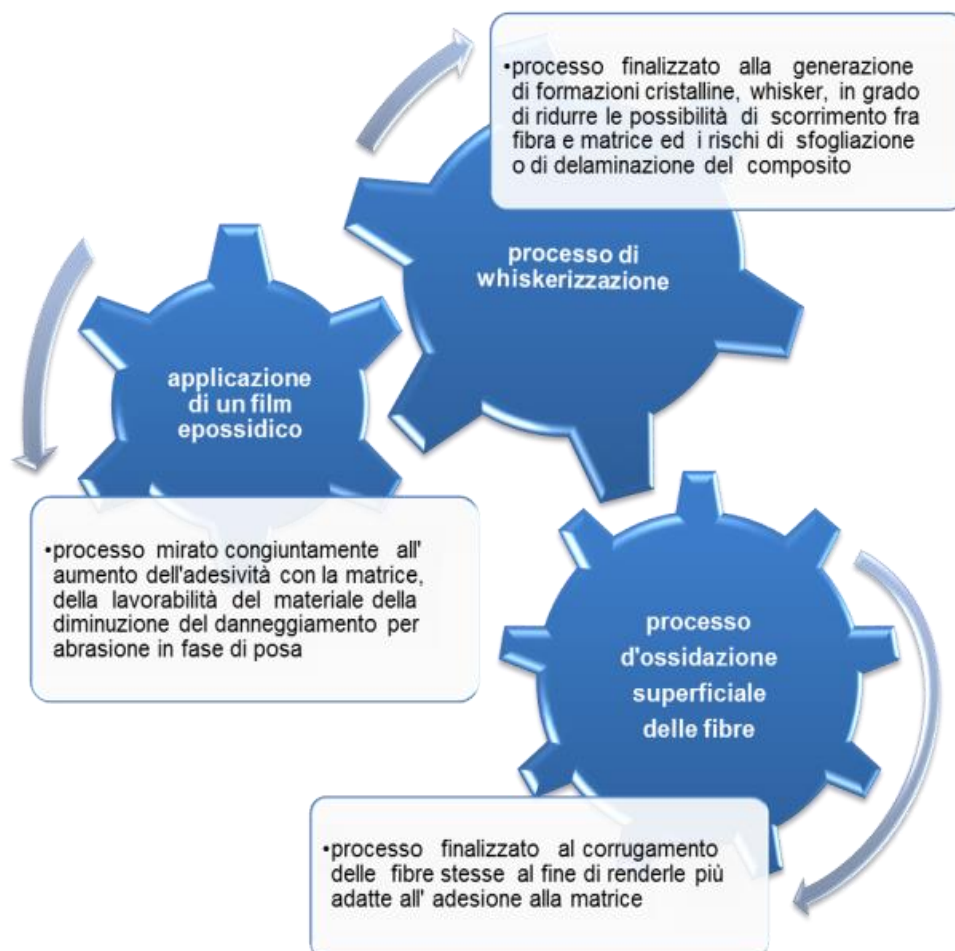
La carbonizzazione, fase che ordina gli assi principali di ogni molecola, avviene ad una temperatura compresa tra 1100°C ed i 1500°C, se si aumenta il valore fino a 2000°C ed oltre, il processo prende il nome di grafittizzazione.

A seguito della grafittizzazione si ottengono le cosiddette fibre di grafite, il cui modulo elastico, conseguentemente ad un ulteriore riordino della struttura delle fibre superiore a quello raggiunto alla temperatura di carbonizzazione, è superiore a quello delle fibre di carbonio a scapito della resistenza a trazione inferiore del 20%.

Sintetizzando le caratteristiche salienti delle fibre di carbonio sono:



Un problema importante nell'impiego di questa tipologia di fibra, nei compositi, è quello della **difficoltà d'impregnazione ed adesione alle matrici**; per tale motivo sono stati messi a punto alcuni **procedimenti** produttivi:



I costi elevati relativi alle materia prime (precursori) e dei processi di produttivi delle fibre determinano un impegno più limitato di queste fibre rispetto a quello di vetro.

E' da rilevare che globalmente, a parità di prestazioni ottenibili, l'uso di manufatti in carbonio (dalla produzione della materia prima, alla realizzazione del manufatto, posa in opera e mantenimento delle prestazioni) ha costi, in termini di energia, inferiori a quelli riscontrabili con l'utilizzo di materiali tradizionali come l'acciaio.

2.0.1.1.3 FIBRE DI BASALTO

I primi tentativi di produrre fibre di basalto risalgono al 1923, negli Stati Uniti d'America. Dopo la seconda guerra mondiale, le ricerche furono riprese e sviluppate anche, in Europa e in Unione Sovietica, principalmente per uso militare ed aerospaziale.

Dal 1995, anno in cui è stato tolto il segreto militare, le fibre di basalto hanno trovato numerose applicazioni per usi civili. Attualmente i maggiori produttori sono Russia, Cina e Stati Uniti d'America.

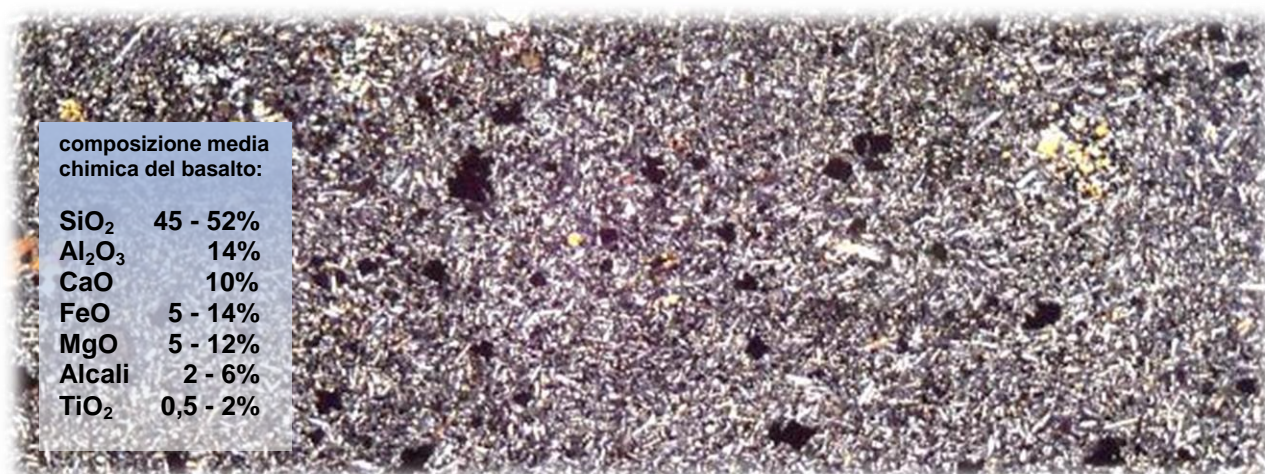
Negli ultimi anni la ricerca di nuove tipologie di fibre da adottare nel settore dell'edilizia civile si è indirizzata verso lo studio delle fibre di basalto.

Le fibre di basalto sono fibre molto sottili, tipicamente con un diametro compreso tra 9 e 13 μ m, di roccia vulcanica composta da: plagioclasti, pirosseni e olivine; per le loro caratteristiche sono un ottimo sostituto delle fibre di amianto in quanto il loro diametro è molto superiore al limite di respirabilità (circa 5 μ m).

Esse appartengono alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e alle fibre di vetro ma, rispetto a queste ultime, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche e un costo significativamente inferiore rispetto alle prime.

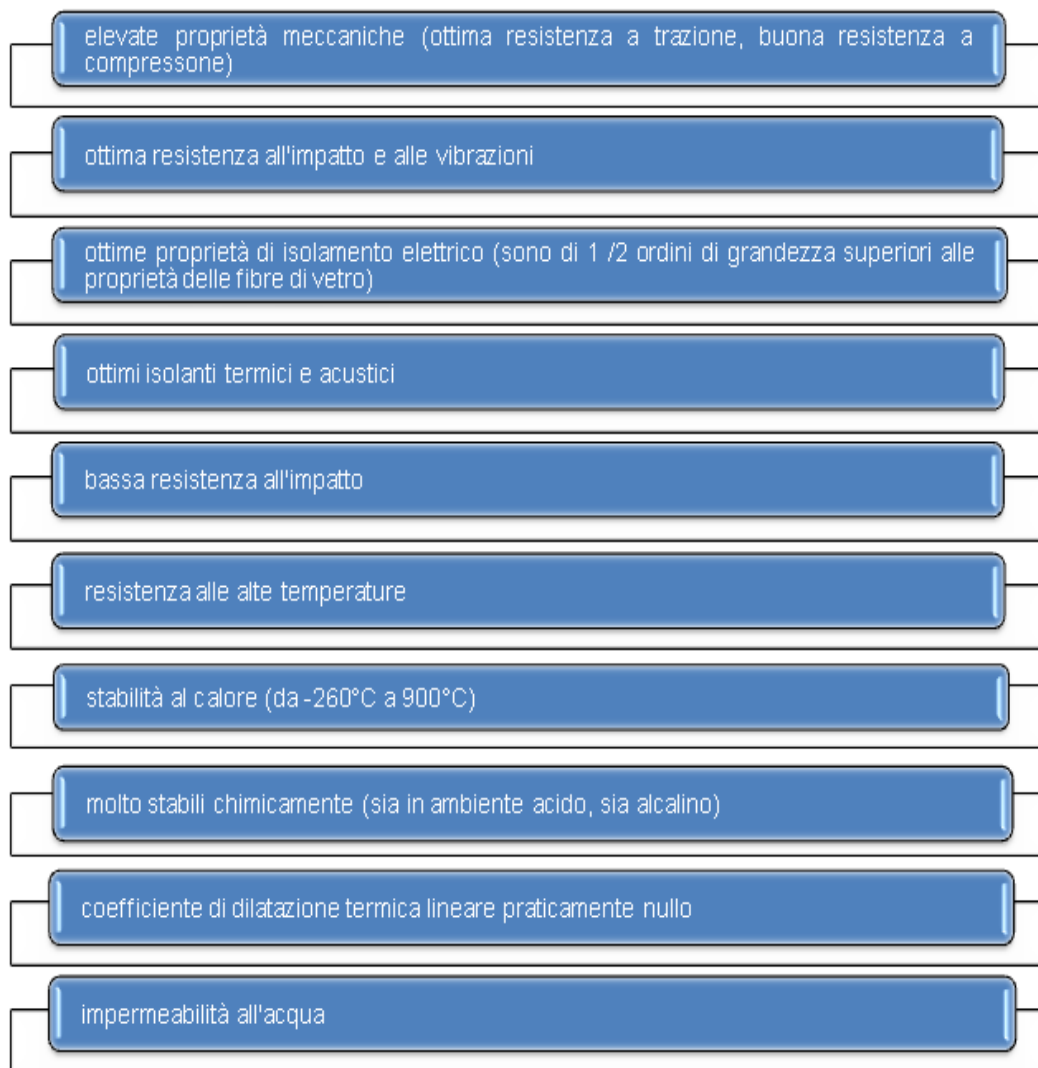
Il basalto è un miscuglio di ossidi di silicio, alluminio, calcio, magnesio, ferro e, in tracce, di altri elementi.

L'esatta composizione chimica della fibra di basalto dipende dal produttore e dalle percentuali in cui le diverse rocce basaltiche sono sciolte in un unico fuso, i dati in massa percentuale secondo la società Basaltex¹³ sono i seguenti:



¹³ Basaltex è una società belga, con molti anni di esperienza nell'utilizzo e commercio delle fibre di basalto, e tra le prime ad introdurre questa nuova fibra nel mercato europeo. Sito ufficiale: <http://www.basaltex.com>

Le caratteristiche principali delle fibre di basalto sono:



Le tecniche di produzione delle fibre di basalto sono simili alle tradizionali tecnologie per la produzione delle fibre di vetro, con la differenza che il precursore di partenza, il basalto, si presenta costituito dalla fusione di “unica materia” prima.

Per produrre la fibra di basalto è necessario portare la roccia oltre la temperatura di fusione (circa 1'400 °C) in modo da garantire una viscosità adeguata per la filatura; per fare ciò si adopera un fornace di materiale refrattario.

Il fuso è quindi estruso attraverso una matrice contenente più boccole in platino –rodio (“Bushing”) per produrre fili continui di basalto. Tali fili sono avvolti su una bobina, operazione che ha anche il compito di stirare le fibre in modo da ridurne il diametro ed aumentarne le proprietà meccaniche.

Benché abbastanza simili alle fibre di vetro le fibre di basalto presentano proprietà meccaniche superiori ma richiedono una temperatura più elevata per essere filate, rendendo il processo produttivo più energivoro.

Il vetro, essendo trasparente, garantisce un'uniformità di temperatura in tutto il bagno con il semplice utilizzo di bruciatori a gas che forniscono il calore dall'alto il basalto invece, essendo di colore nero, assorbe l'energia nell'infrarosso riscaldandosi solo superficialmente.

Questo determina disomogeneità di temperatura nel bagno ed implica la necessità di scaldare il bagno per molte ore per raggiungere condizioni di equilibrio termico.

Attualmente si è cercato di ovviare a questo problema utilizzando degli elettrodi immersi nel bagno di basalto fuso, impiegando dei forni ad arco.

Grazie, alle loro qualitative e poliedriche proprietà, queste fibre si prestano alla creazione di compositi utili in vari ambiti dal quello meccanico all'ingegneria civile:

COSTRUZIONI

- Rinforzo di ponti, gallerie
- Produzione di pannelli sandwich con fibra di basalto e fibra di carbonio-basalto
- Materiali per isolamento acustico e termico esterni ed interni
- Isolamento di giunti di test per pannelli
- Calcestruzzo rinforzato in modo sia direzionale che dispersivo
- Riparazione di crepe (healing), danni locali alle costruzioni, ponti, costruzione di edifici
- Casseforme riutilizzabili
- Tubi di scarico interni
- Costruzioni idrauliche

MATERIALI PER L'INGEGNERIA

- Condutture per cavi, sistemi telefonici protetti contro i campi elettromagnetici e fuga di informazioni attraverso la sorveglianza elettronica
- Guarnizioni e rivestimenti ad alta efficienza per tubazioni
- Pompe per fluidi aggressivi.

AGRICOLTURA

- Condotte di drenaggio dei terreni
- Tubazioni per irrigazione

SICUREZZA AMBIENTALE

- Schermi di protezione contro le radiazioni elettromeccaniche e read-out di informazioni
- Giubbotti antiproiettile di nuova generazione per la protezione individuale e collettiva
- Indumenti da lavoro a prova di fiamma e protettivi del calore
- Contenitori per lo stoccaggio di rifiuti altamente tossici
- Riscaldatori di basalto-carbonio per abiti, stanze, incubatori, ecc
- Contenitori per il trasporto di opere d'art.

NAUTICA e TEMPO LIBERO

- Scafi di imbarcazione vele
- attrezzatura sportiva

PRODUZIONE DI MACCHINE

- Contenitori ad alta resistenza di calore
- Macchine frigorifere
- Isolamento termico e acustico completamente incombustibile per le cabine, vani motore, carrozze della metropolitana, navi e aerei
- Circuiti elettromeccanici ed elettronici
- Pastiglie freno per automobili, aerei, carrozze della metropolitana e pullman
- Dischi frizione per autoveicoli
- Pale per generatori eolici

2.0.1.1.4 FIBRE D'ARAMIDE

Tra le più importanti fibre organiche ci sono le aramidiche¹⁴, il cui sviluppo è iniziato negli anni '50, dalla lavorazione delle poliammidi aromatiche.

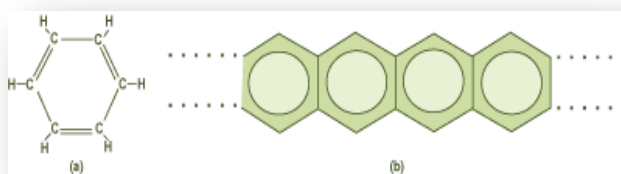


Le poliammidi sono macromolecole caratterizzate dal legame ammidico CO-NH, formalmente derivante dalla condensazione di un acido carbossilico e di un'ammina.

Da questi elementi dipendono molte proprietà di questo tipo di molecole.

Queste macromolecole possono avere una struttura lineare o contenere dei gruppi aromatici¹⁵ e la loro compagine dipende dal processo produttivo.

Si hanno poliammidi a catena lineare quando i legami tra gli atomi di carbonio e i vari gruppi funzionali si sviluppano lungo una linea.



(fig. "a") anelli aromatici di una molecola di poliammide

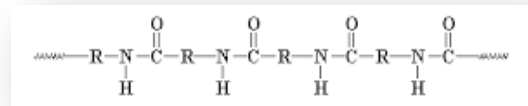
La presenza di anelli aromatici nella molecola di una poliammide (fig. "a"), comporta un incremento delle prestazioni meccaniche rispetto a quelle delle poliammidi lineari, in particolare, del modulo di elasticità.

Se il contenuto di anelli aromatici risulta maggiore dell'85% si parla di poliammidi aromatiche e, più propriamente, di aramidi.

¹⁴ Il termine aramide indica delle poliammidi aromatiche e deriva da aramid, contrazione dell'inglese ARomeric poly-AMIDes.

¹⁵ Anello aromatico: in chimica organica si intende una struttura formata da atomi di carbonio disposti ai vertici di un esagono con legami C-H a cui si dà il nome di benzene.

La fibra aramidica è costituita da **catene poliammidiche** sintetiche, nelle quali il 25% dei legami ammidici è attaccato a due cicli aromatici.



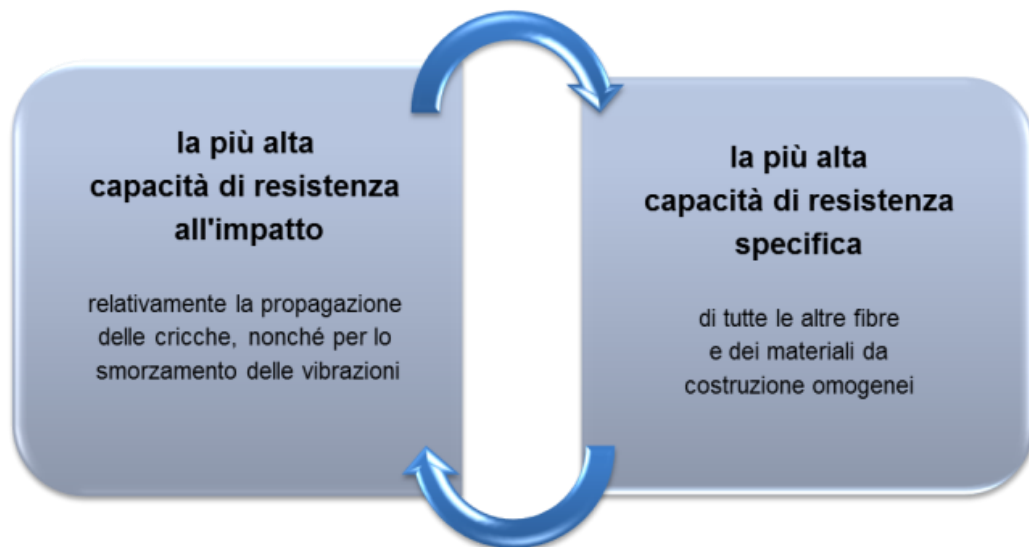
struttura chimica di una catena poliammidica

Il polimero di base si realizza partendo da una soluzione amminica mantenuta tra 5° e 10°C con aggiunta di acido cloridrico seguito da un rinvenimento delle catene polimeriche.

Con l'aggiunta di acido solforico si procede, infine, alla trafilatura attraverso una filiera tenuta ad alta temperatura.

I fili appena trafilati vengono investiti da getti di aria a cui fa seguito un bagno raffreddante in liquido coagulante tra 0° e 4°C.

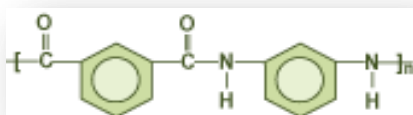
La fibra aramidica, grazie alla combinazione di ottimo peso specifico e di alta resistenza a trazione, presenta:



Le prime fibre aramidiche sono state prodotte negli anni '60 e sono quelle commercializzate dalla ditta Du Pont sotto il nome di **Nomex**.

Successivamente nel 1972, sempre la stessa ditta, ha commercializzato quella che diventerà la fibra aramidica più diffusa e adottata nei più svariati contesti applicativi il **Kevlar**.

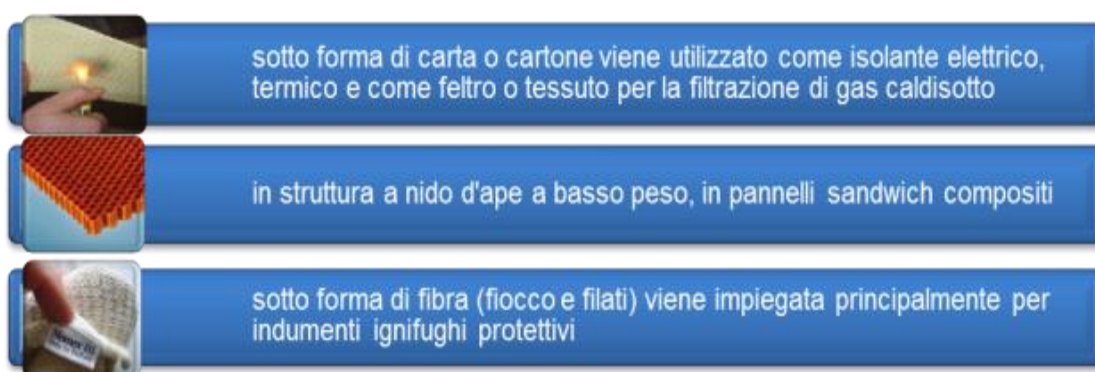
IL NOMEX



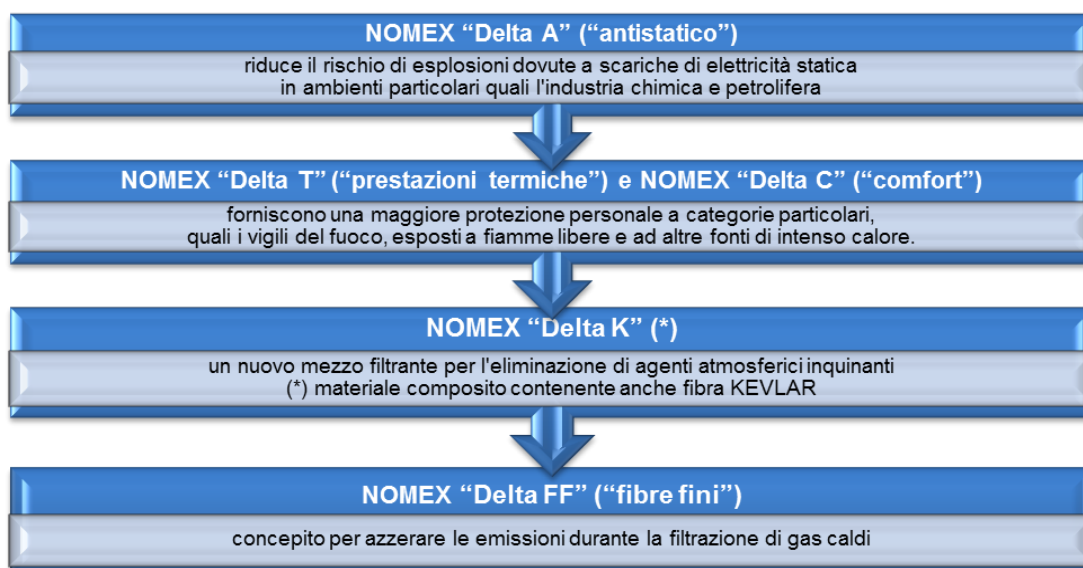
struttura elementare del Nomex

I compositi realizzati con questa fibra presentano una eccezionale resistenza al calore e alla fiamma, ed eccellenti proprietà di isolamento elettrico.

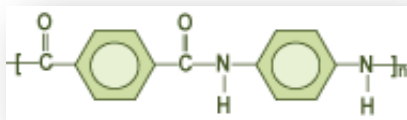
La disponibilità del prodotto in diverse forme: fiocco, filati, strutture laminari e cartoni con eccellenti qualità di resistenza al calore e alla fiamma e di isolamento elettrico, rende questo materiale ideale per vasta gamma di applicazioni:



In seguito, sono state sviluppate nuove generazioni di fibre con marchio NOMEX®, caratterizzate, inoltre, da proprietà antistatiche e da una maggiore resistenza all'usura e alla lacerazione:



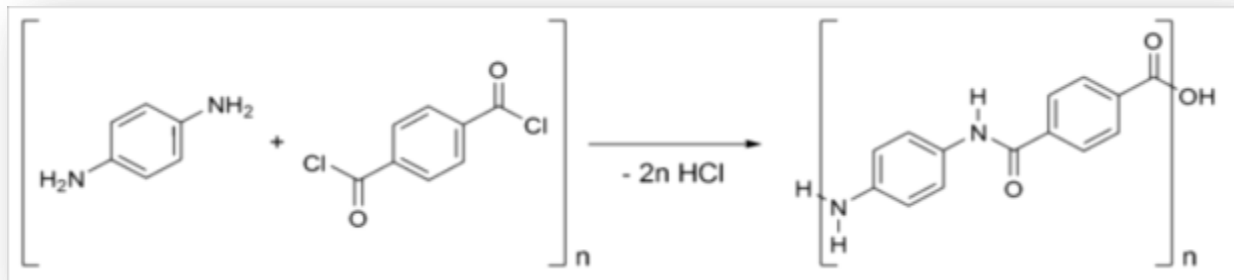
IL KEVLAR



struttura elementare del kevlar

Dopo la scoperta del Nylon, la Du Pont inventò la fibra a marchio Kevlar che rappresentò un importante sviluppo nel campo delle fibre sintetiche.

Dalla reazione tra la para-fenilendiammina ed il cloruro di tereftaloile si ottiene la catena polimerica nota con il nome di Kevlar.



Schematizzazione della formazione di un arammide: struttura di Kevlar

Esistono in commercio vari tipi di Kevlar che si differenziano tra loro sia per la struttura chimica (in particolare per la lunghezza delle diammine aramidiche utilizzate nei monomeri) sia per le prestazioni meccaniche, i più comuni sono il Kevlar 29 e il Kevlar 39. Recentemente è stata introdotta una nuova formulazione denominata Kevlar 149:

Materiale		Kevlar 29	Kevlar 39	Kevlar 149	Acciaio FeB 44K
Densità	Kg/m ³	1440	1450	1470	7850
Modulo elastico	GPa	70	140	160	210
Rest. mec. a trazione	MPa	3600	3600	3200	540
Deform. a rottura	%	3.6	1.9	1.5	20
Resistenza specifica	MPa/Kg	2.50	2.48	2.18	0.07

Le nuove applicazioni comprendono KEVLAR "EE" e KEVLAR "ER" in cui sono state migliorate ulteriormente caratteristiche come, per esempio, la colorazione, la tenacità, il modulo o l'allungamento aggiuntivo.

Il kevlar, dal caratteristico colore giallo-oro, offre ottime doti di leggerezza (il suo peso specifico è circa metà di quello del vetro) e una elevata resistenza a trazione unita a un contenuto allungamento a rottura.

Il processo di produzione di tali fibre è piuttosto complesso, prevedendo nel caso del Kevlar, estrusione in acqua di una pasta contenente il 20% di polimero in acido solforico (che presenta comportamento liquido-cristallino), neutralizzazione della fibra mediante NaOH, trattamenti termici e stiro.

Una caratteristica tipica del Kevlar è la modalità di frattura, che avviene per sfibratura (splitting) in microfibrille, quando viene sottoposto a trazione, e con la formazione di zone di schiacciamento (buckling) e di attorcigliamento (kinking), quando è sottoposto a compressione.

La bassa resistenza agli sforzi di compressione è il motivo per cui il suo uso per la realizzazione di compositi è sconsigliato nel caso di strutture soggette a carichi di compressione o, per carichi di flessione, nelle zone delle strutture soggette a compressione.

La tipologia di frattura del Kevlar, con la formazione di fibrille, consente invece la dissipazione di elevate energie di frattura, impartendo al composito elevata resistenza all'impatto.

Nel corso degli anni, questo tipo di fibra sintetica ha ricevuto miglioramenti notevoli in termini di resistenza meccanica.

Fin dall'inizio essa si dimostrò promettente rispetto all'acciaio, con resistenza meccanica doppia a parità di massa; con il tempo si è arrivati a prodotti ancora più resistenti, che offrono un rapporto di almeno 5:1 sull'acciaio.

Chiaramente questo riguarda la resistenza meccanica, ma non quella al logorio né tanto meno quella al calore: non esistono ingranaggi in kevlar, o parti di motore in tal materiale.

Se sottoposta a flessione l'aramide mostra un comportamento caratterizzato da una plasticità pressoché infinita nella zona compressa che consente all'asse neutro di "shiftare" verso il basso impedendo il raggiungimento del punto di rottura a trazione della zona tesa anche per deformazioni flessionali elevatissime.

L'elevata resistenza specifica delle fibre aramidiche le rende particolarmente indicate nelle applicazioni aeronautiche mentre la loro notevole resistenza all'impatto ne ha suggerito l'uso in particolari applicazioni militari.

Ad esempio, sono state realizzate in Kevlar parti delle corazze di alcuni carri armati leggeri, mentre sono realizzati in tessuti di Kevlar praticamente tutti i giubbotti anti-proiettili.

Nel settore delle costruzioni civili, l'aramide non trova grande impiego nel restauro delle strutture in cemento armato dove le fibre in carbonio provvedono, a parità di costi, un più alto modulo elastico e, quindi, maggiore capacità di assumere carichi e parità di deformazioni imposte alla struttura rinforzata.

L'impiego delle fibre in aramide è, per lo più, indicato nel rinforzo delle strutture in muratura dove un elevato modulo elastico non è necessario e, spesso, può costituire un problema.

La fibra KEVLAR viene commercializzata in forma di filamento, fiocco e nastri.

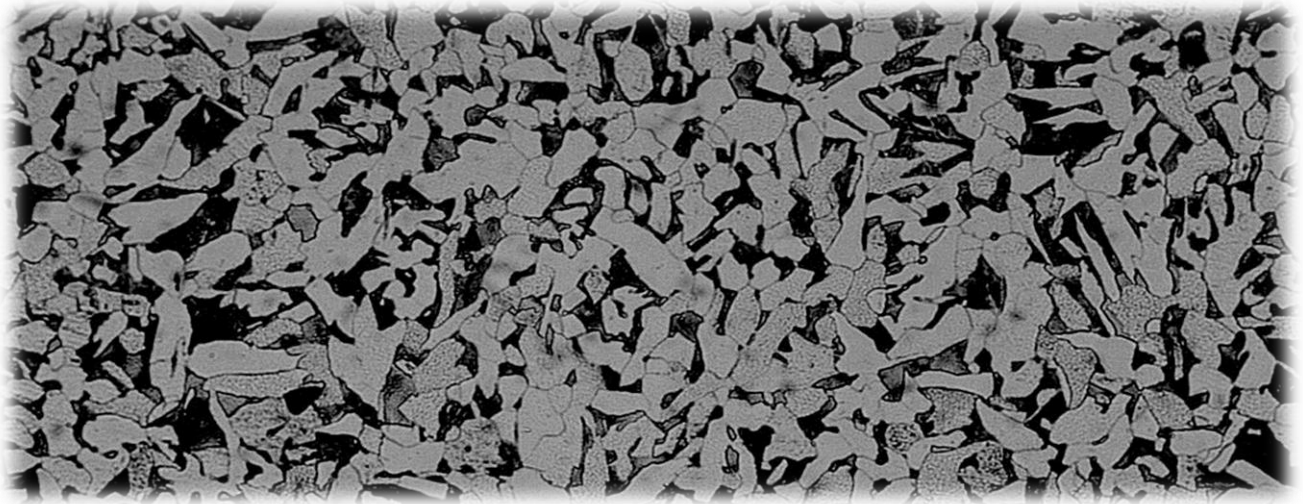


Nastro di tessuto in Kevlar

2.0.1.1.5 FIBRE D'ACCIAIO

Unitamente le fibre di basalto le fibre d'acciaio rappresentano un'altra tipologia di fibra che da pochi anni viene utilizzata per la realizzazione dei materiali compositi.

Acciaio è il nome dato a una lega composta principalmente da ferro e carbonio, quest'ultimo in percentuale non superiore al 2,11%: oltre tale limite, le proprietà del materiale cambiano e la lega assume la denominazione di ghisa.



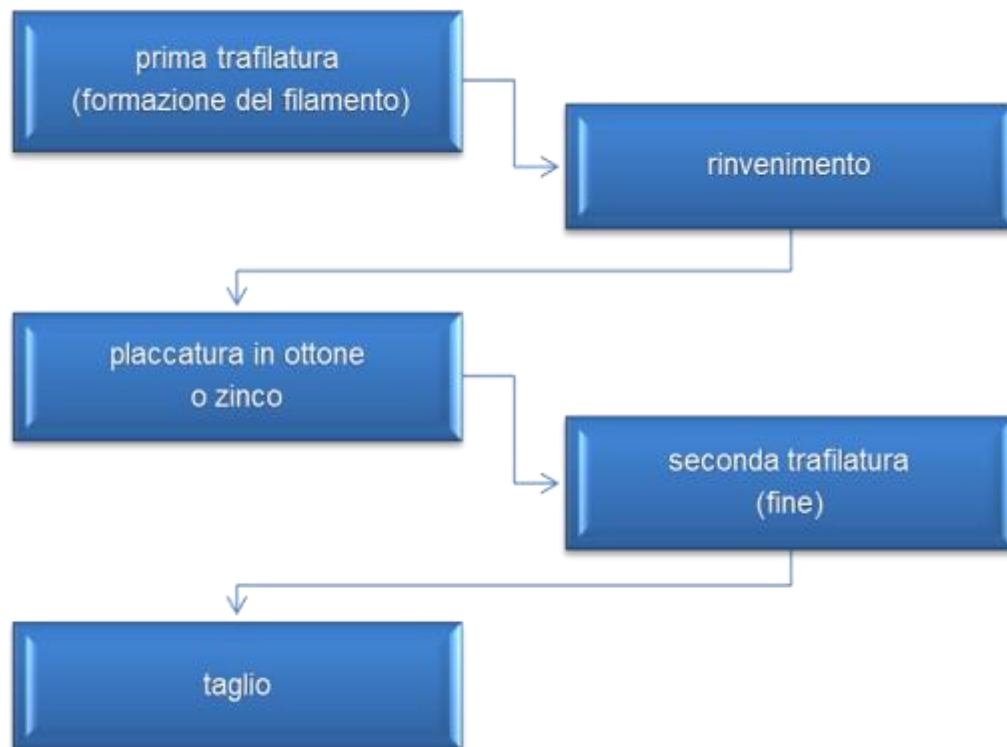
Il carbonio si presenta esclusivamente sotto forma di cementite o carburo di ferro, le particelle di cementite presenti nella microstruttura dell'acciaio, in determinate condizioni, bloccano gli scorrimenti delle dislocazioni, conferendo all'acciaio caratteristiche meccaniche migliori di quelle del ferro puro.

Esiste una classificazione dell'acciaio in base al tenore di carbonio:

extra dolci: carbonio compreso tra lo 0,05% e lo 0,15%
dolci: (*) carbonio compreso tra lo 0,15% e lo 0,25%
semidolci: carbonio compreso tra lo 0,25% e lo 0,40%
semiduri: carbonio tra lo 0,40% e lo 0,60%
duri: carbonio tra lo 0,60% e lo 0,70%
durissimi: carbonio tra lo 0,70% e lo 0,80%
extraduri: carbonio tra lo 0,80% e lo 0,85%

(*) gli acciai dolci sono i più comuni e meno pregiati

L'acciaio utilizzato come precursore nella produzione delle fibre d'acciaio per l'edilizia, derivante dall'evoluzione di un acciaio perlitico o ipereutetoidico (con contenuti di carbonio tra lo 0.8% e lo 0.96%) è sottoposto ad un processo che può essere riassunto:



La **scelta della tipologia d'acciaio** di partenza è responsabilità del progettista in funzione delle specifiche esigenze progettuali sapendo che:

è durante il processo di trafilatura a diametri così ridotti che si osservano quei mutamenti della microstruttura dell'acciaio, da cui è possibile ottenere dati sulle specifiche proprietà meccaniche.



la tipologia di trefolo dipende invece dall'esigenza, tipica dei materiali compositi, di garantire un'adeguata aderenza meccanica tra matrice ed elemento di rinforzo: è auspicabile, infatti, realizzare un composito in cui la rottura del rinforzo preceda il suo scorrimento nella matrice.



Definite le caratteristiche meccaniche della fibra è opportuno valutare il disegno della geometria del rinforzo. L'utilizzo di singoli fili di diametro ridotto causerebbe, a questo proposito, un'insufficiente resistenza all'interfaccia con la matrice.

Si ricorre pertanto a trefoli ottenuti dall'intreccio di più fili in strutture simili a corde, la cui geometria è tale da presentare una superficie corrugata che garantisce un adeguato valore dell'aderenza.

Le principali caratteristiche di queste fibre sono:



I principali impieghi del sistema di rinforzo in fibra d'acciaio in edilizia sono:

IMPIEGHI DELLE FIBRE D'ACCIAIO IN AMBITO EDILIZIO

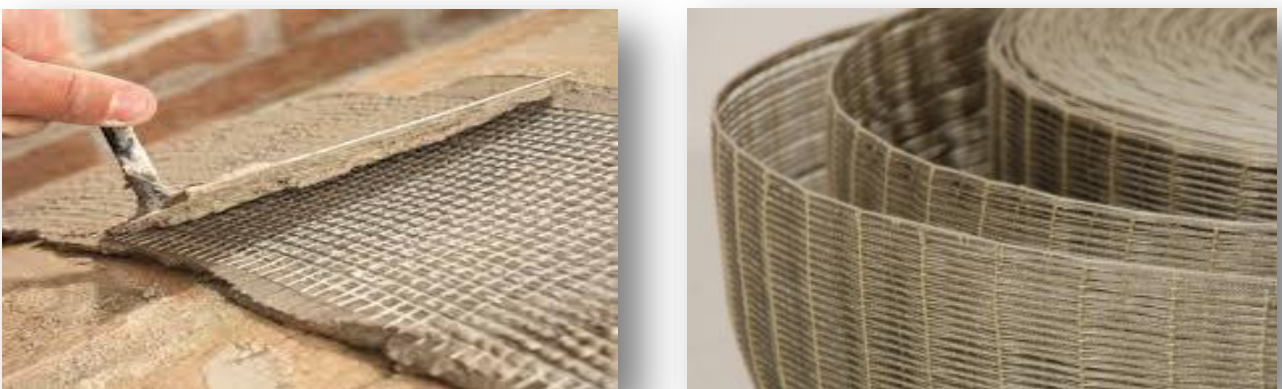
- rinforzo di elementi in calcestruzzo, c.a. e c.a.p. quali travi, pilastri,solai,muri di sostegno, superfici voltate (gallerie);
- incremento di resistenza di pannelli murari portanti, pilastri, archi, volte in muratura;
- rinforzo a pressoflessione e taglio di pannelli murari;
- confinamento di elementi strutturali;
- realizzazione di cordoli in muratura armata;
- collegamenti di elementi collaboranti alle azioni esterne anche a mezzo pretensionamento.

Le fibre sopradescritte sono prodotte e commercializzate in diverse forme al fine di andare a comporre materiali compositi utili nelle più diverse strutture, generalmente si commercializzano:

- **in filamento da trafilatura del filo d'acciaio** pronte per essere poi liberamente disperse in calcestruzzi e malte ad alta resistenza e a basso spessore



- **in tessuti e/o reti** per la futura combinazione con matrici cementizie e la realizzazione di sistemi di rinforzo strutturali compositi (FRG, SRG)



I tessuti in fibre di acciaio ad alta resistenza per il rinforzo strutturale sono composti da filamenti d'acciaio, caratterizzato da elevatissima resistenza meccanica.

I singoli fili sono prodotti in diametri dell'ordine di 0.20 - 0.48 mm, e nel complesso un trefolo (filato o composto da un' insieme di filamenti attorcigliati) ha dimensioni variabili tra 0.89 - 1.02 mm (quindi, tipicamente, meno di un decimo del diametro minimo di un trefolo da precompressione).

2.0.1.1.6 ALTRE TIPOLOGIE DI FIBRA (FIBRE NATURALI)

Negli ultimi decenni, la crescente attenzione verso l'ambiente e le specifiche richieste legislative riguardo alla salvaguardia dell'ambiente e il riciclo dei materiali, hanno fatto in modo che i ricercatori rivolgersero i propri studi verso lo sviluppo di materiali provenienti da fonti rinnovabili e facilmente recuperabili o degradabili alla fine della propria vita utile.

Ad esempio si è cercato, soprattutto in Europa, di sostituire i compositi di più largo uso (a base di resine epossidiche, fibre di vetro, carbonio e kevlar) di difficile smaltimento perché difficilmente separabili, con rinforzi meno invasivi per l'ambiente.

Le fibre naturali sono una rielaborazione in chiave bio-edile delle altre tipologie (più comuni) di fibre.

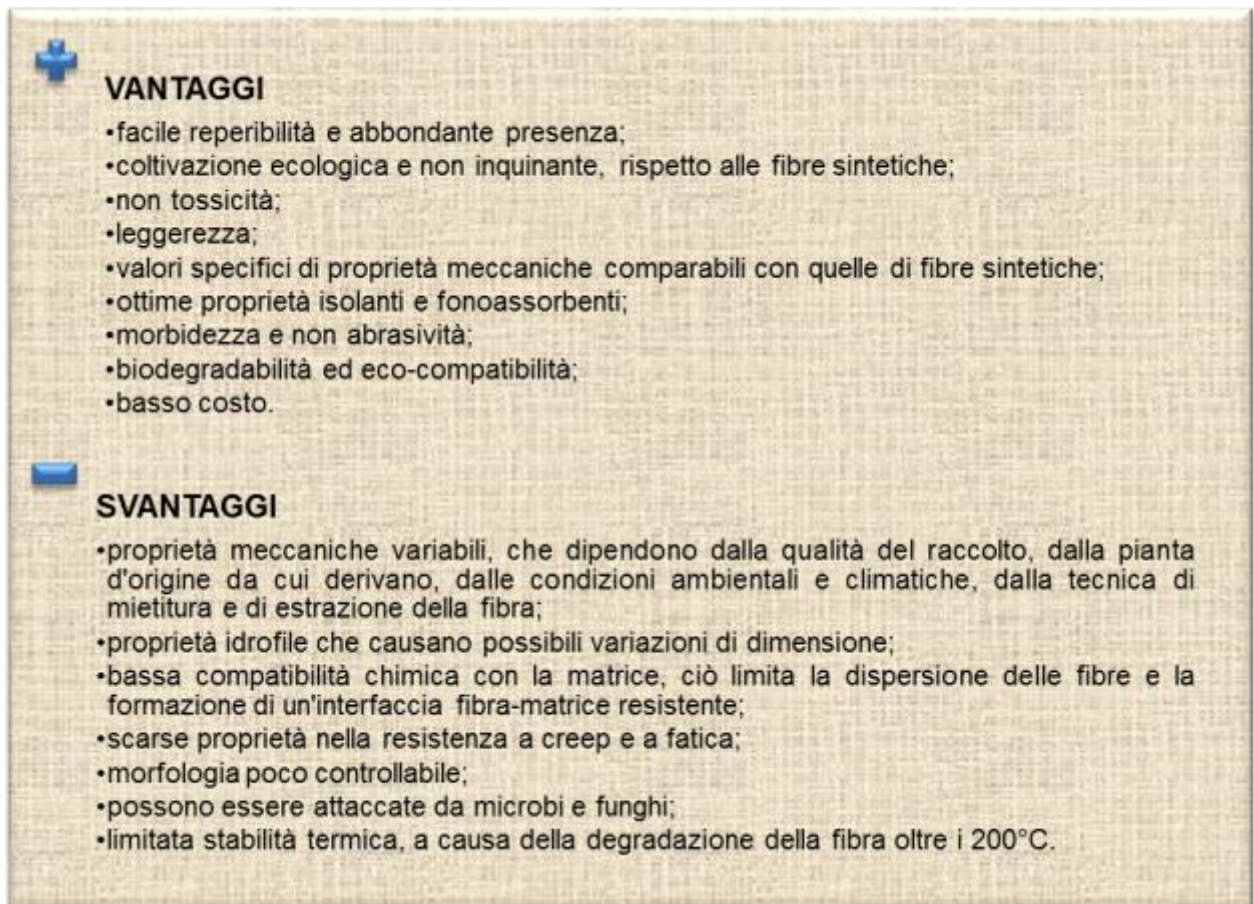
Possono anche essere considerate una rivisitazione delle fibre usate nell'antichità, ottenute prettamente da materiali comuni adattati all'utilizzo nei conglomerati cementizi e nelle malte (paragrafo 1.0.1.1).

Quelle odierne sono chiaramente ottenute attraverso un processo produttivo industriale, ma a partire da materie prime vegetali e rigorosamente senza l'utilizzo di additivi o solventi chimici.

Tra le fibre di origine naturale maggiormente utilizzate come rinforzo nei materiali compositi troviamo:



Le proprietà delle fibre vegetali si possono suddividere in vantaggiose e svantaggiose:



VANTAGGI

- facile reperibilità e abbondante presenza;
- coltivazione ecologica e non inquinante, rispetto alle fibre sintetiche;
- non tossicità;
- leggerezza;
- valori specifici di proprietà meccaniche comparabili con quelle di fibre sintetiche;
- ottime proprietà isolanti e fonoassorbenti;
- morbidezza e non abrasività;
- biodegradabilità ed eco-compatibilità;
- basso costo.

SVANTAGGI

- proprietà meccaniche variabili, che dipendono dalla qualità del raccolto, dalla pianta d'origine da cui derivano, dalle condizioni ambientali e climatiche, dalla tecnica di mietitura e di estrazione della fibra;
- proprietà idrofile che causano possibili variazioni di dimensione;
- bassa compatibilità chimica con la matrice, ciò limita la dispersione delle fibre e la formazione di un'interfaccia fibra-matrice resistente;
- scarse proprietà nella resistenza a creep e a fatica;
- morfologia poco controllabile;
- possono essere attaccate da microbi e funghi;
- limitata stabilità termica, a causa della degradazione della fibra oltre i 200°C.

C'è da specificare che la biodegradabilità oltre che un vantaggio può essere anche uno svantaggio se le fibre sono utilizzate in condizioni ambientali poco controllate.

Concludo l'argomento con un esempio di sperimentazione delle prestazioni raggiunte da alcune fibre naturali dimostratesi paragonabili, ed in alcuni casi migliori, di quelle delle fibre di vetro normalmente usate come rinforzi in numerosi compositi.

La sperimentazione nasce dal presupposto che le fibre di vetro presentano grossi limiti per quel che attiene lo smaltimento a fine vita prodotto in quanto la loro combustione rilascia in atmosfera grosse quantità di anidride carbonica che sembra essere una delle cause principali dell'effetto serra e dell'estensione dei cambiamenti climatici del pianeta.

Ad oggi si è già iniziato a sostituire i rinforzi in fibra di vetro con quelli in fibra naturale per lo più nelle applicazioni in compositi di natura "non strutturale", e in larga misura nelle aziende automobilistiche per i rivestimenti interne delle vetture.

2.0.1.2 ALCUNI CONFRONTI TRA LE DIFFERENTI FIBRE ANALIZZATE

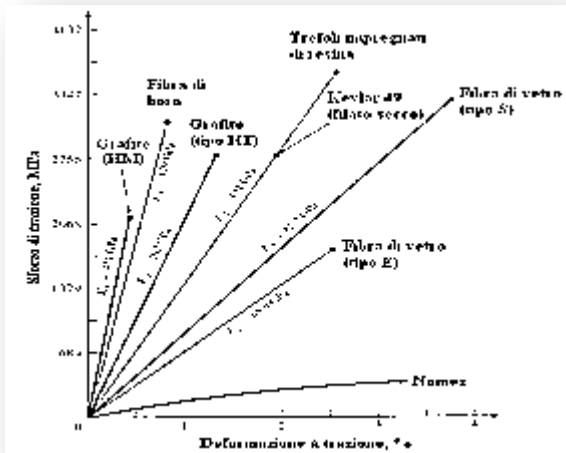


figura (a)

La figura (a) confronta i tipici grafici sforzo-deformazione per le fibre di carbonio, aramidiche e di vetro.

Le fibre di carbonio forniscono la migliore combinazione tra elevata resistenza meccanica, elevata rigidità (elevato modulo) e bassa densità, ma presentano una bassa capacità di allungamento.

La fibra aramidica Kevlar 49 ha una buona combinazione tra elevata resistenza a trazione, modulo elevato (ma minore di quello delle fibre di carbonio), bassa densità ed elevato allungamento (resistenza all'urto).

Le fibre di vetro, che presentano valori di densità più elevati, hanno resistenza a trazione e modulo elastico più bassi delle altre fibre. In pratica, però, le fibre di vetro sono molto più economiche delle altre per cui risulta anche le più impiegate.

La figura (b) confronta la resistenza a trazione sulla densità con il modulo elastico (rigidezza) di diversi tipi di fibre di rinforzo.

Questo confronto mostra gli eccezionali rapporti resistenza meccanica-peso e rigidità-peso delle fibre di carbonio e aramidiche (Kevlar 49) rispetto alle stesse proprietà dell'acciaio e dell'alluminio.

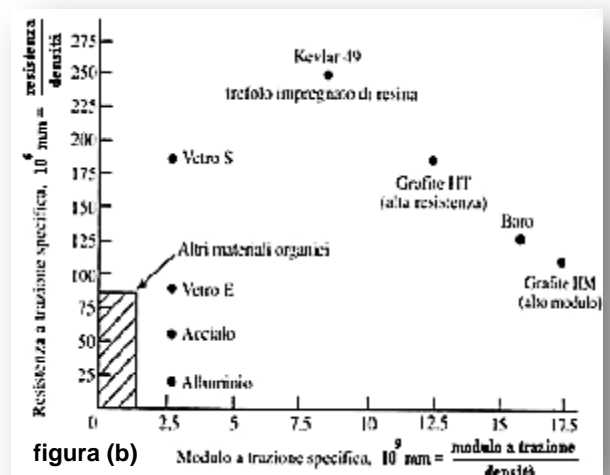


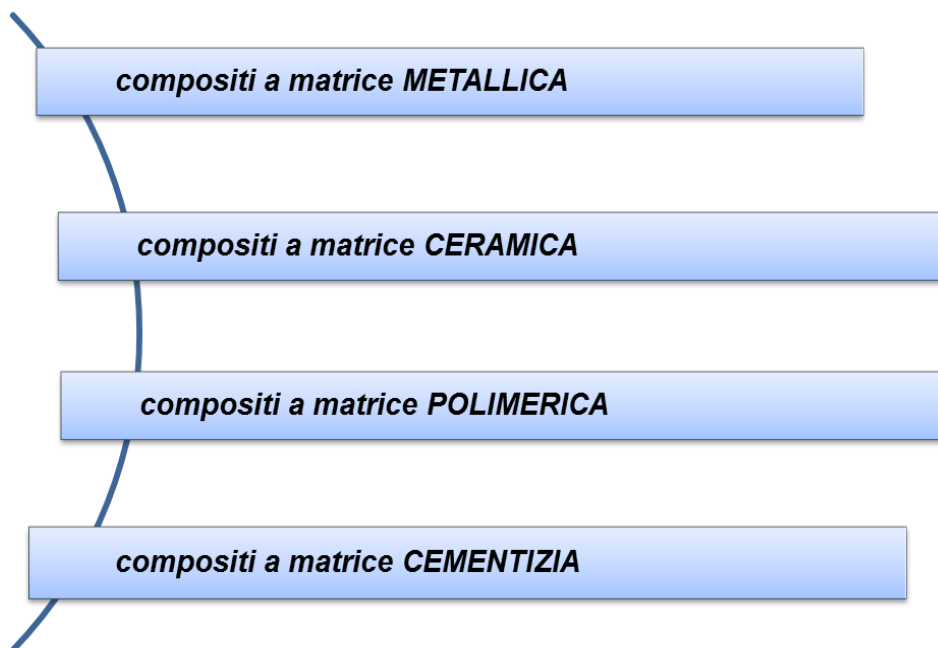
figura (b)

Grazie a queste proprietà favorevoli, i compositi rinforzati con fibre di carbonio ed aramidiche hanno sostituito i metalli in molte applicazioni aerospaziali.

2.0.2 CLASSIFICAZIONE IN BASE AL MECCANISMO DI “RESILIENZA”

2.0.2.1 TIPOLOGIE DI MATRICI

Seguendo una classificazione **relativa al tipo di matrice**¹⁶ di possono individuare le seguenti categorie:



¹⁶ Le classificazioni sono elaborate traendo il materiale da:

- Bertolini, L., Bolzoni, F., Cabrini, M., Pedferri, P., (2001), "Tecnologia dei Materiali. Ceramiche, polimeri e compositi", CittàStudiEdizioni (A cura di) Torino. Brigante, D., (2012), "Rinforzo strutturale con materiali compositi", Graffil (A cura di) Torino.
- Carotenuto, G., Giordano, M., Nicolais, L., (2014), "Materiali Compositi: sviluppi e prospettive" report di ricerca (A cura di) Università di Napoli. Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J., (2011) "Atlante delle Materie plastiche", Utet Scienze Tecniche", (A cura di) collana manuali Grande Atlante di Architettura, Milano.
- Mariani, M., (2016), "Sisma Emilia 2012 - Dall'evento alla gestione tecnica dell'emergenza" (A cura di) Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Regione Emilia-Romagna, Consiglio Nazionale degli Ingegneri, Federazione Ordini degli Ingegneri dell'Emilia-Romagna.
- Minguzzi, G., (1998), "Fiber Reinforced Plastics. Utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica in edilizia civile", Alinea Editrice (A cura di) Firenze.
- Viskovic, A., Bozzetti, A., (2014), "FRP e FRCM: le normative sull'impiego di materiali compositi e innovativi" report di ricerca (a cura di) membri della Commissione: materiali compositi e innovativi dell' Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.
- Frassine, R., (2000), "Tecnologie e proprietà dei materiali compositi" - Professore Ordinario del Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica del Politecnico di Milano, estratto della Docenza in Materiali polimerici e compositi, Promoplast srl (A cura di) su iniziativa di: Assocomplast
- Lenormand, Payen, Morland Jeunne, Laugier, Francoeur, Robiquet, Dfresnoy, ecc., (1845), "Supplemento al Nuovo Dizionario Universale Tecnologico o di arti e Mestieri", Giuseppe Antonelli (A cura di) Venezia.
- <http://www.assocompositi.it>
- [http://www.treccani.it/enciclopedia/ Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica](http://www.treccani.it/enciclopedia/Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)
- <http://www.mapei.com>

2.0.2.1.1 MATRICE METALLICA

I materiali compositi a matrice metallica (**MMC, Metal Matrix Composites**) si ottengono combinando:



La maggior parte dei rinforzi utilizzati non è di tipo fibroso bensì particellare, e le principali applicazioni si trovano nell'industria aerospaziale (componenti strutturali di velivoli e parti di turbine), nell'industria degli autoveicoli (dischi freno e componenti dei motori), nell'industria elettronica e nello sport.

Questo tipo è poco utilizzato per motivi insiti nell'introduzione delle fibre nella matrice, che naturalmente, deve essere allo stato liquido, ma anche ad una temperatura tale da non danneggiare le fibre stesse.

Altro problema è ottenere un'uniforme distribuzione delle fibre nella matrice, oltre ad un perfetto allineamento delle stesse.

La bagnabilità è uno dei requisiti più difficili da rispettare; spesso la matrice metallica non bagna completamente le fibre per cui si ha l'impossibilità a formare un composito.

Per migliorare la bagnabilità, ad esempio di fibre di carbonio, bisogna che i materiali metallici che formano la matrice, come il titanio, lo zirconio, il niobio, il tungsteno, ecc., concorrano alla formazione di carburi; tali carburi, in strato sottile, migliorano la bagnabilità ma possono danneggiare la superficie della fibra in modo notevole.

Il pericolo principale, comunque, risiede nella temperatura con cui la matrice arriva a bagnare la fibra; temperatura che in questo caso è elevata, creando così la possibilità di formare depositi intermedi che possano danneggiare le fibre stesse.

Nonostante queste difficoltà, l'industria aerospaziale ha interesse nello sviluppo di compositi a matrice metallica perché questi legano bene le caratteristiche di basso spessore specifico ed alta resistenza (matrici di alluminio, magnesio e titanio).

Il desiderio di strutture ad alta precisione e con elevata stabilità dimensionale per elementi da mandare nello spazio ha guidato lo sviluppo degli MMC:



La prima applicazione di successo di MMC rinforzato con fibre continue è stata una struttura tubolare fatta di Alluminio/Boro usata nella struttura di supporto nella parte centrale dello Space Shuttle Orbiter (circa il 1975).

Grazie all'applicazione di questi tubi di Alluminio/Boro si è ottenuto un risparmio in peso di circa 145 [kg] ovvero un risparmio del 44% rispetto una stessa struttura in Alluminio con un costo però di circa 1000 [US-\$/kg].

Un'altra applicazione MMC come Alluminio/Carbonio è stata nella "guida" dell'antenna per il telescopio spaziale Hubble fatta con fibre lunghe di carbonio P100 in matrice di Alluminio 6061.

Questa "guida" lunga 3,6 m , offre alta rigidità assiale e bassa deformazione termica così da mantenere la corretta posizione dell'antenna durante le manovre nello spazio. In oltre la struttura con sezione quadrata e tubolare provvede alla funzione di guida d'onda con l'eccellente conducibilità elettrica e facilita la trasmissione tra l'antenna e la nave.. Inoltre la presenza della matrice metallica garantisce un maggiore resistenza alla degradazione chimica sotto l'effetto delle radiazioni presenti nello spazio.



Tubi in Al/B centrale della fusoliera dello Shuttle

Antenna guida dell'Hubble in P 100/6061-Al

Telescopio Hubble in orbita attorno alla terra

2.0.2.1.2 MATRICE CERAMICA

I materiali compositi a matrice ceramica (**CMC, Ceramic Matrix Composites**) sono impiegati quando il composito deve essere esposto a temperature di esercizio molto elevate o in condizioni di attrito e usura molto severe.

Nei ceramici i legami costitutivi che legano assieme gli atomi di questi materiali, di tipo covalente o ionico e parzialmente covalente, sono estremamente forti, di conseguenza essi generalmente hanno un'alta refrattarietà ed inerzia chimica, un alto modulo elastico ed una notevole durezza, proprietà queste ultime che mantengono anche a temperature superiori ai 1000°C.

Gli stessi legami chimici che impartiscono le interessanti caratteristiche che abbiamo visto sono responsabili anche della loro fragilità.

Essi non permettono ai piani cristallini di scorrere gli uni rispetto agli altri e dunque non permettono al materiale di deformarsi plasticamente.

Di conseguenza i ceramici si rompono con un meccanismo tipico dei materiali fragili: improvvisamente, senza alcun preavviso, con la frattura che si propaga ad alta velocità nel manufatto.

Si desume quindi che per rendere un materiale ceramico affidabile bisogna o incrementare il valore del suo fattore critico di intensificazione dello sforzo o diminuire le dimensioni dei difetti in esso contenuti.

Lo scopo principale del rinforzo in questi materiali è quello di aumentare la tenacità e resistenza tipicamente ridotte della matrice ceramica.

La tipologia di rinforzo può essere sotto forma di fibre continue, fibre discontinue o particelle. In tutti i casi l'incremento di resistenza avviene grazie all'effetto di interruzione della propagazione delle cricche, arrivando a raddoppiare la resistenza del materiale a trazione.

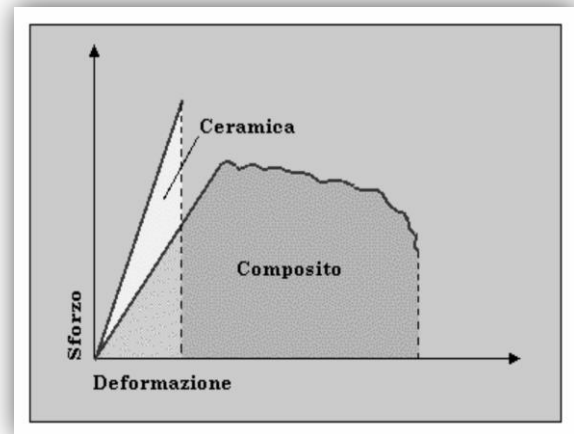
In tutti i casi l'incremento di resistenza avviene grazie all'effetto di interruzione della propagazione delle cricche, arrivando a raddoppiare la resistenza del materiale a trazione.

Mentre nel caso dei compositi a matrice polimerica si cerca di massimizzare i rapporti tra resistenza meccanica e densità e tra modulo elastico e densità, nei compositi a matrice metallica si cerca di incrementare il modulo elastico, nei compositi ceramici si vuol ottenere essenzialmente un aumento della tenacità della matrice.

Nella pratica, il miglioramento della tenacità si traduce solitamente anche in un incremento della resistenza, poiché viene ritardato o annullato il cedimento prematuro di tipo fragile, l'aggiunta di fibre o particelle di rinforzo, inoltre, può comportare anche un incremento del modulo elastico, anche se tale risultato è sensibilmente più ridotto rispetto ai compositi a matrice polimerica e metallica.

Il materiale cede alle sollecitazioni critiche in modo brusco: le fibre si staccano dalla matrice o subiscono frattura.

Nel diagramma a lato si possono osservare le curve sforzo-deformazione di un materiale ceramico e di un composito a matrice ceramica, l'area sottesa dalle due curve è proporzionale alla tenacità dei due materiali.



Si ammetta di aver scelto una matrice ed una "fase" capace di tenacizzarla: mettere assieme questi componenti e costruire un composito con difetti di piccole dimensioni non è semplice.

Mentre per i compositi a matrice polimerica e metallica la matrice può essere portata allo stato liquido o fluido, di conseguenza durante la reticolazione o il raffreddamento la quantità e le dimensioni dei vuoti sono piuttosto piccole, differente è il caso dei compositi ceramici: la matrice non può essere portata allo stato fuso perché o si decompone prima o le sue temperature di fusione sono tanto alte da farla reagire con la fase tenacizzante (tralasciamo il discorso delle difficoltà tecnologiche legate alla manipolazioni di fasi liquide con temperature superiori ai 2000°C).

L'unico mezzo per densificare la matrice è dunque il *processo di sinterizzazione*, questo implica che si deve partire da delle polveri alle quali va aggiunta una seconda fase che molto spesso è costituita da particelle con dimensioni di diversi micron e con forme allungate.

Il tutto poi deve essere portato ad alta temperatura per far partire il processo di sinterizzazione e la presenza di particelle di una fase estranea con dimensioni discrete circondata da particelle più piccole (matrice) che devono densificare dà luogo ad un sistema difficilmente sinterizzabile.

Le particelle più grandi si oppongono al processo funzionando da “*rigid inclusion*”, di conseguenza il materiale che si ottiene dopo “*cottura*” è a bassa densità e con una grande quantità di pori, quindi possiede scadenti proprietà meccaniche.

Si sottolinea che si è parlato di “*fase tenacizzante*” e non di rinforzo, diversamente da quanto fatto per altri tipi di i compositi ad esempio a matrice polimerica e metallica.

Per avere un discreto trasferimento degli sforzi dalla matrice al rinforzo il rapporto tra il modulo elastico di quest’ultimo e quello della matrice deve essere superiore a quattro.

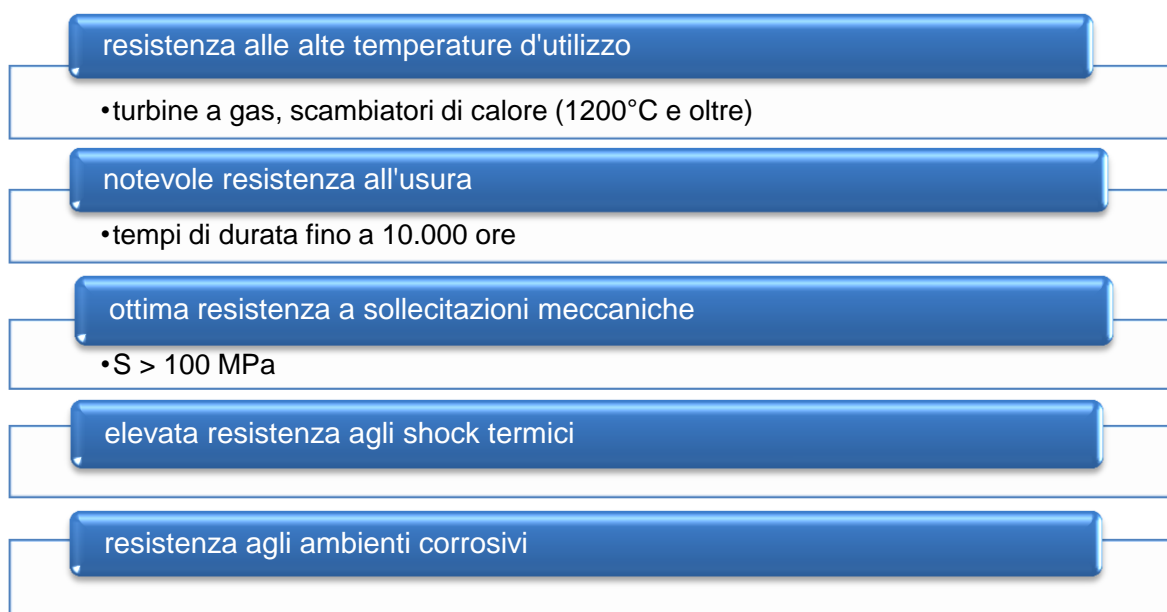
Tra i materiali ceramici non ci sono grosse differenze di modulo elastico e questo rapporto non è quasi mai raggiunto. Inoltre in alcuni casi vengono utilizzate anche inclusioni metalliche che hanno un modulo elastico inferiore a quello della matrice.

I compositi ceramici hanno stimolato gli studi della meccanica della frattura dei materiali fragili che ha fatto negli ultimi anni degli enormi passi in avanti; dal punto di vista tecnologico.

Pur non avendo la stessa diffusione dei compositi a matrice polimerica, essi si sono ritagliati alcune importanti nicchie di mercato nei seguenti campi: edilizia, dispositivi di conversione dell’energia, campo militare (corazze composite e dei proiettili perforanti).

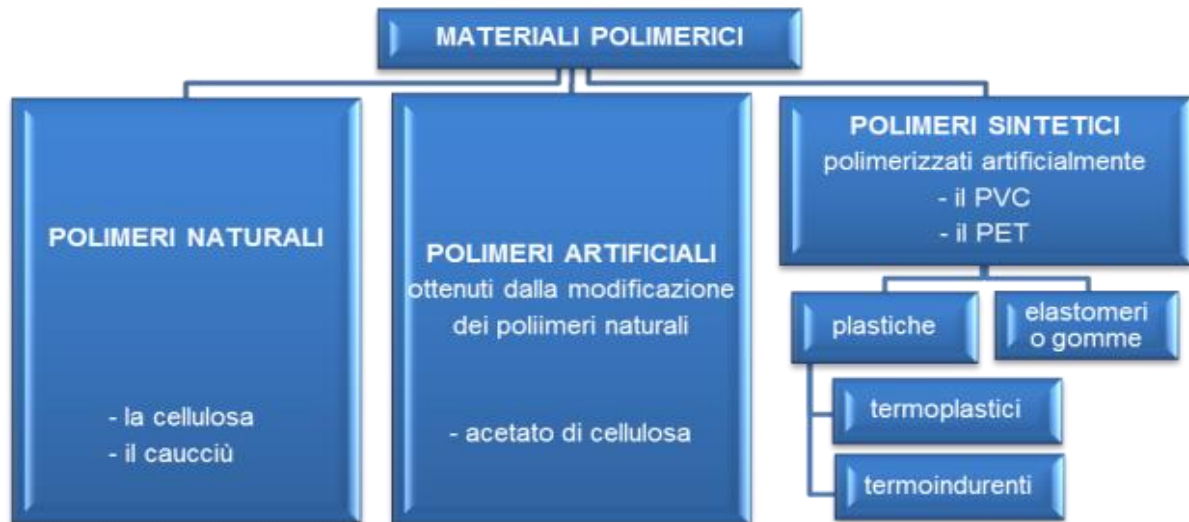
Utilissime sono le applicazioni nel settore aerospaziale: dischi di freni, barriere termiche, camere di combustione di motori a razzo o parti di post-bruciatori.

Le principali caratteristiche dei compositi in matrice ceramica sono:



2.0.2.1.4 MATRICE POLIMERICA

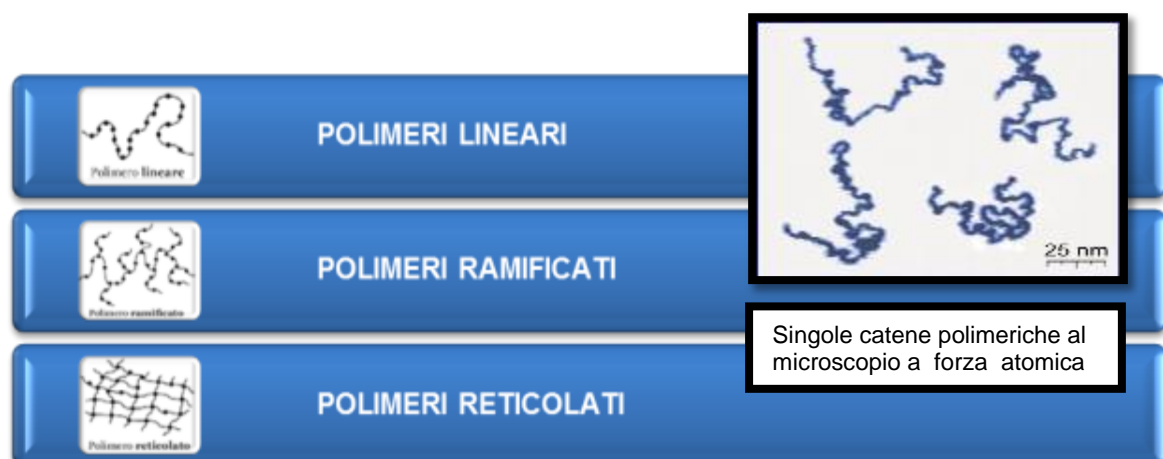
I compositi a matrice polimerica (**PMC, Polymers Matrix Composites**), detti anche plastici, sono quelli in cui la matrice è costituita da una matrice polimerica plastica.



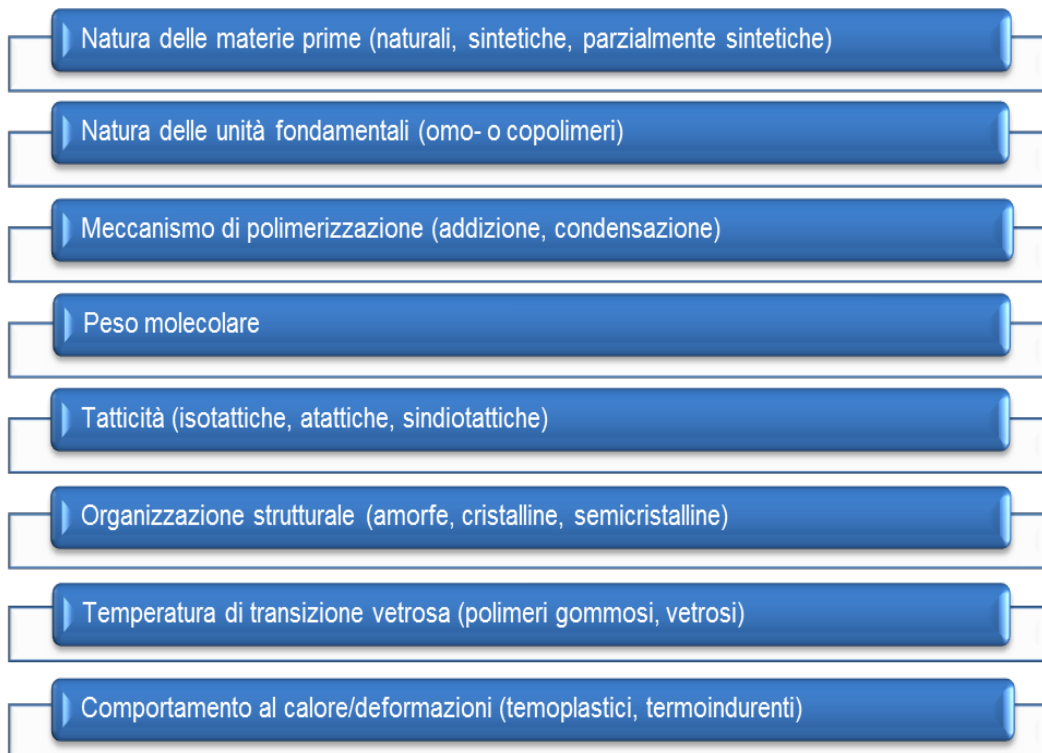
Per meglio comprendere la natura e le caratteristiche di queste matrici occorre inizialmente approfondire il concetto di polimero.

Un polimero (dal greco "che ha molte parti") è una macromolecola, ovvero una molecola dall'elevato peso molecolare, costituita da un gran numero di gruppi molecolari (detti unità ripetitive) uguali o diversi (nei copolimeri), uniti "a catena" mediante la ripetizione dello stesso tipo di legame (covalente).

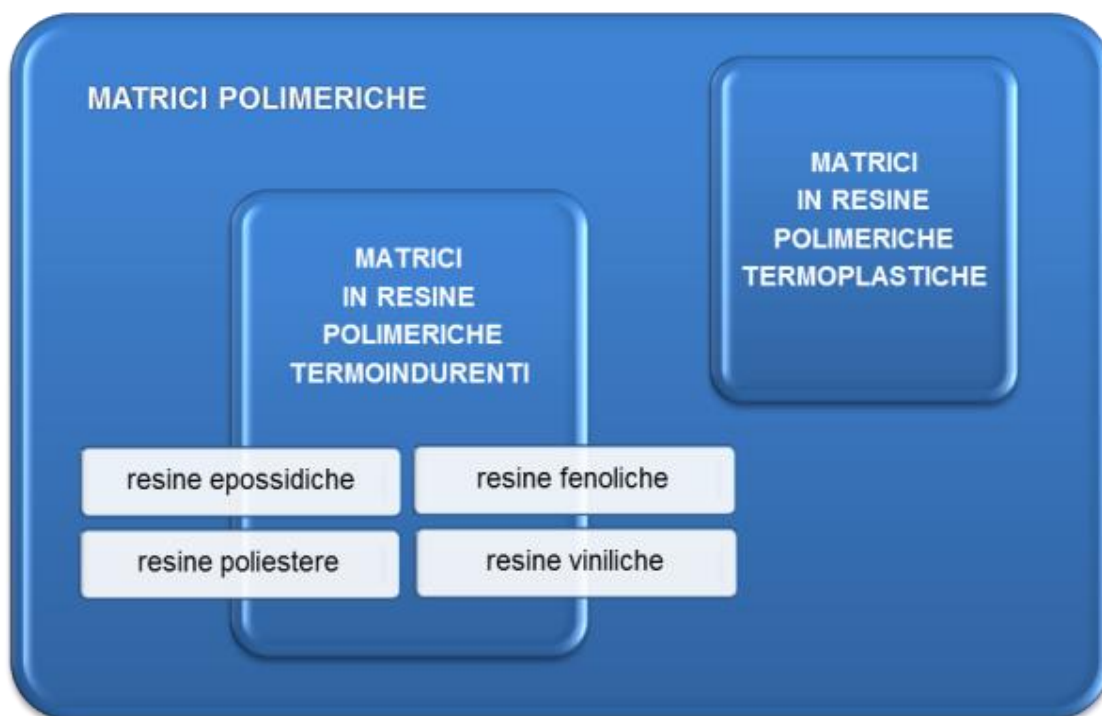
Al polimero, dall'aspetto di una lunga catena, possono legarsi delle ramificazioni in base alle quali segue un'ulteriore classificazione degli stessi:



Le matrici polimeriche possono essere classificate in funzione di diversi criteri :



Generalmente si suole raggruppare le matrici in relazione all' ultimo criterio, ossia vengono identificate due classi di matrici:



RESINE TERMOINDURENTI

Con il nome di termoindurenti si indicano una vasta schiera di materiali plastici che hanno in comune la proprietà di divenire infusibili ed insolubili dopo essere stati portati a fusione e successivamente raffreddati.

Tale caratteristica deriva dalla formazione a livello molecolare, dopo la prima fusione, di un reticolo tridimensionale tenuto insieme da forti legami covalenti i quali rendono irreversibile il processo.

Una prima classificazione di tali resine può essere fatta in base al campo di temperature alle quali le matrici dovranno lavorare:

temperature inferiori i 250°C

- **resine epossidiche:**

- sono le più importanti dato che risultano avere proprietà meccaniche migliori di altri polimeri, ottima adesione alle fibre, buona resistenza chimica, basso ritiro e quindi bassi valori di sollecitazioni residue, associate ad una notevole stabilità termica.

temperature tra i 150° ed i 250°C

- **resine epossidiche, le epossidiche standard e le cicloinfatiche:**

- queste matrici risultano le migliori per l'impiego con le fibre di carbonio poiché possiedono buone proprietà meccaniche oltre ad una buona resistenza a temperature elevate. In generale le resine epossidiche sono maggiormente usate in applicazioni aeronautiche e aerospaziali.

- **resine poliestere:**

- esse trovano un'ottima applicazione in unione alle fibre di vetro (vetroresina); le poliestere sono caratterizzate da un basso costo, da un breve tempo di polimerizzazione e da buone caratteristiche meccaniche. Esse sono utilizzate in applicazioni ferroviarie, marine, chimiche ed elettriche.

- **resine fenoliche:**

- assicurano le stesse proprietà delle resine epossidiche anche ad alte temperature. Gli svantaggi principali, di queste ultime, sono legati alla elevata pressione necessaria durante la polimerizzazione, all'alto contenuto di vuoti ed al caratteristico colore nero. Esse trovano impiego dove è richiesta una certa resistenza al fuoco.

temperature oltre i 250°C

- **resine viniliche:**

- queste matrici presentano le stesse peculiarità delle resine poliestere ma con un legame fibra-matrice più forte; contengono polimeri poliammidici che mantengono buone proprietà meccaniche nonostante le alte temperature di esercizio.

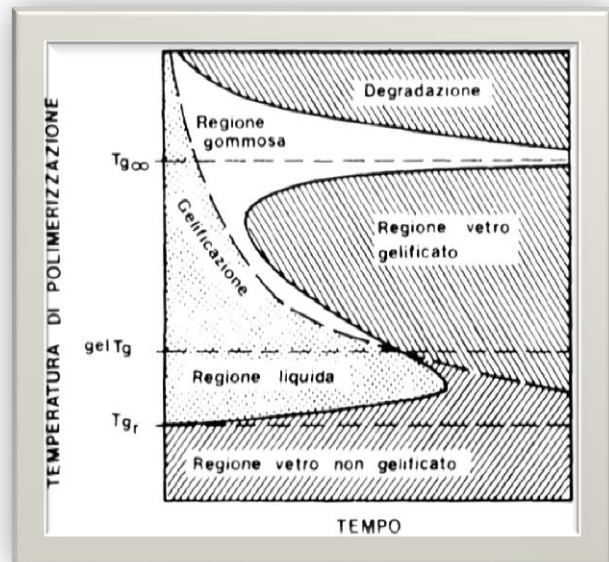
IL PROCESSO DI RETICOLAZIONE

Le matrici plastiche in resine termoindurenti si reticolano¹⁷ tramite un processo d'indurimento chiamato "curing" mediante il quale la resina allo stato fluido subisce una serie di trasformazioni passando per uno stato gelificato o gommoso sino a passare allo stato vetroso.

La figura a lato mostra il diagramma di stato generalizzato TTT (Time-Temperature-Transformation) ottenuto da esperimenti isotermici di un tipico processo che non coinvolge separazioni di fase.

Si vedano i quattro distinti stati del materiale (liquido, elastomero, vetro non gelificato e gelificato) che si incontrano durante il processo di "curing".

Diagramma TTT nel processo di "curing"



Nel processo di "curing" si possono evidenziare tre temperature critiche:

T_g^∞	•la temperatura massima di transizione vetrosa per sistemi completamente vulcanizzati
gel T_g	•la temperatura isotermica alla quale la gelificazione e la vetrificazione avvengono simultaneamente
T_g	•la temperatura di transizione vetrosa dei reagenti

Se un materiale è vulcanizzato isotermicamente sopra la T_g^∞ , il liquido gelifica per formare un elastomero ma non vetrifica in assenza di degradazione.

Una cottura isotermica ad una temperatura intermedia tra la $gel\ T_g$ e la T_g^∞ causa invece, prima la gelificazione e poi la vetrificazione. Se le reazioni chimiche sono smorzate dalla vetrificazione ne segue che la resina non sarà completamente polimerizzata.

¹⁷ Le reticolazioni sono processi chimici che vincolano le catene polimeriche da due estremità e le uniscono su piani differenti con diversi legami.

RESINE TERMOPLASTICHE

Si definiscono termoplastiche le resine a struttura molecolare lineare che durante lo stampaggio a caldo non subiscono alcuna modificazione chimica.

In questo tipo di resine le temperature di riferimento nel processo di reticolazione sono:

T_m e T_m'	• temperature di fusione
T_g	• temperatura di transizione vetrosa

Il calore provoca la fusione e la solidificazione avviene durante il raffreddamento.

E' possibile ripetere il ciclo per un numero limitato di volte poiché troppi riscaldamenti possono degradare le resine

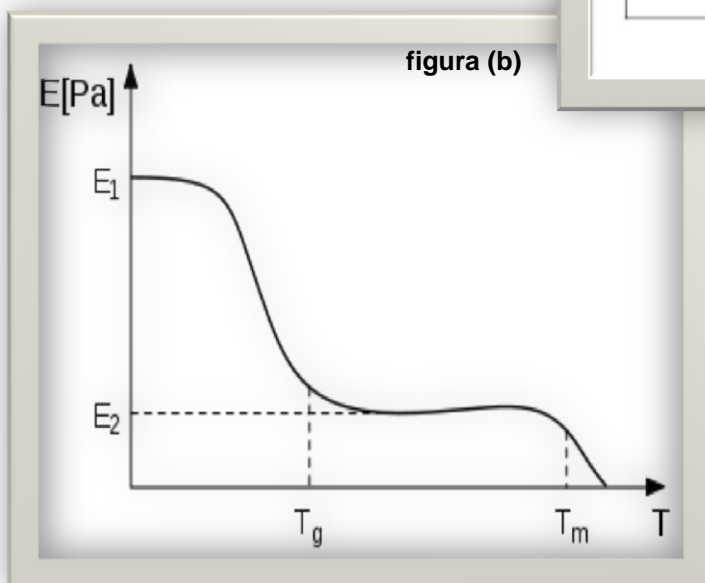
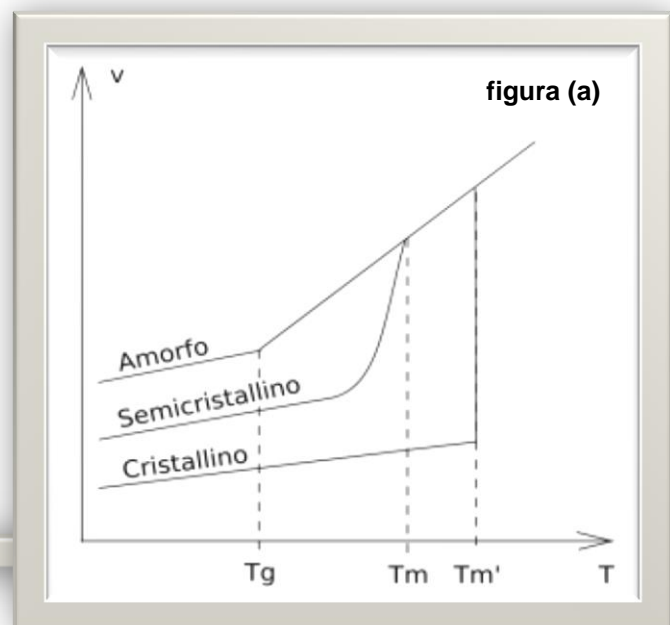



figura (a)

variazione del volume specifico in base alla temperatura per un materiale amorfo, semicristallino e cristallino.

figura (b)

temperatura di transizione vetrosa in un diagramma modulo elastico-temperatura.

In ragione delle temperature di fusione i polimeri possono essere suddivisi in due gruppi:



AMORFI: i polimeri amorfi sono composti da catene disposte casualmente e si caratterizzano per una transizione (temperature di transizione vetrose) durante la quale passano dallo stato fragile, tipico dei vetri a quello simile alle gomme. In tali polimeri la fusione del materiale non avviene ad una determinata temperatura; pertanto non esiste un preciso punto di fusione ma invece il materiale passa gradatamente dallo stato solido, attraverso quello viscoso, allo stato fluido. È durante questo intervallo che i materiali vengono lavorati e trasformati: il ritiro di stampaggio è contenuto fra lo 0,3% e 0,6%.



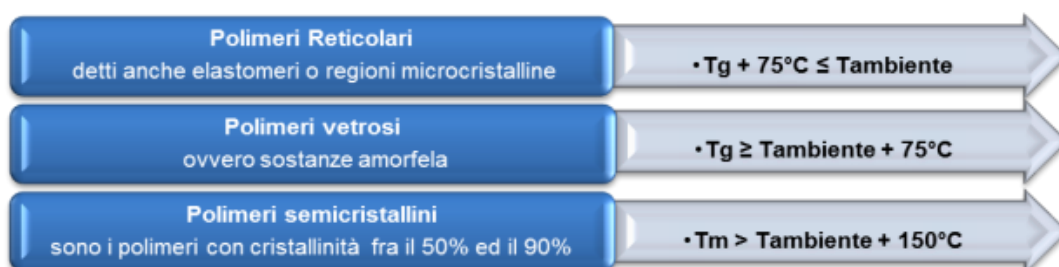
SEMICRISTALLINI: i polimeri semicristallini sotto la temperatura di fusione T_m , sono formati da regioni amorphe e cristalline. L'intervallo utile per la lavorazione è limitato a pochi gradi centigradi poiché al di sotto del punto di fusione il materiale è ancora solido mentre non è prudente superare di molto la temperatura di fusione dato che si possono innescare fenomeni di degradazione termica. Questi polimeri presentano ritiri molto più alti di quelli relativi ai materiali amorfi e si aggirano intorno all' 1% ed il 5%. Inoltre, rispetto ai termoplastici amorfi, sono materiali più resistenti all' attacco chimico (sostanze acide, basiche, solventi ecc...)

Le regioni amorphe si compattano come i polimeri amorfi, mentre le regioni cristalline, sono aggregati di cristallite, catene piegate, usualmente sotto forma di sferuliti.¹⁸

Le dimensioni degli sferuliti influenzano le proprietà meccaniche e di diffusione dei polimeri.

La percentuale di cristallinità, il numero e dimensione degli sferuliti ed il gradiente di cristallizzazione dipendono molto dalla temperatura di cristallizzazione e dalla orientazione macromolecolare durante la cristallizzazione.

I valori T_m e di T_g , in relazione alla temperatura ambientale permettono la seguente classificazione:



¹⁸ Sferuliti: aggregati radiali, rotondeggianti, di cristalli ad abito fibroso. Ogni singola fibra è costituita da un cristallo con una ben precisa orientazione cristallografica. Queste strutture sono un'alterazione caratteristica di alte temperature.

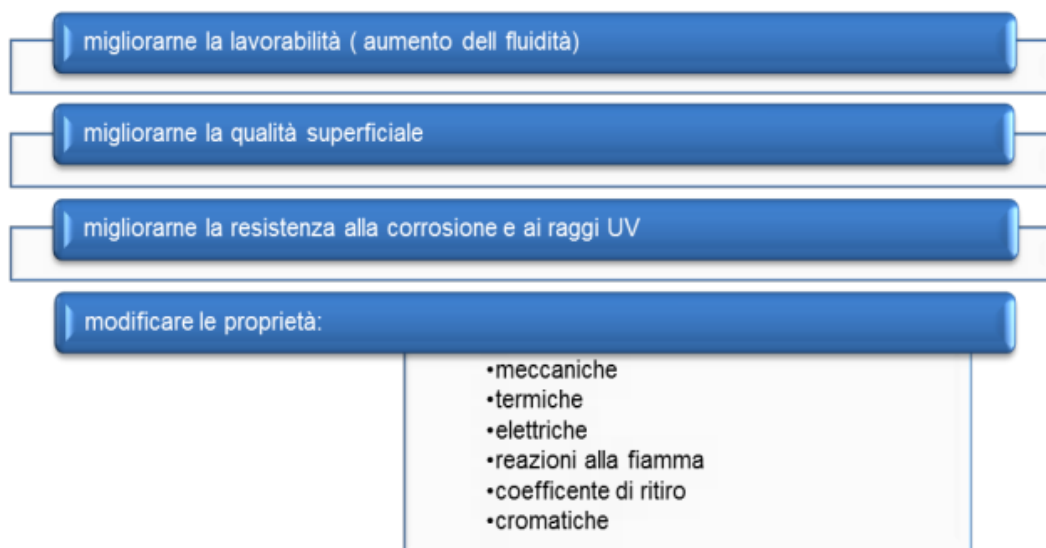
GLI ADDITIVI

Gli additivi sono sostanze utilizzate allo scopo d'incrementare le prestazioni dei materiali.

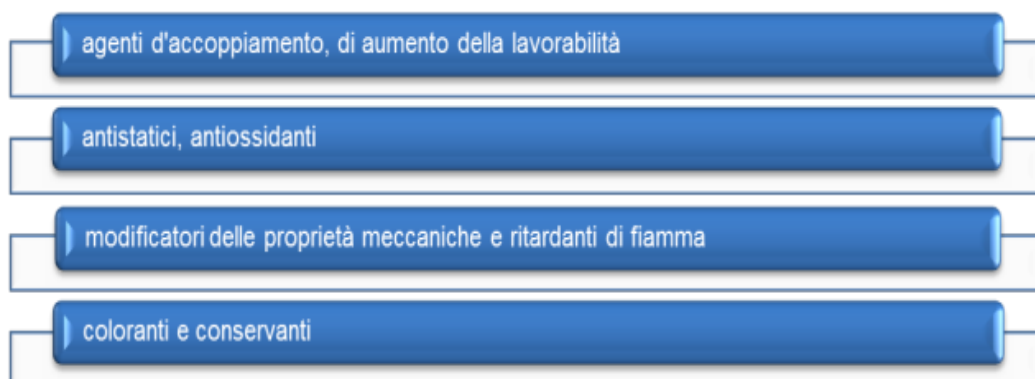
Ciascun additivo ha generalmente lo scopo d'intervenire su di una singola proprietà specifica, e per questo vengono utilizzati contemporaneamente più specie di additivi, compatibili tra loro, in grado di apportare le modifiche prestazionali desiderate.

L'utilizzo di sostanze additive è praticamente indispensabile per la maggior parte dei prodotti polimerici: senza di esse i polimeri risulterebbero, per uno o più motivi, sostanzialmente inutilizzabili.

L'uso di queste sostanze additive nella composizione della resina consente di:



All'interno del composito è fondamentale un giusto dosaggio degli additivi in quanto un apporto errato è in grado di ridurre e/o alterare completamente le proprietà di base dello stesso; generalmente la quantità massima di additivi non supera il 10% del peso complessivo del prodotto, tra i più utilizzati:



2.0.2.1.4 MATRICE CEMENTIZIA

I sistemi compositi con matrici inorganiche cementizie (**GMC, Grout Matrix Composites**) sono prodotti di recentissima immissione nel campo dei materiali compositi con fibre, quale risultato della ricerca tecnologica in ambito edilizio orientata a minimizzare gli effetti derivanti dai limiti intrinseci dei compositi a matrice polimerica.



I sistemi composti a matrici inorganiche sono quindi prodotti costituiti da:

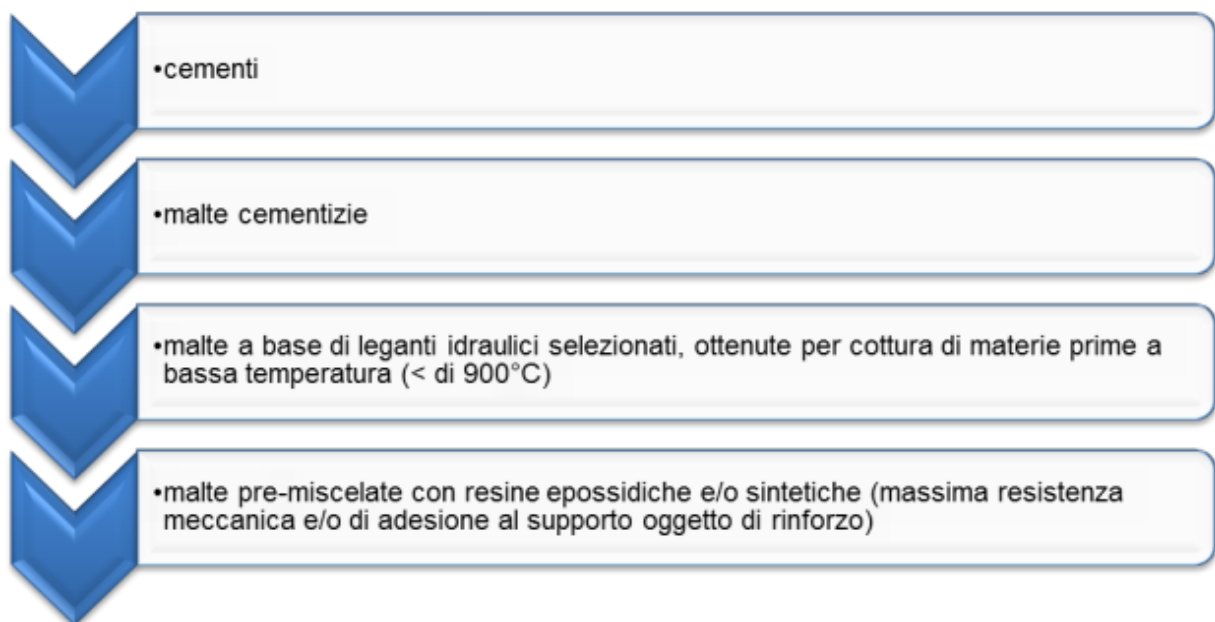


Per i sistemi a matrice cementizia non esiste una denominazione comune, come nel caso degli FRP, ed in letteratura scientifica spesso vengono individuati con acronimi differenti in ragione degli elementi costituenti il sistema composito finale.

Per comodità di descrizione e rappresentazione univoca del prodotto recentemente si è assunto come rappresentativo di questa nuova famiglia di compositi l'acronimo:



I leganti possono essere caratterizzati da differenti formulazioni chimico-fisiche in funzione delle caratteristiche meccaniche del materiale finale che si desidera ottenere, come tipici troviamo:



Nel panorama dei sistemi compositi, gli FRG, sono quelli che più si adattano all'impiego in edilizia, ad esempio come:

elementi di rinforzo strutturale di strutture portanti, da applicare esternamente o internamente.



armature di ripartizione aggiuntive per sollecitazioni anche di natura sismica, su elementi in calcestruzzo e/o muratura.



armature ri-solidarizzazione dei nodi strutturali quali ad esempio l'ammorsatura dei nodi travi-pilastro.



2.0.3 CLASSIFICAZIONE IN BASE AGLI “ELEMENTI COSTITUENTI”

In chiusura del capitolo 2.0 è possibile introdurre un’ulteriore classificazione dei materiali compositi in ragione degli **elementi costituenti il sistema**¹⁹ operando una selezione dei più utilizzati in edilizia a disposizione del progettista strutturale in base alle caratteristiche costituenti:



¹⁹ Le classificazioni sono elaborate traendo il materiale da:

- Brigante, D., (2012), “Rinforzo strutturale con materiali compositi”, Graffil (A cura di) Torino. Carotenuto G., Giordano M., Nicolais L., (2014) “*Materiali Compositi: sviluppi e prospettive*” (A cura di) Università di Napoli
- Mariani, M., (2016), “Sisma Emilia 2012 - Dall'evento alla gestione tecnica dell'emergenza” (A cura di) Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Regione Emilia-Romagna, Consiglio Nazionale degli Ingegneri, Federazione Ordini degli Ingegneri dell'Emilia-Romagna
- Minguzzi, G., (1998), “Fiber Reinforced Plastics. Utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica in edilizia civile”, Alinea Editrice (A cura di) Firenze.
- Frassine, R., (2000), “Tecnologie e proprietà dei materiali compositi” - Professore Ordinario del Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica del Politecnico di Milano, estratto della Docenza in Materiali polimerici e compositi, Promoplast srl (A cura di) su iniziativa di: Assocomplast
- Lenormand, Payen, Morland Jeunne, Laugier, Francoeur, Robiquet, Dfresnoy, ecc., (1845), “Supplemento al Nuovo Dizionario Universale Tecnologico o di arti e Mestieri”, Giuseppe Antonelli (A cura di) Venezia.
- Viskovic, A., Bozzetti, A., (2014), “FRP e FRCM: le normative sull'impiego di materiali compositi e innovativi” report di ricerca (a cura di) membri della Commissione: materiali compositi e innovativi dell' Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.
- <http://www.assocompositi.it>
- [http://www.treccani.it/enciclopedia/ Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica](http://www.treccani.it/enciclopedia/Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)
- <http://www.mapei.com>
- <http://www.resinproget.it>
- <http://www.kerakoll.com>

2.0.3.1 FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS O PLASTIC)

Con questo acronimo si usa definire materiali compositi costituiti da fibre (generalmente in carbonio o vetro) impregnate in matrice polimerica.

Fanno parte della categoria degli FRP tutti i prodotti ottenuti per pultrusione ovvero realizzati mediante un processo di impregnazione in continuo delle fibre con una matrice polimerica.

2.0.3.2 SRP (STEEL REINFORCED POLYMERS O PLASTIC)

L'acronimo SRP è utilizzato per definire quei sistemi compositi costituiti da fibre di acciaio in matrice polimerica.

Come gli FRP anche gli SRP sono caratterizzati da elevate prestazioni meccaniche, elevata distribuzione di carico tra le fibre ed elevate prestazioni di adesione al supporto determinate dalla presenza della matrice polimerica

Grazie alla loro tenacia ed all'elevata resistenza a taglio delle fibre di acciaio, questi materiali si rivelano particolarmente indicati per essere pretesi, mediante opportuni sistemi, ed ancorati tramite sistemi tradizionali senza doversi preoccupare di recidere la fibra.

2.0.3.3 FRG (FIBER REINFORCED GROUT)

Quando ad una matrice polimerica è preferita una malta l'acronimo FRP è sostituito dall'acronimo FRG.

Anche in questo caso come per gli FRP la fase fibrosa può essere costituita da fibre di carbonio, vetro o con differenti caratteristiche fisico-chimiche ma la matrice è sempre costituita da una malta che può essere cementizia o ad esempio a base di leganti idraulici selezionati, al fine di garantirne la piena compatibilità con le strutture da rinforzare.

Le malte possono essere inoltre miscelate con resine epossidiche o altre tipologie di resine sintetiche a seconda che sia prioritario garantire il mantenimento della massima traspirabilità del supporto (come nel caso di supporti murari) o garantire alte prestazioni meccaniche e di adesione al supporto, (come nel caso di rinforzi di strutture in CLS).

Nei materiali compositi FRG solitamente la fase fibrosa è costituita da reti bilanciate (trama e ordito si equivalgono) termosaldate ad esempio con filamenti di poliestere; tali reti presentano solitamente una maglia minima di otto millimetri per garantire il passaggio della malta di impregnazione da una parte all'altra del tessuto.

Nel caso di tessuti FRG spesso non si riesce a parlare di vera e propria impregnazione della fibre ma più precisamente le fibre vengono in gran parte inglobate nella matrice, ciò determina quindi una minore distribuzione di carico rispetto al caso degli FRP e richiede quindi un passo della maglia non troppo ridotto per evitare fenomeni di distacco dal supporto per de-laminazione.

I principali vantaggi dell'utilizzo degli FRG sono la maggiore resistenza alle alte temperature che non è vincolata alla temperatura di transizione vetrosa delle resine epossidiche che costituiscono la matrice degli FRP e SRP e la maggiore traspirabilità del supporto.

2.0.3.4 SRG (STEEL REINFORCED GROUT)

Quando le fibre che costituiscono un materiale composito tipo FRG sono le fibre di acciaio esso prende il nome di SRG.

I materiali compositi SRG, come gli FRG, garantiscono un'alta traspirabilità del supporto ed un'elevata resistenza alle alte temperature e come gli SRP possono essere ancorati tramite sistemi tradizionali senza doversi preoccupare di recidere la fibra.

Gli SRG a differenza dei compositi tradizionali sono in grado di realizzare un presidio attivo nel rinforzo di strutture murarie pretensionando il sistema in opera.

Anche in questo caso come per gli FRG il principale svantaggio è legato alle prestazioni meccaniche, alla distribuzione di carico tra le fibre ed alle prestazioni di adesione al supporto che risultano inferiori di quelle dei compositi a matrice polimerica.

Come detto sopra il sistema è in grado di garantire resistenza alle alte temperature, nonché un contributo portante, anche in caso di incendio, per un tempo significativamente più grande rispetto ai compositi tradizionali.

Inoltre gli SRG sono traspiranti, potendo essere impiegati con una matrice a base di leganti idraulici, si caratterizzano per la elevata permeabilità.

La loro applicazione non altera in nessun modo il comportamento originario della struttura ed è in grado di mantenere i contenuti di acqua nella parete, all'interno dei naturali limiti di variabilità della struttura.

Tali vantaggi rendono l'intervento di rinforzo strutturale maggiormente compatibile con le strutture murarie e quindi ben visto dalla Soprintendenza per Beni Architettonici e per il Paesaggio.

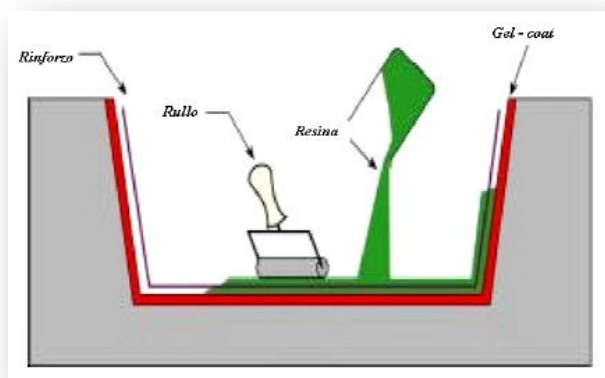
3.0 PROCESSI E PRODOTTI COMPOSITI

3.0.1 TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE

Le proprietà finali dei materiali compositi oltre che dalle specifiche proprietà dei costituenti, rinforzo e matrice, sono intrinsecamente legate alle tecniche di fabbricazione dei semiprodotti e dei prodotti finali.

Non basta, perciò, limitarsi a scegliere i tipi di materiali, bensì sarà di fondamentale importanza ponderare le tecniche di associazione dei singoli componenti al fine di garantire la qualità del prodotto.

Questa prerogativa si esplica appieno quando il prodotto realizzato risponde alle proprietà fisiche e meccaniche cui si mirava in sede di progettazione.



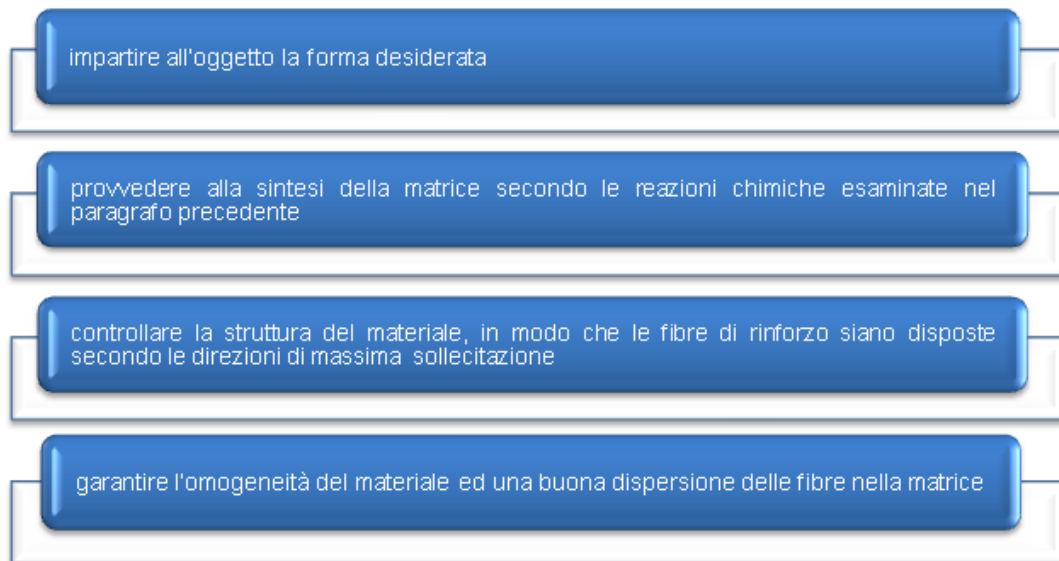
La coesione inter-laminare è connessa all'assenza di bolle d'aria ottenuta durante la formatura del materiale composito, si comprende che l'efficacia reale del sistema composito è direttamente proporzionale al livello di qualità della lavorazione e/o posa in opera dello stesso.

Nella pratica, all'attenzione sulla qualità della realizzazione del sistema, si somma lo sforzo mirato ad ottenere strutture in materiale composito che presentino costi totali inferiori rispetto a quelli richiesti dalle corrispettive soluzioni progettuali strutturali, realizzate con le modalità costruttive tradizionali.

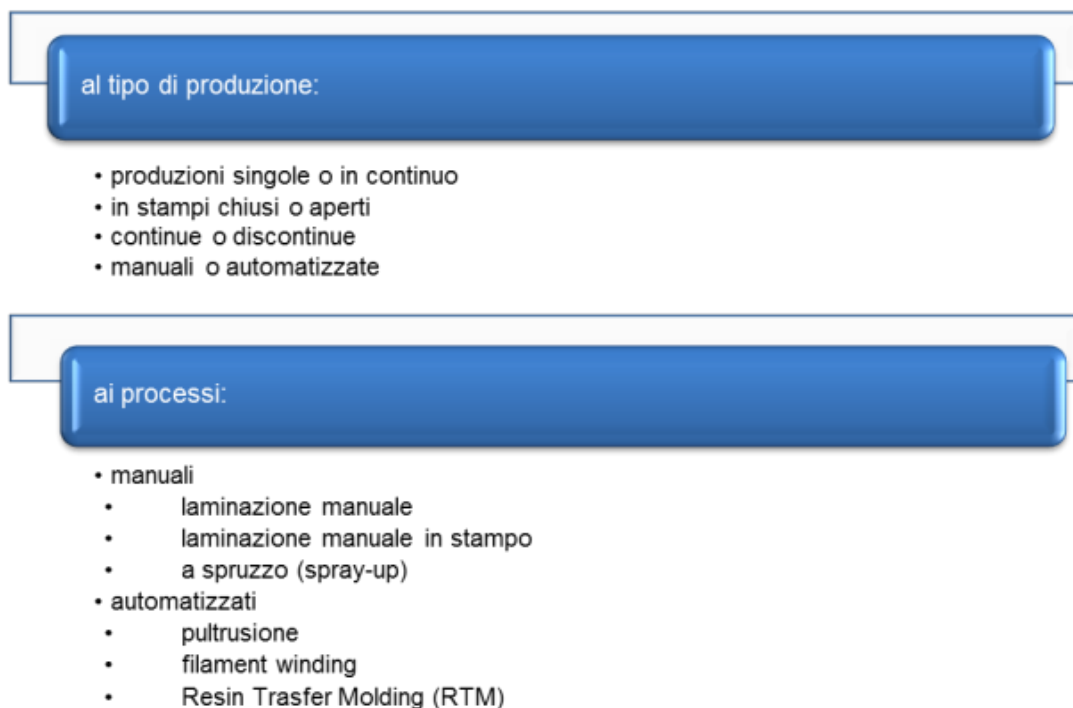
Anche la forma del materiale incide in maniera notevole sul costo finale, per cui è molto importante valutare se realizzare tessuti, fogli, nastri o quanto altro possa incarnare la soluzione economica più vantaggiosa.

È possibile ottenere materiali con caratteristiche fisico-meccaniche elevatissime, in ragione di elevate inclusioni in matrice di notevoli quantità di fibre di rinforzo, così come è altresì possibile ottenere elementi con caratteristiche meno elevate ma con costi di produzione notevolmente ridotti.

La tecnologia di trasformazione del materiale in manufatto deve consentire di svolgere le seguenti operazioni fondamentali:



Numerosi sono i processi e le tecnologie afferenti relativi alla fabbricazione di sistemi od elementi in materiale composito, non potendo dedicare una trattazione soddisfacente per tutte le possibili tecniche ho deciso di rivolgere l'attenzione a quelle più diffuse in base:



3.0.1.2 PROCESSI MANUALI

3.0.1.1.1

LAMINAZIONE MANUALE "A FORMA LIBERA"



Questo processo, tuttora il più largamente diffuso per la produzione e posa in opera di compositi per superfici ampie in ingegneria civile quanto per la produzione di elementi singoli di ampia superficie quali scafi per barche e piscine. Nel caso dell'ingegneria civile il supporto d'applicazione sono le murature o gli elementi in c.a.; inizialmente il rinforzo in fibra viene imbevuto di resina catalizzata successivamente consolidato manualmente con l'eliminazione della resina in eccesso utilizzando per mezzo di rulli in metallo o plastica.

3.0.1.1.2

LAMINAZIONE MANUALE "IN STAMPO"



In questo processo di produzione la laminazione avviene, in uno stampo aperto; nello stampo viene applicata una mano di gel come da rivestimento, successivamente vi vengono tese le fibre di rinforzo, in forma di mat, tessuto o stuoia in percentuali di progetto infine chiude il processo l'applicazione, della matrice in resina pre-miscelata e la stesura a rullo.

3.0.1.1.3

PROCESSO A SPUZZO "SPRAY UP"



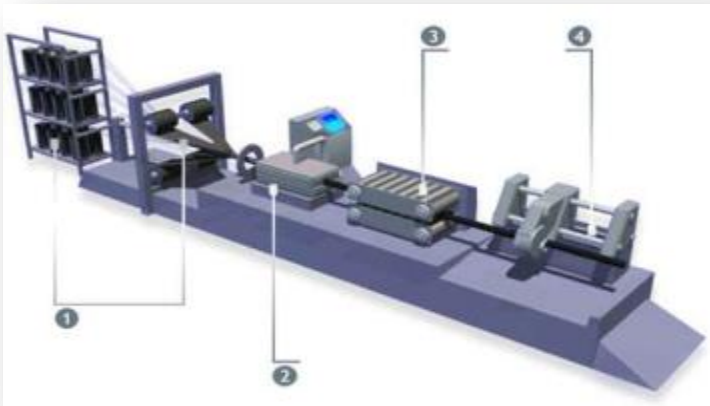
Una variante molto usata alla laminazione manuale è la tecnica di spray-up (processo a spruzzo) che consiste nello spruzzare contemporaneamente resina e fibre corte tagliate da una apposita taglierina. Questa tecnica è usata per la realizzazione di pre-forme, cioè parti semilavorate del pezzo finale, e per la posa in opera di cementi fibrorinforzati ad esempio con fibre d'acciaio.

3.0.1.2 PROCESSI AUTOMATIZZATI

3.0.1.2.1 PULTRUSIONE

La pultrusione, un processo automatico e continuo per la fabbricazione di materiali plastici rinforzati con fibre, è uno dei processi più economici per la fabbricazione dei materiali compositi.

Questo processo è un sistema integrale che comprende una macchina per trazione dei profilati, un forno a tunnel, uno stampo riscaldato, una vasca preriscaldata di impregnazione della resina al fine di ridurre il picco iniziale di viscosità, un essiccatoio per le fibre, il cui scopo è quello di favorire l'adesione tra le fibre e la resina, ed eventualmente una camera di post-polimerizzazione.



La figura mostra lo schema di una macchina per la pultrusione; in essa sono evidenziati, oltre ai già citati elementi, guide per il trasporto e la predisposizione delle fibre, le bobine di fibra (cantra), ed un utensile per il taglio dei pezzi.

Legenda schema macchina per pultrusione:

1. cantra
2. impregnazione preformatura, formatura per trafilatura, e polimerizzazione
3. puller o tiro
4. unità di taglio e post formatura

Con la tecnologia della pultrusione è possibile produrre profilati rettilinei in materiale composito che abbiano sezione di forma qualunque.

A lato un immagine di alcuni esempi di sezioni realizzate con la tecnica della pultrusione.

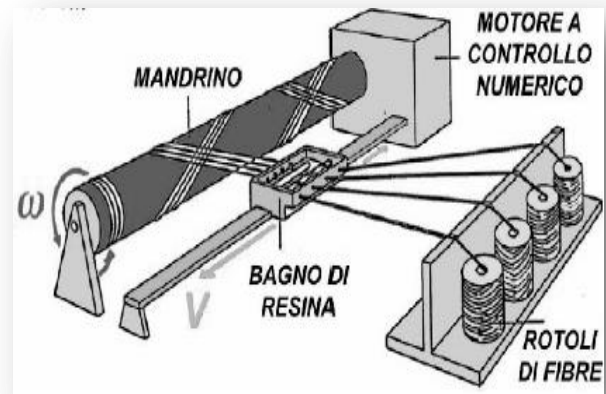


3.0.1.2.2 FILAMENT WINDING (FW)

Unitamente al processo di pultrusione, è tra le lavorazioni automatizzate più diffuse nella realizzazione dei materiali compositi; consiste nell'avvolgimento di filamenti continui di materiale di rinforzo su un corpo, rotante su un asse chiamato mandrino.

I fattori fondamentali che regolano questa tecnologia produttiva e che influiscono in maniera determinante per l'ottenimento del prodotto finale sono:

- **il tipo di avvolgimento**
- **il tipo d'impregnazione**
- **il tipo di mandrino**
- **il tipo di macchine**



Il tipo di avvolgimento o tipo d'angolo d'avvolgimento è indicativo della modalità di rotazione del filamento nel macchinario definito in ogni punto come l'angolo compreso tra la direzione delle fibre e la tangente al meridiano del mandrino, in pratica di due tipi:

AVVOLGIMENTO POLARE:

- il mandrino e l'occhiello di deposizione possiedono entrambi moto rotatorio, in modo tale che l'avvolgimento delle fibre avvenga praticamente secondo i meridiani della struttura, l'angolo d'avvolgimento può variare tra 0° e 90° a seconda delle proprietà meccaniche richieste al pezzo. In questo processo le fibre non si sovrappongono durante l'avvolgimento e si può coprire l'intero mandrino con una singola lamina opportunamente orientata rispetto all'asse.

AVVOLGIMENTO ELICOIDALE:

- il mandrino ha un moto rotatorio, mentre il braccio di deposizione ha un moto traslatorio alternato. Combinando opportunamente questi due movimenti si può far seguire alle fibre le traiettorie d'avvolgimento desiderate ottenendo, tuttavia, non una struttura a lamine, ma una sorta di tessuto a fibre. Se invece si vogliono realizzare laminati con angolazioni maggiori è necessario utilizzare nastri di larghezza opportuna. Questo processo è molto usato per la costruzione di serbatoi in pressione, e grandi pezzi, come fusoliere di aerei.

Il tipo d'impregnazione indica la modalità di trattamento applicata al rinforzo:

DIRETTA O BAGNATA:

- il trattamento viene effettuato direttamente sul filamento appena prima di essere avvolto sul mandrino attraverso il passaggio in una vaschetta contenente resina; ciò impone una velocità di lavorazione lenta per garantire l'adeguata impregnazione del filamento.

INDIRETTA O A SECCO:

- in questo metodo si fa uso di rinforzi pre-preg, ossia filamenti pre-impregnati di resina parzialmente polimerizzata (wrapping); in questo caso la velocità di produzione è più elevata in quanto non è più limitata da problemi di bagnabilità delle fibre. L'utilizzo di pre-preg, pur generando un maggior costo iniziale, garantisce l'ottenimento di prodotti di elevata qualità, inoltre essi possono essere utilizzati con tutti i tipi di resine, comprese quelle aventi una viscosità tale da non poter essere utilizzate in impregnazione diretta dei filamenti in fase di avvolgimento.

Il tipo di mandrino:

METALLO

- acciaio, alluminio

PLASTICA

GESSO

FISSO

- rimane all'interno del pezzo, divenendone parte integrante

MOVIBILE

- alla fine del processo di produzione esso verrà rimosso

Il tipo di macchine:

AD ASSE ORIZZONTALE

- avvolgimento elicoidale

AD ASSE VERTICALE

- avvolgimento polare di elementi compositi di grandi dimensioni

3.0.1.2.3 RESIN TRANSFER MOULDING (RTM)

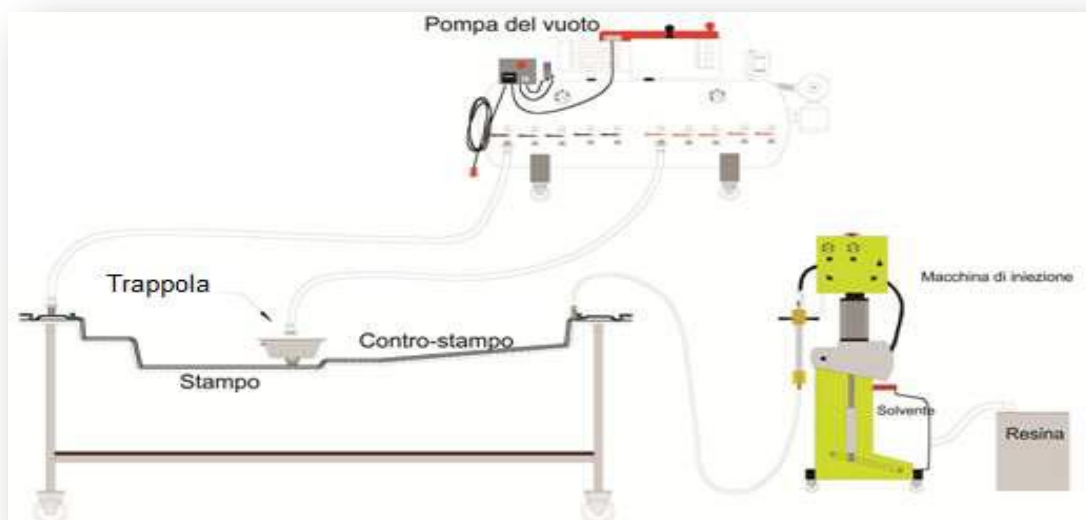
Il Resin Transfer Molding (RTM) è un processo a stampo chiuso che permette la realizzazione di compositi in diverse forme, dimensioni e prestazioni. Il processo si differenzia dagli altri tipi di stampaggio sia per il tipo di polimero impiegabile (solo termoindurente) e per il fatto che il rinforzo e la resina sono combinati all'interno dello stampo.

I vantaggi consistono nella possibilità di realizzare una superficie liscia su ambedue i lati del pezzo, produrre pezzi complessi con una elevata accuratezza di dettaglio e realizzare parti che non necessitano di laboriose operazioni di rifinitura.

Altri punti a favore sono cicli di produzione veloci (a seconda delle condizioni di reticolazione della resina), ottimo controllo di vuoti ed elevate percentuali di rinforzo, mentre lo svantaggio più grande è la spesa iniziale dello stampo e della macchina RTM.

Questo metodo consiste in un processo in cui due o più componenti reattivi vengono opportunamente miscelati e iniettati nello stampo rigido chiuso ove precedentemente è stata posizionata una preforma in fibra.

La geometria dello stampo, quindi del pezzo finito, la scelta dei punti di iniezione, la pressione di iniezione, la scelta della preforma e della resina rappresentano i punti critici di uno stampaggio RTM.



Schema del processo di Resin Transfer Molding

Per realizzare cicli brevi, gli stampi devono essere uniformemente riscaldati alla corretta temperatura di reticolazione.

La possibilità di riscaldare lo stampo permette di aumentare la produttività grazie a una iniezione di resina a più bassa viscosità e una maggiore velocità di reticolazione una volta riempito lo stampo.

A causa della natura abrasiva del rinforzo le superfici degli stampi devono essere cromati. Tutti questi requisiti limitano la scelta dei materiali.

Per stampi da produzione, l'acciaio rimane il materiale più adatto grazie alla durabilità e alla possibilità di essere facilmente modificato. Per volumi ridotti di produzione o per prototipi stampi in composito sono una alternativa accettabile.

Dato che RTM usa pressioni più basse dello stampaggio a compressione o della iniezione di termoplastici, la forza di chiusura richiesta è considerevolmente più bassa.

Il ciclo RTM si articola nelle seguenti fasi:

- pulitura dello stampo
- applicazione della agente distaccante
- applicazione del gel-coat
- posizionamento dei tessuti di rinforzo
- chiusura e bloccaggio dello stampo
- iniezione o trasferimento della resina
- polimerizzazione della stessa

Per quanto riguarda la pulitura dello stampo, si può ottenere o con una soffiatura ad aria compressa, oppure può richiedere l'uso di un raschietto, per rimuovere, da residui di gel-coat a residui di resina, ovviamente, per non rovinare lo stampo, tale raschietto deve essere meno duro, quindi di legno duro, materiale termoplastico, rame, od ottone, se lo stampo è di acciaio. Solo in casi estremi si possono utilizzare solventi come l'acetone, o il cloruro di metilene.

La deposizione dei tessuto, mediante sovrapposizione, può essere laboriosa visto che si deve adattare allo stampo un sistema soffice che deve essere adattato e rifilato, strato per strato, tenendo debitamente conto dell'orientazione che devono assumere le fibre.

A volte, quindi, i tessuti si trovano già conformati come preforme al fine di rendere più semplice il posizionamento nello stampo,.

Una volta posizionati i tessuti vengono pressati e con l'utilizzo di un legante opportuno adattati in un elemento sufficientemente rigido di forma analoga allo stampo, potendo ricorrere poi anche ad aggiustamenti locali per i punti critici quali spigoli e bordi.

Ciò che è principalmente importante è l'uniformità della distribuzione delle fibre senza raggrinzamenti, pieghe, increspature, variazioni di spessore non volute, ripiegamenti.

Lo stampo dovrà resistere alla pressione dell'operazione d'iniezione ed alla polimerizzazione, quindi la chiusura del controstampo verrà effettuata con morse, bulloni od altri sistemi capaci dibloccarlo con la forza sufficiente.

La resina già miscelata viene iniettata attraverso dei canali e dei fori ricavati nello stampo e nel controstampo.

Tale operazione si può agevolare applicando una pompa a vuoto che aspiri l'aria dalla cavità attraverso i fori d'uscita (questi sono i casi evoluti del Vacuum Assisted-RTM o VARTM).

A riempimento avvenuto, prima vengono chiuse le valvole dei condotti di deflusso della resina, e poi quelli d'ingresso, ottenendo un afflusso addizionale (detto pumping-up) d'aria.

Questo processo in pressione è finalizzato a prevenire contrazioni nel tessuto di rinforzo, e permettere la miglior corrispondenza dimensionale e finitura superficiale del pezzo finito.

Per quel che riguarda i tempi di polimerizzazione, dipendono dalla miscela resina catalizzatore, ma anche dalle caratteristiche reologiche, e geometriche della cavità, dalla temperatura di iniezione, e di quella dello stampo.

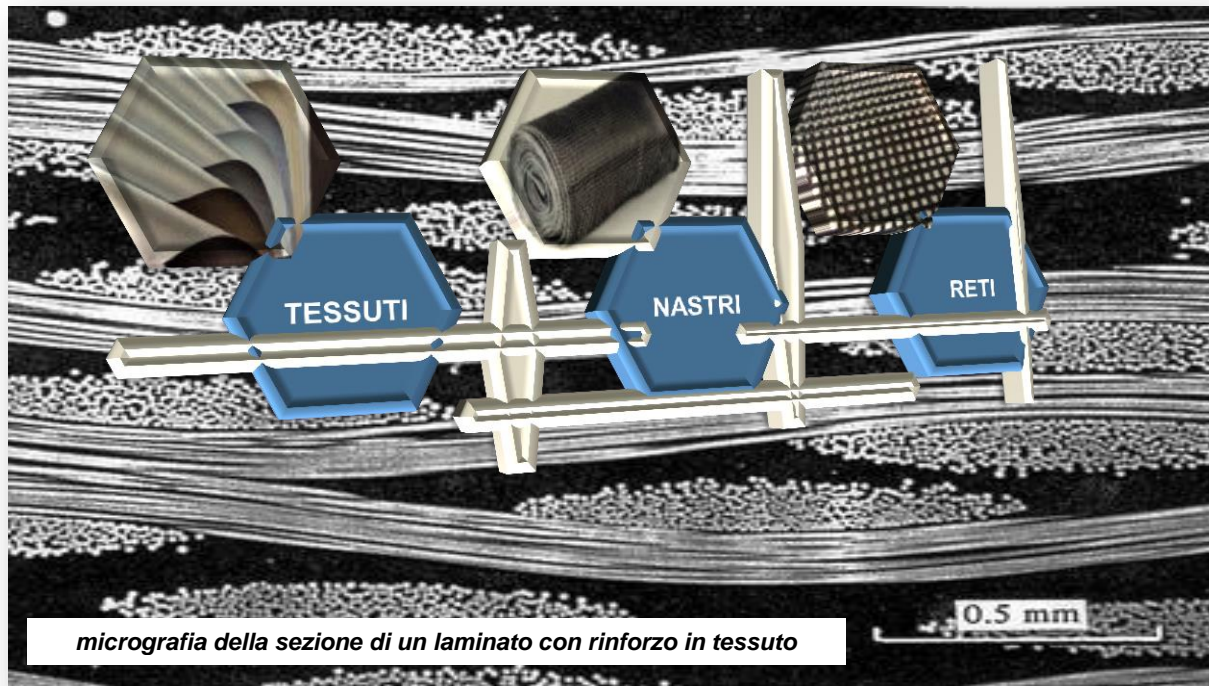
E per tutte queste operazioni il pezzo deve rimanere nello stampo, con evidente influenza del ciclo di produzione.

Infine il pezzo sarà rifinito eliminando le protuberanze dovute ai fori, d'ingresso e di uscita, e le frange lasciate dal punto di contatto tra stampo e controstampo, nonché sarà verniciato o comunque costituirà un semilavorato.

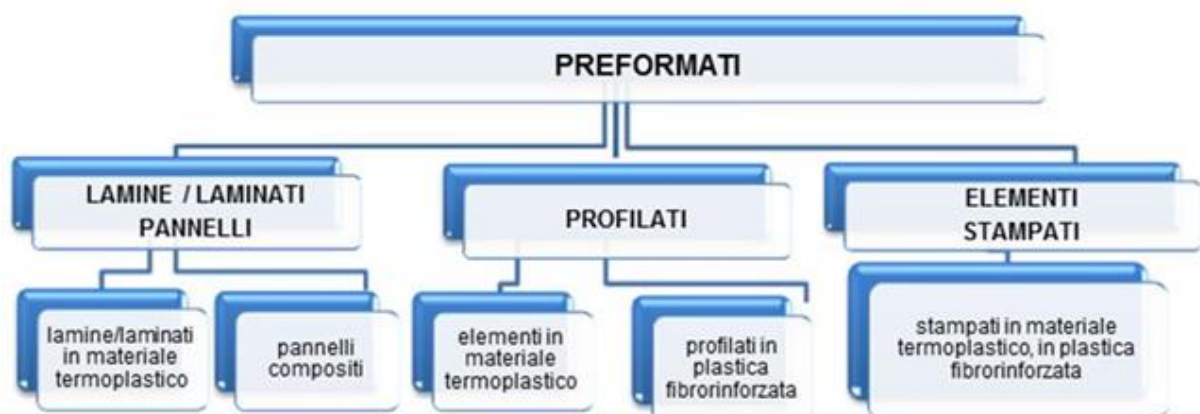
3.0.2 PRODOTTI

L'industria produce una serie di prodotti con i quali in seguito vengono assemblati i vari prodotti compositi finali a disposizione del progettista:

- i **tessili**, destinati alla lavorazione manuale di compositi detti a "forma libera"



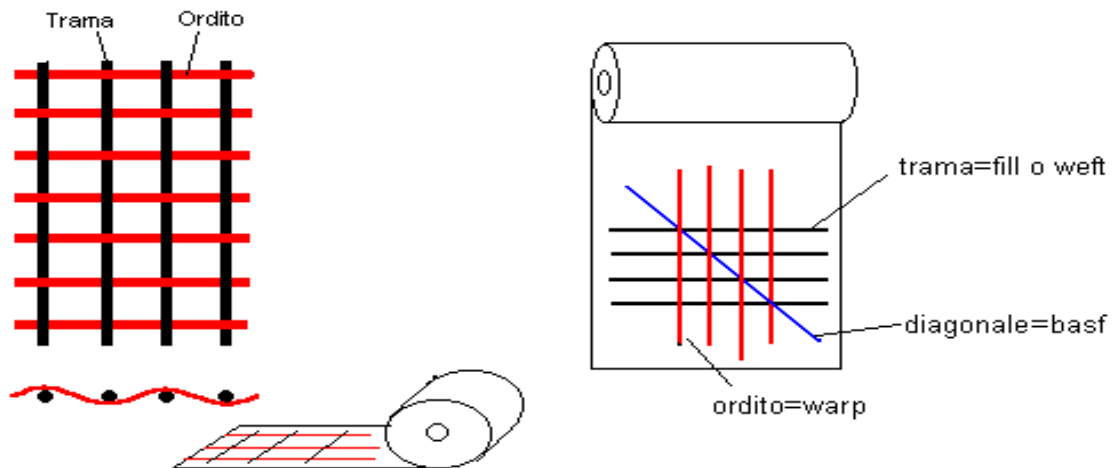
- i **preformati**, compositi derivati da procedimenti automatizzati detti "semilavorati"






3.0.2.1 I TESSILI

I prodotti compositi ottenuti da fibre tessute e lavorate ad esempio in nastri e reti, costituiscono un materiale primario importante per la realizzazione di composti detti “a forma libera”, ottenuti dalla successiva impregnazione degli stessi con resine o malte.

I prodotti tessili, ottenuti direttamente dalla tessitura dei fili di fibre, avranno una direzione principale detta ordito (warp) ed una direzione trasversale detta trama (weft).

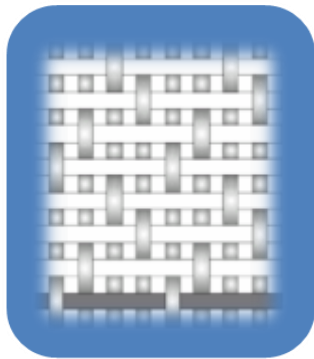


La configurazione geometrica dei tessuti è principalmente di tre tipi:

 <p>Trama (non strutturale)</p> <p>ORDITO (strutturale)</p>	<p>tessuti UNIDIREZIONALI: le fibre sono orientate tutte nella stessa direzione della lunghezza e tenute assieme da una trama leggera di tipo strutturale;</p>
 <p>Trama / Ordito (entrambi strutturali)</p>	<p>tessuti BIDIREZIONALI: le fibre sono orientate in due direzioni preferenziali a formare una tessitura trama-ordito ortogonale bilanciata;</p>
	<p>tessuti MULTIASSIALI: le fibre sono orientate in diverse direzioni del piano senza una direzione preferenziale;</p>

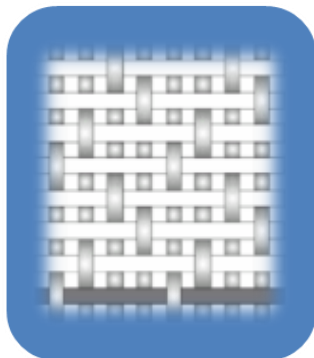
Il Tex è l'unità di misura della massa lineare (titolo: massa per unità di lunghezza) ed è equivalente ad un grammo per chilometro di fibra. La vecchia unità di misura era il Denier equivalente a 0,111 Tex.

La classificazione delle tre tipologie fondamentali di armatura delle fibre in quest'ambito, è quella tipica dei materiali prodotti dall'industria tessile così come le denominazioni stesse:



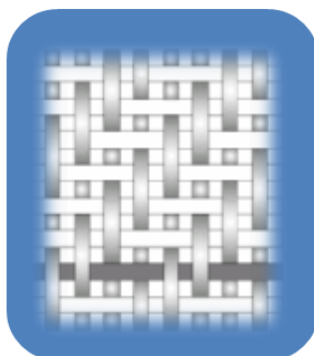
- **PLAIN (tela): "tessitura a tela"**

questa modalità di tessitura, si presenta con un filo sopra ed uno sotto, ha una struttura più rigida ma è più difficile da impregnare con la resina, il che può portare ad una minore efficacia del rinforzo nel piano.



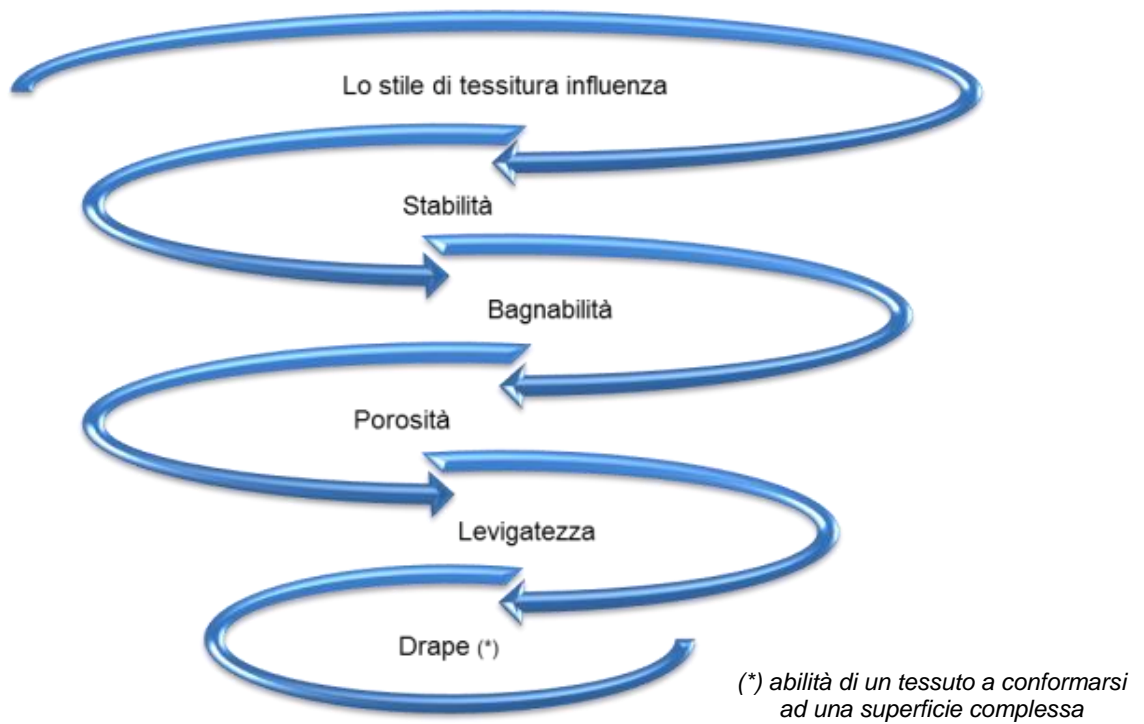
- **TWILL (batavia): "tessitura diagonale"**

il prodotto presenta due fili sopra e due sotto, è più facile da impregnare, presentando una minore ondulazione (crimp) superficiale, ha lo svantaggio di essere più difficile da maneggiare.

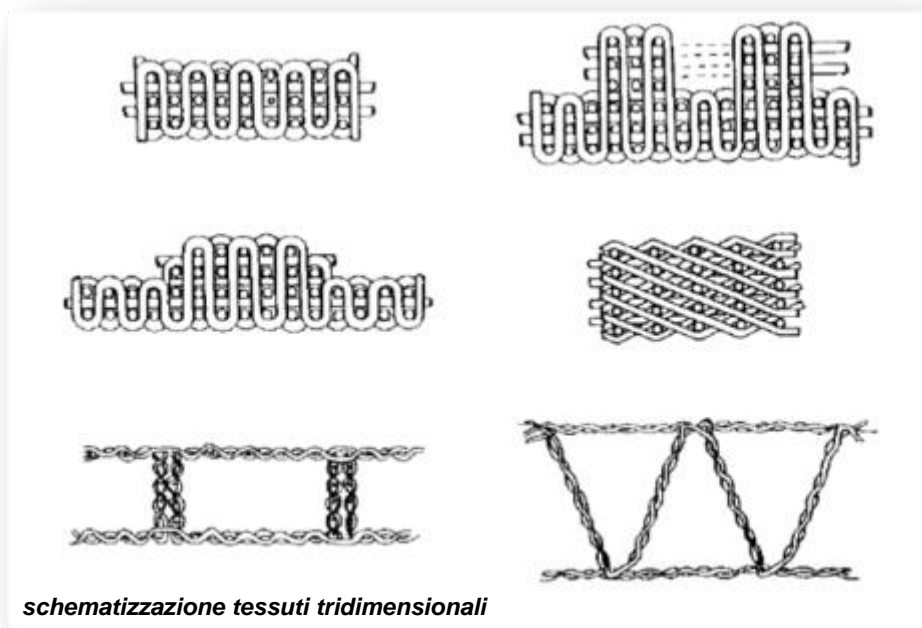


- **SATIN (raso): "tessitura levantina"**

il prodotto presenta più fili sopra ed uno sotto, ha un'ondulazione superficiale minima e quindi può raggiungere la massima rigidità nel piano una volta impregato è più delicato da maneggiare in fase di lavorazione.



In conclusione aggiungo che esistono altri tipi di tessuto quali: il crowfoot, il basket e il leno, unitamente ai più recenti tessuti ibridi (diversi tipi di fibre di rinforzo per componente) e i cosiddetti tridimensionali, nei quali la presenza di una seconda “trama” in direzione ortogonale al piano principale impartisce maggiore resistenza e proprietà particolari (ad esempio, la capacità di rigonfiarsi quando vengono impregnati con la resina).



Oltre alla disposizione delle fibre, i tessuti sono caratterizzati da alcuni parametri fisici e meccanici che è opportuno conoscere per poter progettare con essi un rinforzo:

- P_x = peso per unità di superficie (grammatura)[g/m²];
- T_x = titolo del filato(nella generica direzione x)[Tex = g/km];
- N_f = numero di filati per unità di larghezza (nella generica direzione x) [n°/cm]
- E = modulo elastico [MPa];
- $f_{f\tau}$ = resistenza a trazione (valore medio e caratteristico) [N];
- $\varepsilon_{f\tau}$ = allungamento a rottura [%];
- S_e = area resistente per unità di larghezza;
- ρ = peso specifico del materiale del tessuto

Non sempre i produttori gabellano l'area resistente per unità di larghezza, in tal caso per ottenere il valore è sufficiente svolgere il calcolo illustrato di seguito:

$$S_e = \frac{P_x}{n \cdot \rho}$$

n = numero di direzioni del tessuto (es. 2 se biassiale, 3 se triassiale e così via)

Allo stesso modo, con una semplice relazione è possibile ricavare anche la grammatura del tessuto:

$$P_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10}$$

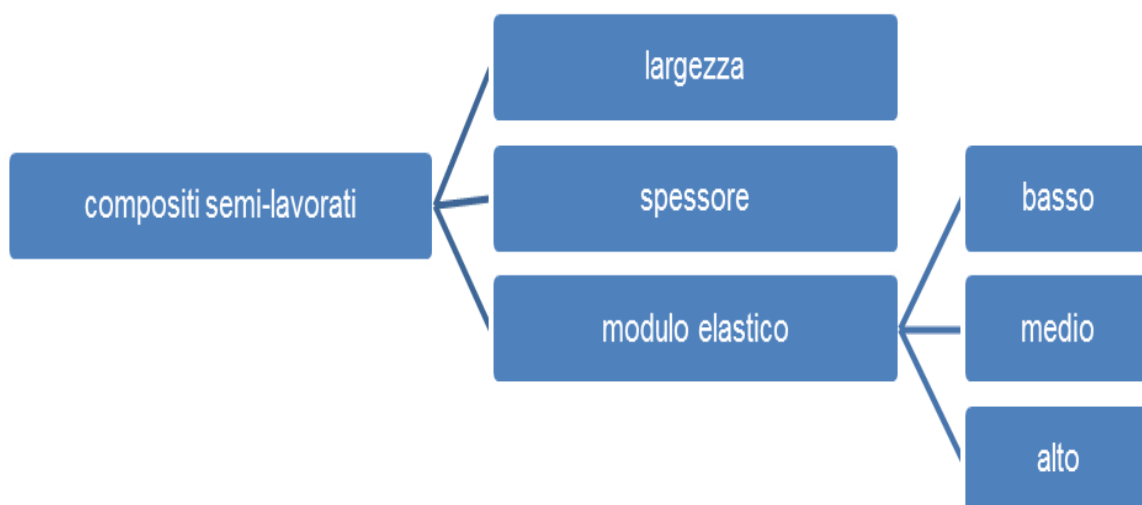
3.0.2.2 I PREFORMATI

I compositi “preformati” risultanti dalla produzione automatizzata delle materie prime, fibre e matrici, uniscono al vantaggio delle prestazioni intrinseche al composito, la qualità e comodità di una produzione standardizzata e un prodotto finito e pronto all’uso.

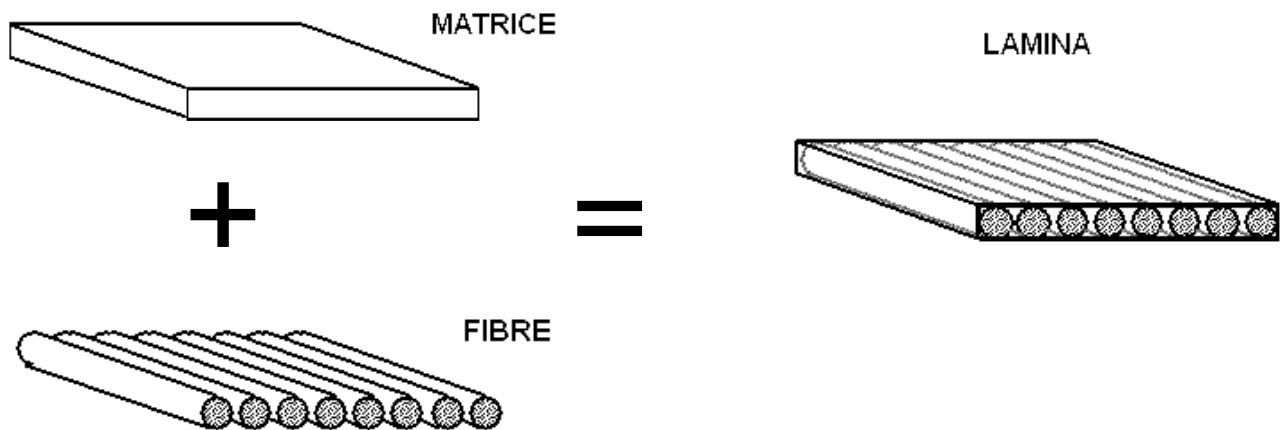
In edilizia i preformati più diffusivi a disposizione del progettista sono:



Le caratteristiche che differenziano i vari prodotti sono:



Lamina: singolo strato (ply) di materiale

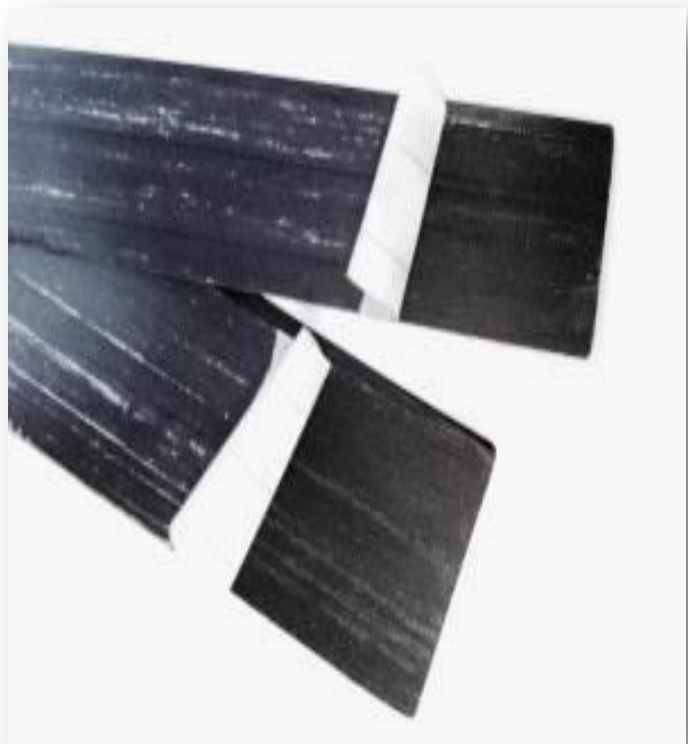


In questi materiali, progettati secondo le necessità, le fibre sono già inglobate in una matrice di resina epossidica, per cui si presentano in forma di lamine dotate di una propria rigidità.

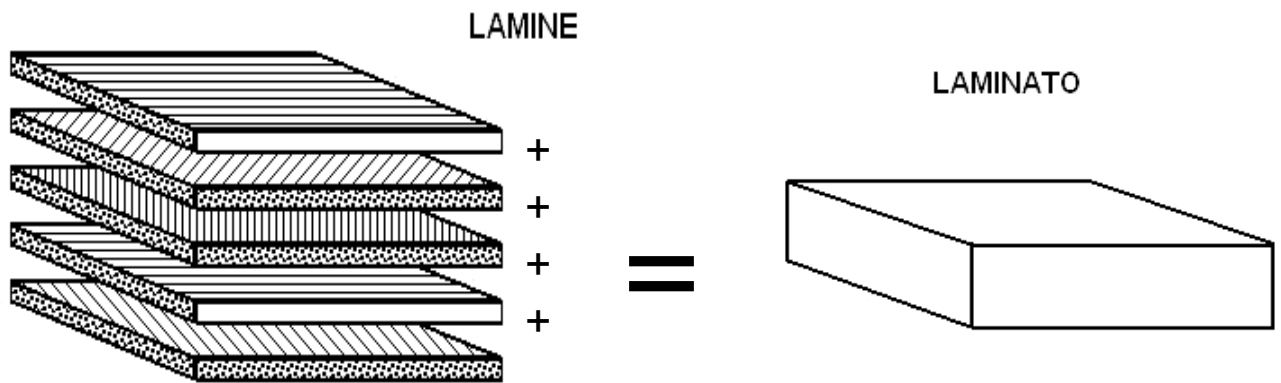
Le lamine sono utilizzate prevalentemente in edilizia come materiali compositi strutturali, laddove vi sia da un lato la necessità di elevate prestazioni meccaniche in termini di rigidità, resistenza, comportamento alla fessurazione, e dall'altro l'esigenza di limitare il peso.

L'uso di semplici lamine con rinforzo unidirezionale risulta spesso insoddisfacente nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche a causa della bassissima resistenza e rigidità in direzione trasversale.

Questo inconveniente è superato ricorrendo ai laminati compositi costituiti dalla unione di "n" lamine con rinforzo unidirezionale orientate in modo da soddisfare le varie esigenze di progetto quali, in particolare, resistenza e rigidità.



Laminati: due o più lamine accoppiate in genere con diverse direzioni del rinforzo

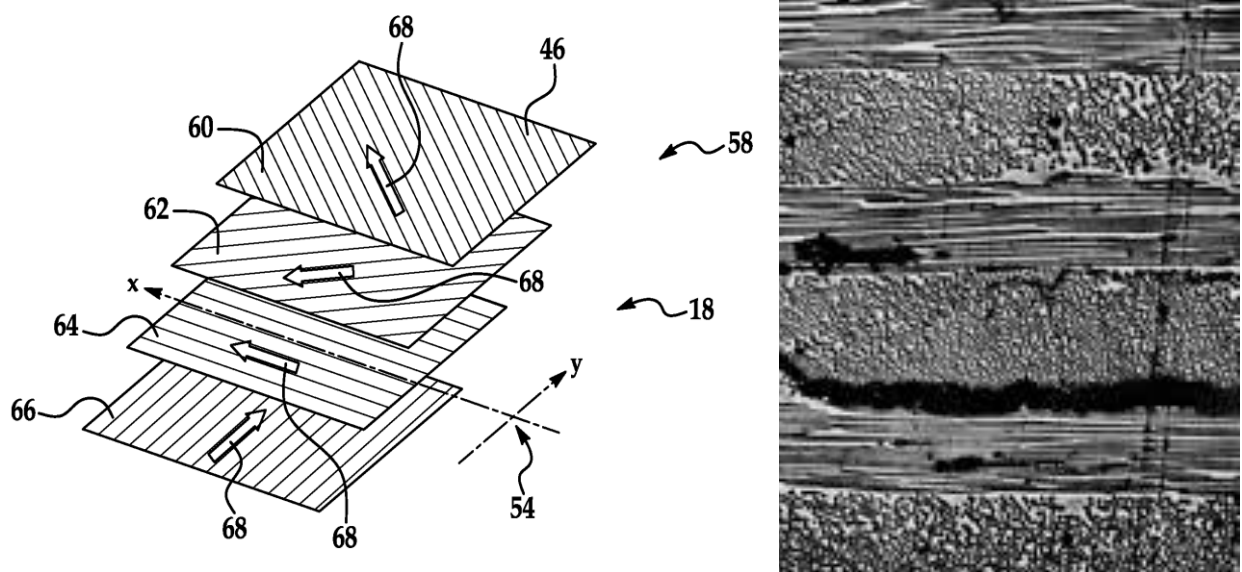


Materiali ottenuti per sovrapposizione di "n" lamine, in genere a rinforzo unidirezionale o tessuto, disposte secondo differenti orientazioni.

Generalmente l'assemblaggio del laminato avviene per "fusione" dell'insieme di lamine, a volte per collaggio (per esempio nella tecnologia del legno compensato).

I laminati vengono utilizzati, come materiali strutturali, laddove vi sia da un lato la necessità di elevate prestazioni meccaniche in termini di rigidità, resistenza, comportamento alla fessurazione, e dall'altro l'esigenza di limitare il peso.

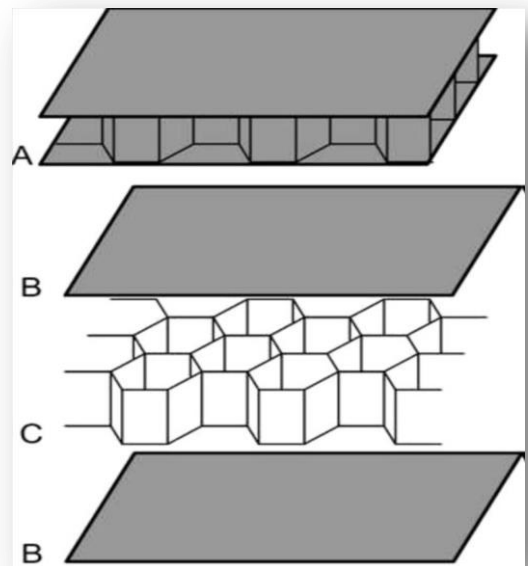
Questi materiali possono essere progettati secondo le necessità ed oggi si affaccia anche l'idea, e la tecnologia, di realizzare laminati con disposizione continuamente variabile delle fibre, in quantità e direzione.



Pannelli: elementi costituiti da due strati resistenti, detti facce, distanziati da un materiale connettivo chiamato “core” (cuore).

Il core è in genere un materiale leggero e poco resistente, la cui unica funzione è distanziare le facce, di materiale più nobile sotto le qualità resistenziali meccaniche e di spessore ridotto.

La rigidità assiale del core è assolutamente trascurabile rispetto a quella delle facce, che sono preposte ai carichi nel piano.



Profilati: appartengono alla categoria dei semilavorati plastici generalmente a partire dai polimeri termoplastici (senza rinforzo di fibre) o dai polimeri termoindurenti (fibrorinforzati) e si possono suddividere in base alla loro geometria in:



I profilati in materiali plastici fibrorinforzati sono particolarmente adatti per le strutture portanti. Nell'edilizia vengono impiegate soprattutto le fibre di vetro, che sono relativamente poco costose e presentano una durabilità apprezzabile.

Le fibre di carbonio sono economicamente sostenibili soltanto per componenti edili fortemente sollecitati come cavi o lamelle di rinforzo. In questo tipo di elementi l'impegno di altre tipologie di fibre, aramidiche, basaltiche o naturali è quasi nullo.

Lastre: semilavorati plastici di più largo consumo in edilizia assolvendo spesso a più funzioni ed essendo presenti sul mercato con un'ampia gamma di prodotti.

Generalmente sono suddivise in due famiglie di prodotto, lastre in materiale termoplastico (per lo più trasparenti) e pannelli compositi.

Le lastre semilavorate trovano impiego in facciate, manti di copertura, arredi e allestimenti interni, oltre che parapetti, rivestimenti interni, ambienti sanitari e piani di lavoro.



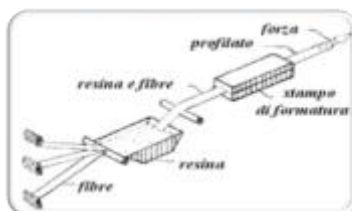
Stampati: materiali semilavorati, o componenti finiti a geometria tridimensionale.

A differenza dei profilati e delle lastre hanno una forma disegnata in modo specifico per la funzione a cui sono destinati.

Idealmente ciascun elemento stampato dopo la produzione non richiede lavorazioni successive e può essere posto in opera direttamente.



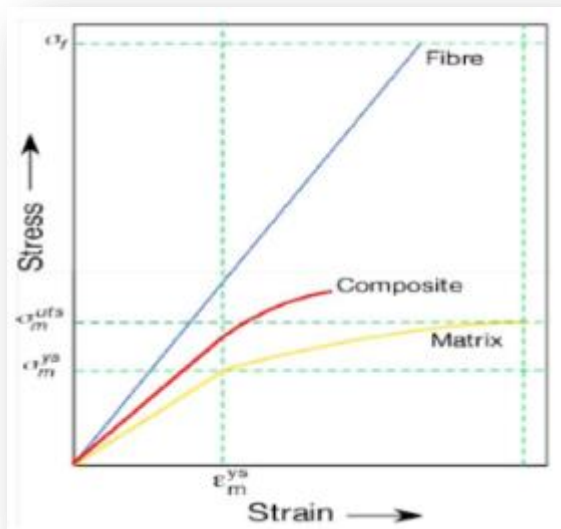
esempio di stampato in materiale plastico e fibre di vetro



impalcato del ponte *ponte pedonale di Aberfeldy*
"Aberfeldy Golf Club", 1992 Scozia

4.0 GENERALITÀ SULLA MECCANICA DEI COMPOSITI

Le proprietà dei sistemi compositi sono strettamente legate alle proprietà dei singoli materiali componenti, dalla loro forma, dimensione, concentrazione, distribuzione, orientamento, nonché dalla loro mutua interazione.



La resistenza e la rigidità del materiale composito dipendono in gran parte dal materiale di rinforzo e, in particolare nel caso di fibre lunghe o corte, dall'orientazione delle fibre rispetto ai carichi applicati.

Tuttavia si ribadisce che il comportamento meccanico non dipende esclusivamente dal materiale di rinforzo, ma anche dalla sinergia tra il rinforzo e la matrice.

Ad esempio, nel caso di un fascio di fibre senza matrice sottoposto a sollecitazione, la rottura di una di esse comporta che lo sforzo venga trasferito alle fibre rimanenti, con conseguente diminuzione della resistenza globale del fascio.

Al contrario se le fibre sono immerse in una matrice, la rottura di una di esse non compromette la sua resistenza meccanica, in virtù della presenza dell'interfaccia e della deformabilità della matrice che assicurano il fenomeno del trasferimento di carico.

Infatti, quando le estremità della fibra nel punto di frattura si allontanano, la deformazione elastica o lo scorrimento plastico della matrice esercitano, tramite l'interfaccia, delle forze di taglio che ripartiscono gradualmente la sollecitazione anche sulla fibra fratturata.

I materiali da costruzione tradizionali possono essere descritti come:

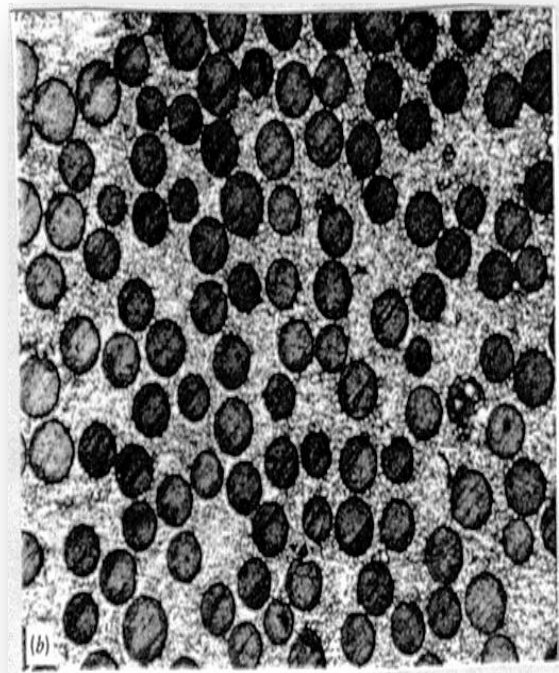
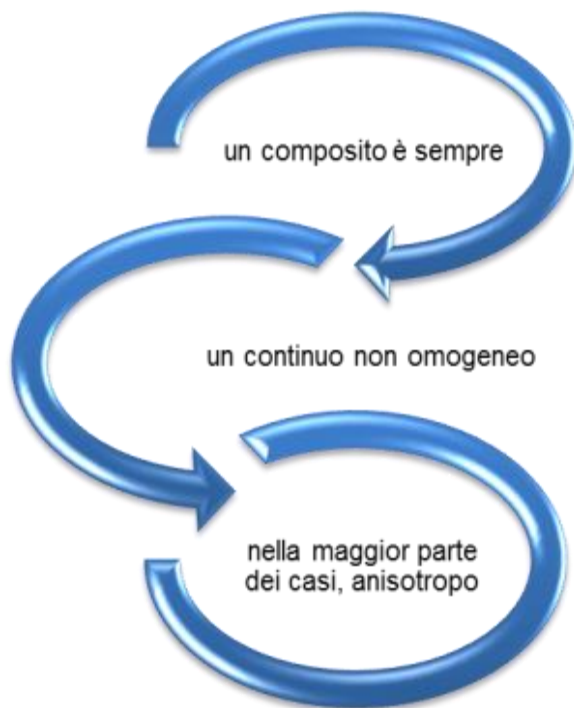
omogenei:

con proprietà uniformi (conduttività, elettrica, rifrazione, ecc)

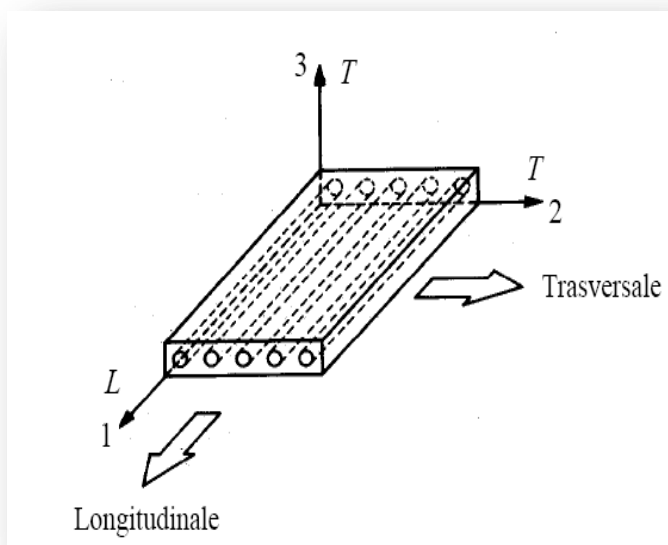
isotropi:

con proprietà costanti in ogni direzione e in ogni punto

Nei compositi la cosa cambia, essi si presentano anisotropi ed eterogenei:

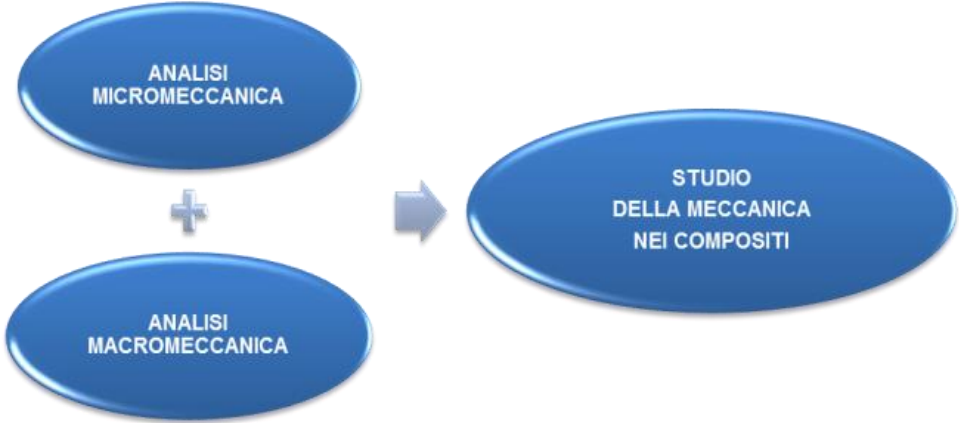


microstruttura di un composito al microscopio

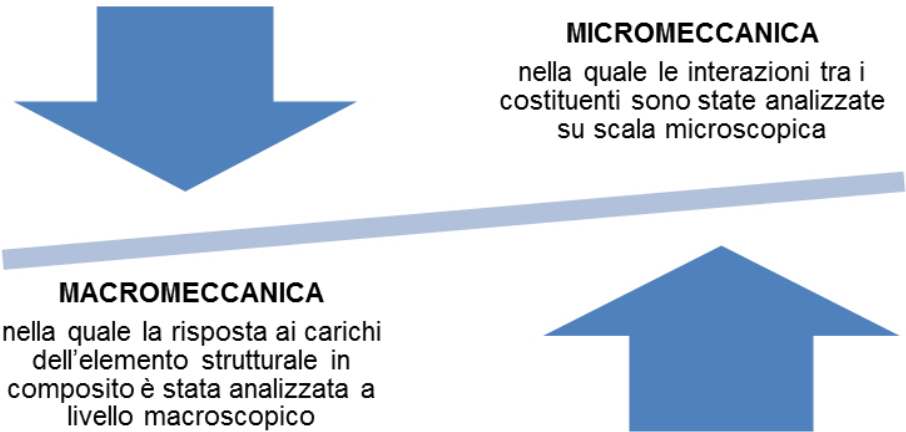


Ad esempio in un prodotto come quello rappresentato nello schema a lato in cui le fibre risultano disposte parallelamente tra loro nella matrice, composito unidirezionale, si avranno capacità resistenziali nella direzione (1) notevolmente più alte di quelle nelle direzioni (2) e (3), quindi proprietà meccaniche del materiale spiccatamente anisotrope.

I materiali compositi essendo eterogenei ed anisotropi, necessitano di una “trattazione dello studio della meccanica anch’esso “composito”, risultante dall’analisi del materiale dai seguenti punti di vista:



Lo studio delle relazioni tra proprietà meccaniche (essenzialmente quelle elastiche) dei costituenti e quelle della struttura del composito finale, ha portato allo sviluppo di teorie sulla meccanica dei materiali compositi lavorando su due livelli di scala:

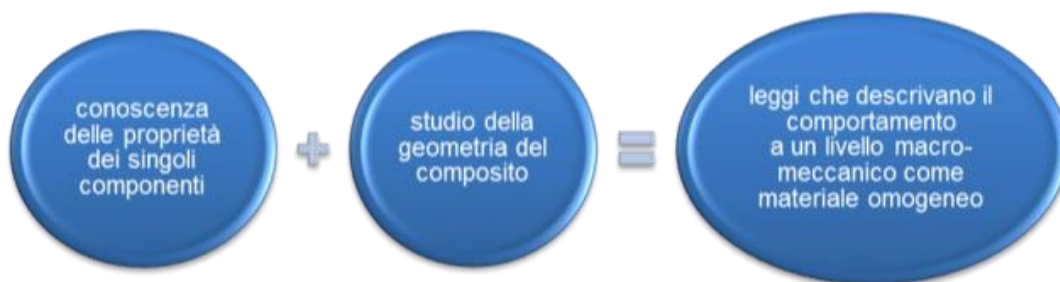


4.0.1 ANALISI MICROSCOPICA: L'ETEROGENEITÀ

La micromeccanica è lo studio del comportamento del materiale composito che si interessa di determinare i moduli elastici partendo da quelli dei singoli costituenti.

Oggetto complementare dell'analisi micromeccanica è la valutazione delle capacità di resistenza in termini di sollecitazione di rottura.

Lo scopo dell'analisi micromeccanica cercare delle **leggi di omogeneizzazione**.



Esistono varie teorie e modelli di omogeneizzazione; l'approccio classico considera un volume elementare e significativo di composito e ipotizzando un comportamento isotropo lineare dei due componenti, ne ricava le leggi di omogeneizzazione nell'idea di un'aderenza perfetta di fibra e matrice.

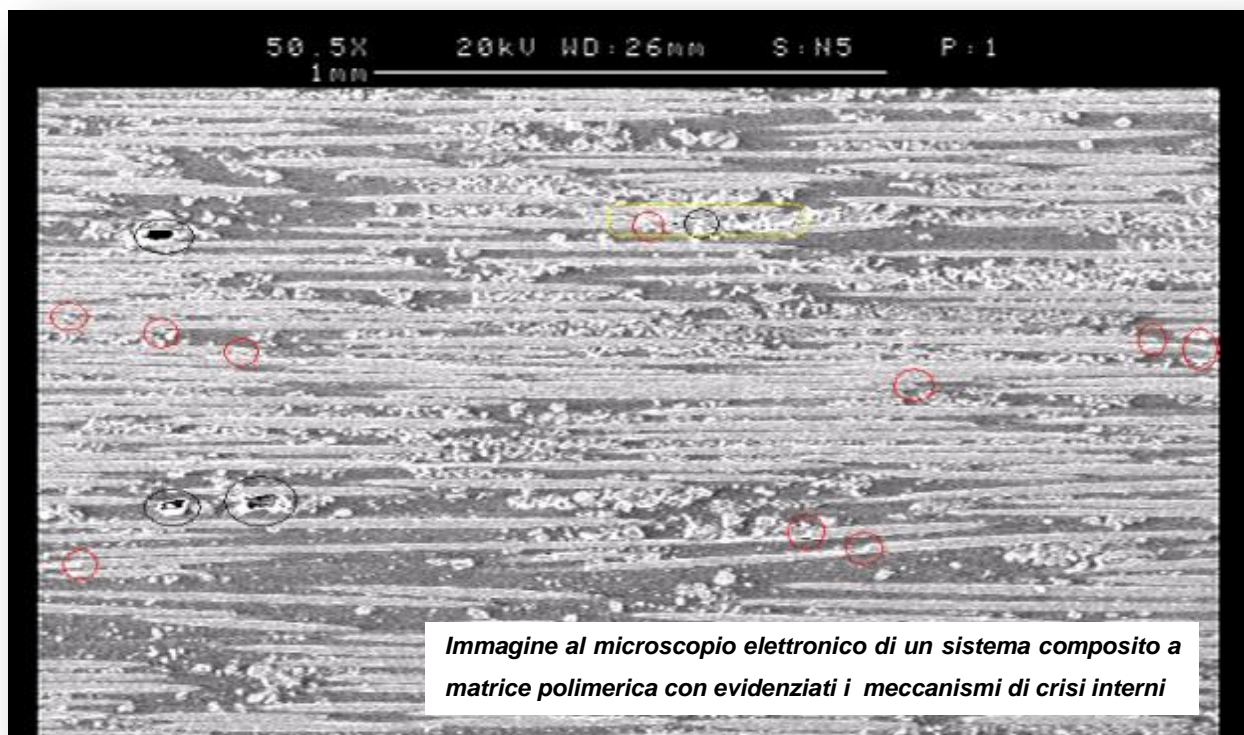
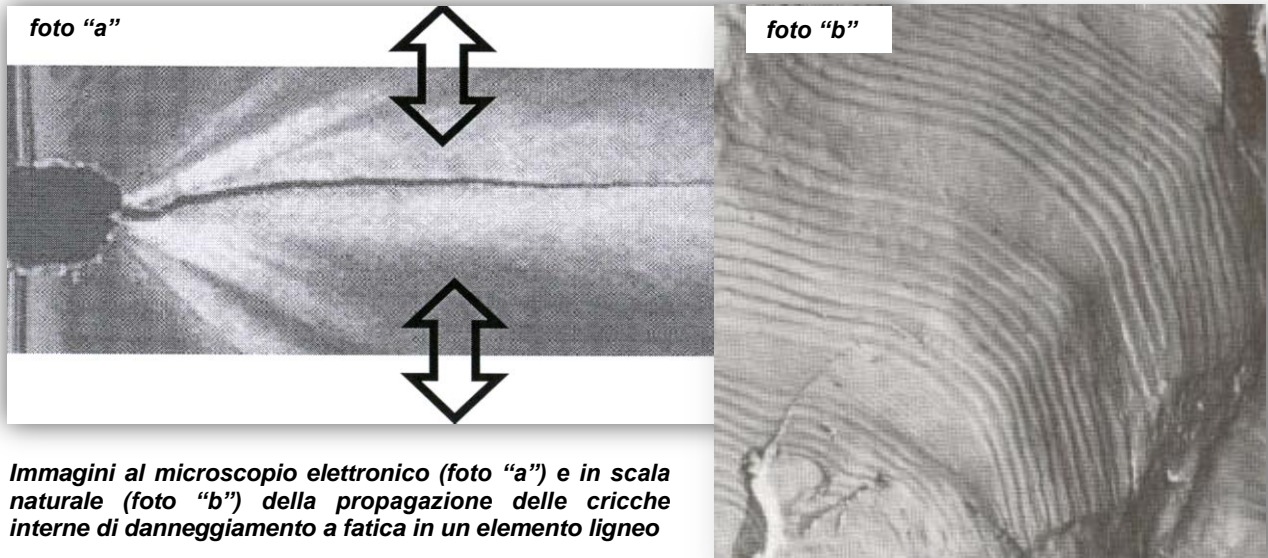
Il punto di vista dell'analisi micromeccanica, analizza l'interazione fra le fasi costituenti del composito su scala microscopica, per determinare i loro effetti sulle proprietà complessive del composito.

Purtroppo l'analisi micromeccanica ha delle limitazioni fondandosi sull'ipotesi, non sempre soddisfatta, di considerare perfettamente unite tra loro la fibra e la matrice.

Un'unione imperfetta comporta che al materiale competano delle proprietà "degradate" rispetto a quelle teorizzate dall'analisi micromeccanica.

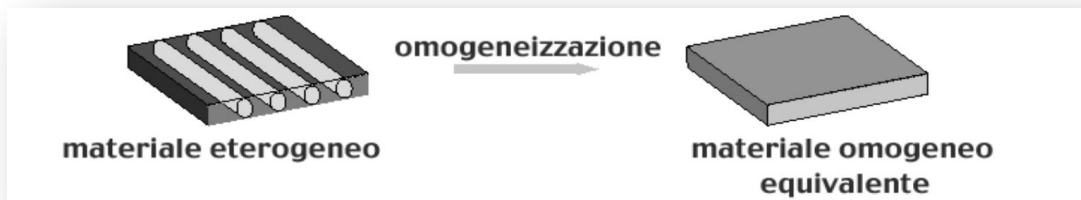
Questo studio risulta molto complesso, in quanto i fattori che ne influenzano il comportamento a fatica sono svariati.

Al contrario dei tradizionali materiali per l'edilizia, omogenei ed isotropi, nei quali il danneggiamento è dato dalla nucleazione di un solo difetto che poi si propaga in piani e secondo direzioni stabilite (esempio nel legno), nei compositi il comportamento cambia: sollecitati a fatica essi presentano "diverse modalità" di danneggiamento, cricche nella matrice, rottura della fibre, cricche nell'interfaccia matrice-fibre.

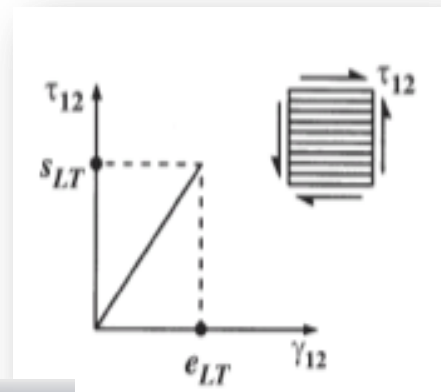
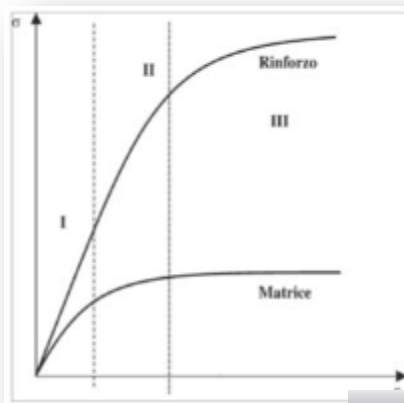


4.0.2 ANALISI MACROSCOPICA: L'ANISOTROPIA

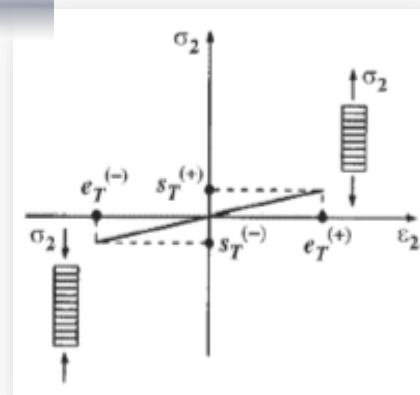
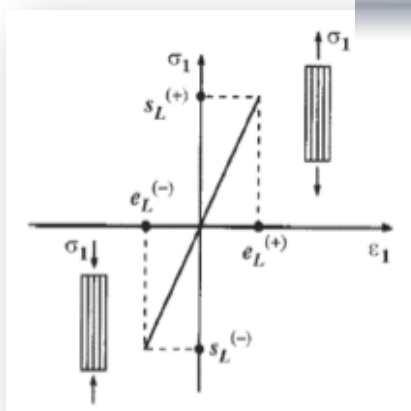
Il punto di vista dell'analisi macromeccanica, presuppone una omogeneizzazione del materiale, si trascura l'eterogeneità e lo si analizza come un continuo omogeneo, marcatamente anisotropo, nel quale gli effetti delle fasi costituenti si riflettono nelle proprietà macroscopiche medie del materiale composito.



Stabilita come sopradescritto "l'area" di riferimento, si prosegue nello studio con prove di caratterizzazione meccanica (resistenza residua, modulo elastico) nelle diverse direzioni:



*prove di
caratterizzazione
meccanica*



4.0.3 MECCANICA DEI LAMINATI

Meccanica dei laminati: la teoria classica dei laminati permette di ridurre il comportamento delle diverse lamine che compongono un laminato a quello di una sola piastra equivalente:

- le ipotesi sono quelle classiche delle piastre-lastre: comportamento elastico lineare, piccole deformazioni e piccoli spostamenti, cinematica alla Kirchhoff, stato piano generalizzato di sforzo;
- in tali ipotesi si arriva alla legge fondamentale dei laminati, che ne descrive il comportamento meccanico (è una legge costitutiva);

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^0 \\ \boldsymbol{\kappa} \end{Bmatrix}$$



- il comportamento è quindi descritto da tre tensori, A, B e D, che in genere non sono uguali: è come se la piastra finale fosse costituita da materiali diversi secondo il comportamento preso in esame.

Nella meccanica dei laminati, si incontrano alcuni fenomeni e problemi sconosciuti nei materiali classici, come ad esempio:

- **delaminazione:** rottura inter-laminare provocata dalle tensioni inter-laminari;
- **tensioni residue:** la loro presenza dipende molto dal processo di fabbricazione; in particolare, se polimerizzato a caldo un laminato sarà sempre soggetto a tensioni inter-laminari residue che possono essere anche molto importanti e soprattutto di difficile valutazione;
- **tensioni ai bordi:** si può vedere, tramite modelli analitici, che in funzione della sequenza degli strati e del carico, si può avere una concentrazione degli sforzi ai bordi liberi, che può essere anche molto elevata e provocare delaminazione;
- **analisi della rottura:** la rottura completa di un laminato è un fenomeno progressivo e spesso difficile da cogliere, sia a livello analitico che, per quanto concerne la sua evoluzione, sperimentale.

Il progetto ottimale dei laminati: si tratta di una operazione spesso complessa.

Le difficoltà tipiche dell'ottimizzazione dei laminati sono:

- forte non linearità
- elevata multi-modalità
- molteplicità degli obiettivi
- numero di variabili spesso elevato
- soluzioni che a volte i presentano in forma continua
- difficoltà relative alla rappresentazione elastica

Poche sono le regole e i metodi utilizzati nella pratica, spesso si tratta di approcci molto semplificati, che restringono molto il campo delle possibilità.

I parametri sintetici di valutazione delle prestazioni di un composito sono i rapporti:

$$E/\rho \text{ e } \sigma_{lim}/\rho$$

Nella tabella che segue sono riportati alcuni dati tipici sui compositi:

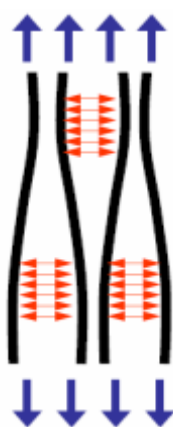
	Materiale	ρ	E	σ_u	E/ρ (A)	σ_u/ρ (B)	ρ/ρ_{ac}	E/E_{ac}	$\sigma_u/\sigma_{u ac}$	A/A_{ac}	B/B_{ac}
		kg/m ³	MPa	MPa	MN m/kg	kN m/kg					
Forma massiva	Acciaio	7850	210000	360	26,75	45,86	1	1	0,171	1	0,171
	Acciaio alta resist.	7850	210000	2100	26,75	267,52	1	1	1	1	1
	Leghe d'Al	2700	70000	620	25,93	229,63	0,34	0,33	0,295	0,97	5,01
	Legno	500	30000	15	60,00	30,00	0,06	0,14	0,007	2,24	0,65
	Vetro	2500	75000	40	30,00	16,00	0,32	0,36	0,019	1,12	0,35
	Tungsteno	19300	350000	4100	18,13	212,44	2,46	1,67	1,952	0,68	4,63
	Berillio	1830	300000	700	163,93	382,51	0,23	1,43	0,333	6,13	8,34
	Titanio	4610	115000	1900	24,95	412,15	0,59	0,55	0,905	0,93	8,99
Fibre	Vetro E	2540	72400	3500	28,50	1377,95	0,32	0,34	1,667	1,07	30,05
	Vetro S	2480	85500	4600	34,48	1854,84	0,32	0,41	2,190	1,29	40,45
	Carbonio	1380	190000	1700	137,68	1231,88	0,18	0,90	0,810	5,15	26,86
	Carbonio HM	1900	390000	2100	205,26	1105,26	0,24	1,86	1,000	7,67	24,10
	Carbonio HR	1850	240000	3500	129,73	1891,89	0,24	1,14	1,667	4,85	41,25
	Kevlar	1500	130000	2800	86,67	1866,67	0,19	0,62	1,333	3,24	40,70
	Boro	2630	385000	2800	146,39	1064,64	0,34	1,83	1,333	5,47	23,22
	Berillio	1830	300000	1700	163,93	928,96	0,23	1,43	0,810	6,13	20,26
Matrici	Poliestere	1200	3000	80	2,50	66,67	0,15	0,01	0,038	0,09	1,45
	Fenoliche	1200	3000	40	2,50	33,33	0,15	0,01	0,019	0,09	0,73
	Epossidiche	1500	5000	80	3,33	53,33	0,19	0,02	0,038	0,12	1,16
	Poliamidiche	1140	2500	85	2,19	74,56	0,15	0,01	0,040	0,08	1,63

4.0.4 MECCANISMI DI CRISI NEI COMPOSITI

Così come il comportamento meccanico dei materiali compositi è molto complesso, a causa della disomogeneità e dell'anisotropia del materiale, anche i meccanismi di crisi sono molto più complessi rispetto a quelli dei materiali omogenei ed isotropi.

Queste premesse rendono difficili sia la previsione delle tensioni di crisi che l'interpretazione dei risultati sperimentali.

Alle criticità intrinseche alla tecnologia composita si aggiungono, sin dall'inizio del ciclo di vita del composito, alcune interruzioni di fibre, che nel corso della vita del componente, sono destinate ad aumentare, a causa ad esempio di tensioni localizzate.



Generalmente è presente anche una mancanza di allineamento delle fibre, causata da una scarsa accuratezza nella lavorazione o da stati tensionali anomali.

Una volta sottoposte a carico, le fibre tendono a riallinearsi, inducendo nella matrice stati di compressione e di trazione che possono provocare il distacco tra fibra e matrice, con conseguente riduzione della resistenza del composito; lo schema a lato mostra l'allineamento delle fibre e conseguente compressione della matrice sotto l'azione del carico.



Le fibre possono essere inoltre distribuite in modo non uniforme provocando, quando il composito viene sollecitato, l'insorgere di tensioni tangenziali tra fibre e matrice: questa sollecitazione è nota come *taglio intra-laminare*.

Nello schema a lato è evidenziata la distribuzione non uniforme delle fibre e conseguente nascita del taglio intra-laminare sotto l'azione del carico.

Nel caso di matrici a base polimerica può essere presente porosità dovuta sia alle bolle d'aria rimaste nel corso dell'impregnazione, sia ai gas che si sviluppano durante la polimerizzazione della resina, mentre nel caso di matrici cementizie è l'operazione stessa dell'impregnazione delle fibre ad essere difficoltosa, a causa dell'alta viscosità della malta infatti, si riesce con difficoltà ad avvolgere le fibre meno superficiali.

Si trovano anche fratture nella resina indotte sia dal ritiro che si verifica nel corso della polimerizzazione, sia da tensioni di origine termica.

4.0.4.1 MECCANISMI DI CRISI NEI RINFORZI A MATRICE POLIMERICA

Dallo studio della meccanica dei compositi e dagli esiti delle campagne di prove sperimentali da essi ispirate, in letteratura si trova che i meccanismi di crisi nei sistemi compositi di tipo FRP sono riassumibili in queste categorie:



TRAZIONE PARALLELA ALLE FIBRE

Quando un composito in FRP con rinforzo unidirezionale è sollecitato a trazione fino a rottura, la crisi è generalmente causata da una combinazione di cause:



La crisi può avere inizio con la rottura di singole fibre nella loro sezione più debole, come anche a partire da tensioni molto inferiori a quelle di crisi, per la presenza di difetti.

Il fenomeno inizialmente riguarda una piccola percentuale di fibre, ma la resina, lavorando a taglio, trasmette lo sforzo alle fibre adiacenti, le fibre rotte possono rimanere attive per quasi tutta la loro lunghezza, consentendo al composito di mantenere praticamente invariate le sue proprietà.

La crisi si verifica quando il fenomeno si propaga in maniera instabile in due modi:

PROPAGAZIONE IN DIREZIONE TRASVERSALE:



- l'aderenza tra le estremità della fibra rotta e la resina impedisce il distacco all'interfaccia;
- la resina subisce una crisi localizzata per modo I e la frattura giunge alle fibre adiacenti, provocando in esse un incremento localizzato di tensione, che ne può provocare la rottura;
- l'innescò alla crisi può essere anche una microfessurazione della resina, qualora questa abbia una deformazione ultima inferiore a quella della fibra.
- una crisi di questo tipo si verifica in genere con piccole frazioni volumetriche di fibra.

PROPAGAZIONE IN DIREZIONE LONGITUDINALE:



- è caratterizzata da una crisi provocata dalle tensioni tangenziali, crisi che può interessare l'interfaccia tra fibra e resina (taglio intra-laminare), oppure soltanto la resina;
- la crisi si propaga, a partire dalla sezione di rottura della fibra, lungo la fibra stessa;
- questo tipo di crisi si verifica frequentemente in caso di elevate frazioni volumetriche di fibra.

Le due modalità possono anche coesistere, o verificarsi in successione.

Spesso si verificano dapprima fratture normali alle fibre, che interessano soprattutto la matrice, successivamente si verifica la frattura intra-laminare, inizialmente in zone limitate e in seguito in modo più diffuso, fino a quando il fenomeno diviene instabile e sfocia nel collasso della lamina.

Le fasi precedenti il collasso non danno luogo a un sensibile scostamento dalla linearità del legame tensione-deformazione, e la crisi si manifesta in maniera improvvisa.

Se il composito è sollecitato a trazione nella direzione ortogonale alle fibre, la crisi avviene per il raggiungimento della tensione ultima di trazione della matrice.

TAGLIO NEL PIANO



TRAZIONE NON PARALLELA ALLE FIBRE

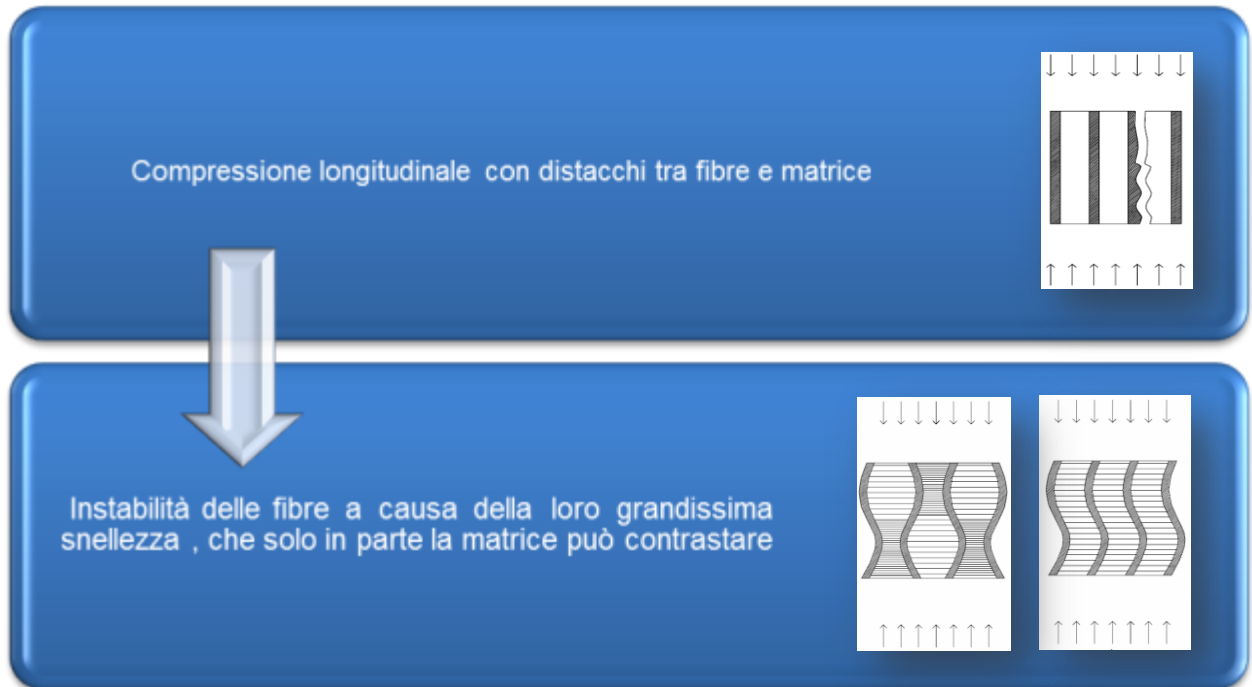
Se si considera il comportamento a trazione di una lamina unidirezionale sollecitata secondo una direzione θ rispetto alla direzione delle fibre, si possono distinguere angoli di carico per i quali sono più evidenti alcuni tipi di rottura rispetto ad altri.

Tabella: angolazione del carico applicato e corrispondente tipologia di rottura:

Angolo θ	Tipo di rottura
tra 0° e 5°	Rottura trasversale per cedimento delle fibre
tra 5° e $20^\circ \div 25^\circ$	Rottura per taglio intra-laminare
tra $20^\circ \div 25^\circ$ e 45°	Rottura per taglio intra-laminare + Rottura matrice per trazione
tra 45° e 90°	Rottura matrice per trazione

COMPRESSIONE

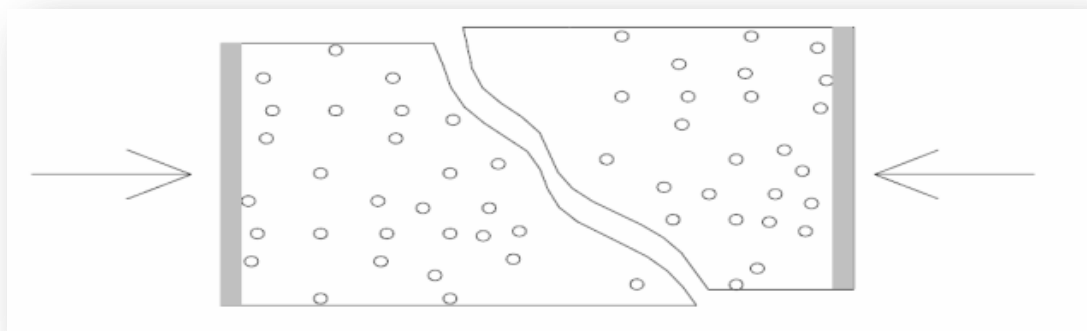
Nei compositi unidirezionali sollecitati a compressione nella direzione delle fibre, la crisi del composito può avvenire per:



In ogni caso la resistenza a compressione è molto inferiore rispetto a quella a trazione.

Nella direzione ortogonale alle fibre la crisi avviene per compressione della matrice e spesso si creano superfici di scorrimento.

In una lamina bidirezionale, e soprattutto in un laminato composto da più lamine, tutte queste tipologie di rottura interagiscono tra loro e la crisi si manifesta in maniera più complessa.



Schematizzazione del meccanismo di crisi di un composito unidirezionale per compressione ortogonale alle fibre

4.0.4.2 MECCANISMI DI CRISI NEI RINFORZI A MATRICE CEMENTIZIA

I meccanismi di crisi dei materiali compositi a matrice inorganica (cementizia) si differenziano sostanzialmente da quelli a matrice organica (resina epossidica) per le modalità con cui si manifestano.

Generalmente la crisi di provini rinforzati con questi compositi risulta più duttile di quella dei medesimi provini rinforzati con FRP.

Il perché di questa maggiore duttilità è concepibile se focalizziamo la nostra attenzione su un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre.

PROVE DI PULL-OUT

Per testare il comportamento di un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre ed individuare il meccanismo che porta ad una rottura meno repentina e quindi più duttile, si può fare riferimento ad una prova di pull-out²⁰ che valuti l'interazione tra fibre e matrice cementizia.

Come esempio caratteristico delle modalità di crisi si può fare riferimento a test condotti su un composito in FRG molto comune in ambito edilizio, ossia fibre di vetro accoppiate ad una malta cementizia a grana fine, le quali hanno portato alla luce quanto segue:



²⁰ pull-out: prova sperimentale a carattere semi-distruttivo che consiste nell'estrarre un inserto (in questo caso un filato in fibra di vetro) da una matrice solida per valutarne l'interazione e la resistenza dei materiali testati.

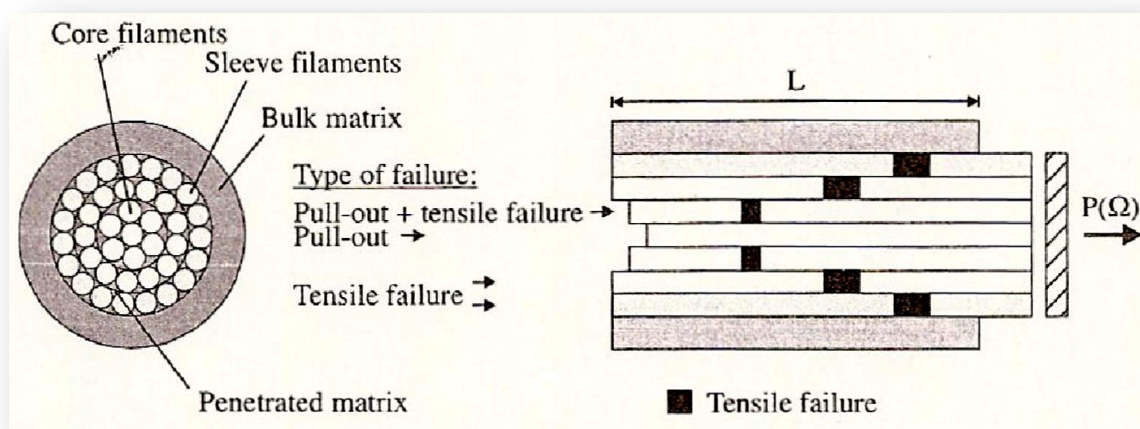
Il comportamento durante la prova è condizionato dalla forte adesione che i filamenti più esterni del filato sviluppano con la matrice mentre quelli più interni si lasciano scivolare come avvolti da una guaina, questo avviene perché la penetrazione della malta tra i filati non avviene in maniera omogenea.

In linea di principio quanto appena esposto non deve lasciare stupiti, in quanto, a differenza delle resine epossidiche che compongono i classici FRP, le malte utilizzate nei rinforzi a matrice cementizia hanno nel loro impasto la polvere di cemento che per quanto possa essere fine, come quella utilizzata nella prova che era di circa $10\mu\text{m}$, difficilmente riesce a penetrare negli spazi tra i filamenti di fibra che è dell'ordine dei $3\mu\text{m}$.

Il meccanismo di rottura che si evidenzia prende il nome di “*telescopic-failure*”, questo nome, che letteralmente significa “rottura telescopica”, deriva proprio dalla modalità con cui si manifesta il successivo sfilamento dei filamenti (*pull-out failure*) che si protrae dagli strati più esterni fino al nucleo del filato.

Il meccanismo sopradescritto progressivamente si combina ad un secondo che coinvolge i filamenti più esterni, i quali, prima di subire l'estrazione dalla matrice cementizia, giungono a rottura per il superamento della resistenza a trazione ultima (*tensile failure*).

In considerazione di queste modalità di crisi s'evidenzia che la perdita d'efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo una maggiore dissipazione di energia di rottura e quindi la duttilità che li contraddistingue.



Schematizzazione dei meccanismi di crisi di un rinforzo annegato in una matrice cementizia

In base a quanto esposto, si capisce come la rappresentazione analitica e quindi la previsione del comportamento di un'applicazione di questo tipo sia attualmente un problema per i ricercatori del settore.

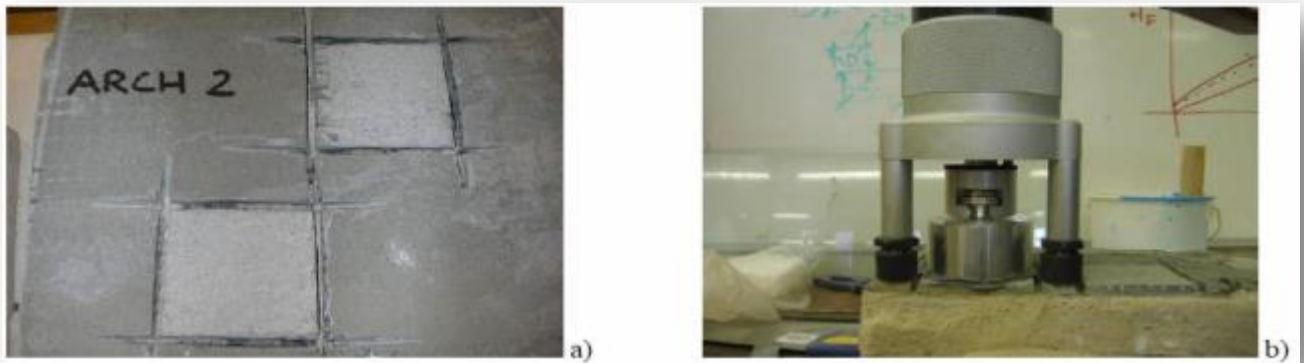
PROVE DI PULL-OFF

Si tratta di un metodo diretto di prova consistente in una estrazione semi-distruttiva, atto a stimare la resistenza a trazione dei materiali di ripristino collegati al sottofondo.

La prova viene preparata incollando direttamente sulla fibra, in una zona appositamente predisposta con opportune resine, un apposito elemento metallico di dimensioni solitamente cm 4x4 dotato di una apposita asta.

Prima della prova viene eseguito un taglio lungo il bordo del piastrino metallico in modo da svincolare la zona in prova da quelle circostanti.: il taglio deve avere una profondità almeno pari allo spessore della fibra.

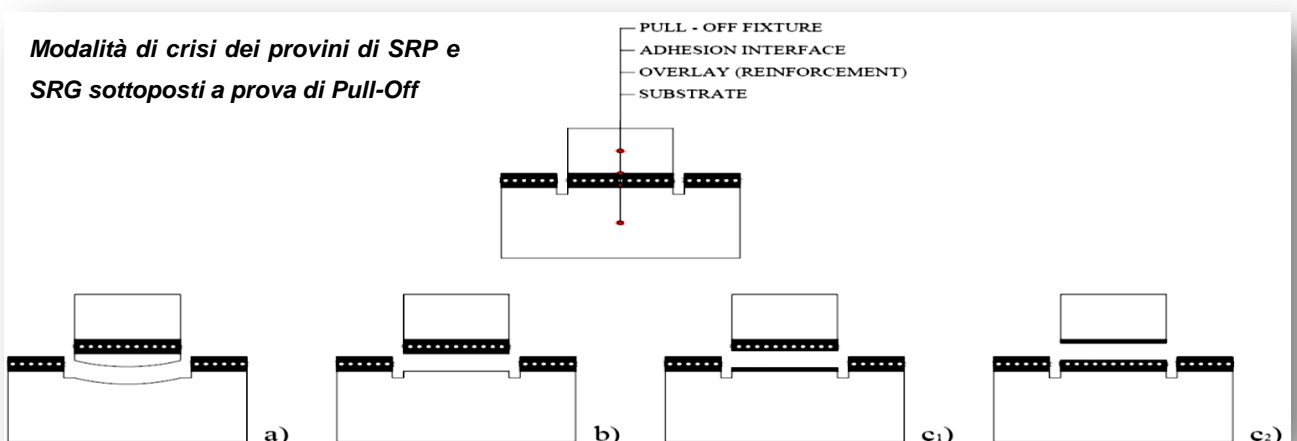
Ad avvenuta maturazione della resina si procede applicando al disco una pressione di distacco in direzione normale alla parete con opportuno martinetto dotato di manometro tarato, il quale esercita la forza contrastando su una struttura di sostegno.



a) elemento di rinforzo testato con prova Pull-Off

b) macchina di prova per il Pull Off

Prove di questo tipo sono state effettuate sia su provini rinforzati con SRP (Steel Reinforced Polymer) sia con SRG (Steel Reinforced Grout), evidenziando le seguenti modalità di crisi:



Con riferimento alla figura soprastante analizziamo i diversi schemi di rottura:



a) Frattura Coesiva: all'interno del materiale di supporto

- Lo stesso materiale è presente su entrambe le superfici di frattura, le quali possono presentarsi lisce o rugose.



b) Frattura Adesiva: all'interfaccia tra l'adesivo e l'aderendo

- Si manifesta quando la resistenza dell'interfaccia (forza di adesione) è minore di quella dell'aderendo.



c) Frattura Coesiva: all'interno del materiale di supporto

- Si manifesta in corrispondenza di uno strato di matrice non perfettamente consolidato, subito al di sotto delle fibre in acciaio oppure subito al di sopra.

Tutti i provini con SRP (Steel Reinforced Polymers o Plastic) hanno mostrato modalità di crisi tipo a), mentre quelli a matrice cementizia SRG (Steel Reinforced Grout), arrivando a rottura prevalentemente con modalità c), evidenziando una migliore adesione al supporto ma una scarsa capacità di uniformarsi alla parte discontinua del pacchetto di rinforzo.

La difformità di comportamento è imputabile, come per le prove di pull-out, alla maggiore densità della matrice cementizia che non riesce ad avvolgere completamente la fibra metallica.

5.0 IL TEMA DELLA DURABILITÀ NEI MATERIALI COMPOSITI

E' di fondamentale importanza conoscere quali siano i problemi di durabilità²¹ connessi all'impiego dei materiali compositi utilizzati in interventi di consolidamento strutturale.

Di seguito sono descritte le principali cause²² che possono dare origine ad un decadimento delle prestazioni del materiale posto in opera.

5.0.1 EFFETTI TERMICI

E' noto che basse temperature, cicli di gelo-disgelo e alte temperature possono innescare fenomeni di microcracking, degrado del legame fibra-matrice, o ancora fenomeni di debonding.

La problematica dell'esposizione dei rinforzi in FRP alla alte temperature viene affrontata in prima analisi studiando il comportamento delle singole fasi costituenti il materiale, fibra e matrice, avendo chiaro in ogni caso che, tali proprietà possono essere in via teorica, anche fortemente alterate allorché ci si riferisca al materiale nella sua globalità: il composito.

Un ulteriore "complicazione" del problema deriva poi dalla sua caratterizzazione in termini di rinforzo strutturale, ovvero di materiale applicato per mezzo di adesivi o resine da impregnazione al supporto strutturale.

Sia che si tratti di fibre, matrice, adesivo o resina da impregnazione, il comportamento di un materiale a base polimerica alle alte temperature viene significativamente descritto per valori di temperatura prossimi ad un valore critico noto come vetrosa, Tg. (paragrafo 2.0.2.1.1).

In corrispondenza di tale valore le regioni polimeriche amorfe di un materiale subiscono una trasformazione reversibile, passando da uno stato rigido e fragile ad uno viscoso e gommoso.

²¹ Durabilità: tendenza a resistere al tempo.

²² Le informazioni riportate sono elaborate traendo materiale da:

- Brigante, D., (2012), "Rinforzo strutturale con materiali compositi", Grafil (A cura di) Torino.
- CNR (2004-rev. 2008)-Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati- Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie" CNR (A cura di) Roma.
- Minguzzi, G., (1998), "Fiber Reinforced Plastics. Utilizzo dei materiali composite a matrice polimerica in edilizia civile", Alinea Editrice (A cura di) Firenze.
- <http://www.assocompositi.it>
- <http://www.carbon-compositi.it>

Il raggiungimento di tale valore di temperatura implica una alterazione e un decadimento delle proprietà fisico meccaniche del materiale: per valori di temperatura prossimi alla T_g si nota un abbattimento del modulo elastico fino a 3 ordini di grandezza.

Dallo studio delle diverse fasi costituenti il composito è emerso come tanto le fibre quanto la matrice mostrino un ottimo comportamento termico.

Le fibre garantiscono, con opportuni trattamenti termici, un degrado trascurabile fino a 2000C° .

Le matrici rimangono caratterizzate sino al valore della temperatura di transizione vetrosa, per i compositi normalmente utilizzati nel settore civile, intorno a valori dell'ordine dei $100\text{-}130\text{C}^\circ$.

L'anello debole della catena va ricercato nel comportamento del composito in quanto rinforzo strutturale, in tale veste infatti, il composito viene reso solidale alla struttura per mezzo di adesivi e resine da impregnazione.

Per tali elementi si può osservare come i componenti di base siano della stessa natura dei costituenti la matrice: si tratta in entrambi i casi di polimeri, nella maggior parte dei casi di resine termoindurenti a base epossidica.

Tuttavia le prestazioni degli "incollaggi" ad elevate temperature risultano sensibilmente inferiori a quelle caratterizzanti la matrice, tale diversità di comportamento va ricondotta al diverso processo di produzione che li contraddistingue.

Il valore della temperatura di transizione vetrosa ottenibile per le resine da impregnazione e gli adesivi per incollaggio si attesta comunemente intorno ai 50C° ; per alcune resine elevabile a 120C° .

Si osserva, inoltre, che tali valori possono essere suscettibili di ulteriori diminuzioni, essendo le matrici esposte dall'umidità ambientale durante il periodo di reticolazione.

Si sottolinea a tal proposito come l'azione dell'umidità sul rinforzo, in presenza di alte temperature, non si possa trattare semplicemente in termini di sovrapposizione degli effetti: tra temperatura e umidità infatti esiste un forte legame di dipendenza e non semplicemente un rapporto di coazione.

5.0.2 UMIDITÀ

L'umidità si diffonde in tutti i polimeri organici provocando cambiamenti delle loro caratteristiche chimiche, termofisiche e meccaniche.

Le trasformazioni che subisce la resina, causate dall'assorbimento d'acqua o di soluzioni chimiche, sono principalmente dovute: all'idrolisi, alla plasticizzazione, alla saponificazione ed altri meccanismi che possono causare cambiamenti sia reversibili che irreversibili nella struttura del polimero.

Particolarmente importanti gli effetti congiunti dovuti ad elevate escursioni termiche e dal contatto del materiale composito con soluzioni saline ad elevate concentrazioni.

In queste circostanze si ha un notevole aumento dei tempi di degrado dell'intervento di rinforzo strutturale.

Per ridurre gli effetti di degrado che possono subire i materiali compositi ubicati in ambienti umidi è opportuno utilizzare uno spessore superficiale più elevato della resina di impregnazione, in modo tale da proteggere le fibre.

5.0.3 ALCALI

Anche i materiali compositi possono entrare in contatto con media alcalini attraverso l'interazione con diverse fonti: soluzioni alcaline, terreno e conglomerato cementizio.

Esistono molte ricerche effettuate sulla degradazione di fibre di vetro "nude" a contatto con soluzioni alcaline, specialmente quelle che derivano dal calcestruzzo; dai risultati emerge che le fibre in questi ambienti subiscono una severa degradazione a livello strutturale.

Anche se la presenza di resina intorno ai singoli filamenti protegge le fibre da tale attacco, le soluzioni alcaline possono accelerare notevolmente la degradazione del legame delle resine stesse, specialmente se l'intervento di consolidamento strutturale non viene conservato adeguatamente con il passare del tempo.

Quindi, la resina polimerica gioca un ruolo fondamentale nel proteggere la fibra e rallentare il processo di diffusione degli alcali: la preferenza dovrebbe essere data all'uso di resine epossidiche e viniliche, mentre l'uso di resine a base di poliestere non è raccomandato, in quanto il loro impiego riduce sensibilmente il tempo da cui ha inizio il degrado.

5.0.4 CREEP/RILASSAMENTO

Negli interventi di consolidamento con FRP, il rilassamento che subisce il materiale alle normali tensioni di esercizio, è regolato dal tipo di matrice che lo compone e dalle caratteristiche delle fibre.

I materiali compositi costituiti da fibre di vetro o di aramide sono maggiormente predisposti a rottura a livelli di stress più bassi rispetto a quelli delle fibre di carbonio, quindi l'utilizzo di queste ultime è da privilegiare negli interventi di rinforzo strutturale.

Se l'intervento non è conservato e non viene eseguita una idonea manutenzione, col passare del tempo la resina posta in superficie tende ad essere facilmente predisposta a fenomeni di creep e micro-crack durante le diverse fasi di servizio della struttura.

Un' opportuna scelta di resine e una accurata progettazione nella disposizione della trama delle fibre può risolvere in larga parte i problemi legati a questo fenomeno.

5.0.5 RADIAZIONI UV

La radiazione solare ultravioletta che colpisce la superficie terrestre costituisce all'incirca il 6% del flusso totale radiante del Sole.

Molti materiali polimerici posseggono energie di dissociazione di legame alla lunghezza d'onda compresa tra 290 e 400 nm; questa è proprio la lunghezza d'onda della radiazione ultravioletta.

Per questo motivo i materiali aventi queste caratteristiche subiscono un grave attacco dalla radiazione emessa in corrispondenza di tale spettro solare.

Gli effetti dell'esposizione ultravioletta (UV), sul materiale composito, sono normalmente confinati ad uno spessore compreso in pochi micron a ridosso della superficie esterna.

E' buona norma, negli interventi, schermare la superficie dell' FRP dall'esposizione diretta ai raggi solari, in quanto l'utilizzo di un ricoprimento polimerico non previene i danni derivanti dall'irraggiamento UV, ma ha solamente la valenza di "superficie di sacrificio".

Gli effetti più deleteri dell'esposizione UV non sono probabilmente dovuti al danneggiamento che provoca la radiazione solare, limitato alla zona superficiale, ma al potenziale in grado d'ingresso d'umidità nelle regioni danneggiate.

6.0 SISTEMI COMPOSITI NEL RESTAURO E RICOSTRUZIONE POST-SISMA

Così come descritto negli obiettivi del presente lavoro di tesi, passo ora a introdurre il panorama applicativo in ambito edilizio dei sistemi compositi sin qui descritti.

Gli ambiti applicativi in edilizia di questi materiali sono quelli dei materiali da costruzione tradizionali, verso i quali si propongono in alternativa.

Nello specifico in questa sede mi sono data l'obiettivo d'indagare l'utilizzo di sistemi compositi nell'ambito del restauro e ricostruzione post-sisma in alternativa ai tradizionali

Prima d'introdurre le applicazioni pratiche ritengo utile descrivere, (seppur sinteticamente in quanto l'argomento meriterebbe in sé un elaborato), le forze in campo da gestire:

- le azioni sismiche

Una buona progettazione deve, oggi più che mai in ragione anche dei recenti sisma dell'Emilia e Amatrice, tenere presenti le consolidate nozioni della scienza e della tecnica delle costruzioni quanto quelle costitutive, del comportamento e dinamicità dei suoli.

Si delineano così due scenari progettuali:

- **“pre” costruzione**
- **“post” costruzione**

Detti scenari progettuali avranno obiettivi diversi:

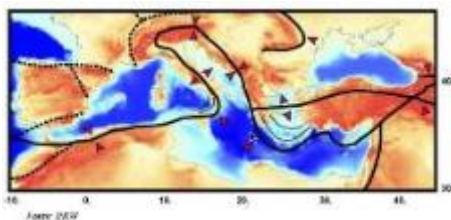
- **il “pre” costruzione la prevenzione e/o la mitigazione del rischio sismico**
- **il “post” costruzione la messa in sicurezza e/o la ri-costruzione a danno avvenuto**

Entrambi gli scenari, benché significativamente diversi, muovo verso un comune obiettivo: la gestione delle variabili strutturali in gioco quando si tratta di progettare un manufatto.

Non essendo negli scopi di questo studio indagare complessivamente gli ambiti propri della scienza e tecnica delle costruzioni, mi limiterò a descrivere l'ambito della progettazione “post” costruzione meglio noto come “mitigazione del rischio sismico”.

Anche in questo caso ritengo utile introdurre brevemente la forza in gioco che dovrà conoscere e gestire il progettista per responsabilità propria e/o in forza di Legge: il sisma, le azioni sismiche e i rispettivi panorami, dal normativo all'applicativo.

6.0.1 CENNI IN MATERIA DI GESTIONE DEL RISCHIO SISMICO ²³



L'Italia è uno dei Paesi a maggiore rischio sismico del Mediterraneo, per la sua particolare posizione geografica, nella zona di convergenza tra la zolla africana e quella eurasiatica.

La sismicità più elevata si concentra nella parte centro-meridionale della Penisola, lungo la dorsale appenninica (Val di Magra, Mugello, Val Tiberina, Val Nerina, Aquilano, Fucino, Valle del Liri, Beneventano, Irpinia), in Calabria e Sicilia e in alcune aree settentrionali, come il Friuli, parte del Veneto e la Liguria occidentale. Solo la Sardegna non risente particolarmente di eventi sismici.

La **sismicità** indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio.

Se conosciamo la frequenza e l'energia associate ai terremoti che caratterizzano un territorio, e attribuiamo un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definirne la pericolosità sismica.

La **pericolosità sismica** sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato.

Le **conseguenze** di un terremoto dipendono anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni alle azioni di una scossa sismica: la predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata si definisce vulnerabilità.

Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze.

L'**esposizione** è definita la maggiore o minore presenza di beni esposti al rischio, la possibilità cioè di subire: perdita di vite umane, danni economici e di carattere culturale.

Il **rischio sismico**, determinato dalla combinazione della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione, è **la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo**, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti).

²³ Informazioni tratte dal sito istituzionale del Dipartimento della Protezione Civile-Presidenza del Consiglio dei Ministri: <http://www.protezionecivile.gov.it>

L'Italia ha:

- **una pericolosità sismica medio-alta** (per frequenza e intensità dei fenomeni),
- **una vulnerabilità molto elevata** (per fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale, produttivo e dei servizi)
- **un'esposizione altissima** (per densità abitativa e presenza di un patrimonio storico, artistico e monumentale unico al mondo)

La nostra Penisola è dunque ad elevato rischio sismico, in termini di vittime, danni alle costruzioni e costi diretti e indiretti attesi a seguito di un terremoto.

La prevenzione sismica si può realizzare attraverso l'utilizzo di due strumenti interdipendenti:

- **la classificazione sismica**
- **la normativa antisismica**

In Italia i comuni sono stati classificati come sismici e sottoposti a norme restrittive per le costruzioni solo dopo essere stati fortemente danneggiati dai terremoti, dal 1908 (anno del devastante terremoto di Messina e Reggio Calabria) fino al 1974.

In alcuni casi, si è assistito ad una declassificazione su richiesta paradossalmente degli stessi territori colpiti, come nel caso di 39 comuni dell'Irpinia, con la legge n. 1684 del 1962, solo un mese dopo la loro classificazione avvenuta in seguito al terremoto del 21 agosto 1962 (IX grado della scala MCS).

Con la Legge n.64 del 2 febbraio 1974 si stabilisce che la classificazione sismica debba essere realizzata sulla base di comprovate motivazioni tecnico-scientifiche, attraverso decreti del Ministro per i Lavori Pubblici.

Nel 1981 viene adottata la proposta di riclassificazione del territorio nazionale in 3 categorie sismiche predisposta dal CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Progetto Finalizzato Geodinamica. Con appositi decreti ministeriali, tra il 1981 ed il 1984, il 45% del territorio nazionale risulta classificato ed è obbligatorio il rispetto di specifiche norme per le costruzioni.

Metà del Paese, tuttavia, continua a non essere soggetta a questo obbligo.

Dopo il terremoto del 2002 in Puglia e Molise viene emanata l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 2003, che riclassifica l'intero territorio nazionale in quattro zone a diversa pericolosità, eliminando le zone non classificate.

E' un punto di svolta importante: **nessuna area del nostro Paese può ritenersi non interessata al problema sismico.**

La normativa antisismica riguarda i criteri per costruire una struttura in modo da ridurre la sua tendenza a subire un danno, in seguito ad un evento sismico.

Il Ministro delle Infrastrutture, di concerto con il Ministro dell'Interno e con il Capo Dipartimento della Protezione civile emana il 14 gennaio 2008 il Decreto Ministeriale che approva le nuove "Norme Tecniche per le Costruzioni", pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n.29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30.

L'applicazione di tali norme diventa obbligatoria dal 1 luglio 2009, come previsto dalla legge n.77 del 24 giugno 2009.

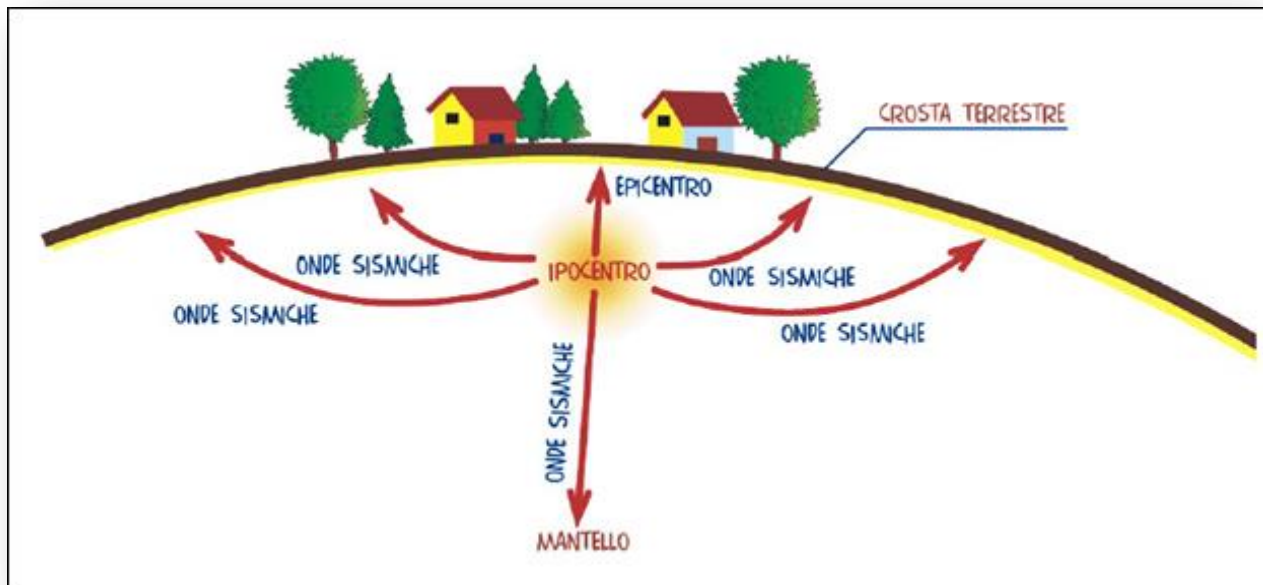
Ecco esposti cronologicamente i principali provvedimenti nazionali relativi al rischio sismico:

- **L.15 marzo 1997, n. 59** :Legge Delega al Governo per il conferimento di funzioni e compiti alle Regioni ed Enti Locali, per la riforma della Pubblica Amministrazione e per la semplificazione amministrativa.
- **D. Lgs. 31 marzo 1998, n. 112**: Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle Regioni ed agli Enti Locali, in attuazione del capo I della Legge 15 marzo 1997, n. 59.
- **Dpr n. 380 del 6 giugno 2001**: Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia
- **L. 9 novembre 2001, n. 401**: Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 7 settembre 2001, n. 343, recante disposizioni urgenti per assicurare il coordinamento operativo delle strutture preposte alle attività di protezione civile.
- **Opcm n. 3274 del 20 marzo 2003**: Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
- **Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008**: "Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" emanato dal Ministro delle infrastrutture, di concerto con il Ministro dell'interno e con il Capo Dipartimento della protezione civile.

Dopo il terremoto in Abruzzo del 6 aprile 2009 è stato emanato un nuovo provvedimento per dare maggiore impulso alla prevenzione sismica: L'articolo 11 del decreto legge n. 39 del 28 aprile 2009 prevede che siano finanziati interventi per la prevenzione del rischio sismico su tutto il territorio e la sua attuazione è affidata al Dipartimento della Protezione Civile e regolata attraverso ordinanze del Capo del Dipartimento della Protezione Civile.

6.0.1.1 L' AZIONE SISMICA

Per le scienze naturali l'azione sismica rientra tra le azioni ambientali, naturali.



Per il progettista strutturale essa è definita e normata dal D.M. 14/01/2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” al paragrafo §3.2 – Azione Sismica²⁴ :



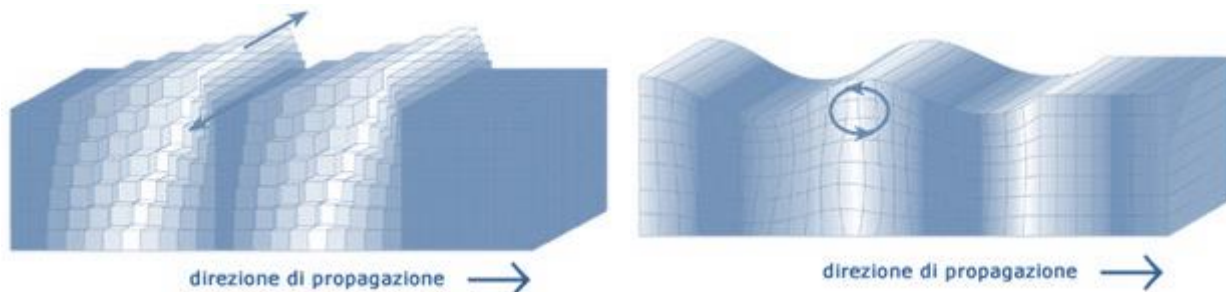
“Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A quale definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} , come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento V_R , come definito nel § 2.4. In alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica del sito.”...omissis

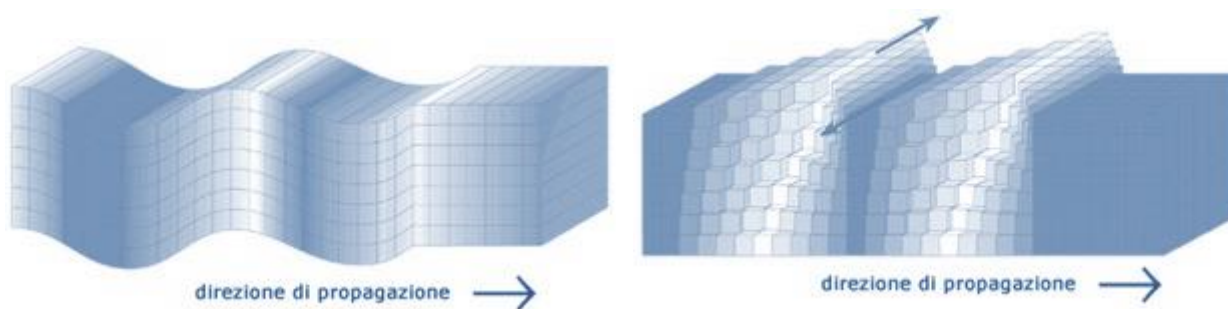
²⁴ Estratto del paragrafo §3.2 – Azione Sismica - del Decreto del Ministero delle infrastrutture 14 gennaio 2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni” (pubblicato nella G.U. n° 29 del 04/02/2008 - suppl. ord. n° 30)

6.0.1.2 L'AZIONE SISMICA SULLE COSTRUZIONI

L'azione sismica sulle costruzioni è generata dal moto non uniforme del terreno di sedime per effetto della propagazione delle onde sismiche.



Schematizzazione scuotimento del terreno - Tipologia onde



Il **moto sismico** eccita la struttura provocandone la risposta dinamica, che va verificata e controllata negli aspetti di sicurezza e di prestazioni attese.

Le **azioni sismiche di progetto** si definiscono in base alla **Pericolosità Sismica** del sito di costruzione.

La **pericolosità sismica** è definita in termini di:



6.0.1.3 LA PERICOLOSITÀ SISMICA

La pericolosità sismica di un territorio è rappresentata dalla frequenza e dalla forza dei terremoti che lo interessano, ovvero dalla sua sismicità.

Viene definita come la probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo, si verifichi un terremoto che superi una soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (P_{ga}) di nostro interesse.

L'approccio alla valutazione della pericolosità può essere di tipo deterministico oppure probabilistico.

Il metodo deterministico si basa sullo studio dei danni osservati in occasione di eventi sismici che storicamente hanno interessato un sito, ricostruendo degli scenari di danno per stabilire la frequenza con cui si sono ripetute nel tempo scosse di uguale intensità.

Tuttavia, poiché questo approccio richiede la disponibilità di informazioni complete sulla sismicità locale e sui risentimenti, nelle analisi viene generalmente preferito un approccio di tipo probabilistico.

Attraverso questo approccio, la pericolosità è espressa come la probabilità che in un dato intervallo di tempo si verifichi un evento con assegnate caratteristiche.

Con il metodo probabilistico vengono individuati nel territorio, le zone responsabili degli eventi sismici (zone sismo genetiche) e il loro grado di attività sismica infine si calcolano gli effetti sul territorio in relazione alla distanza dall'epicentro.

Attualmente in Italia “La pericolosità sismica” è determinata secondo quanto approvato dal D.M. 14 gennaio 2008 (NTC)²⁵: esso fornisce i parametri dell'azione sismica in funzione delle coordinate geografiche a partire da un reticolo di lato pari a circa 5 km e per diversi periodi di ritorno, compresi tra 30 e 2475 anni.

Nell' “Allegato A” alle NTC sono fornite le indicazioni per ottenere i parametri dell'azione sismica per una generica coordinata geografica ed un generico periodo di ritorno²⁶.

²⁵ “La pericolosità sismica”: Decreto del Ministero delle infrastrutture 14 gennaio 2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”(pubblicato nella G.U. n° 29 del 04/02/2008 - suppl. ord. n° 30) studio pubblicato sul sito web del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici all'indirizzo:
http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_content&task=view&id=75&Itemid=20

²⁶ Il foglio di calcolo elettronico Spettri-NTC, che valuta e fornisce le risposte spettrali per una generica coordinata geografica ed un generico periodo di ritorno, in perfetto accordo con le indicazioni di norma, è scaricabile nel sito:
http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_content&task=view&id=75&Itemid=1

6.0.1.4 IL MOTO SISMICO

Il pericolosità sismica introduce al parametro progettuale detto “moto sismico”.

Detto parametro è descritto dallo “spettro sismico” definito sulla base di quanto riportato nell’ “Allegato 1” alle NTC, utilizzando il valore corrispondente alla coordinata geografica del manufatto o al comune nel quale esso è situato.

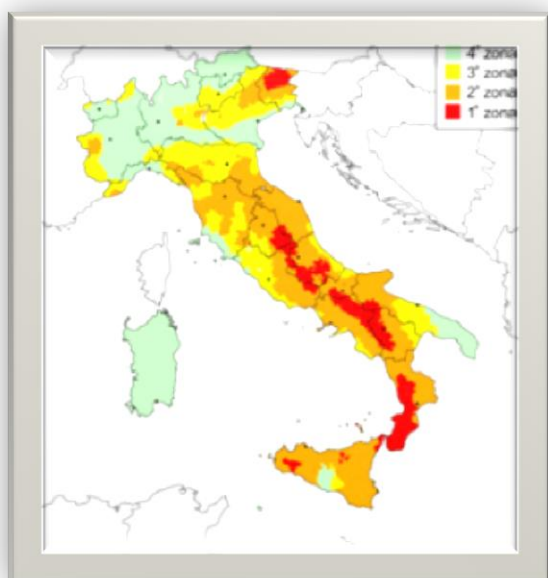
Lo spettro di risposta è un diagramma che fornisce il massimo valore medio dell’accelerazione relativa ad un oscillatore semplice, in funzione del suo periodo fondamentale.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R ²⁷, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

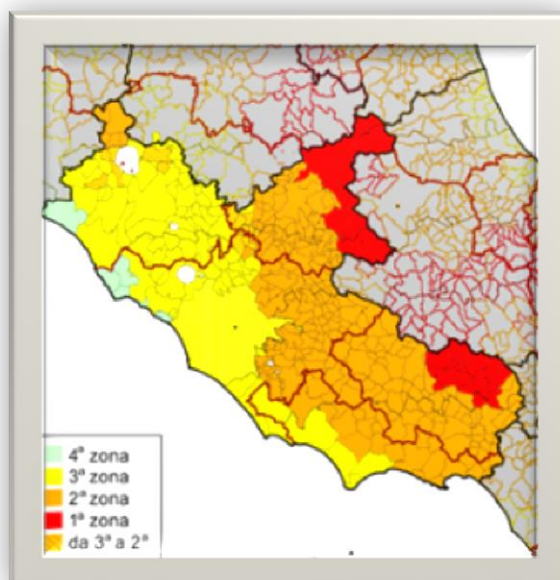
- a_g accelerazione orizzontale massima al sito
- F_o valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T^*_c periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

Questi parametri sono calcolati in funzione di un “reticolo di riferimento”²⁸ mappato sul territorio italiano (maglie di circa 10 km di lato), assegnando a ciascun nodo i valori di a_g , F_o , T^*_c di riferimento per i progettisti.

MACRO-Zonazione sismica



MICRO-Zonazione sismica



²⁷ P_{VR} e V_R : probabilità (P_{VR}) che, in un fissato lasso di tempo periodo di riferimento (V_R) espresso in anni, in un detto sito si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato, DM.14/01/08- § 2.4.3

²⁸ reticolo di riferimento sismico: mappe strumentali alla mitigazione del rischio sismico. Nello specifico ci si riferisce alla “macro classificazione” del territorio effettuata a livello nazionale a cui fa seguito l’approfondimento della pericolosità sismica locale attraverso la “micro zonazione”.

6.0.1.5 IL RISCHIOSISMICO

Sotto la dicitura di riduzione del Rischio Sismico confluiscono una serie di concetti e di conseguenti attività, riguardanti un tema ambientale tanto importante quanto spesso sottovalutato nelle conseguenze.

Una sintetica quanto efficace descrizione d'area vasta del rischio sismico riferito al nostro territorio quale tema ambientale, sia nella valutazione delle sue componenti sia mediante l'individuazione di possibili indicatori, risulta oggi inserita nell'Annuario dei dati ambientali prodotto dell'ARPA Emilia-Romagna:

RISCHIO SISMICO (RS) = [Pb . PI] . [V . E]
Severità dell'azione
Pericolosità (Pb) = frequenza ed intensità probabilistica mente prevedibili degli eventi che interesseranno in futuro un territorio anche declinata secondo i possibili sismi; Effetti locali (PI) = variazioni della pericolosità all'interno di un territorio per condizioni specifiche dei luoghi (anche temporanee)
Severità delle conseguenze
Vulnerabilità (V) = qualità delle costruzioni e delle infrastrutture presenti in un territorio in termini di resistenza ad una determinata intensità dell'evento sismico Esposizione (E) = distribuzione e struttura della popolazione presente, delle attività produttive, risorse ed infrastrutture di un territorio

Riassumendo, al fine di **mitigare gli effetti di un sisma**, in estrema sintesi possiamo dire che tre sono i filoni di lavoro ormai consolidati ed approfonditi ai diversi livelli istituzionali e alle diverse scale territoriali:

- **la Normativa** (nazionale e regionale);
- **l'individuazione della pericolosità sismica** del territorio (macro-zonazione e micro zonazione-sismica);
- **la pianificazione territoriale ed urbanistica** (Province e Comuni) a cui fa seguito una corretta progettazione alla scala edilizia in linea con le seguenti strategie per affrontare le azioni sismiche:
 - ridurre la probabilità che l'azione avvenga o ridurre l'intensità (prevenzione)
 - ridurre gli effetti dell'azione sulla struttura (protezione)
 - progettare e realizzare una struttura in grado di sopportare senza danni le azioni
 - limitare il grado di danneggiamento delle strutture a seguito dell'accadimento dell'azione sismica
 - mitigare le conseguenze del collasso (mitigazione)

6.0.2 NORMATIVA SULL'APPLICAZIONE DEI COMPOSITI IN EDILIZIA



All'accelerazione tecnologica dello studio dei compositi non corrisponde, tuttavia, un aggiornamento del quadro normativo, che allo stato attuale è, come per tutte le costruzioni in genere, fondamentalmente costituito da:

- **Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14/01/2008** (nel seguito indicate come NTc2008)
- **Circolare Esplicativa n.617 del 02/02/2009**

Tali norme riconoscono la possibilità di utilizzare materiali non tradizionali (tra cui rientrano i compositi fibrorinforzati) e, per la loro qualificazione e accettazione, come anche per il progetto e le verifiche strutturali, rimandano alle Istruzioni del consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, alle linee guida e ai documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Più specificatamente, il paragrafo 4.6 e il cap. 11 delle NTc2008, stabiliscono che non si possono utilizzare materiali non tradizionali senza il preventivo assenso del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (di seguito CSLLP).

Deve cioè essere ottenuta la certificazione di Idoneità Tecnica all'Impiego, rilasciata dal Servizio Tecnico centrale (STC) su parere del CSLLPP, per lo specifico prodotto utilizzato e, nel caso di rinforzi FRP e FRG, etc., anche in riferimento allo specifico supporto su cui questi sono applicati.

Di contro esistono pareri della prima Sezione del CSLLPP che contengono informazioni parzialmente difformi da quanto è stato sopra riferito.

Il parere n. 113 del 07/09/2010 - CSLLPP chiarisce che non è necessaria l'autorizzazione preventiva del Servizio Tecnico Centrale per l'utilizzo dei compositi fibrorinforzati negli interventi su elementi strutturali preesistenti.

Non è nemmeno necessario che il singolo progetto nella sua unicità ottenga un'autorizzazione o una certificazione di idoneità da parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Nel medesimo parere, infine, si afferma che per i compositi sia pertinente il par. 8.6 (e non il 4.6) delle NTc2008, tale punto cita:

“gli interventi sulle strutture esistenti devono essere effettuati con materiali previsti dalle presenti norme; possono essere altresì utilizzati materiali non tradizionali, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità”.

Il parere n. 120 del 18/10/2011 - CSSLPP specifica invece che la qualificazione e la certificazione di idoneità tecnica all'impiego dei materiali compositi devono essere rilasciate sulla base delle linee guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il parere n.66 del 21/07/2006 reso dall' Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. stabilisce le "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni".

Dalle indicazioni contenute nelle NTc2008 e nella circolare del 2009, nonché dai pareri del CSSLPP appena citati, risulta evidente come l'autorizzazione sismica di progetti con compositi fibrorinforzati può essere rilasciata sulla base di linee guida e documenti di comprovata validità quali:

- **CNR DT-200/2004** il primo documento emanato nel 2004 dal CNR con le "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di Interventi di consolidamento Statico mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati", la cui prima revisione è stata emanata nel 2012 (CNR DT 200 R1/2012).
- **CNR DT 201/2005** – "Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di consolidamento Statico di Strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati"
- **CNR DT 202/2005** - "Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di consolidamento Statico di Strutture Metalliche mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati";
- **CNR DT 203/2006** – "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato";
- **CNR DT 205/2007** – "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di Strutture realizzate con profili pultrusi di Materiale composito Fibrorinforzato (FRP)".

A livello internazionale la materia "sistemi compositi" è trattata nei seguenti testi:

- **le regole progettuali pubblicate su appositi bollettini dal Fib Task Group 9.3**, comitato istituito a livello europeo nel 1998;
- **i bollettini dell'American Concrete Institute (ACI)** (n.440 -2000, 2r-08): linee guida per il progetto e costruzione di strutture in cemento armato rinforzato con FRP;
- **le regole di progettazione e rinforzo con l'impiego degli FRP dell'Eurocode 8** "Design of structures for earthquake resistance"-Part.3-"Assesment and retrofitting of buildings"-Draft n.7-January 2003, dell' "European Committee for Standardization"
- **le istruzioni giapponesi (JSCE -1997)**

6.0.2.1 I LAVORI DEI TAVOLI TECNICI: NON SOLO FRP

In conclusione ad oggi in Italia è quindi possibile, seppur difficile, utilizzare i compositi costituiti da matrice epossidica e fibre di carbonio, vetro o aramide come materiale di rinforzo strutturale in alternativa ai sistemi edilizi tradizionali mentre, restano esclusi i sistemi in matrici cementizie FRG e le altre fibre.

A tal proposito per colmare e/o implementare le complesse e a volte carenti informazioni sullo stato di avanzamento dei lavori d'indirizzo applicativo dei Tavoli Tecnici Ministeriale (soprattutto per quel che attiene il mondo degli FRG) si organizzati e attivati diversi gruppi e commissioni tecniche nazionali e internazionali d'iniziativa privata.

Il risultato di queste organizzazioni è stato una fitta produzione di codici, ordinanze e raccomandazioni specificatamente predisposte per l'impiego di materiali "non convenzionali".

Tra queste, in Italia, è risultato particolarmente efficace il lavoro di ricerca volto dal 2005 dall'Associazione "Assocompositi"²⁹.

L'Associazione conta tra le sue attività un'opera di studio e divulgazione in stretto collegamento con le associazioni nazionali dei paesi membri dell'Unione Europea grazie alla sua adesione sin dal 2006 a EuCIA (Associazione Europea dei Materiali Compositi).

Inoltre come membro di FEMS (Federazione europea dei materiali), coordina le attività di sviluppo e di promozione della cultura europea dei materiali compositi e di monitorare i lavori della Commissione Europea per quanto riguarda le direttive comunitarie in materia di ambiente, riciclo e impiego dei materiali compositi.

In Italia Assocompositi ha promosso due importanti iniziative col fine di colmare e/o implementare stato di avanzamento dei lavori dei Tavoli tecnici istituiti a livello associativo e ministeriale per lo sviluppo di Linee Guida per la qualificazione e l'accettazione dei materiali compositi nel settore delle costruzioni.

La prima nel giugno del 2011, promuovendo un "Tavolo di Lavoro"³⁰ con lo scopo di sviluppare delle Linee Guida per la qualificazione e l'accettazione degli FRP nelle costruzioni esistenti.

²⁹ Assocompositi: Associazione italiana compositi & affini. Fondata nel 2005, ad oggi è l'Associazione di riferimento del settore dei materiali compositi in Italia: raggruppa oltre 60 Aziende ed Enti di ricerca distribuiti sul territorio nazionale e svolge attività di promozione della cultura dei compositi e di tutela del mercato e di rapporti con le istituzioni.

³⁰ Elenco partecipanti: Ardea, BASF Italia, Carbonveneta, Cenci Legno, Fibwrap, Fibrenet, Fidia, HG Europe, G&P, Intech, Interbau, Mapei, Ruredil, Saimex, SGM, Sireg, Sika Italia, Università di Napoli e Politecnico di Milano.

I lavori sono iniziati nel giugno 2011 e si sono conclusi in marzo 2013. Il documento è stato approvato dal parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in febbraio 2015.

Il documento è specifico per i compositi fibrosi a matrice polimerica (FRP) e fa riferimento alle “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati” pubblicate come documento CNR DT-200 R1/2013.

Il DT-200 cita esplicitamente – a pag.9 - che, per quanto riguarda i materiali non classificabili come FRP (ad esempio fibre discontinue o continue ma costituite da materiali differenti, come ad esempio l’acciaio, il basalto, ecc. oppure matrici diverse come quelle cementizie) il CNR ha in programma di pubblicare documenti specifici in modo da fornire le corrispondenti Linee guida che necessariamente dovranno/potranno essere diverse.

In conclusione, le istruzioni contenute nel CNR DT-200 e nella sua revisione R1 del 2013, non sono automaticamente estendibili ad altri tipi di fibre, in quanto le formule predittive in esso contenute si riferiscono a stati limite, di servizio ed ultimi, la cui modellazione è sviluppata per le fibre di arammide, carbonio e vetro.

La seconda iniziativa di Assocompositi nasce proprio allo scopo di ampliare i campi di applicazione dei materiali fibrorinforzati a fibre e matrici diverse da quelle citate nel DT-200, attraverso un ulteriore “Tavolo di Lavoro”³¹ con lo scopo di sviluppare delle Linee Guida per la qualificazione degli FRG delle costruzioni esistenti.

Questo ulteriore “Tavolo di lavoro” operante in stretto coordinamento con una Commissione di esperti nominata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ha iniziato i lavori nel 2012 per concluderli nel luglio 2015; attualmente la proposta di Linea Guida è al vaglio del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Al già complesso ambito normativo della progettazione con materiali compositi, si unisce un altro dibattuto e importante argomento, ossia quello relativo alla vita nominale delle opere e dei relativi sistemi di consolidamento statico basati sull’uso di compositi fibrorinforzati.

Tutte le norme nazionali e internazionali prevedono l’esecuzione di prove di durabilità (capitolo 5.0) sui materiali impiegati che vengono condotte in condizioni ambientali che simulano le condizioni reali di esercizio.

³¹ Elenco partecipanti: BASF Italia, Betontex, Carbonveneta , Cenci Legno, Fibrwrap, Fibrenet, Fidia, G&P Intech, HG, Europe, Interbau, Kerakoll, Mapei, Ruredil, Saimex, SGM, Sireg, Sika Italia, TCS Calce, Università di Napoli, Politecnico, di Milano, Università di Roma 3 e Università di Miami.

Per quanto riguarda gli **FRP**, queste condizioni sono riportate nel documento ministeriale rilasciato in luglio 2015 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Tali prove di invecchiamento artificiale hanno il solo scopo di determinare il tasso di decadimento dei valori medi delle caratteristiche meccaniche dei sistemi di rinforzo al variare della durata dell'invecchiamento stesso.

Esse pertanto **non possono in alcun modo essere utilizzate per effettuare una previsione della durata in esercizio del sistema** stesso, che dipende da molti fattori tra cui ad esempio: la destinazione d'uso della struttura rinforzata, le condizioni ambientali, la composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali preesistenti, la qualità delle maestranze ed il livello di controllo, l'adozione di particolari misure protettive e la manutenzione attesa durante la vita utile (come compiutamente descritto a pag.20 del DT-200).

Le condizioni di invecchiamento artificiale per quanto riguarda gli **FRG non sono invece ancora disponibili** in quanto, come detto, il documento non è ancora stato rilasciato dal Ministero.

La normativa vigente pertanto non contiene indicazioni su come stimare la durata dei sistemi di rinforzo sulla sola base della loro composizione (FRP o FRG).

Sono attualmente in via di redazione, da parte di una commissione istituita dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, le linee guida per la qualificazione di compositi rinforzati a matrice inorganica, da utilizzare per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

Lo funzione delle linee guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, delle successive istruzioni CNR DT200 R1/2012, (coadiuvate dal lavoro di gruppi di ricerca indipendenti sopradescritti), per loro natura giuridica non cogenti, è quella aiutare gli addetti ai lavori nel filtrare la numerosa bibliografia nazionale ed internazionale sull'argomento, fornendo un aiuto progettuale ai tecnici, ai quali va detto resta ad oggi la responsabilità finale delle scelte operate.

Sebbene particolare attenzione sia posta riguardo alla qualificazione e al controllo dei materiali per l'impiego strutturale, non sono ancora disponibili criteri adeguatamente condivisi, con i conseguenti problemi in fase di progettazione, di accettazione in cantiere e nel collaudo finale.

Dall'ampio panorama tecnico a disposizione del progettista italiano orientato all'uso dei compositi in ambito strutturale, chiudo l'argomento evidenziandone una sintesi in ragione di contenuti e indicazioni d'iter progettuale dal **Documento tecnico italiano CNR DT 200-04**.

Il CNR, per tramite di una Commissione incaricata di formulare pareri in materia di Normativa tecnica relativa alle costruzioni unitamente all'azione di un gruppo di docenti di Scienza e di Tecnica delle Costruzioni da tempo impiegate in ricerche sugli FRP nel mondo accademico ed industriale, ha redatto un documento articolato come segue:

- **materiali**
- **concetti basilari del rinforzo con FRP e problematiche speciali**
- **rinforzo di strutture in c.a. e in c.a.p**
- **rinforzo di strutture murarie**
- **rinforzo di strutture metalliche**
- **rinforzo di strutture in legno**
- **nuove costruzioni con l'impiego di FRP**

Scopo di questo articolato tecnico è fornire ai progettisti e direttori lavori nell'ambito delle attuali normative vigenti, un documento orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.

In questo testo sono inoltre fornite specifiche indicazioni in merito all'iter di progettazione per le costruzioni in zona sismica in linea con i più recenti orientamenti tratti dalle normative nazionali ed internazionali sintetizzabili come segue:

- **valutazione della sicurezza sismica**
- **requisiti di sicurezza (verifica di stati limite)**
- **livelli di protezione antisismica (intensità dell'azione sismica associata)**
- **metodi di analisi**
- **criteri di verifica (distinzione tra elementi "duttili" e "fragili")**
- **caratteristiche dei materiali da impiegare nelle verifiche di sicurezza**

6.0.3 APPLICAZIONI

6.0.3.1 NEL RESTAURO E RICOSTRUZIONE



Le prime applicazioni di materiali compositi fibrorinforzati (FRP) nel settore dell'ingegneria civile risalgono alla metà degli anni '80.

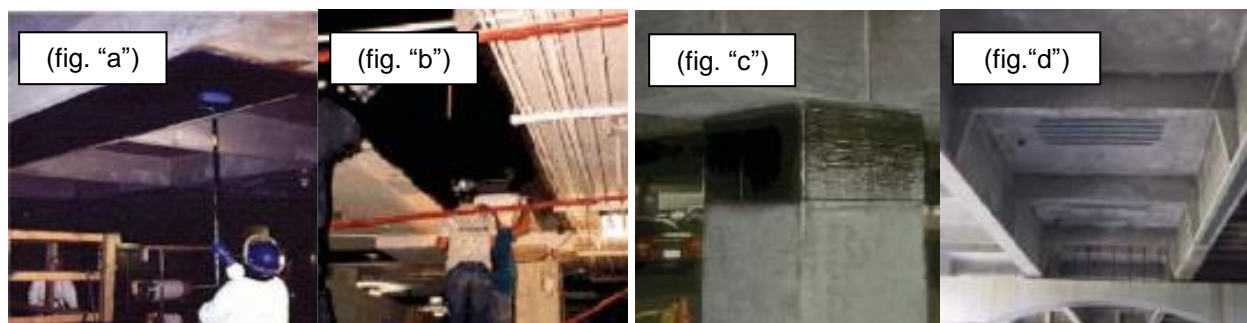
Da allora gli FRP si sono costantemente evoluti in termini di prestazioni, tipologie di prodotti e settori di applicazione, acquisendo un certo interesse applicativo nel ripristino strutturale e nel rinforzo antisismico degli edifici.

I compositi maggiormente diffusi in edilizia, sono gli FRP in fibra di carbonio.

Questi sistemi compositi combinano, alti valori di resistenza e rigidità, con ottime caratteristiche di leggerezza, durabilità e versatilità, ideale per applicazioni veloci e non invasive soprattutto in opere in calcestruzzo armato.

Tra i principali utilizzi dei compositi **come rinforzi interni al costruito** si possono citare:

- rinforzo a flessione di travi e solai in c.a., di pareti in muratura (fig. "a")
- rinforzo a taglio di travi in c.a. e pareti in muratura (fig. "b")
- confinamento di colonne, pilastri in c.a. e muratura (fig. "c")
- rinforzo di solette travi principali e impalcati da ponte (fig. "d")



Rinforzo a flessione	fibre disposte longitudinalmente
Confinamento di pilastri	fibre disposte lungo il perimetro
Rinforzo a taglio di travi	fibre disposte secondo la direzione delle staffe

Tra i principali utilizzi **come rinforzi esterni** il sistema composito può sostituire per caratteristiche meccaniche il tradizionale placcaggio con piatti in acciaio (beton plaquè), unendo i vantaggi di:

- **l'estrema leggerezza**
- **ridotta invasività dell'intervento**
- **elevata durabilità**
- **velocità di esecuzione**
- **buona reversibilità**

Queste caratteristiche rendono l'intervento in sistemi compositi competitivo rispetto alle tecniche tradizionali: l'elemento da rinforzare non modifica la sua sagoma e non incrementa significativamente il peso, beneficio importante se si opera in zona sismica.

La ridotta invasività di queste tipologie d'intervento, nel caso degli FRG, si presenta particolarmente interessante per le strutture in muratura d'interesse storico-artistico.

La facilità e rapidità di posa in opera è un aspetto importante per gli interventi su strutture viarie (ponti, strade, cavalcavia) nei quali la possibilità di chiudere il servizio o di limitarlo per breve tempo ha influenza nella valutazione costi-benefici dell'intervento.

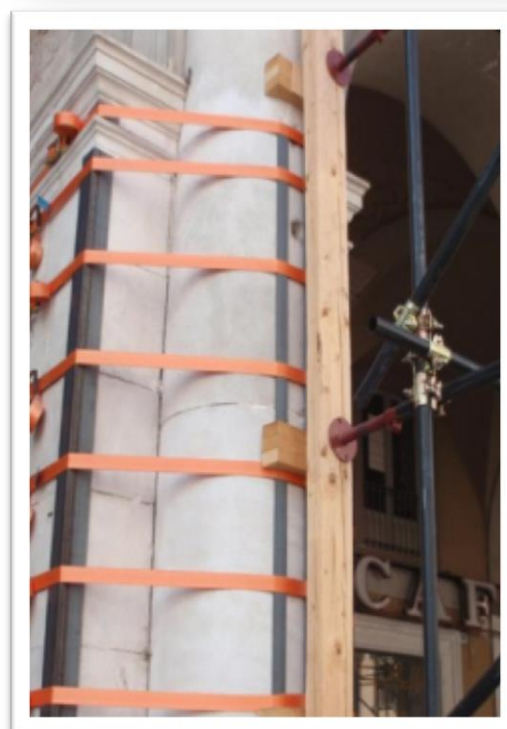
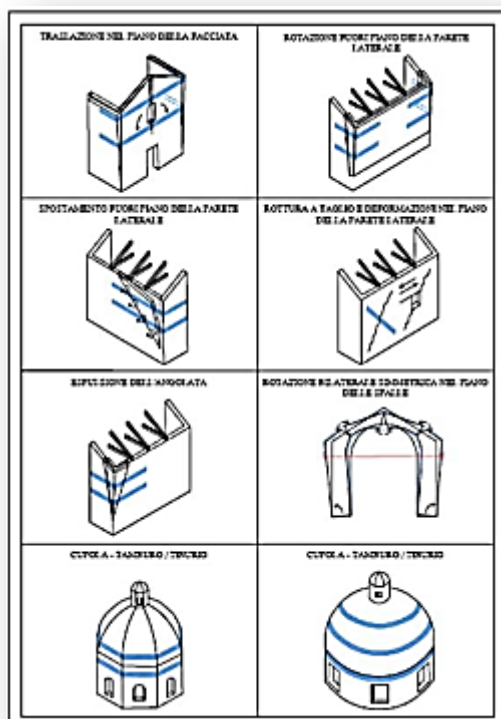
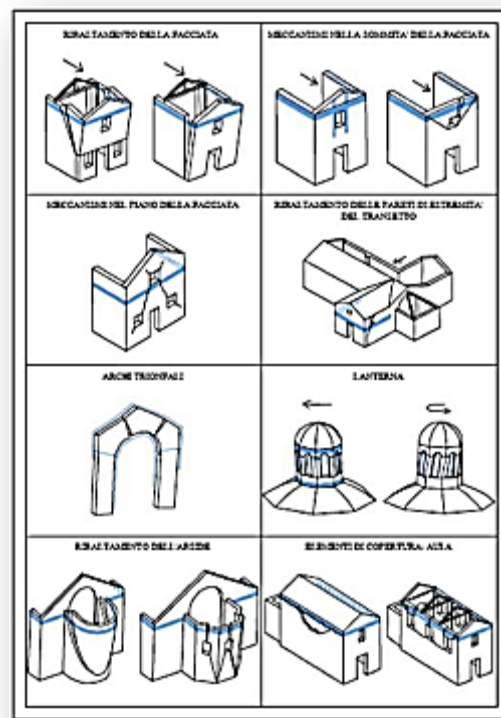
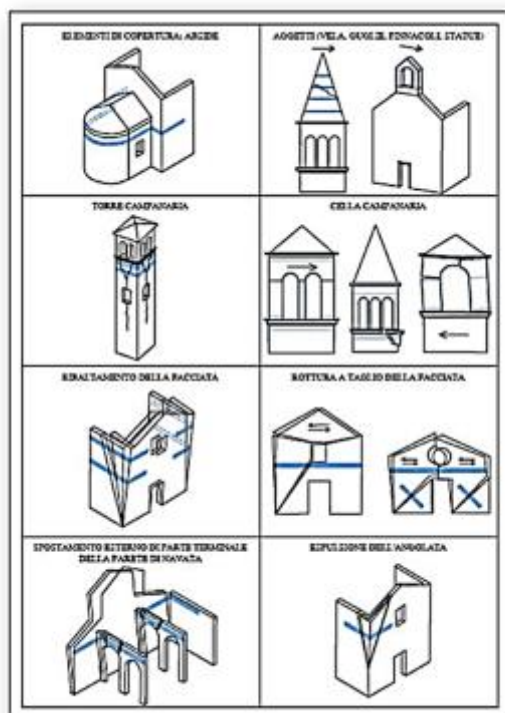
Un altro interessante utilizzo dei compositi è come **presidi di sicurezza** nella necessità di porre in sicurezza edifici, in particolare quelli in muratura, o parti di essi, danneggiati per cause accidentali, terremoti, danneggiamento, cedimenti ovvero cause patologiche.

Con i compositi il progettista è in grado di eseguire efficaci interventi urgenti di semplice applicazione e con ridotto e controllato rischio di esecuzione per gli operatori, come valida alternativa ai presidi eseguiti mediante puntellazioni, lignee o metalliche, a carattere provvisorio.

Infine va sottolineato che, per alcuni meccanismi di collasso riconducibili al ribaltamento di fuori dal piano, (i più frequenti nei fabbricati in muratura con elementi spingenti) la realizzazione i presidi realizzati con fasciature o cerchiature esterne in FRP e/o FRG offrono il vantaggio di poter permanere come soluzioni strutturali definitive seppur realizzate in condizioni d'urgenza.

6.0.3.2 PRESIDI DI SICUREZZA POST-SISMA

A conclusione del paragrafo 6.0.3 presento gli schemi, di alcune modalità di collocazione d'interventi di fasciatura con i compositi FRP/FRG per i principali meccanismi di collasso³² prodotti da un evento sismico in edifici in muratura:



³² I meccanismi di collasso rappresentati negli schemi sono tratti dalle norme "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni -Testo allegato al parere n. 66 dell'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. reso nella seduta del 21 luglio 2006".

6.0.3.3 SISTEMI COMPOSITI vs SISTEMI TRADIZIONALI

Come presidi di sicurezza: l'impiego dei compositi, sia "FRP" che "FRG" consente, per alcune tipologie di collasso, la messa in sicurezza con oggettivi vantaggi rispetto alle tecniche di costruzioni tradizionali quali puntelli lignei metallici.

Come presidi nel restauro e consolidamento strutturale: le sperimentazioni progettuali ed applicative ad oggi eseguite (soprattutto negli scenari post-sisma) stanno dimostrando il buon funzionamento dei sistemi, anche se va detto attendono la conferma in termini di durabilità.

I principali motivi d'interesse per un progettista strutturale di propendere verso i sistemi compositi in alternativa ai sistemi tradizionali possono essere sinteticamente riassunti:

- economicità;
- rapidità di posa in opera;
- esecuzione dell'intervento dall'esterno del fabbricato senza necessità di entrare all'interno dell'edificio pericolante;
- facile e semplice trasporto dei materiali necessari al consolidamento e conseguente facile accessibilità anche in zone di difficile accesso, possono non essere necessari ponteggi ed essere eseguiti anche attraverso cestelli di macchine elevatrici;
- capacità di adattare l'intervento a condizioni particolari di presenza di manufatti esistenti, cavi elettrici, pluviali, ecc.;
- privi di ingombro, hanno di fatto spessore prossimo a zero, rispetto a puntellazioni classiche non ingombrano le sottostanti vie e strade pubbliche;
- reversibilità, aspetto fondamentale nel caso di edifici a valenza monumentale;
- se l'intervento lo consente sono lavorazioni a carattere definitivo, con oggettivo risparmio economico rispetto opere "usa e getta" del tipo puntellazioni lignee;
- per il caso dei compositi "SRG" la possibilità di applicare interventi attivi attraverso pre-tensione;
- se opportunamente protetti da raggi UVA, non hanno un deperimento nel tempo proprie caratteristiche;
- non sono interventi sensibili a variazioni in funzione di umidità e temperatura.

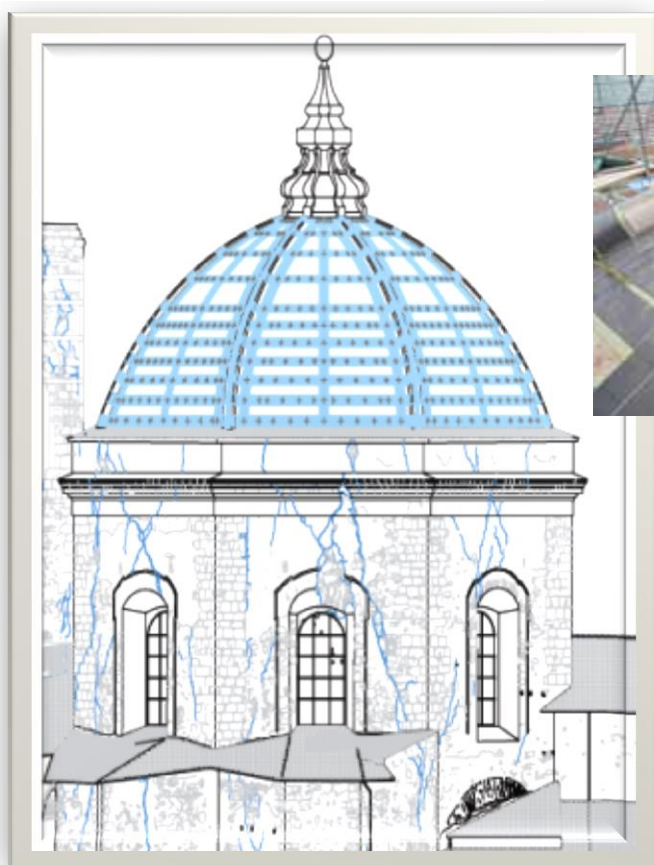
Chiudo l'argomento citando tra tutti un'importante intervento di restauro e consolidamento realizzato con sistemi compositi sulle volte della Basilica di S. Bernardino (Aquila).

A seguito del sisma che ha colpito l'Aquila nel 2009, relativamente i danni subiti dalla struttura portante della Basilica, (murature portanti e copertura a cupola) è stato eseguito³³ un intervento di messa in sicurezza e ripristino della capacità portante del manufatto.

La messa in sicurezza è stata effettuata tramite applicazione di fasce in tessuto di carbonio multistrato disposte sia secondo le diagonali delle volte sia radialmente all'oculo centrale superiore fino alla base della cupola.

L'intervento è stato eseguito all'intradosso e all'estradosso della cupola; i due sistemi di fasciatura sono stati connessi con barre passanti per renderli solidali e migliorare l'efficacia dell'intervento.

Elaborato grafico "Quadro Fessurativo e di degrado e ipotesi d'intervento" relativo al prospetto Laterale della Basilica



Serie di fotografie di porzione della cupola della Basilica relative alla posa delle fasciature di rinforzo composite



³³ Intervento realizzato dalla Ditta Resin Proget s.r.l. (sedi di Rovigo e Modena) Azienda impegnata in interventi di restauro e consolidamento strutturale di edifici vincolati, con elevato valore storico-monumentale, ma anche di edifici industriali e infrastrutture www.resinproget.it

7.0 CASO STUDIO

Per concludere la presentazione dei sistemi descritti, ritengo utile allo scopo la presentazione del seguente “caso studio” da me trattato in collaborazione con gli ingegneri strutturisti incaricati dalla Regione Emilia Romagna e dall’Unione dei Comuni Valle del Savio, (di seguito Unione) Ente proprietaria dell’Immobile.



Elaborazione fotografica del fronte dell’immobile oggetto di studio: Palazzo Pesarini

7.0.1 PROGETTO DI MIGLIORAMENTO: PALAZZO PESARINI

Il lavoro che andrò a descrivere è relativo alle fasi di progetto preliminari propedeutiche alla realizzazione di un ‘intervento di “miglioramento sismico” presso l’immobile denominato “Palazzo Pesarini” sito nel Comune di San Piero in Bagno (provincia di Forlì Cesena) attuale sede dell’Unione.

Il progetto nasce dalla necessità dell’Unione, di ottemperare all’obbligo di Legge in capo ad essa relativo alla “verifica” e se necessaria “messa in sicurezza” degli edifici in proprietà³⁴.

L’iter progettuale si è svolto secondo i seguenti criteri :

- **CONOSCENZA**
- **VALUTAZIONE**
- **ANALISI NUMERICA STRUTTURALE**
- **IPOTESI E SCELTA PROGETTUALE**

³⁴ Con l’art. 2 comma 3 dell’O.P.C.M. 20 marzo 2003 n. 3274, il Governo impose a tutti i proprietari di edifici e infrastrutture che a seguito di eventi sismici potevano assumere sia rilievo fondamentale ai fini della protezione civile che rilevanza per effetto di eventuale collasso strutturale, di procedere alla verifica sismica dei manufatti entro cinque anni.

7.0.1.1 CONOSCENZA

La fase di lavoro di “conoscenza” è quella parte di lavoro orientata all’inquadramento delle caratteristiche locali ed intrinseche del manufatto.

Questa fase apparentemente poco progettuale è in verità una vera e propria componente dell’iter di progetto definita dalle stesse NTc08 come “valutazione della sicurezza”.

Inoltre è una fase molto importante in quanto, in base al livello di conoscenza del manufatto raggiunto (NTc08–Livelli di Conoscenza) saranno stabiliti i parametri di progettazione (NTc08-- Fattori di Confidenza) sui quali i progettista strutturale imposterà i suoi sistemi di calcolo e verifica.

I livelli di coscienza si raggiungono sulla base della storia del fabbricato: storia, rilievi e indagini diagnostiche.

Sul fabbricato oggetto di studio si è stabilito di raggiungere il più alto livello di conoscenza di possibile (NTc08-L3) attraverso le seguenti indagini e azioni:

- **analisi storico critica:** elementi geometrici e costruttivi di partenza
- **studio geologico:** i dati relativi all’area di sedime (tipologia e resistenze del terreno) e l’entità delle principali forze sismiche in gioco (pericolosità sismica)
- **rilievo geometrico strutturale:** i principali quadri fessurativi e di degrado
- **saggi effettuati su murature, solai e volte e prove diagnostiche** (martinetto doppio piatto) si sono determinati i principali parametri meccanici dei materiali che compongono la struttura

La fase conoscitiva si è conclusa con l’effettuazione di una serie di calcoli finalizzati alla determinazione dei possibili meccanismi di danno, sia nel caso di comportamento d’insieme sia di comportamento locale di singoli paramenti ritenuti più a rischio.

Di seguito riporto alcuni estratti della documentarne progettuale redatta, ringraziando l’Unione della possibilità di riportare in questa sede parti del lavoro di progettazione in corso, procedo alla presentazione.

ANALISI STORICO-CRITICA

Il fabbricato oggetto del presente studio è sito nel Comune di Bagno di Romagna appartenente alla Provincia di Forlì-Cesena, in Via Verdi n. 4 nella frazione San Piero in Bagno. Fu realizzato tra il 1780 e il 1790 da Giovan Battista Pasquale Spighi.

Esso prese, e conserva ancora, il nome di “Palazzo Pesarini”, dall’ultima famiglia che lo possedette a partire dal 1848, prima di diventare proprietà della Comunità Montana Appennino Cesenate nel 1989.

Si trova all’interno di un aggregato edilizio piuttosto articolato, comprendente numerosi edifici aventi origini antiche, molte delle quali risalenti a prima del 1800, e che hanno subito nel corso degli anni numerosi interventi di modifica e di ricostruzione, in modo particolare dopo i sismi del 1918-19, che sono stati causa di ingenti danni.

Il fabbricato si configura tuttavia in maniera autonoma dal punto di vista della distribuzione strutturale, e non ha subito nel tempo modifiche sostanziali, anche se, come si vedrà in seguito, si è tenuto conto nei calcoli dei muri contigui e dei carichi trasmessi dai solai dei fabbricati confinanti, in modo da interpretare, nel modo più rispondente alla realtà, l’influenza di questi ultimi nella risposta sismica.

La configurazione dell’aggregato edilizio di cui fa parte “Palazzo Pesarini” è ben individuabile all’interno del Catasto storico redatto dagli uffici tecnici del Granducato di Toscana già nella prima metà dell’Ottocento, che mostra come la distribuzione edilizia



Consistenza edilizia nel Catasto Toscano del 1826

dell’area del centro di San Piero in Bagno, che si sviluppa a fianco del torrente Rio, sia rimasta pressoché inalterata negli ultimi due secoli, se si escludono le demolizioni dei piani superiori al terzo, effettuate nei territori colpiti dal terremoto del 1918 e che hanno portato all’assetto edilizio osservabile ancora oggi.

I fabbricati confinanti con Palazzo Pesarini, che fino al 1919 si sviluppavano su quattro piani fuori terra, furono infatti oggetto, dopo il sisma, di interventi di parziale demolizione, a seguito delle direttive del Genio Civile, che imposero a tre il numero massimo di piani consentito.

È probabile che durante tali interventi anche il fabbricato in oggetto abbia subito delle modifiche, soprattutto nelle zone di confine.

CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE DEL SITO

Per quanto attiene lo studio delle caratteristiche del sottosuolo si riporta un estratto dello studio geologico redatto nel Luglio 2012 dai geol. M. Flamigni e C. Michelacci:

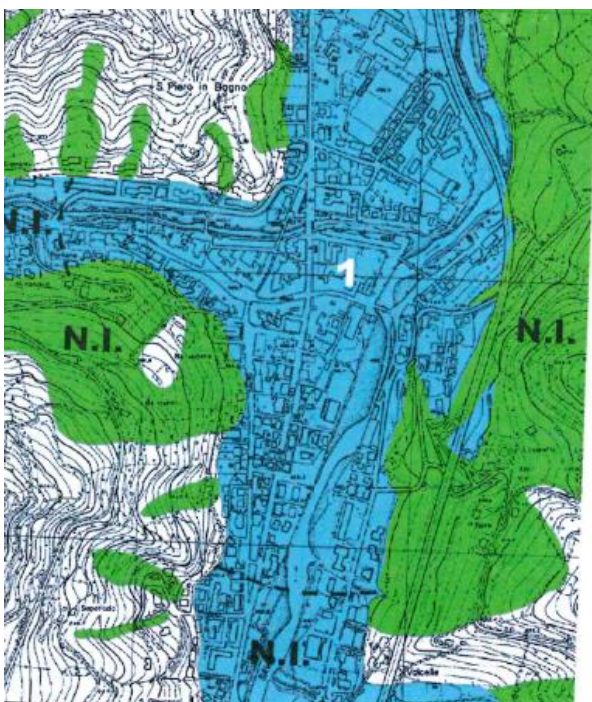
“L’area di intervento si trova immediatamente in destra idrografica del Fosso del Rio affluente di sinistra del Savio nell’abitato di San Piero in Bagno. I terreni presenti in superficie sono prevalentemente di natura limoso-argillosa, di origine alluvionale e passano, inferiormente, a ghiaie e sabbie. Al di sotto delle alluvioni si rinvencono le rocce appartenenti alla formazione Marnoso-Arenacea Romagnola. Geomorfologicamente l’area di intervento è pianeggiante e stabile e non mostra segnali di instabilità potenziale o in atto. Una bassa pericolosità idrogeologica dell’area è riconosciuta anche dal Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dell’Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, che non individua in quest’area particolari rischi”.

Per caratterizzare meglio la risposta sismica in funzione della tipologia del terreno, si è utilizzato un approfondito studio di microzonazione sismica condotto tra il 2004 e il 2007 dalla Regione Emilia Romagna³⁵ nel territorio del centro storico di San Piero in Bagno

Lo studio geologico, che riporta i seguenti valori delle Vs:

da 0 a 2 m: 170 m/s
da 2 a 5 m: 300 m/s
da 5 a 12 m: 230 m/s
da 12 a 13 m: 400 m/s
> 13 m: 630 m/s

Microzonazione sismica: San Piero in Bagno



Zona 1
 $FA(0,1 s < T < 0,5 s) = 1,7 \div 2,5$

Nota del progettista:

“Applicando la formula prevista dal D.M. 14/01/2008 si ottiene un valore della velocità $V_{s30} > 360$ m/s.

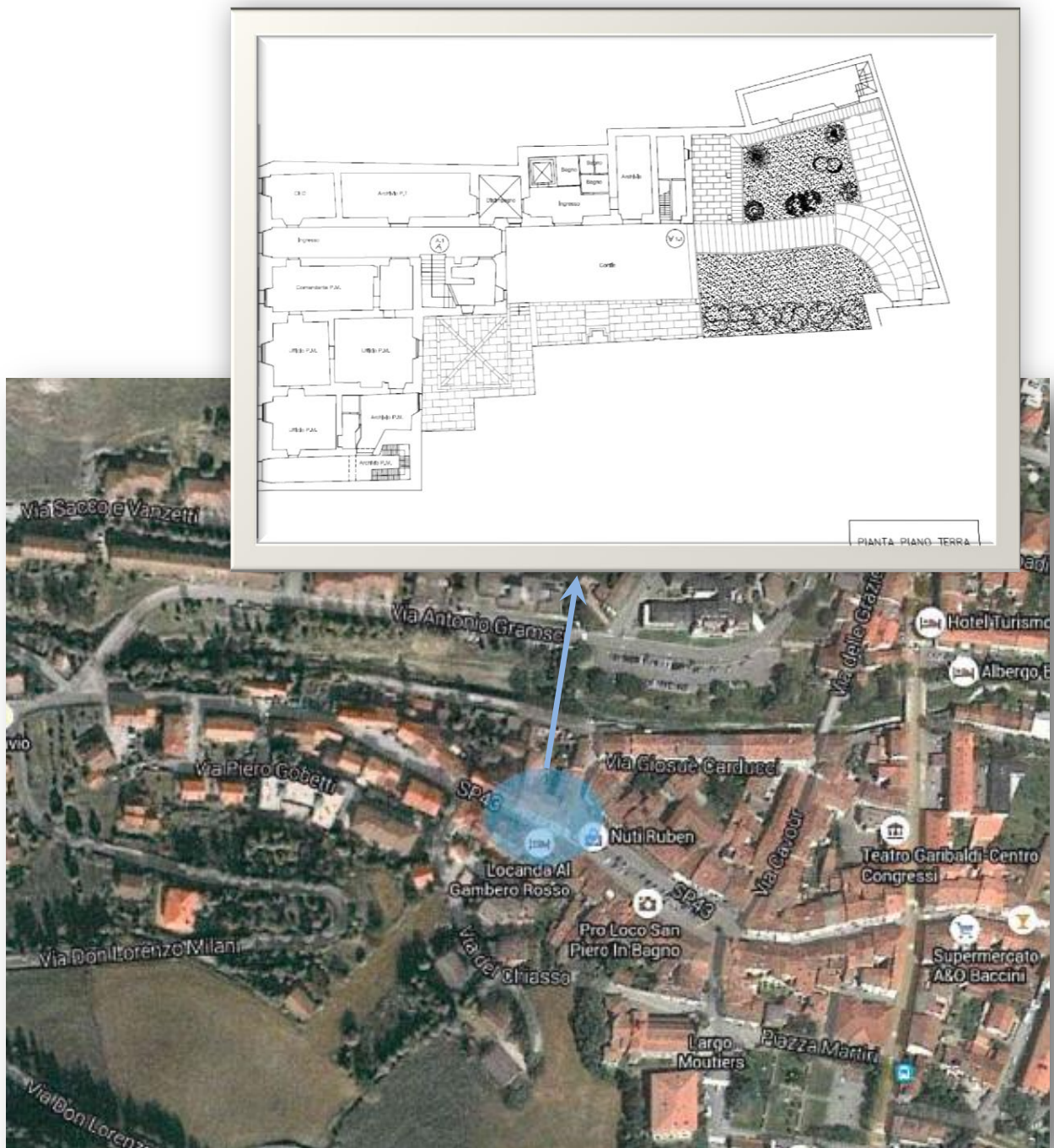
Si è scelto di fare riferimento ai più cautelativi valori forniti dallo studio di micro zonazione citato, per quel che riguarda il coefficiente di amplificazione stratigrafica dello spettro che, in caso di utilizzo della tabella 3.2.V del D.M. 14/01/2008 sarebbe pari a 1.15 allo SLV”

³⁵ Gli studi di microzonazione sismica citati sono stati effettuati in occasione del progetto S.I.S.M.A. *System Integrated for Security Management Activities*, promosso dalle Regioni Umbria, Marche, Emilia Romagna, Abruzzo, Prefettura di Atene, Regione del Peloponneso, Municipalità di Homeroupolis, Repubblica Slovena, Repubblica Slovacca, Dipartimento della Protezione Civile, condotto dal 2004 al 2007.

RILIEVO GEOMETRICO E STRUTTURALE

I dati dimensionali e gli schemi plano-altimetrici di riferimento all'elaborato di rilievo geometrico (Stato Attuale) fanno riferimento al progetto di restauro scientifico del fabbricato redatto nel 1989 dall'arch. Luciano Botti,

Nel progetto sono riportati in modo molto dettagliato le caratteristiche dimensionali sia delle strutture principali che degli elementi secondari come volte, lunette, travi lignee, stipiti, struttura delle camorce.



QUADRO FESSURATIVO E DI DEGRADO

Il quadro fessurativo riscontrato è risultato molto articolato e di difficilmente inquadrabile in un contesto descrittivo unitario.

Molte lesioni sono state riscontrate in prossimità degli architravi, sugli stipiti e verticalmente lungo le aperture di porte e finestre, trattandosi di zone tipicamente soggette al superamento delle massime tensioni normali per flessione e tangenziali per taglio.

Altre lesioni interessano le strutture a camorcanna dei controsoffitti voltati a secondo livello e nel vano scala, provocate dall'usura, dal peso dell'intonaco oltre che presumibilmente dalle scosse sismiche che negli anni si sono più volte manifestate (per ultimo lo sciame sismico tra i mesi di giugno e luglio 2011 che, se pur di lieve intensità, si è prolungato quasi incessantemente per un lungo periodo).

In alcune zone si notano dei distacchi d'angolo dovuti presumibilmente a fenomeni di spinta e ribaltamento provocati da inadeguati collegamenti nei cantonali, verosimilmente anche qui intensificati da scosse sismiche.

Le lesioni pregresse e quelle verificatesi negli anni a seguire, sono risultate in ogni caso contenute, grazie all'inserimento di tiranti in ferro, avvenuto presumibilmente a seguito del forte sisma del 1918, ma non sono esclusi inserimenti precedenti, mentre è certo l'inserimento di catene in epoche successive anche recenti; i tiranti presenti sono ortogonali alle ali del fabbricato.

La diversa pezzatura delle murature riscontrata in alcuni casi, e la presenza di alcune aperture anomale farebbe pensare ad interventi nel tempo, per i quali risulta difficile affermarne genesi e finalità.

È dato da vedere che essi hanno contribuito alla modifica della distribuzione degli spazi interni, come confermano anche le numerose nicchie presenti in molte pareti sempre al secondo livello e il disallineamento verticale di alcune aperture.

Occorre del resto considerare che il secondo livello, essendo destinato ad abitazione (al contrario del primo destinato alla servitù e al terzo destinato a granaio), è stato quello che maggiormente ha subito le modifiche architettoniche nel tempo.

Di seguito viene schematizzato il quadro fessurativo riscontrato, con l'ausilio di documentazione fotografica, seguita da commenti sulle criticità individuate:

Al primo livello non sono presenti fessure degne di nota.

Ciò è giustificato probabilmente dall'elevato spessore delle pareti e dalle robuste volte che sostengono il piano superiore, entrambe perfettamente integre nonostante gli anni trascorsi. Sull'esterno all'estremità Nord-Est del fabbricato, è presente un'ampia lesione diagonale nella fascia muraria tra la porta d'ingresso a doppio arco e la finestra superiore;



Il secondo livello è risultato quello più critico, come dimostra soprattutto il quadro fessurativo rilevato nelle stanze presenti sull'ala Sud-Est del fabbricato.

Occorre considerare, come già detto in precedenza, che molte delle pareti in questione hanno, nel tempo, subito delle modifiche (nicchie e apertura di porte) cui vanno aggiunte anche le tracce per il passaggio degli impianti realizzate in occasione dei lavori di ristrutturazione del 1997.

Le lesioni sono comunque imputabili ad una molteplicità di fattori, come di seguito descritto:

Alcune pareti di mostrano una “non continuità verticale” con il piano sottostante, ma poggiano su una porzione interna della volta. Ciò può avere provocato dei cedimenti nelle porzioni di parete che poggiano sui rinfianchi, come sembrerebbe confermato dalla tipologia di alcune lesioni riscontrate, tipiche dei cedimenti verticali.



La presenza di aperture, molte delle quali prossime alle estremità delle pareti, e in presenza di altezze piuttosto elevate (oltre 4 mt), è una causa di debolezza in riferimento alle azioni sismiche, in quanto la presenza di aperture fa sì che le isolinee di tensione vadano a distribuirsi nel muro formando un arco di scarico che, se trova alle estremità un'altra apertura, viene interrotto, andandosi così ad appoggiare, per stabilizzarsi, sul semiarco di estremità che si trova già in equilibrio precario in quanto scarica per metà sulla parete d'angolo e solo per la restante metà a terra.

Quanto sopra può avere provocato nelle pareti più critiche le fessure rilevate, o al più può essere stato una concausa ai danni riscontrati.

Al terzo livello non è possibile parlare di un vero e proprio quadro fessurativo, in quanto le uniche fessure riscontrate sono visibili solo in poche pareti, dando luogo ad una situazione localizzata e non certo generalizzata.

In particolare la condizione più critica è mostrata nella foto a lato dove si nota un distacco d'angolo con fessure a 45° tra le due aperture, che lasciano presupporre un principio di ribaltamento, molto probabilmente provocato da azioni orizzontali, che possono essere di natura sismica o semplicemente provenienti dalla spinta del tetto.



Diffuse lesioni sono infine comparse all'interno di diverse stanze, a seguito dello sciame sismico del 2011.

È possibile che tali lesioni siano state indotte da eccessivi spostamenti relativi della parete interna (come mostra l'evidente distacco nell'incrocio muro-soffitto), ma non è da escludersi un effetto di trascinamento provocato dalla massa del lampadario appeso al controsoffitto.

All'esterno sono presenti alcune fessure da taglio, alcune delle quali dovute a scosse sismiche.

Nel **vano scala principale** risultano presenti numerose lesioni riguardanti gli intonaci delle rampe delle scale, in parte sostenuti da strutture in cannucciato e in parte direttamente applicati sotto i gradini, cui vanno aggiunte delle fessure a 45° in chiave agli archi di accesso ai pianerottoli.



I danneggiamenti rilevati sui controsoffitti delle rampe sono da attribuire innanzitutto al degrado temporale; a seguito di seppur modeste, scosse sismiche, tale porzione di fabbricato risulta assai critico in riferimento agli spostamenti e alle deformazioni.

Per effetto dei movimenti delle pareti, gli elementi che compongono il controsoffitto (incannucciato e intonaco), presentando differenti proprietà elastiche, si deformeranno assieme finché l'intonaco, che è più rigido, non avrà raggiunto il suo limite elastico, spaccandosi, mentre l'incannucciato manterrà ancora abbondanti proprietà elastiche.

RILIEVO MATERICO E PARTICOLARI COSTRUTTIVI

Il successivo impegno nell'azione d'approfondimento della conoscenza del manufatto è stato definito con: un rilievo materico delle principali strutture del manufatto e con una campagna d'indagini specialistiche.

MURATURE PORTANTI

I calcoli che hanno condotto alle verifiche strutturali sono stati effettuati con riferimento a valori di resistenza e a proprietà elastiche dei materiali, desunti dalle tabelle di normativa (vedi tab. C8A.2.1 della Circ. C.S.LL.PP. del 2 febbraio 2009 n. 617), col conforto dell'osservazione dei materiali attraverso saggi in alcuni muri individuati ai vari piani.

I saggi sono stati realizzati attraverso la semplice scarificazione dell'intonaco superficiale che ha portato a nudo i conci murari e i letti di malta.

Saggio su un muro in pietra



Si è potuto constatare che, in linea generale, le murature del fabbricato sono costituite da pietrame a spacco con elementi pseudo rettangolari e cuneiformi (con l'esclusione di sporadici elementi arrotondati), disposti in ricorsi sub-orizzontali e alcuni elementi in laterizio.

E' molto probabile che la presenza del laterizio non sia originale, ma sia stata aggiunta in epoca successiva a quella di realizzazione, a seguito di ristrutturazioni interne o riparazioni localizzate, probabilmente effettuate in conseguenza dei danni subiti dal sisma del 1918.



Particolare muratura portante mista pietra-laterizi

SOLAI

I solai di piano lignei sono stati attentamente ispezionati.



Particolare solaio in legno al secondo



Particolare innesto trave principale del solaio al piano primo



Dalle foto si nota come le travi principali, in legno di castagno, di dimensioni pari a cm 20x20 e disposte a interasse di 150 cm, sono inserite dentro asole opportunamente realizzate nei muri di appoggio, e rinforzate da puntoni di dimensioni pari a cm 8x8.

A metà interasse sono state inserite delle travi rompi-tratta di dimensioni pari a cm 10x7. Sopra la struttura principale grava un tavolato ligneo di dimensioni pari a cm 4x30, un massetto di 5 cm e un mattonato in cotto.

Il solaio non è a vista ma presenta all'intradosso una struttura di controsoffitto realizzata in camorcanna e intonaco affrescato.

Il solaio del piano sottotetto a vista è costituito da un'orditura principale di travi aventi dimensioni pari a cm 20x20 disposte a interasse di 150 cm, un'orditura secondaria a interasse di 75 cm e dimensioni di cm 8x8, e un tavolato di dimensioni pari mediamente a cm 4x30, privo di superficie di calpestio.



La copertura è realizzata con una doppia orditura di travi principali di dimensioni pari a cm 20x20 e secondarie di dimensioni pari a cm 8x8; a seguito di un intervento di restauro conservativo effettuato nell'anno 1990, il manto in coppi è stato inserito sopra un massetto appoggiato su tavelle in laterizio.

CAMORCANNE

Parti del sottotetto non calpestabili sono costituite dalle camorcanne, le cui strutture portanti, rappresentate dalle centine lignee non mostrano segni di danneggiamento.



La camorcanna, o falsa volta, ha il vantaggio di rendere leggero il piano che sostiene, e si presta bene alla realizzazione di soffitti di ampie dimensioni, come viene manifestato dalle splendide e ampie coperture affrescate dei saloni al secondo piano, in particolare della sala principale.

Particolare solai in camorcanne al piano secondo e controsoffitto a vista del salone principale su due livelli



VOLTE

Risulta assai frequente nell'edificio l'impiego della volta in mattoni.

In particolare al piano primo, come copertura dell'ultimo pianerottolo della scala principale, e in due locali del secondo piano; per la scaletta secondaria situata sullo spigolo Nord-Est è stata impiegata una struttura con voltine a sbalzo incrociate e ancorate ai muri perimetrali.

Dai saggi effettuati , le volte, (come osservabile dalle foto) sono costituite da mattoni disposti sul lato lungo, a prova di un'elevata resistenza meccanica, (come dimostra l'assenza di quadri fessurativi di rilievo).



Particolare voltine scala secondaria



Volta sopra pianerottolo della scala principale



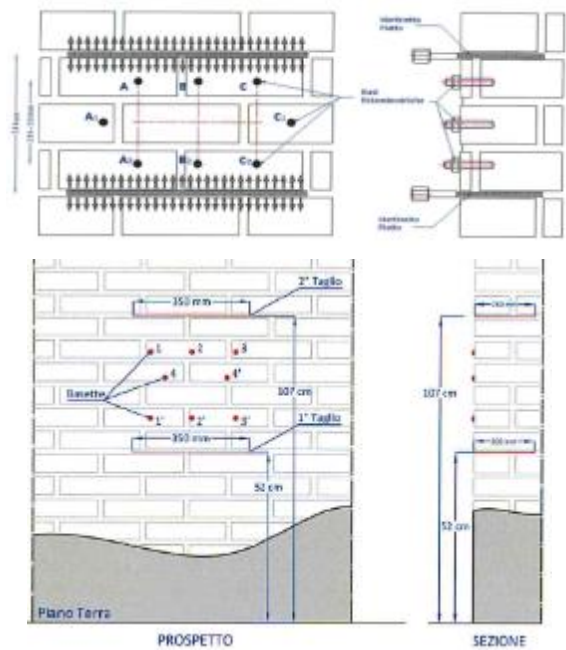
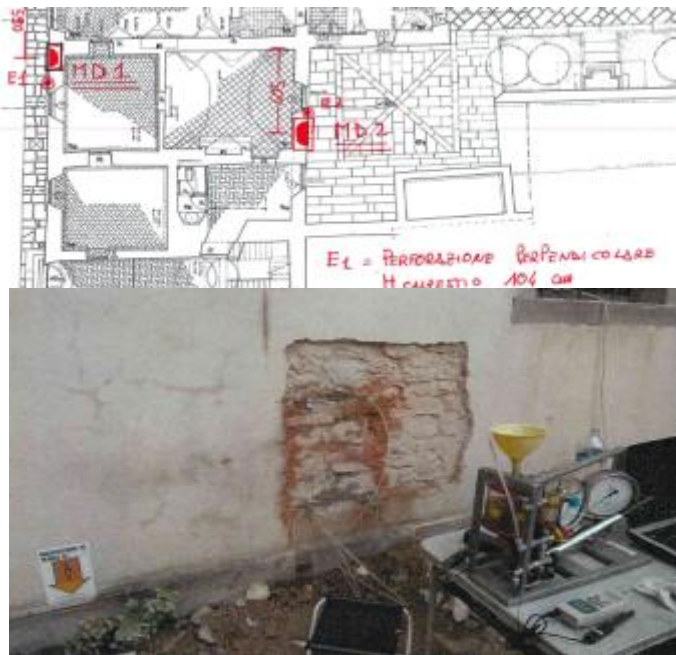
Volta a lunetta nel corridoio fronte scala a piano terra (particolare dell'intersezione)



INDAGINI SPECIALISTICHE

Per meglio inquadrare l'intervento di miglioramento strutturale il gruppo di progettazione a ritenuto opportuno approfondire la conoscenza della resistenza meccanica delle murature portanti, incaricando una ditta specializzata in indagini diagnostiche³⁶.

Nello specifico alla ditta è stato affidato l'incarico di realizzare prove strumentali, martinetto doppio piatto, presso le murature portanti in pietra, in laterizio e miste.



Punto di misura MD1

p = pressione letta al manometro

s = sollecitazione agente nella muratura [daN/cmq]

$s = p \times Km \times Ka$

Ac = [area della superficie compressa della tasca] = cmq **780,00**

Aj = [area del martinetto utilizzato] = cmq **778,56**

Ka = [rapporto tra Aj e Ac] **0,9982**

Km = [coefficiente medio di taratura del martinetto] **0,8400**

In estrema sintesi i risultati delle prove hanno dimostrato che le murature presentano dei parametri di resistenza meccanica a trazione e compressione nella norma. Relativamente ogni prova effettuata, la ditta ha organizzato delle "tabelle dati" riassuntive dei valori ottenuti.

Letture rilevate al comparatore del deformometro D GEI 250 sulla barra di taratura in acciaio Invar da 250,00 mm = **3,953**

P	s	Letture rilevate al comp. del deformometro (mm)				Misure effettive delle basi di misura verticali				Deformazioni ε (mm/mm)					Note	Temp °C
		Verticali		Orizzontali		(mm)				Verticali		Orizzontali				
bar	[daN/cm ²]	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	1-1'	2-2'	3-3'	media 1-2-3	4-4'		
0	0,00	5,341	4,692	7,376	7,514	251,388	250,739	253,423	253,561	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		
1	0,84	5,326	4,693	7,353	7,514	251,373	250,740	253,400	253,561	-0,000060	0,000004	-0,000091	-0,000049	0,000000		
2	1,68	5,324	4,687	7,356	7,517	251,371	250,734	253,403	253,564	-0,000068	-0,000020	-0,000079	-0,000055	0,000012		
3	2,52	5,312	4,677	7,344	7,517	251,359	250,724	253,391	253,564	-0,000115	-0,000060	-0,000126	-0,000100	0,000012		
4	3,35	5,309	4,663	7,338	7,517	251,356	250,710	253,385	253,564	-0,000127	-0,000116	-0,000150	-0,000131	0,000012		
5	4,19	5,305	4,661	7,334	7,517	251,352	250,708	253,381	253,564	-0,000143	-0,000124	-0,000165	-0,000144	0,000012		
0	0,00	5,300	4,656	7,331	7,517	251,347	250,703	253,378	253,564	-0,000163	-0,000144	-0,000178	-0,000161	0,000012		
0	0,00	5,300	4,656	7,331	7,517	251,347	250,703	253,378	253,564	-0,000163	-0,000144	-0,000178	-0,000161	0,000012		
5	4,19	5,296	4,646	7,322	7,516	251,343	250,693	253,369	253,563	-0,000179	-0,000183	-0,000213	-0,000192	0,000008		
10	8,38	5,291	4,630	7,316	7,515	251,338	250,677	253,363	253,562	-0,000199	-0,000247	-0,000237	-0,000228	0,000004		
12	10,06	5,288	4,637	7,317	7,516	251,335	250,684	253,364	253,563	-0,000211	-0,000219	-0,000233	-0,000221	0,000008		
14	11,74	5,280	4,630	7,310	7,516	251,327	250,677	253,357	253,563	-0,000243	-0,000247	-0,000260	-0,000250	0,000008		
16	13,42	5,276	4,622	7,301	7,516	251,323	250,669	253,348	253,563	-0,000259	-0,000279	-0,000296	-0,000278	0,000008		
18	15,09	5,269	4,615	7,292	7,516	251,316	250,662	253,339	253,563	-0,000286	-0,000307	-0,000331	-0,000308	0,000008		
20	16,77	5,260	4,607	7,288	7,517	251,307	250,654	253,335	253,564	-0,000322	-0,000339	-0,000347	-0,000336	0,000012		

³⁶ Ditta Geoin: Indagini e Servizi per la Geologia, l'Ingegneria e l'Ambiente.

7.0.1.2 VALUTAZIONE

Al termine dell'analisi storico critica e del quadro di degrado, unitamente all'obbiettivo di raggiungere il prefissato livello di conoscenza, si è giunti a trarre alcune conclusioni relativamente le criticità intrinseche all'edificio.

In ogni struttura, le principali cause di degrado e di fessurazione sono relative all'azione di: sostanze aggressive presenti negli agenti atmosferici, cedimenti del sottosuolo, carichi permanenti e accidentali (trasmessi dai solai alle pareti) e da spinte orizzontali di natura sismica.

Il fabbricato esaminato dove possibile è stato descritto dalla sua storia costruttiva sino allo stato attuale nelle sue componenti strutturali principali portandoci ai seguenti risultati.

Si è potuto constatare come esso, nel rispetto delle usanze costruttive del tempo per i palazzi signorili, presenti un primo livello costituito da struttura a pareti e volte (a botte nei corridoi, a crociera e a padiglione nelle stanze), da un secondo livello a pareti e solai in legno con controsoffitti a camorcanne e un terzo e ultimo livello con copertura a falde in legno.

Il fabbricato presenta un ampio salone aperto con ballatoio tra il secondo e terzo livello, che si affaccia su strada sul fronte Est e confina sul fronte Ovest con il cortile interno e il vano scala, quest'ultimo realizzato con gradini autoportanti incastrati tra i muri perimetrali; esso si configura inoltre piuttosto rigido al primo livello, grazie alle ridotte luci delle pareti e alle presenza delle volte, mentre i piani superiori presentano luci maggiori delle pareti, campate più ampie e solai lignei.

A seguito di un intervento di ristrutturazione eseguito nel 1997, fu realizzato un vano ascensore nell'ala Est del fabbricato, con la ricostruzione di una parte di solaio in latero-cemento.

Le murature esaminate non presentano uno stato di degrado provocato da agenti atmosferici degno di nota.

Ciò è dovuto soprattutto ad un buono stato di conservazione del fabbricato, che non essendo stato mai disabitato, ha goduto negli anni di interventi di manutenzione ordinaria agli intonaci, alle pitture e agli stucchi, che hanno protetto adeguatamente le strutture.

Il quadro lesivo riscontrato va pertanto interamente attribuito a motivazioni di carattere statico.

Occorre infine citare quegli elementi che, sulla base del rilievo effettuato, non risultano essere stati concepiti all'origine del fabbricato, e quelli che, pur essendo sicuramente originali, possono provocare o aver provocato delle anomalie nel comportamento strutturale globale del fabbricato, rispetto alle azioni sismiche, si tratta in particolare dei seguenti elementi:

- **i solai in laterocemento e il vano ascensore in cemento armato**, realizzati negli anni '90 sono elementi di forte irrigidimento, provocando pertanto un'alterazione della risposta ad azioni orizzontali, rispetto ai solai in legno;
- **il muro in mattoni pieni, al secondo livello**, presumibilmente realizzato in epoca successiva e posto direttamente sulla volta genera su di essa delle sollecitazioni che, non essendo trasmesse correttamente ai muri laterali, possono provocare cedimenti del muro stesso; le fessure su di esso riscontrate potrebbero essere ricondotte a tale meccanismo;
- **nicchie, aperture, camini incassati nelle murature e canne fumarie**, che generano delle interruzioni allo sviluppo dei maschi murari e in taluni casi, in particolare modo per le canne fumarie, "tagliano" il muro in più parti.

Questi elementi rappresentano delle importanti criticità, che sono rese manifeste dai quadri fessurativi, individuati in modo particolare al secondo livello del fabbricato;

- **le tracce effettuate per il passaggio degli impianti**, specie quello elettrico e del riscaldamento, sono risultate in alcuni casi piuttosto invasive, come documentato precedentemente;
- **le volte di controsoffitto in camorcanna** presentano una forte vulnerabilità alle azioni sismiche, in quanto costituite da strati di intonaco di ingente spessore che, a seguito di scosse anche lievi, può subire delle lesioni per trazione (come hanno manifestato alcuni distacchi subiti a seguito sia dello sciame sismico del 2011 che del terremoto emiliano del 2012).

Le criticità sopra esposte sono amplificate dalle ampie luci dei controsoffitti, con particolare riferimento al salone centrale; pur non trattandosi di elementi non portanti, la loro fragilità costituisce comunque un rischio per la sicurezza di persone e cose.

7.0.1.3 ANALISI NUMERICA STRUTTURALE

Terminata la descrizione delle fasi di conoscenza e valutazione vado verso la fine della presentazione del caso studio, passando velocemente, attraverso alcuni accenni di quelle che sono state le principali fasi del “lavoro dello strutturista” incaricato di valutare l'intervento di miglioramento sismico del fabbricato in oggetto.

Al fine di definire quelli che sono “i numeri” inerenti la verifica dei parametri sismici , così come descritto del paragrafo 6.0.1.4, per prima cosa lo strutturista ha dovuto inquadrare quella che è l'azione sismica di riferimento per il caso in oggetto:

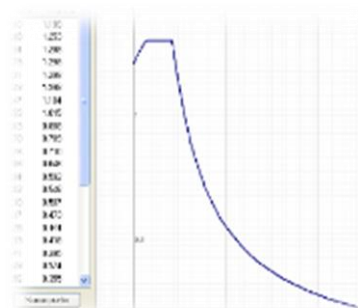
L'azione sismica di progetto è stata valutata sulla base delle caratteristiche geomorfologiche e della sismicità locale con i criteri descritti nel D.M. 14 gennaio 2008, si seguito sono elencati i parametri che definiscono l'azione sismica, inseriti nel programma di calcolo per determinare gli spettri di risposta impiegati nei calcoli strutturali:

- **Vita nominale** VN = 50 anni
(opere ordinarie)
- **Coefficiente d'uso** CU = 2.0
(classe d'uso IV, costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti)
- **Periodo di riferimento per l'azione sismica** VR=2*50 = 100 anni
- **Coordinate geografiche** LON = 11.977 – LAT = 43.856
- **Parametri di pericolosità sismica:**

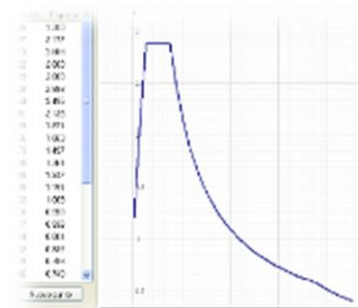
Stato Limite	T_r [anni]	$a_g/g[-]$	$F_o[-]$	$T^*_d[s]$
Operatività	60	0.095	2.400	0.275
Danno	101	0.118	2.407	0.280
Salvaguardia Vita	949	0.256	2.436	0.317
Prevenzione Collasso	1950	0.315	2.496	0.327

- **Categoria di sottosuolo** B Categoria topografica T1 ST = 1
- **Fattore di struttura** Struttura non regolare

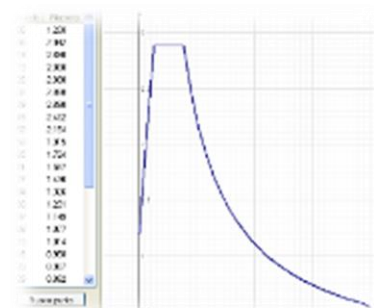
Spettro SLV



Spettro SLD



Spettro SLO



7.0.1.4 IPOTESI E SCELTA PROGETTUALE



Svolte le fasi di Conoscenza, Valutazione, preso atto dallo stato di fatto dell'immobile e delle indicazioni sul suo comportamento strutturale nel tempo, sia apre lo scenario della scelta progettuale del tipo d'intervento.

Nel definire la scelta dell'intervento ottimale il gruppo di progettazione ha dovuto tenere in considerazione questi fattori:

- **esigenze intrinseche del manufatto**
- **obblighi normative di “messa in sicurezza” dell'edificio in capo all'Unione**
- **disponibilità economiche**
- **tempi di realizzazione**

Come premesso al paragrafo 6.0.1, quando si parla di “progettazione sismica” o “messa in sicurezza sismica” di un edificio si vuol riferirsi all'adempimento e verifica di quelli che sono i requisiti limiti di Legge in materia imposti dalle norme sismiche vigenti (paragrafo 6.0.1.3) .

In sostanza il fine della progettazione è quello di garantire i minimi di sicurezza in considerazione di azioni sismiche di progetto “stimate” e “o presunte”.

Questa premessa apre la difficile e spinosa questione di quale sia l'intervento più efficace “oggi” per gestire un evento “domani” dagli sfumati e presunti contorni in termini di accadimento, dinamica e intensità.

Collimare le “concrete” esigenze intrinseche al manufatto in termini di manutenzione e recupero con quelle “predittive” normative è stato il primo scoglio progettuale da dover superare.

Concludendo, per il caso in questione, l'intervento più adatto è risultato essere quello di “miglioramento sismico”.

Grazie infatti alla solida base conoscitiva preliminare è stato possibile stabilire che all'edificio non servissero ben più “pesanti” interventi, d'adeguamento sismico.

La natura strutturale del manufatto e i meccanismi di fatica o di crisi da essa evidenziati nelle lesioni, ha suggerito le seguenti necessità in ordine di priorità:

- **interventi mirati al rinforzo dei nodi di collegamento strutturali**
- **il rinforzo delle pareti verticali dei fronti principali lato strada e sul retro**
- **il ripristino degli archi del vano scale principale**
- **il rinforzo delle pareti del vano scale secondario**
- **il consolidamento delle porzioni di copertura interna in camorce**
- **il ripristino delle crepe d'intonaco superficiali diffuse**

Delineato lo scenario d'intervento motivato dalle ragioni intrinseche al manufatto la fase successiva è stata quella della valutazione del soddisfacimento degli obblighi assegnati dall'ottemperanza ai requisiti minimi di Legge in capo all'Unione, nei limiti di un budget assegnato di circa 100.000 euro.

Dalla sintesi dei passaggi sopradescritti si è arrivati ad un primo scenario d'interventi finalizzati alla riduzione della vulnerabilità complessiva dell'edificio, approvati dall'Unione, attualmente verso l'approvazione definitiva (in quanto già accettato in via preventiva) del competente ufficio della Soprintendenza ai Beni Culturali ed Architettonici di Ravenna in ottemperanza al Vincolo cui l'immobile è soggetto.

L'attenzione è stata posta sia agli elementi strutturali principali, (murature portanti solai e scale) sia a quelli secondari con un elevato livello di pericolosità e di esposizione, con il ripristino d'intonaci pesanti e i cannucciati i quali in presenza anche di piccoli spostamenti, possono andare in pezzi, con conseguenti rischi sia per l'incolumità degli occupanti, sia alla conservazione delle volte affrescate di particolare pregio architettonico.

Gli interventi in ordine di priorità sono i seguenti:

- **rinforzo delle murature**
- **riduzione delle spinte sulle pareti della sala centrale;**
- **rinforzo dei cannucciati**

Nella pratica la progettazione ha in primo luogo valutato e poi abbandonato l'idea di un intervento di tipo tradizionale in muratura armata, cordoli perimetrali in c.a. e tiranti in ferro, per ragioni di costi, e di peso e nella volontà di evitare la formazione "di punti rigidi" in una struttura di forma irregolare e con un comportamento globale duttile.

Come soluzione di rinforzo per le murature e la riduzione/controllo delle spinte orizzontali (vano scale) si è infine scelta l'applicazione interne/esterna di un sistema FRG (più compatibile con la struttura e gradito al Sovrintendenza del fratello FRP).

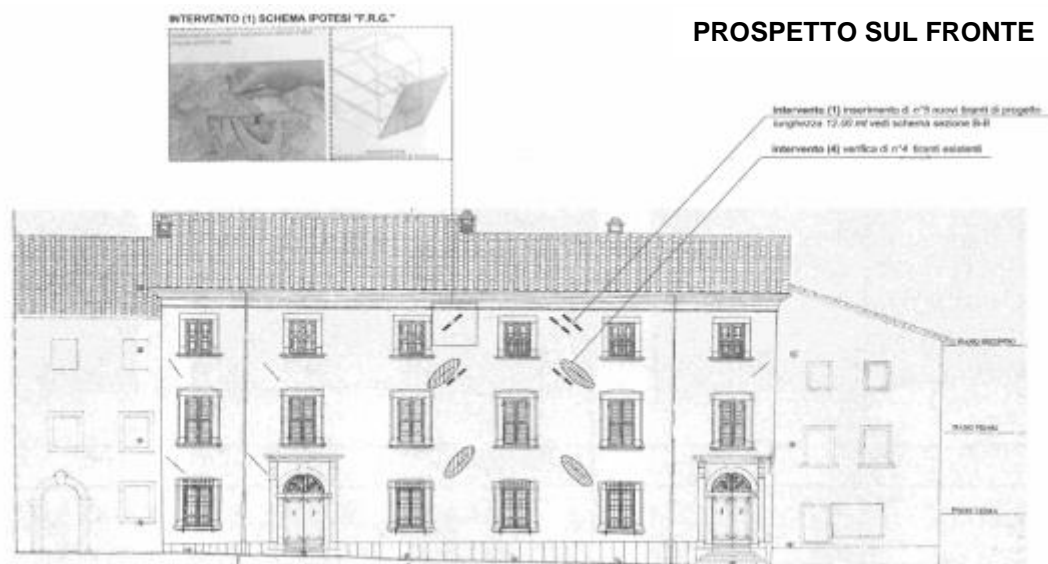
Convinti che il sistema FRG può di superare molti dei problemi applicativi degli FRP (in particolare l'aderenza al supporto) pur mantenendone i vantaggi più significativi, ciò ha reso l'alternativa interessante al gruppo di progettisti al di là delle responsabilità progettali intrinseche alla scelta (vedi paragrafo 6.0.2).

La progettazione si può riassumere come segue:

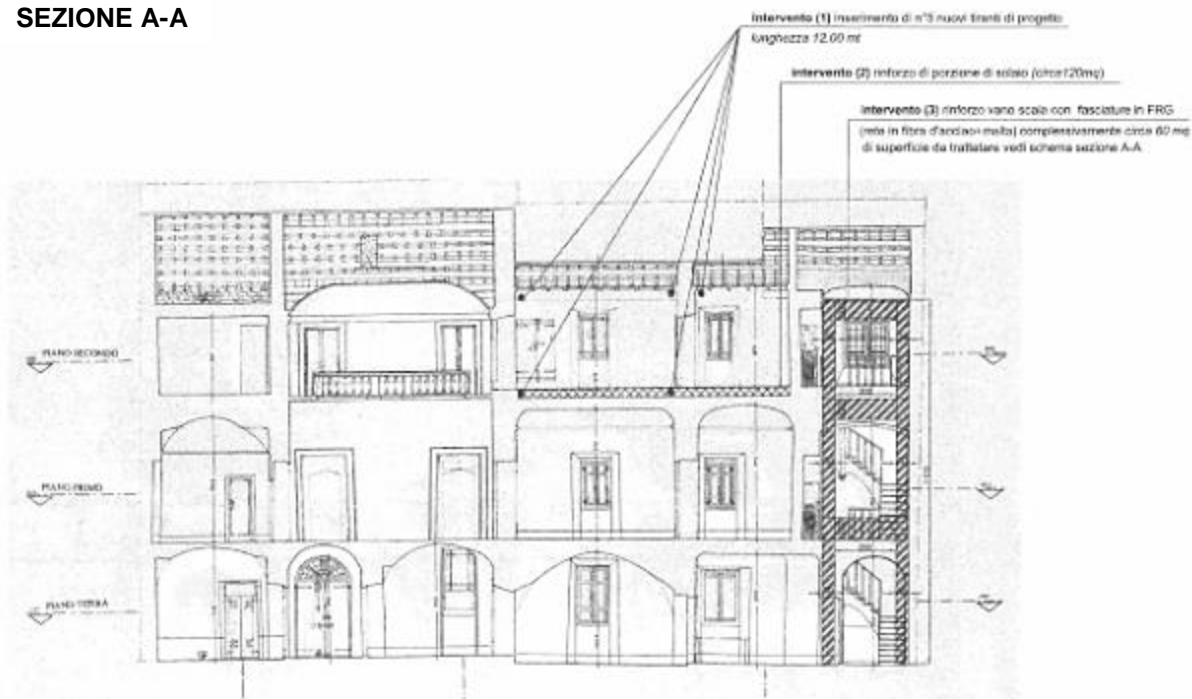
RIEPILOGO E CONFRONTO INTERVENTI : FRG vs TRADIZIONALE	
intervento (1) inserimento di nuovi tiranti in FRG di lunghezza 12.00m <i>(schemi: PROSPETTO SUL FRONTE e SEZIONE B-B)</i>	intervento (1) inserimento di n°5 nuovi tiranti di progetto in acciaio lunghezza 12.00m <i>(schemi: PROSPETTO SUL FRONTE e SEZIONE B-B)</i>
intervento (2) rinforzo di porzione di solaio (circa 120mq) con cemento composito avanzato fibre d'acciaio disperse in cemento ad alta resistenza dello sp. 2cm (35% peso a mq. in meno del c.a. tradizionale) <i>(schema: PIANO SECONDO)</i>	intervento (2) rinforzo di porzione di solaio (circa 120mq) con soletta rinforzata con rete metallica elettrosaldata e cls dello sp. 5cm <i>(schema: PIANO SECONDO)</i>
intervento (3) rinforzo vano scala con fasciature in FRG (rete in fibra d'acciaio + malta) circa 60mq di superficie da trattare <i>(schema: SEZIONE A-A)</i>	intervento (3) rinforzo vano scala con intonaco armato sp. 5cm. complessivamente circa 60mq <i>(schema sezione A-A)</i>
intervento (4) verifica di n°4 tiranti esistenti <i>(schema: PROSPETTO SUL FRONTE)</i>	intervento (4) verifica di n°4 tiranti esistenti <i>(schema: PROSPETTO SUL FRONTE)</i>
intervento (5) rinforzo parete esterna con fasciature in FRG (rete in fibra d'acciaio+malta) circa 60mq. di superficie da trattare <i>(schema: PROSPETTO SUL RETRO)</i>	intervento (5) rinforzo parete esterna con intonaco armato sp. 5cm per circa 60 mq <i>(schema: PROSPETTO SUL RETRO)</i>

7.0.1.4 SCHEMI DEGLI INTERVENTI

Di seguito riporto gli schemi degli interventi pensati e proposti all'Unione:



SEZIONE A-A



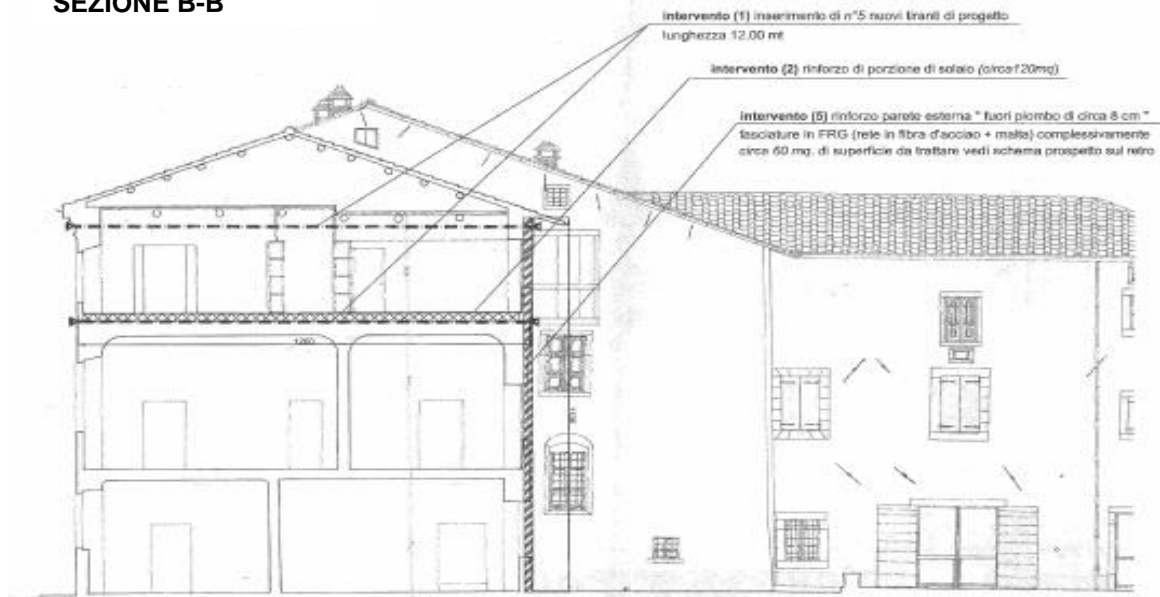
PROSPETTO SUL RETRO



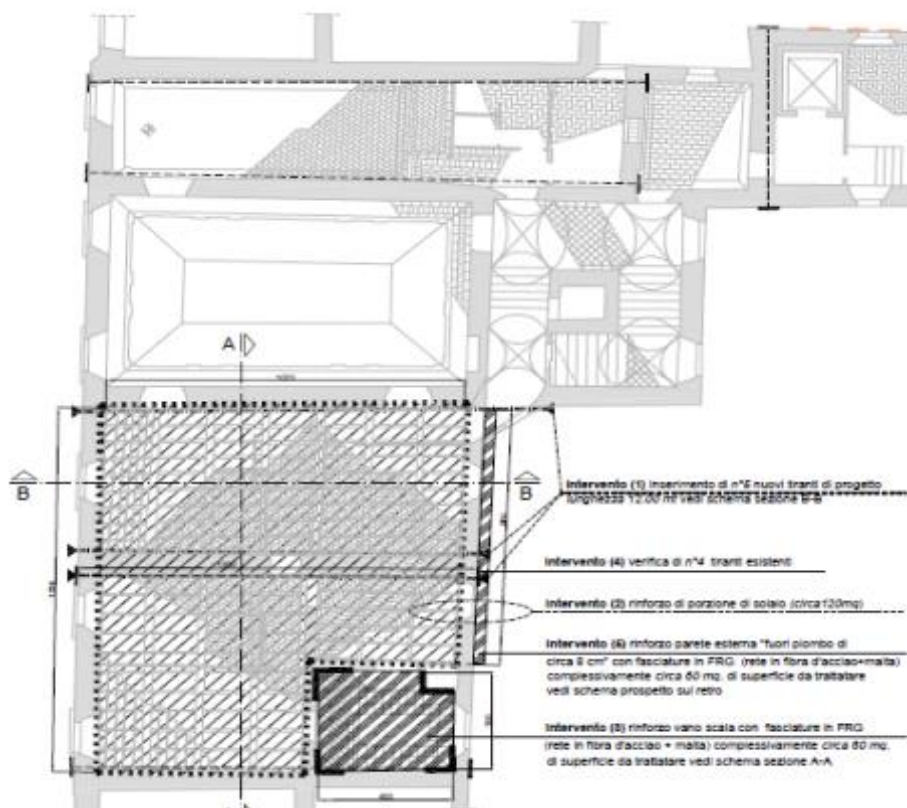
INTERVENTO (5) SCHEMA POTESI "F.R.G."



SEZIONE B-B



PIANTA PIANO SECONDO



Per rinforzare elementi strutturali secondari quali i cannucciati e la volta in camorcanne del salone centrale (parte più pregiata per la presenza di affreschi e di stucchi d'epoca) si è prevista l'applicazione di fasciature sempre in FRG "anti sfondellamento".

CONCLUSIONI

Consapevole che in un settore molto tradizionalista come quello delle costruzioni è sempre difficile far accettare nuove tecnologie e materiali (specialmente ai costruttori i quali temono che passare a nuovi materiali significhi aumentare i costi), mi sembra lecito affermare che questi materiali meritino “maggiori attenzioni”.

Nonostante i recenti terremoti abbiano evidenziato gravi carenze per quel che riguarda l’anti-sismicità degli edifici esistenti, si prende atto che, i vantaggi dell’utilizzo di queste tipologie di materiali (di provata efficacia e mirati alla riduzione della vulnerabilità sismica del patrimonio architettonico) risultano ancora poco apprezzati; il loro uso infatti rappresenta attualmente una piccola percentuale delle grandi possibilità applicative offerte dall’edilizia.

Ritengo che questa situazione sia dovuta (unitamente alle riserve del mercato) anche alla difficoltà progettuale fortemente condizionata dall’attuale ambito Normativo di settore che nei riguardi dei compositi si rivela articolato, a volte contraddittorio, se non addirittura assente nello specifico degli FRG.

La necessità di provvedere all’adeguamento di strutture “non progettate” o “mal progettate” per resistere agli eventi sismici resta comunque un problema di primaria importanza.

Le sperimentazioni progettuali, ed applicative ad oggi eseguite soprattutto negli scenari post-sisma, hanno dimostrato il buon funzionamento dei compositi (soprattutto dei sistemi malte/cemento e nastri con trefoli d’acciaio).

Queste prove attestano la possibilità di realizzare, con grande semplicità, economicità e rapidità: presidi di sicurezza, cordoli di sommità in muratura armata (in alternativa a quelli in c.a.), cerchiature e rinforzi di murature, archi e volte, (anche pre-tensionati), ecc.

Quindi anche se per il momento le applicazioni per le nuove costruzioni sono limitate, il miglioramento delle conoscenze e la messa a punto di questi nuovi materiali (in particolare i compositi a matrice cementizia e i compositi eco-compatibili) fanno pensare a una loro futura crescita.

In quest'ottica mi sento di poter dire anche che, un intervento di ripristino basato sull'utilizzo di compositi ad alte prestazioni, può risultare economico se si estende la valutazione non solo alla materia prima ma anche ai tempi ed alle attrezzature necessarie per la sua realizzazione, quindi un' "interessante" concorrente per le tecniche costruttive tradizionali.

Tra le tipologie di sistemi compositi considero di rilievo le possibilità di sviluppo applicativo nel settore del consolidamento degli FRG, vantaggi economici a parte, perché in grado di superare i molti problemi applicativi degli FRP mantenendone peraltro i benefici più significativi.

I risultati sperimentali di laboratorio e le esperienze di cantiere ad oggi sono di sicuro conforto al tecnico che deciderà di orientarsi verso questi sistemi pur consapevole delle responsabilità intrinseche alla scelta.

Penso quindi che i materiali compositi avanzati meritino "la loro occasione" dall'edilizia (oltre che dall'industria) e credo che nel tempo si vedrà un loro significativo aumento applicativo (soprattutto nell'ambito del restauro e della mitigazione del rischio sismico).

Ho aperto il mio elaborato con l'ispirazione dell'illustre progettista Leonardo per sottolineare la mia curiosità verso questa nuova tecnologia e voglio concluderla "allineandomi" all'ottimistica opinione del decano dell'ingegneria dei materiali compositi, Prof. Angelo di Tommaseo³⁷ verso di essa:

"Siamo ancora lontani da immaginare grandi costruzioni in composito ma la prospettiva di crescita è molto buona anche perché tutti hanno acquisito il concetto che l'Italia è un paese ad alto rischio sismico e quindi è fondamentale che l'uso dei materiali compositi diventi generalizzato".

³⁷ Cfr. Di Tommaseo, A., Prof. Ordinario di Scienza delle Costruzioni, Istituto Universitario di Architettura di Venezia, Docente alla Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna e Consulente del Ministero dei Beni Culturali.

BIBLIOGRAFIA

Libri di Testo

- Bertolini, L., Bolzoni, F., Cabrini, M., Pedferri, P., (2001), *“Tecnologia dei Materiali. Ceramiche, polimeri e compositi”*, CittàStudiEdizioni (A cura di) Torino.
- Bever, M., Bloor, D., Cahn, R.W., (1994), *“The Encyclopedia of Advanced Materials”*, Pergamon Press, (A cura di) Oxford.
- Brigante, D., (2012), *“Rinforzo strutturale con materiali compositi”*, Graffil (A cura di) Torino.
- Carotenuto, G., Giordano, M., Nicolais, L., (2014), *“Materiali Compositi: sviluppi e prospettive”* report di ricerca (A cura di) Università di Napoli.
- Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J., (2011), *“Atlante delle Materie plastiche”*, Utet Scienze Tecniche (A cura di) collana manuali Grande Atlante di Architettura, Milano.
- Mariani, M., (2016), *“Sisma Emilia 2012 - Dall'evento alla gestione tecnica dell'emergenza”* (A cura di) Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Regione Emilia-Romagna, Consiglio Nazionale degli Ingegneri, Federazione Ordini degli Ingegneri dell'Emilia-Romagna.
- Minguzzi, G., (1998), *“Fiber Reinforced Plastics. Utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica in edilizia civile”*, Alinea Editrice (A cura di) Firenze.
- Russo, M.V., Fratoddi, I., Venditti, I., (2014), *“Materiali nanostrutturati innovativi a base polimerica, nanoparticelle metalliche e loro compositi come assorbitori di etilene rilevabile da variazioni di proprietà elettroniche”*, report di ricerca (A cura di) Dipartimento di Chimica, Università Sapienza di Roma.
- Viskovic, A., Bozzetti, A., (2014), *“FRP e FRCM: le normative sull'impiego di materiali compositi e innovativi”* report di ricerca (a cura di) membri della Commissione: materiali compositi e innovativi dell' Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.

Leggi e Normative

- *Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 2 febbraio 2009, n. 617* “Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al D.M. 14/01/2008. (pubblicata nella G.U. n° 47 del 26/02/2009 - suppl. ord. n° 27).
- *Decreto del Ministero delle infrastrutture 14 gennaio 2008* “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”(pubblicato nella G.U. n° 29 del 04/02/2008 - suppl. ord. n° 30).
- *CNR (2004-rev. 2008)*-Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni “Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati- Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie” (A cura di) CNR di Roma.

e-book

- Frassine, R., (2000), *“Tecnologie e proprietà dei materiali compositi”* - Professore Ordinario del Dipartimento di Chimica, Materiali ed Ingegneria Chimica del Politecnico di Milano, estratto della Docenza in Materiali polimerici e compositi, Promoplast srl (A cura di) su iniziativa di: Assocomplast.
- Lenormand, Payen, Morland Jeune, Laugier, Francoeur, Robiquet, Dfresnoy, ecc., (1845), *“Supplemento al Nuovo Dizionario Universale Tecnologico o di arti e Mestieri”*, Giuseppe Antonelli (A cura di) Venezia.

Articoli in Journal

- Steve, A.,(2013), "The Aberfeldy FootBridge at 20", (A cura di) *Composites and architecture*
<http://compositesandarchitecture.com/?p=2398>

Approfondimenti:

- The Condition Of The Aberfeldy Footbridge After 20 Years Of Service by Dr. Tim Stratford
http://www.research.ed.ac.uk/portal/files/3582804/CGB_STRAT.pdf
- Aberfeldy Bridge – An Advanced Textile Reinforced Footbridge, C.J. Burgoyne and P.R. Head
<http://www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/cp25.pdf>

Sitografia:

- <http://www.assocompositi.it>
sito ufficiale Assocompositi gruppo di riferimento del settore dei compositi in Italia dal 2005.
- <http://www.basaltex.com>
sito ufficiale della ditta Basaltex srl ditta leader in Europa per la produzione e commercializzazione delle fibre di basalto.
- <http://www.carbon-compositi.it>
sito ufficiale del gruppo di lavoro Carbon-Compositi ideato dalla ditta S.E.I.C.O. srl per lo studio dei sistemi compositi per i rinforzi strutturali in fibre di carbonio.
- <http://www.geoin.it>
sito ufficiale della ditta Geoin srl specializzata in indagini e servizi per la geologia e l'ingegneria ambientale.
- <http://www.treccani.it/enciclopedia/Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica>
enciclopedia della Scienza e della Tecnica.
- <http://www.mapei.com>
sito ufficiale della ditta Mapei srl, sezione : "Guida alla scelta dei materiali compositi per il rinforzo strutturale".
- <http://www.protezionecivile.gov.it>
sito istituzionale del Dipartimento della Protezione Civile-Presidenza del Consiglio dei Ministri.
- www.resinproget.it
sito ufficiale della ditta Resinproget srl, azienda impegnata in interventi di restauro e consolidamento strutturale di edifici vincolati, con elevato valore storico-monumentale, ma anche di edifici industriali e infrastrutture.
- <http://www.keracoll.com>
sito ufficiale della ditta Keracoll, sezione: "Catalogo e dispense tecniche".
- http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_content&task=view&id=75&Itemid=20
"La pericolosità sismica": studio pubblicato sul sito web del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.
- http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_content&task=view&id=75&Itemid=1
"Il foglio di calcolo elettronico Spettri-NTC" .