

DOTTORATO DI RICERCA IN
TECNOLOGIE E SISTEMI DI PRODUZIONE
XXVI CICLO

TESI DI DOTTORATO

*Innovazione e trasferimento tecnologico
dei sistemi produttivi avanzati
basati sull'impiego dei materiali compositi*

COORDINATORE
Ch.mo Prof. CARRINO LUIGI

DOTTORANDO
Dott. MAIONE ALESSANDRO

TUTOR
Ch.mo Prof. CARRINO LUIGI

CAPITOLO I - COMPLESSITÀ AMBIENTALE E CIRCOLAZIONE DELL'INNOVAZIONE

1.1	VARIETÀ ambientale e innovatività	8
1.2	INNOVAZIONE E STRUTTURA DEL SETTORE.....	11
1.3	LA COMPLESSITÀ TECNOLOGICA.....	14
1.4	MECCANISMI DI GENERAZIONE DELL'INNOVAZIONE TECNOLOGICA	17
1.4.1	Modello pipeline	17
1.4.2	Modello del product concept	20
1.4.3	Circuito clienti-fornitori.....	22
1.4.4	Processo a rete	24
1.5	LA TECNOLOGIA TRA DIFFUSIONE E ISTITUZIONALIZZAZIONE	27
1.5.1	Il diffusionismo della tecnologia	30
1.5.2	Il modellamento sociale della tecnologia.....	36
1.5.3	I modelli matematici di diffusione dell'innovazione	38
1.5.4	I modelli reticolari di diffusione dell'innovazione	41
1.6	I DRIVER DEI PROCESSI DI INNOVAZIONE TECNOLOGICA	44
1.6.1	La struttura del mercato di riferimento	44
1.6.2	La capacità di assorbimento delle imprese	49
1.7	LA STANDARDIZZAZIONE DELLA TECNOLOGIA E LA COMPETIZIONE TECNOLOGICA	51
1.7.1	Il modello concettuale per lo studio della competizione attraverso gli standard tecnologici	51
1.7.2	Il ciclo della tecnologia e le strategie competitive.....	56
1.7.3	Gli assetti competitivi derivanti dalla combinazione delle forze “push” e “pull”	60
1.8	DIFFUSIONE DELL'INNOVAZIONE: UN CONFRONTO INTERSETTORIALE	63
1.9	IL PROCESSO DI INNOVAZIONE NEL SETTORE AEROSPAZIALE: L'APPROCCIO BUILDING-BLOCK PER LO SVILUPPO DI COMPONENTI STRUTTURALI	65
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	69

CAPITOLO II – MATERIALI AVANZATI E RELATIVA DIFFUSIONE NELL’AMBITO DEI TRASPORTI

2.1 NUOVI BISOGNI E RISPOSTE TECNOLOGICHE.....	71
2.2 SVILUPPO E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI AVANZATI: FIBRE DI RINFORZO E MATRICI.....	77
2.2.1 Fibre di rinforzo	80
2.2.2 Matrici.....	81
2.3 CONFRONTO TRA COMPOSITI E METALLI: VANTAGGI E SVANTAGGI	88
2.4 APPLICAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI AVANZATI PER L’INDUSTRIA DEI TRASPORTI.....	93
2.4.1 Le condizioni di contesto	93
2.4.2 Lo sviluppo dell’applicazioni dei materiali compositi per l’aeronautica	96
2.4.3 L’applicazione dei materiali compositi nell’industria automotive...	102
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	105

CAPITOLO III – TRASFERIMENTO TECNOLOGICO DEI COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO PER PARTI STRUTTURALI: TRA STANDARDIZZAZIONE ED EMULAZIONE

3.1 L’AFFERMAZIONE DEI COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO NELLE PRODUZIONI DI PARTI STRUTTURALI PER L’AERONAUTICA	107
3.2 IL PROCESSO DI STANDARDIZZAZIONE DELL’APPLICAZIONE DEI CFRP IN AERONAUTICA	110
3.3 PROPRIETÀ E VANTAGGI DEI COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO	114
3.4 LE PRINCIPALI TECNOLOGIE NELLA LAVORAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI A FIBRA DI CARBONIO	121
3.4.1 Laminazione Manuale: Hand Lay-Up E Spray-Up.....	123
3.4.2 Stampaggio sotto vuoto o a pressione.....	125
3.4.3 Avvolgimento-Filament Winding	126
3.4.4 Produzione continua (pultrusione).....	128
3.4.5 Stampaggio per trasferimento	129
3.4.6 I processi tecnologici per compositi a matrice termoplastica	130

3.5 I PROCESSI IMITATIVI NELL'AMBITO DELL'INDUSTRIA AUTOMOTIVE	133
3.6 EVOLUZIONE TECNOLOGICA ATTESA DELL'APPLICAZIONE DEI MATERIALI CFRP NELL'INDUSTRIA AUTOMOTIVE E POSSIBILI SPILL-OVER PER L'INDUSTRIA AERONAUTICA	136
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	142

CAPITOLO IV – MODELLO DECISIONALE NELLA DEFINIZIONE DEI PROCESSI DI PRODUZIONE INNOVATIVI PER COMPONENTI IN CFRP

4.1 LA VISIONE DELL'IMPRESA PER PROCESSI	144
4.2 DAI PROESSI AI SISTEMI DI PRODUZIONE	149
4.2.1 I vincoli tecnico-economici ed i fattori produttivi	149
4.2.2 I vincoli di flessibilità e varietà produttiva	152
4.3 ANALISI COMPARATIVA DELLE TECNOLOGIE PER I MATERIALI COMPOSITI: I KPI ED IL MODELLO DI ANALISI.....	164
4.4 LA CARATTERIZZAZIONE DELLE TECNOLOGIE DI LAVORAZIONE DEI MATERIALI CFRP SULLA BASE DEL MODELLO DI ANALISI.....	168
4.4.1 PREPREG LAY-UP.....	168
4.4.2 PREPREG LAY-UP + PRESSA CALDA	171
4.2.3 INJECTION MOLDING.....	173
4.4.4 COMPRESSION MOLDING	178
4.4.5 TECNOLOGIE DI POSIZIONAMENTO DI RINFORZI DI TIPO CONTINUO	182
4.4.6 TERMOFORMATURA CON RINFORZO A FIBRA LUNGA.....	190
4.5 UNA POSSIBILE MAPPATURA DELLE TECNOLOGIE DI LAVORAZIONE ESAMINATE.....	193
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	197

CAPITOLO V – UNA POSSIBILE APPLICAZIONE DEL MODELLO DI ANALISI: LA CARATTERIZZAZIONE DEI KPI PER IL SUPORTO DECISIONALE

5.1 INTRODUZIONE.....	198
5.2 MECHANICAL PERFORMANCES	198
5.2.1 Metodi di caratterizzazione meccanica	198

5.2.2 Proprietà meccaniche di compositi prodotti da preimpregnati.....	200
5.2.3 Proprietà meccaniche di compositi prodotti per RTM.....	201
5.2.4 Proprietà meccaniche di compositi prodotti per termoformatura.....	203
5.3 ASSORBIMENTO DI ENERGIA AD IMPATTO	206
5.3.1 Test di impatto	206
5.3.2 Comportamento ad impatto di compositi prodotti da pre-impregnati	210
5.3.3 Comportamento ad impatto di compositi prodotti per RTM.....	211
5.3.4 Comportamento ad impatto di compositi a matrice termoplastica...	212
5.3.5 Tempi ciclo per la produzione di componenti in CFRP	214
5.4 VALUTAZIONE CICLO CURA SISTEMA EPOSSIDICO	215
5.4.1 Definizione della problematica	215
5.4.2 Modellazione del processo di scambio termico in autoclave	216
5.4.3 Modellazione Cinetica SAATI.....	218
5.4.4 Identificazione del modello e parametri cinetici (SAATI).....	222
5.4.5 Identificazione dei parametri per la cura in Autoclave HP compositi (SAATI).....	224
5.5 PARAMETRI DI CONTROLLO PROCESSO DI PRODUZIONE	228
5.6 ESTETICA.....	229
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	232
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	232
RINGRAZIAMENTI.....	238

ABSTRACT

Il lavoro ha come obiettivo la *definizione e la misurazione del trasferimento tecnologico*, al fine di contribuire alla determinazione di uno strumento di ausilio nelle scelte degli operatori che si occupano dello sviluppo e della fabbricazione dei prodotti industriali basati sull'impiego dei materiali compositi, siano essi progettisti di prodotto che responsabili di produzione.

L'esigenza di una ricerca sul trasferimento tecnologico nasce dalla quasi totale assenza di ricerche approfondite riguardanti il rapporto innovazione – trasferimento tecnologico, dato che la letteratura scientifica moderna si è limitata ad affrontare soltanto aspetti legati all'influenza della complessità sulla generazione dell'innovazione e sulla relativa velocità di diffusione.

Attraverso l'individuazione e lo studio di differenti metodi proposti in letteratura, nel lavoro si analizza *lo stato dell'arte* su definizioni, misure e fattori determinati dell'innovazione in ambito industriale, evidenziando la correlazione esistente tra innovazione, complessità del sistema e trasferimento tecnologico.

Tale relazione è approfondita attraverso l'analisi comparativa dei sistemi produttivi avanzati basati sull'impiego dei materiali compositi che hanno avuto maggiore diffusione nei settori più innovativi del sistema manifatturiero : *l'automotive* ed il settore aeronautico

Attraverso tale analisi sono state identificate le variabili di fondo per *l'elaborazione di un metodo di calcolo* dell'indice di trasferibilità tecnologica delle tecnologie di produzione che standirzzati nell'ambito dell'aeronautica possono trovare impiego sotto vincoli tecnico-economici nell'ambito dell'automotive.

Sulla base dei risultati ottenuti attraverso tale modello di calcolo in riferimento alle tecnologie di lavorazione ed ai processi attualmente utilizzati per l'industrializzazione in media-grande serie, si è infine proceduto attraverso un'analisi multiobiettivo all'individuazione della coppia tecnologia di lavorazione-componente automotive ottimale. I singoli parametri sono stati sperimentalmente ed empiricamente valutati in modo da poter effettuare una valutazione complessiva dell'impatto di una variazione sui requisiti di progetto

di un componente quali il numero di elementi previsti per la serie e/o un differente posizionamento di mercato del prodotto (prezzo al pubblico).

CAPITOLO I - COMPLESSITÀ AMBIENTALE E CIRCOLAZIONE DELL'INNOVAZIONE

1.1 VARIETÀ AMBIENTALE E INNOVATIVITÀ

La **capacità di innovare** (l'applicazione di un'invenzione in un nuovo prodotto o processo produttivo-organizzativo ed il suo sfruttamento in attività economiche) costituisce una condizione di sopravvivenza per l'azienda. Se il fine di tale istituto economico è l'*economicità a valere nel tempo*¹, la capacità del soggetto di governo del sistema aziendale di introdurre un nuovo/migliorato prodotto sul mercato (innovazione di prodotto) e nuovo/migliorato processo produttivo (innovazione di prodotto) o nuovo/migliorati modelli di coordinamento dell'azione collettiva (innovazione organizzativa) rappresentano obiettivi strategici per assicurare condizioni di mercato ovvero di efficienza favorevoli per perseguire azioni competitive potenzialmente profittevoli e sostenibili nel medio termine.

In generale l'innovazione, sia che essa collegata alla nascita di nuove **tecnologie** (insieme di conoscenza, strumenti e tecniche, derivante da scienza ed esperienza pratica, che viene utilizzato nello sviluppo, progettazione, produzione di prodotti, processi, sistemi e servizi)² sia essa di tipo organizzativo (mutamenti significativi nelle pratiche di gestione aziendale, nell'organizzazione del lavoro o nelle relazioni con l'esterno) ovvero di marketing (nuove strategie e pratiche di commercializzazione di prodotti o servizi, nonché le modifiche nelle caratteristiche estetiche, nel design e nel confezionamento dei prodotti), fornisce alle imprese i mezzi per sopravvivere in contesti costantemente in evoluzione (Thompson, 1965; Greve, 2007), ed è un fattore cruciale per il loro successo e la relativa sopravvivenza nel lungo periodo.

¹ «L'azienda verrà intesa come una «unità elementare dell'ordine economico-generale, dotata di vita propria e riflessa, costituita da un sistema di operazioni, promanante dalla combinazione di particolari fattori e dalla composizione di forze interne ed esterne, nel quale i fenomeni della produzione, della distribuzione e del consumo vengono predisposti per il conseguimento di un determinato equilibrio economico, a valere nel tempo, suscettibile di offrire una remunerazione adeguata ai fattori utilizzati e un compenso, proporzionale ai risultati raggiunti, al soggetto economico per conto del quale l'attività si svolge» (Giannessi 1960, 72).

² Abetti, 1989

Nelle economie avanzate caratterizzate da contesti competitivi allargati ed aperti alla concorrenza (Kalburgi, 1995; Knight, 2000; Bumes, Cooper e West, 2003; Salavou et al., 2004; Birdthistle e Fleming, 2005), la crescente varietà e variabilità ambientale (Dixon, 1992; Chirico e Salvato, 2008), segnando il passaggio da un “mondo di orologi”, in cui si poteva programmare ed agire sulla base di una ipotetica razionalità, ad un “mondo di nuvole” (K.Popper), dove occorre reinventarsi continuamente, ha moltiplicato le opportunità/minacce a cui l’impresa è esposta, innalzando in tal modo i rischi connessi allo svolgimento delle sue attività.

In tale ottica di complessificazione, non solo esterna ma anche interna all’impresa (*principio delle requirity*), l’innovazione degli output produttivi, dei sistemi produttivo-organizzativi, delle tecnologie e delle norme che ne sono a fondamento e a salvaguardia si configura come un evento sempre più ordinario e meno straordinario nel processo evolutivo del sistema aziendale.

Nuove tecnologie, nuovi modelli organizzativi, nuove modalità di commercializzazione permettono, in un rapporto spesso di mutua dipendenza, di accrescere la produttività delle imprese, di generare efficienza nel sistema, di ottimizzare l’allocazione delle risorse disponibili, di adattare conoscenze e risorse esistenti in diversi settori/mercati, assicurando condizioni di economicità a valere nel tempo per l’impresa.

Esempio in tale senso è il modello teorico gestionale attualmente dominante negli studi manageriali della *lean organization* (sotto in profilo intra-aziendale) e della *value networking* (sotto il profilo interaziendale) che trae spunto dai sistemi biologici e dalla teoria del caos, considerando una evoluzione costante del sistema che richiede continue modifiche ed aggiornamenti di operazioni e strutture – in contrapposizione con la visione meccanicistica del paradigma Tayloriano che basato sulla fisica classica, in termini di equilibrio, stabilità e determinismo, definiva il sistema produttivo a partire da una matematica precisa, e comportava una netta divisione del lavoro e delle operazioni.

L’evoluzione che ha portato dalla fabbrica in linea di Ford e dalla *one best way of organization* alle attuali metodologie di produzione quali la Group Technology, la produzione flessibile e il Just in Time ha determinato un

incremento di complessità della gestione dovuta a layout di impianto, macchinari e tecnologie sofisticati e fortemente integrati tra loro.

Da questo punto di vista, l'innovazione è, quindi, legata alla creazione, all'accettazione e alla realizzazione di nuove modalità di coordinamento dell'azione collettiva e di gestione dell'interazione tra gli attori del sistema aziendale, *stakeholders*, sia essi portatori di interessi interni al sistema stesso che di interessi esterni.

Spesso il concetto di innovazione è collegato ad una nuova tecnologia: può trattarsi di una tecnologia completamente nuova che crea un nuovo mercato, oppure una nuova tecnologia che, in un determinato mercato, ne sostituisce una già esistente; in quest'ultima situazione si genera un 'momento di fermento' in cui diverse tecnologie (quella nuova e quella preesistente) competono per il primato (Tushman e Anderson, 1986). In questo periodo in cui le tecnologie lottano per la supremazia è presente una situazione di incertezza che si conclude normalmente con la vittoria di uno standard o *dominant design* (Abernathy e Utterback, 1978; Clark, 1985; Tushman e Anderson, 1986; Arthur, 1996). Alla fine di questo periodo di incertezza, dopo aver stabilito la vittoria della tecnologia predominante, si migliora tale tecnologia fino a quando non ci sarà la comparsa di una nuova tecnologia con il conseguente momento di fermento e così via. (Tushman e Anderson, 1986; Christensen, 1997).

Esempio di tale momento di fermento è rappresentato dalla diffusione delle tecnologie basate sull'impiego dei materiali compositi, che nel tempo si sono diffuse sia in settori produttivi, labour intensive basati sulla standardizzazione dei processi, come l'automotive, sia in settori science-based, come quello aeronautico o più in generale dell'aerospazio. Lo sviluppo di tecnologie e conoscenze nell'ambito dei materiali compositi è inizialmente trascinato dal settore aeronautico, in particolare dalle applicazioni militari in cui i vantaggi operativi hanno una prevalenza rispetto alla consistenza economica delle soluzioni adottate.

Hult, Hurley e Knight (2004) hanno sottolineato l'importanza del ruolo dell'innovatività, come sinonimo di apertura alla novità e capacità dell'azienda di investire in innovazione. Da questo punto di vista, l'innovazione è legata alla

creazione, all'accettazione e alla realizzazione di nuove idee, processi, prodotti e servizi (Damanpour, 1991; Tidd *et al.*, 2001; Drucker, 2002).

1.2 INNOVAZIONE E STRUTTURA DEL SETTORE

In base ad una visione di sistema integrato al pari del sistema aziendale anche l'evoluzione del settore produttivo è fortemente condizionata dalla capacità di innovare e dal tasso di innovazione degli attori che in esso operano. L'innovazione nei prodotti e nelle tecnologie di processo influisce, infatti, sulle strategie di crescita dell'impresa nonché sulle politiche produttive e gestionali, comportando nel tempo una conseguente riorganizzazione del settore produttivo.

La scienza, quale forza produttiva, genera stimoli ed opportunità in grado di trasformarsi in applicazioni tecnologiche; ciò innesca dinamiche competitive che seguono percorsi di sviluppo pluri-sequenziali. “Nello sviluppo della scienza e della tecnologia sono riscontrabili logiche di auto-propulsività e di multi-direzionalità. Le loro potenzialità sono cioè sfruttabili in modi plurimi, non sempre prevedibili o rigidamente pianificabili. Le opportunità di «fertilizzazione» possono dispiegarsi tanto verticalmente (lungo cioè una specifica filiera: agroindustria, informatica-telematica, chimica di base, applicata e fissa, ecc.) quanto - e ciò in misura crescente - in orizzontale (da settore a settore, da funzione a funzione)”³.

L'adozione di un'innovazione incide sulle scelte di natura competitiva delle imprese interessate direttamente dall'innovazione perché concorrenti nel settore di origine o indirettamente perché coinvolte in ambiti competitivi collegati. In particolare, la decisione di innovare innesca un processo dinamico di azione-reazione determinato dalle strategie messe in atto dagli attori coinvolti. Pertanto, i comportamenti delle imprese *first mover*, di quelle imitatrici e utilizzatrici si intrecciano dinamicamente sul terreno competitivo, seguendo percorsi circolari

³ Cfr. Caselli L., “Impresa e Ambiente: cambiamenti dei fenomeni produttivi”, Kibernetes, marzo, 1988, pag. 15.

in cui gli effetti delle strategie influenzano la configurazione delle direttrici di sviluppo delle imprese e della struttura del mercato.⁴

In generale, non tutte le innovazioni (tecnologiche, organizzative, strategiche, di mercato) determinano cambiamenti sostanziali nella struttura competitiva; ciò perché la natura, le modalità ed i tempi di adozione dell'innovazione incidono con intensità diversa sugli stati caratteristici della domanda e dell'offerta (Volpato, 1995, pag .358 e seg.)

Tabella 1.2.1 – *Effetti dell'innovazione sulla domanda e sull'offerta*

LE VARIAZIONI DELLE CARATTERISTICHE STRUTTURALI DELLA DOMANDA	LE VARIAZIONI DELLE CARATTERISTICHE STRUTTURALI DELL'OFFERTA
<ul style="list-style-type: none"> • configurazione di un nuovo mercato potenziale; • individuazione di un segmento in un mercato omogeneo; • identificazione di un nuovo segmento in un mercato già segmentato; • spostamento di domanda da un segmento di mercato ad un altro; • riduzione del numero di segmenti e standardizzazione dei prodotti; - cambiamenti nella domanda lungo la filiera tecnico-produttiva e nei business collegati orizzontalmente; - variazione del tasso di crescita della domanda all'interno dello stesso mercato; • trasformazione della percezione degli attributi dei prodotti (da struttura complessa a struttura semplice e viceversa) da parte dei consumatori. 	<ul style="list-style-type: none"> • grado di concentrazione in relazione alla dimensione delle imprese ed al numero di attori presenti sul mercato di riferimento (e su quelli collegati); • grado di integrazione del mercato sulla base del numero di imprese nelle fasi della filiera tecnico-produttiva (concorrenza verticale); • grado di diversificazione a seguito dello sviluppo del portafoglio prodotti e delle scelte strategiche di differenziazione; • barriere di derivazione competitiva; • caratteristiche a struttura semplice e complessa dei prodotti; • tasso di penetrazione ed assorbimento del prodotto innovativo.

⁴ La decisione di innovare “costituisce la proiezione di un'impresa che si emancipa dal mercato (di origine) e diventa capace di produrre mercato, attivando continuamente nuovi mercati o nuove situazioni di mercato, sia attraverso l'innovazione di prodotto, sia attraverso entrate sempre più frequenti in mercati collaterali (cross-entrie)”, cfr. Di Bernardo B., Rullani E., Il management e le macchine, Bologna, Il Mulino, 1990.

Mentre gli effetti dell'introduzione/diffusione dell'innovazione sulla domanda sono misurabili in termini di ampiezza, di intensità e di omogeneità della domanda, dal lato dell'offerta, gli effetti dell'innovazione rappresentano, per grandi linee, il risultato di strategie di crescita che possono tradursi in obiettivi di conquista di una nuova, diversa posizione di mercato ed il raggiungimento di un nuovo, differente livello di equilibrio economico.

Tuttavia, mentre l'affermazione secondo la quale le imprese che non innovano sono destinate a perdere nel tempo competitività può, in linea generale, essere condivisa, l'altra, secondo la quale le imprese che innovano, per questa sola ragione, hanno successo nella competizione è quanto meno semplicistica e va comunque opportunamente precisata. In altri termini, non vi è sempre un nesso diretto tra innovazione e dinamiche competitive in quanto l'innovazione può:

- interessare mercati e contesti competitivi quanto mai differenti;
- influenzare in maniera non uniforme gli assetti e la morfogenesi dei mercati;
- generare divergenze tra le fasi di programmazione e attuazione, a causa della presenza di rischi non eliminabili insiti nei processi gestionali delle imprese.

1.3 LA COMPLESSITÀ TECNOLOGICA

Più in generale, poiché una caratteristica essenziale dei sistemi di impresa è costituita dalla creazione di valore aggiunto, occorre riconoscere che qualsiasi attività aziendale (creatrice di valore) richiede l'utilizzazione di tecnologia. Il concetto di tecnologia può, quindi, essere interpretato in maniera ampia, riconoscendo che la «tecnologia» è incorporata in ogni attività del sistema d'impresa (Golinelli, 2000), ed è altresì incorporata nelle stesse risorse utilizzate per lo svolgimento delle attività aziendali.

L'innovazione tecnologica, intesa come processo economico-organizzativo, presenta un elevato grado di complessità. Tale complessità può essere colta tramite i concetti seguenti:

- a) la “multidimensionalità”, la quale indica che l'innovazione non riguarda soltanto la tecnologia della produzione manifatturiera, ma anche le altre attività aziendali, tenendo presente che l'impresa, considerata come “insieme di attività”, si presenta come un “insieme di tecnologie” (Porter, 1987);
- b) la “globalità” dell'innovazione, nel senso che il processo innovativo va gestito come un fenomeno unitario nell'ambito dell'impresa tramite un approccio organizzativo.

Complessità tecnologica è un termine ampio che implica diversi approcci relativi a differenti aspetti e livelli di complessità in ambito industriale. I più ricorrenti sono:

- Complessità di prodotto
- Complessità di processo
- Complessità di sistema manifatturiero

Il terzo livello include i primi due ed è anche correlato con la complessità delle forniture e in generale delle entità esterne che interagiscono con il sistema produttivo.

Al fine di connettere tutti e tre gli aspetti sopra citati la complessità tecnologica può essere definita come il livello tecnologico necessario per il progetto e la fabbricazione del prodotto industriale, considerandone caratteristiche e prestazioni.

I possibili indicatori di misura della complessità tecnologica possono essere ricondotti a 3 aree di analisi:

AREE DI COMPLESSITÀ TECNOLOGICA	INDICATORI
<i>SVILUPPO</i>	1) difficoltà scientifiche o tecnologiche nel lavoro di sviluppo 2) coordinamento della rete o interfaccia del sistema per l'implementazione dell'innovazione 3) capitale di investimento dell'innovazione 4) protezione brevettuale (strumenti legali)
<i>CONSEGNA</i>	5) standardizzazione prodotto/processo 6) distribuzione del prodotto
<i>MERCATO</i>	7) comprensione della domanda del cliente 8) esistenza di flusso di entrate concorrenti 9) attività di marketing relative all'innovazione 10) incertezze di mercato.

La complessità dell'innovazione determinata come somma dei fattori precedenti viene classificata in 5 livelli in base al punteggio totale calcolato come somma dei punteggi dei 10 fattori sopra citati in base alla tabella seguente.

	LIVELLO	RANGE DI PUNTEGGIO
1	Bassissima complessità	0-10
2	Bassa complessità	11-20
3	Media complessità	21-30
4	Alta complessità	31-40
5	Altissima complessità	41-50

Le complessità vengono quindi confrontate con il numero di mesi/anni necessari per portare il prodotto innovativo commercializzato nel mercato.

I risultati dell'indagine confermano che le innovazioni caratterizzate da un alto livello di complessità non richiedono necessariamente un tempo più lungo per raggiungere la commercializzazione delle innovazioni con un livello di complessità più basso.

1.4 MECCANISMI DI GENERAZIONE DELL'INNOVAZIONE TECNOLOGICA

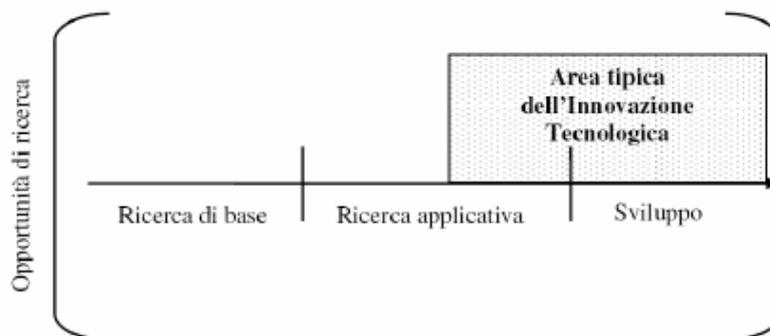
Per quanto riguarda la generazione e lo sviluppo dell'innovazione tecnologica si possono individuare diversi modelli più o meno presenti nelle imprese a seconda delle situazioni.

1.4.1 Modello pipeline

Il modello "*pipeline*" è il più semplice ed è stato il primo storicamente applicato. Esso rappresenta il processo innovativo come una successione di "scatole nere" delle diverse attività funzionali, collegate tra loro in serie (Merrifield, 1979). Il modello non tiene conto della necessità di realizzare una rete complessa di interazioni necessarie tra le singole attività.

Il ciclo innovativo è composto da tre fasi, ricerca di base, ricerca applicativa e sviluppo, e l'area tipica dell'innovazione tecnologica comprende parte della fase di ricerca applicativa e l'intera fase di sviluppo.

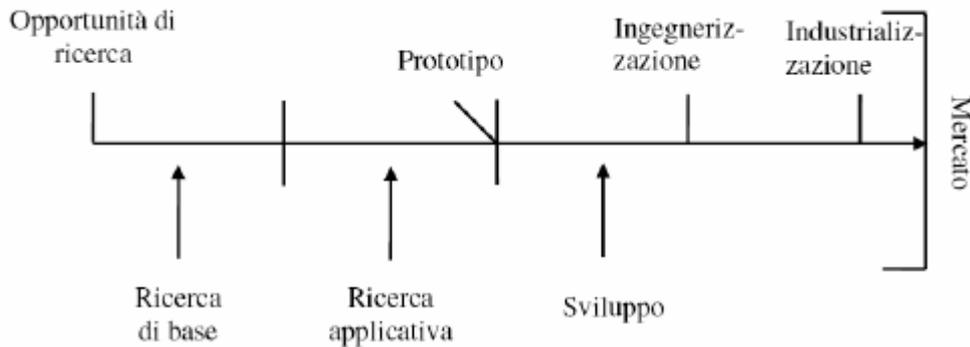
Figura 1.4.1.1 – Area tipica dell'innovazione tecnologica



La ricerca di base si occupa di approfondire le conoscenze rilevanti per i settori in cui è attualmente presente l'impresa, e di acquisire conoscenze fondamentali riferite ai suoi potenziali futuri settori industriali d'interesse (ricerca esplorativa). La ricerca di base ha precise valenze strategiche poiché mobilita le risorse al fine di migliorare la posizione competitiva dell'impresa, così come la ricerca esplorativa riferita al lungo periodo può essere orientata dalle scelte tecnologiche di carattere strategico effettuate dall'impresa oppure determinarle a sua volta.

Le fasi di ricerca applicativa e sviluppo comprendono la messa a punto del prototipo, la realizzazione dell'impianto pilota e la primissima produzione, l'ingegnerizzazione e la realizzazione degli impianti di produzione su scala industriale, lo sviluppo di piani di penetrazione del mercato e infine la messa a punto di eventuali miglioramenti del processo produttivo e/o del prodotto

Figura 1.4.1.2 – Il modello pipeline



Le informazioni tecnico-scientifiche che alimentano tale processo innovativo acquistano un carattere sempre più interdisciplinare con l'avvicinarsi allo scambio con il mercato dei prodotti o dei processi oggetto dell'attività di ricerca; un peso sempre maggiore assumono le informazioni di tipo tecnologico rispetto a quelle essenzialmente di carattere scientifico.

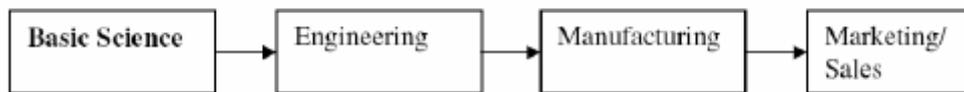
L'ampliamento dello spettro interdisciplinare deriva dall'aumento del numero di attori che entrano nel processo decisionale ed operativo durante lo sviluppo del processo innovativo.

Analogamente le informazioni economico-organizzative raggiungono un maggior grado di approfondimento e complessità con l'avvicinarsi allo scambio con il mercato, poiché lo sviluppo del progetto di ricerca comporta un livello crescente di impiego di risorse (investimenti in competenze, impianti, mezzi strumentali, servizi, ecc..) diretto a soddisfare le esigenze del mercato, al fine di raggiungere il successo commerciale ed economico oltre che tecnico. Anche il sistema di controllo si fa progressivamente più rigoroso con lo svolgersi del processo innovativo a causa della sua crescente complessità.

Descrivendo in altri termini questo stesso modello, concentrandosi cioè principalmente sulle diverse funzioni dell'impresa, è possibile distinguerne due tipologie, *Technology Push* e *Demand Pull*, a seconda di quale funzione svolge il ruolo di primo anello della sequenza di attività.

Nel modello *Technology Push* la scoperta scientifica precede e “spinge” l'innovazione tecnologica.

Figura 1.4.1.3 – *Il Modello pipeline Technology Push*



Nel modello Demand Pull assume invece un ruolo determinante il mercato con i bisogni dei consumatori, e quindi gli investimenti effettuati per l'innovazione sono subordinati a tali bisogni

Figura 1.4.1.4 – *Il Modello pipeline Demand Pull*

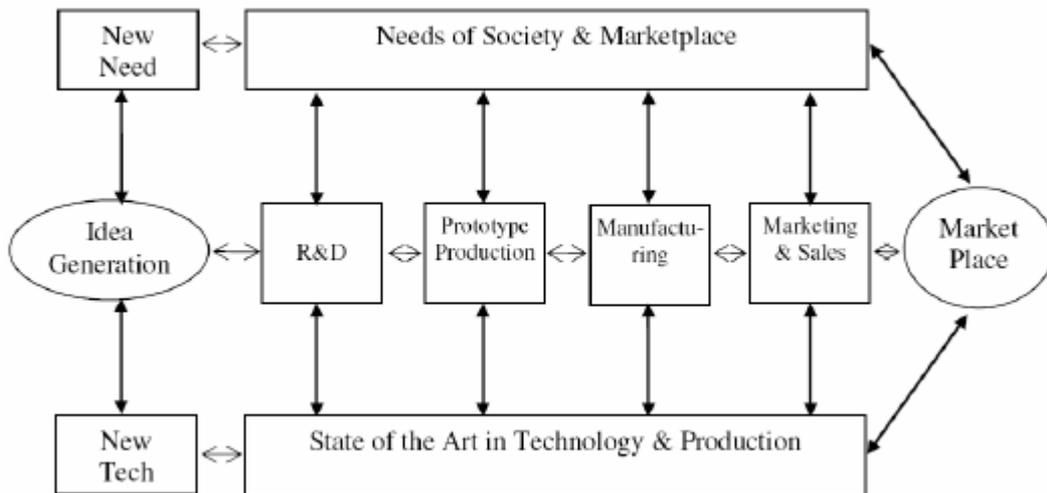


Le principali critiche mosse nei confronti di questi modelli sono legate alla loro natura lineare e sequenziale e all'eccessiva semplificazione del processo d'innovazione. Le attività poste in sequenza vengono viste come isolate le une dalle altre, non considerando né eventuali feed-back da uno stadio all'altro né l'interdipendenza tra gli stadi e le possibili sovrapposizioni temporali. Inoltre, trascurano le relazioni con l'ambiente esterno e sottostimano la natura caotica del processo d'innovazione soprattutto negli stadi iniziali in cui viene sviluppato e testato il nuovo concetto.

L'evoluzione di questi modelli è quello che viene chiamato “Interactive Model”, che, pur mantenendo la natura di base lineare, considera cicli di feedback

tra i diversi stadi ed una interazione tra gli aspetti scientifici e quelli relativi al mercato del processo d'innovazione.

Figura 1.4.1.5 – *Il modello interactive*



In questo modello la nuova idea, motore del processo d'innovazione, nasce dall'interazione tra i nuovi bisogni del mercato e le nuove tecnologie disponibili, congiungendo questi due aspetti. Il processo d'interazione può anche non essere continuo, ma si sviluppa in complessi percorsi di comunicazione e collegamenti intra e inter-organizzativi. La principale critica mossa a questo modello è che non prende sufficientemente in considerazione i fattori ambientali che possono entrare in gioco nel processo innovativo e l'integrazione esterna dell'impresa con altre imprese od istituzioni.

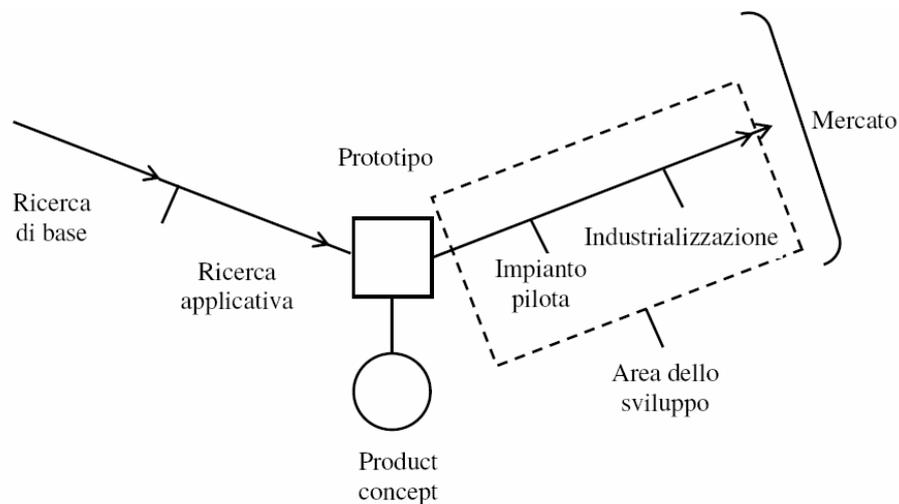
1.4.2 Modello del product concept

Questo modello identifica nella concezione di un nuovo prodotto lo *startup* ed allo stesso tempo il baricentro della attività innovativa, cioè è l'idea di un nuovo prodotto ad attivare lo sforzo di ricerca. Tale *product concept* concentra

le forze di ricerca verso la realizzazione di un prototipo che incorpori le conoscenze frutto della ricerca di base e i risultati delle sperimentazioni tipiche della ricerca applicativa.

La sequenza del processo innovativo, successivamente alle fasi di ricerca, prevede una prima sperimentazione produttiva che si realizza mediante la costruzione di eventuali impianti pilota; seguono le fasi di ingegnerizzazione, costruzione dell'impianto su scala industriale e immissione del prodotto sul mercato di riferimento.

Figura 1.4.2.1 – *Il modello del product concept*



Il *product concept* può essere definito come la descrizione della promessa fatta dal nuovo prodotto e

dalle sue caratteristiche fisiche e percettive per un gruppo particolare di utenti. Rappresenta l'elaborazione dell'idea di partenza in ottica del cliente mediante l'identificazione di quelle caratteristiche che sono direttamente sperimentabili dal cliente stesso.

Tale concetto di prodotto allo stesso tempo descrive il prodotto-mercato di riferimento all'interno del quale posizionare il nuovo prodotto e costituisce l'insieme di specifiche tecniche per la funzione di Ricerca&Sviluppo dell'impresa.

Infatti si possono identificare cinque dimensioni del *product concept*:

- ciò che fa (funzioni e caratteristiche sperimentabili),
- ciò che è (aspetto e livello d'innovazione),
- a chi è destinato (segmenti di clienti),
- ciò che significa per i clienti,
- come si posiziona rispetto ai prodotti concorrenti.

1.4.3 Circuito clienti-fornitori

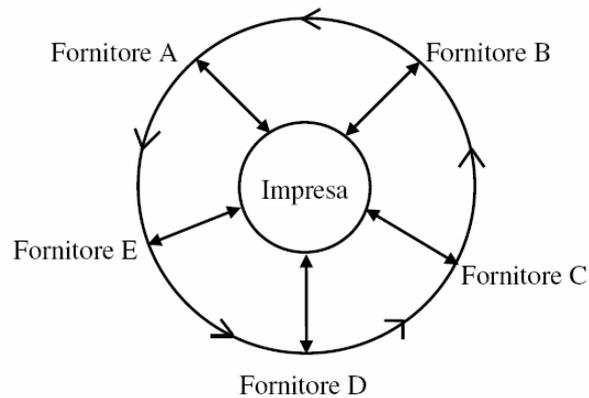
Tale modello enfatizza la relazione tra l'impresa ed i propri fornitori come motore di spinta del processo innovativo, cioè considera l'innovazione come il frutto di uno scambio di conoscenze tra fornitori ed impresa. Infatti in molti casi se il fornitore non è innovativo, se non si può collaborare per l'innovazione cercando nuove opportunità di business, l'azienda che punta sull'innovazione per ottenere un vantaggio competitivo rispetto ai concorrenti risulterà sconfitta.

Il rapporto cliente-fornitore diviene dunque uno dei principali protagonisti del business odierno.

L'impresa, all'interno del circuito clienti-fornitori, diventa il centro di propulsione e di diffusione dell'innovazione tecnologica, ed allo stesso tempo anche i fornitori possono produrre innovazioni a vantaggio dell'impresa; il fornitore vive del business del cliente ed il cliente vive delle capacità del fornitore di consentirgli lo svolgimento di tale business.

In particolare le funzioni che all'interno dell'impresa partecipano al processo innovativo (R&S, Engineering, Marketing e Produzione) si interfacciano con un processo interattivo ai soggetti esterni che possono essere vettori di innovazioni significative; lo stesso processo si svolge tra gli stessi soggetti esterni.

Figura 1.4.3.1 – *Circuito clienti-fornitori*



Questi scambi generano un cumulo di conoscenze e esperienze in tutti i partecipanti che può raggiungere la soglia critica del “*break-thru*” innovativo (innovazioni radicali).

Una importante considerazione da fare è che spesso la maggior parte dei componenti di un progetto dell’azienda cliente si basa e contiene le tecnologie dei fornitori; quando un progettista disegna un prodotto, arriva a predefinire anche le tecnologie che dovrà utilizzare il fornitore, richiedendogli di fatto un componente già definito. Tuttavia, poiché i progettisti non possono conoscere tutte le tecnologie dei fornitori, risulta conveniente il loro coinvolgimento in fase di progettazione per ottenere un vantaggio competitivo.

Se il fornitore eccelle nel suo settore specifico per conoscenze e capacità innovativa, egli integra in modo determinante le conoscenze e le capacità del cliente e sviluppa innovazioni finalizzate alle sue specifiche esigenze in modo sinergico. In questo modo si supera il mero rapporto di fornitura instaurando uno stretto rapporto di cooperazione.

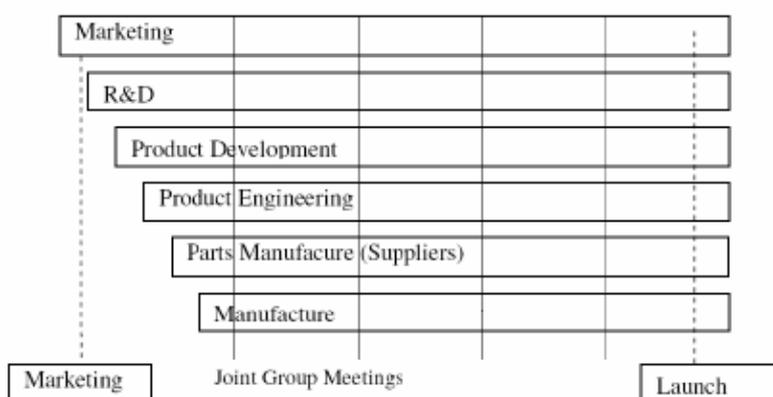
Il coinvolgimento dei fornitori allo sviluppo dei nuovi prodotti può avere vari livelli di integrazione fino ad arrivare al massimo livello denominato *codesign*; un fornitore è definito *co-designer* quando sviluppa in maniera autonoma e con piena responsabilità un prodotto, servizio o sottoinsieme sulla base delle prescrizioni funzionali e nel rispetto degli obiettivi di qualità, tempi e costi forniti dal cliente, nell’ottica della soddisfazione del cliente finale.

1.4.4 Processo a rete

Nell'ambito di ambienti complessi e altamente dinamici, il processo d'innovazione richiede un rivoluzionario ripensamento progettuale. L'impresa diviene un semplice "nodo" di una complessa rete di imprese (*network*) volte ad alimentare l'innovazione. Tale rete, composta da partner, clienti, fornitori, centri di ricerca, Università e, a volte, anche da concorrenti, è la modalità organizzativa più efficace per presidiare le molteplici competenze e conoscenze necessarie allo sviluppo di un nuovo prodotto/processo in contesti dinamici e complessi. Raramente, infatti, un'impresa può da sola farsi carico della complessità (tecnologica, competitiva e di mercato) presente nell'ambiente.

Tale modello può essere identificato come “*Integrated Model*”; a differenza dei precedenti modelli lineari, esso prevede sovrapposizioni funzionali significative tra i diversi dipartimenti dell'impresa coinvolti nel processo d'innovazione, evidenziando la necessità d'integrazione interfunzionale interna all'impresa, ma anche un'integrazione esterna.

Figura 1.4.4.1 – *Integrated Model*

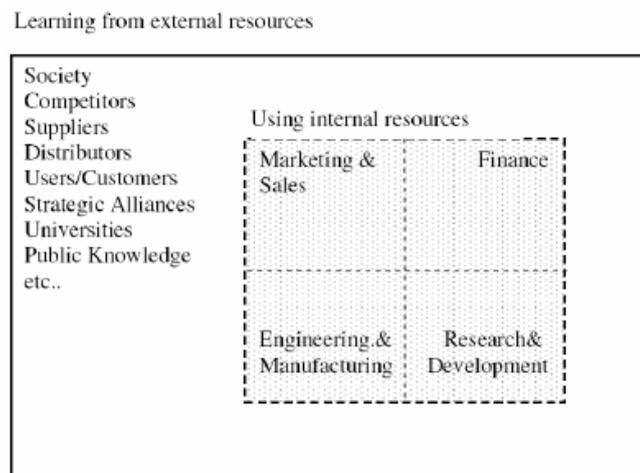


Quindi le imprese possono fare ricorso a una rete sia interna sia esterna. Quella interna si riconduce a un intreccio di contatti riguardanti i principali ruoli coinvolti nell'innovazione (tra cui quelli più critici appartengono alle funzioni Marketing, Produzione e R&D). Quella esterna alimenta invece tali intrecci grazie all'apporto essenziale degli interlocutori esterni all'impresa.

Un'estensione di questo modello è rappresentata da quello denominato “*Systems Integration and Networking Model*”, il quale enfatizza le relazioni

verticali dell'impresa con fornitori e consumatori ed anche le collaborazioni con i concorrenti. Questo modello si basa sull'utilizzo di strumenti elettronici che operano in *real time*, in grado di automatizzare il processo d'innovazione incrementando la velocità e l'efficienza dello sviluppo di un nuovo prodotto attraverso l'intera rete. In questo modo si ottiene anche una consistente riduzione dei costi e la possibilità di diventare i leader del mercato.

Figura 1.4.4.2 – *Systems integration and networking model*



La motivazi li entrare a far parte di una rete finanziata allo sviluppo dell'innovazione e la mancanza delle risorse e delle competenze necessarie allo svolgimento efficace ed efficiente di tali attività da parte delle singole imprese. Il bisogno dello sviluppo rapido di nuovi prodotti, infatti, spesso preclude lo sviluppo interno di tecnologie critiche, rendendo più attraente e vantaggiosa l'acquisizione di tecnologia all'esterno, stipulando alleanze.

Una rete basata sulla ricerca e sull'innovazione mira a favorire lo scambio di informazioni e ad attivare meccanismi indirizzati a facilitare l'incontro della domanda e dell'offerta di tecnologia sfruttando proprio la struttura del network. La logica della rete, infatti, mira a sostenere il trasferimento tecnologico anche a beneficio delle imprese di più piccola dimensione permettendo di superare difficoltà di ordine organizzativo, gestionale e soprattutto limitando i costi che le imprese dovrebbero sostenere e che rappresentano spesso la causa principale della carenza di innovazione.

Inoltre la rete stimola un processo circolare in cui avanzamento della ricerca scientifica e stimoli di mercato interagiscono nella definizione di nuove soluzioni tecnologiche vendibili. Lo scopo ultimo diventa quindi l'avvio di un processo dinamico di apprendimento che coinvolge le imprese e i centri di ricerca.

Diventa quindi sempre più importante creare luoghi fisici o virtuali in cui il mondo della ricerca da un lato e quello dell'impresa dall'altro possono sviluppare una progettualità comune, focalizzata sui temi di ricerca specifici ad alto potenziale di applicazione industriale e di impatto economico. Un ruolo fondamentale per stimolare l'attività di ricerca ed innovazione delle imprese viene svolto da quelle strutture che sono impegnate nella fornitura di servizi per il trasferimento tecnologico: infrastrutture di trasferimento tecnologico, centri per l'innovazione e parchi tecnologici. Si tratta di strutture in grado di assistere le imprese nella identificazione dei fabbisogni di innovazione, di definire i progetti, di trovare le competenze adeguate e le risorse finanziarie.

La creazione di "grappoli" di eccellenza, quando si trovano riuniti fattori quali le infrastrutture, la disponibilità di competenze ed esperienza, la vicinanza di centri tecnologici e di ricerca e l'esistenza di imprese con un potenziale di innovazione, è di fondamentale importanza per favorire l'innovazione. Quando queste condizioni esistono, è importante stimolare le capacità innovative, per sviluppare la competitività.

La convinzione fondamentale su cui tale modello a rete si basa è che, solo attraverso una struttura interconnessa tra attori eterogenei e che preveda la condivisione di competenze e risorse critiche, sia possibile sviluppare un'eccellenza di rete che abbia un valore aggiuntivo rispetto alla somma delle singole parti.

1.5 LA TECNOLOGIA TRA DIFFUSIONE E ISTITUZIONALIZZAZIONE

In un saggio di circa dieci anni fa, H. Berglund (2004) metteva in rilievo l'ambiguità assunta nel corso degli ultimi decenni dal concetto di innovazione. Esso, in effetti, si presta a molteplici definizioni e, nell'uso corrente, viene spesso utilizzato come sinonimo di concetti quali quello di mutamento e novità o al posto di espressioni come quelle di "adozione di nuove conoscenze" o di "uso di nuove tecnologie".

Uno dei principali fattori di ambiguità è rappresentato dal fatto che la nozione di innovazione è utilizzata, per indicare sia l'invenzione o l'applicazione di qualcosa di nuovo (conoscenze, procedure, tecnologie, ecc.) che prima non esisteva, sia la diffusione all'interno della società di qualcosa che già esiste. Quando, pertanto, si parla di imprese innovative, non si può comprendere, a meno di avere ulteriori informazioni, se si sta parlando di imprese che stanno elaborando nuovi prodotti, nuovi processi o nuove conoscenze (e quindi che fanno ricerca) o di imprese che non creano nulla di veramente nuovo, ma che sono attente ad assumere idee, tecnologie o conoscenze da altre imprese, da laboratori di ricerca o da altre fonti. Si tratta, probabilmente, di un'ambiguità non risolvibile, soprattutto perché è molto difficile distinguere tra loro l'invenzione e la diffusione, essendo i due momenti tra loro strettamente collegati, a tal punto che, quasi sempre, ogni forma di assunzione di qualcosa che viene dall'esterno richiede una forma di adattamento creativo.

Sebbene gli studi accademici abbiano classificato varie tipologie di innovazione, gli aspetti maggiormente menzionati nella definizione del fenomeno sono due: la caratteristica di novità dell'idea, e l'applicazione che essa trova in campo economico- sociale. Un'invenzione o un'idea creativa non si traduce, infatti, in innovazione fino a che non viene utilizzata per soddisfare una necessità concreta. L'applicazione suppone un concreto processo di cambiamento, dal momento che l'obiettivo principale è quello di tradurre il miglioramento prodotto dall'inventore (individuo o impresa) in un miglioramento globale per la società. Perché ciò avvenga è essenziale che l'innovazione si diffonda.

È possibile distinguere tre momenti fondamentali all'interno del processo innovativo:

1. l'invenzione, ovvero il momento in cui si manifesta un'idea potenzialmente generatrice di benefici, non necessariamente realizzata in forma concreta di prodotto, processo o servizio;
2. l'innovazione, che consiste nell'applicazione commerciale della suddetta idea. Innovare significa trasformare idee in prodotti, processi e servizi nuovi o migliorati, che abbiano un valore per il mercato. Si tratta di trarre dall'idea un beneficio economico, che incrementi la capacità dell'impresa di creare ricchezza e che abbia, inoltre, forti implicazioni sociali;
3. la diffusione, ovvero la fase in cui si mette a conoscenza della società l'utilità di un'innovazione. Questo è il momento in cui chi commercializza l'idea, sotto forma di bene economico, riceve un beneficio.

Figura 1.5.1 – *I momenti del processo innovativo*



Lo sviluppo economico di un'azienda dipende dalle capacità di realizzare queste tre fasi, pur essendo variabile l'importanza relativa di ogni fase in funzione del tipo di organizzazione. Inoltre, le risorse e le abilità richieste per la realizzazione di queste tre fasi è rappresenta un'ulteriore criticità.

Gestire l'innovazione significa, infatti, organizzare e dirigere le risorse umane ed economiche al fine di stimolare la creazione di nuova conoscenza, la generazione di idee che permettano di ottenere nuovi prodotti, processi e servizi o che consentano di migliorare quelle esistenti. Significa guidare il trasferimento di queste stesse idee alle fasi di produzione, distribuzione ed uso.

Attraverso la gestione dei processi innovativi, si può agire sugli elementi sopracitati e puntare agli obiettivi preposti dall'organizzazione nel proprio percorso di cambiamento tecnologico.

Il problema a cui si vuole dare una soluzione per mezzo della gestione dell'innovazione è chiaro: con il fine di mantenere e migliorare la posizione nel

mercato, l'impresa mira a variare, a seconda delle variabili esterne, la propria offerta e il modo in cui essa viene creata e somministrata. Per riuscire a fare ciò, l'impresa deve ciclicamente:

- vigilare l'ambiente esterno nella ricerca di segnali sulla necessità di innovare e su potenziali opportunità. L'obiettivo è quello di preparare l'organizzazione ad affrontare cambiamenti che possano influenzare il futuro prossimo e conseguire così l'adattamento all'ambiente; localizzare l'attenzione e gli sforzi su una strategia concreta per il miglioramento del business o per trovare una soluzione specifica ad un problema. Anche le organizzazioni dotate di maggiori risorse non possono decidere di accogliere tutte le opportunità di innovazione che oltre l'ambiente, ma devono selezionare quelle che, in maggior misura, possono contribuire al mantenimento e al miglioramento della competitività nel mercato;
- attuare la strategia scelta, dedicando le risorse necessarie per metterla in pratica. Ciò può implicare l'acquisto di una tecnologia, lo sfruttamento dei risultati di una ricerca esistente o la realizzazione di una nuova ricerca per trovare risultati adeguati;
- implementare l'innovazione, partendo dall'idea e seguendo le distinte fasi del suo sviluppo, fino al lancio nel mercato come nuovo prodotto o processo;
- apprendere dall'esperienza. Ciò significa riflettere su elementi del passato e revisionare esperienze di successo e di fallimento. In questo senso è necessario disporre di un sistema di valutazione che alimenti e assicuri il miglioramento continuo nel processo di cambiamento tecnologico.

Nondimeno, accanto o, meglio, all'interno degli studi sull'innovazione, si è sviluppato un ampio filone di studi che concentra l'attenzione sui fattori che entrano in gioco nel determinare modalità, ritmi, barriere e ostacoli connessi con l'acquisizione delle nuove soluzioni tra gli imprenditori, le istituzioni o anche i semplici consumatori.

Il tema della circolazione delle tecnologie è piuttosto articolato, in quanto è stato oggetto di analisi da parte di varie tradizioni di ricerca, sia teoriche sia empiriche, che hanno reso l'argomento complesso, arrivando a diverse

conclusioni non sempre tra loro congruenti. Per ovviare a questo problema si farà riferimento ai risultati ormai ampiamente condivisi o considerati come punti di partenza imprescindibili, così da dare all'argomento la maggiore consistenza possibile.

La circolazione delle tecnologie è un processo socio-economico che porta con sé una serie di variabili da non considerare in maniera isolata, ma come reciprocamente interagenti. Per cercare di elaborare un quadro generale nel quale collocare il seguente *excursus* si ricorrerà ad una prima distinzione, tipicamente sociologica, fra una dimensione relativa alla *diffusione delle tecnologie* ed una inerente all'*istituzionalizzazione delle tecnologie*. La prima descrive le dinamiche attraverso cui una tecnologia si diffonde all'interno del tessuto sociale e consente di tematizzare il modo con cui le tecnologie diventano strumenti alla portata della maggior parte degli utilizzatori (*users*). Quello dell'istituzionalizzazione, invece, è un processo che si occupa di descrivere le strategie mediante le quali la tecnologia entra a far parte della vita delle persone, dando origine a una serie di conseguenze sociali che possono essere comprese solo considerando i processi di riorganizzazione simbolica che le riguardano.

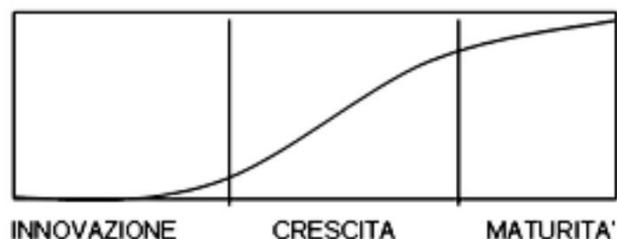
1.5.1 Il diffusionismo della tecnologia

La prospettiva di ricerca denominata in questo modo si occupa di studiare le modalità con cui una tecnologia comincia a diffondersi all'interno di uno specifico contesto sociale, ed è storicamente la prima impostazione che tenta di elaborare un quadro nel quale collocare le forme che consentono a una tecnologia di penetrare nella società.

Già il sociologo francese Gabriel Tarde nel 1903 osservò che la diffusione di un'innovazione (tecnologica, ma non solo) all'interno della società dipendeva da un processo sociale basato sull'imitazione e poteva essere descritta da una curva a forma di S (detta *sigmoide*), in grado di identificare tre momenti distinti dello sviluppo di una tecnologia:

- I. innovazione,
- II. crescita,
- III. maturità.

Figura 1.5.1.1 – *La rappresentazione della diffusione dell'innovazione*



Nella prima fase, la nuova soluzione incontra molti ostacoli a diffondersi; nella fase di crescita, tuttavia, essa tende a diffondersi rapidamente, fino a quando non diviene la soluzione standard. A quel punto, si avvia la fase di maturità; il mercato si satura e i ritmi di diffusione si rallentano.

Queste istanze sarebbero state oggetto di studio sistematico soltanto tra il 1940 e il 1970, dando vita a una letteratura scientifica piuttosto articolata – anche se frammentaria –, ma sistematizzata in una struttura teorica solo successivamente.

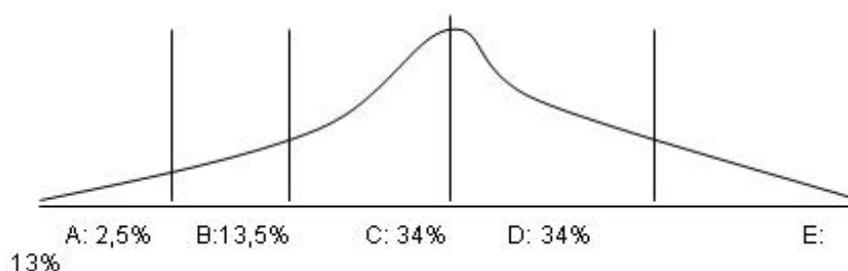
In particolare, gli studi empirici, realizzati negli anni '40 da B. Ryan e N. Gross (1943) sulla diffusione delle sementi ibride nell'Iowa confermarono le tesi di Tarde. Secondo gli autori, la diffusione dell'innovazione si configura come un processo sociale, in cui entrano in gioco le valutazioni soggettive degli imprenditori. Ryan e Gross identificarono cinque categorie di soggetti in base al loro atteggiamento rispetto all'innovazione, vale a dire:

- gli innovatori (*innovators*), caratterizzati dalla voglia di assumersi dei rischi, hanno familiarità con fonti di informazione scientifica e sono in grado di interagire con altri innovatori (tutte proprietà che rivelano una forte attitudine a essere opinion leaders);
- gli anticipatori (*early adopters*), che utilizzano la nuova tecnologia nella fase iniziale della commercializzazione, denotano contatti intensi con agenti del cambiamento e sono opinion leaders assai forti in contesti anche molto diversi;

- la maggioranza iniziale (*early majority*) il gruppo di *user* che considera un'innovazione interessante soltanto dopo che altri omologhi l'hanno adottata per via di contatti consistenti con agenti del cambiamento e con gli anticipatori
- la maggioranza tardiva (*late majority*), gruppo di *user* più resistente al cambiamento
- i ritardatari (*laggards*), gruppo di *user* tradizionalisti e fortemente ancorati al passato.

All'inizio degli anni '60, E. Rogers (1962) riprese la tipologia di Ryan e Gross, cercando di identificare, per ognuno dei tipi, le caratteristiche distintive. Egli mostrò empiricamente, tra l'altro, come gli *early adopters* e coloro che appartenevano alla maggioranza anticipatrice fossero maggiormente inseriti nei meccanismi di comunicazione locale ed avessero una più elevata capacità di assumere un ruolo di *opinion leaders*. Questo spinse Rogers a identificare il **processo di diffusione come essenzialmente di natura comunicativa**, in cui entrano in gioco caratteristiche e orientamenti personali. Più che una curva a S, Rogers propose una curva normale "a campana".

Figura 1.5.1.2 – *La curva di diffusione delle innovazioni*



Secondo Rogers:

- il gruppo A è quello degli innovatori, caratterizzati da alto livello di istruzione, orientamento al rischio, controllo su fonti finanziarie,

abilità specifiche nella comprensione e nella applicazione delle conoscenze tecniche ed esposti a più fonti di informazione;

- il gruppo B include gli anticipatori (early adopters), dotati di alti livelli di istruzione, elevata reputazione nella comunità, capacità di svolgere una funzione di leadership sociale e con esperienze di successo alle spalle;
- il gruppo C include la maggioranza anticipatrice (early majority), caratterizzata da soggetti che hanno una forte interazione con i pari; spesso ricoprono posizioni di leadership e hanno una tendenza a seguire un processo deliberativo prima di adottare una nuova idea;
- il gruppo D include la maggioranza ritardataria (late majority), comprendente soggetti normalmente scettici, tradizionalisti, con uno status economico basso, prudenti e che patiscono molto la “pressione” sociale esercitata dai pari;
- il gruppo E, infine, include i ritardatari (laggards) ed è composto da individui normalmente isolati, sospettosi, con relazioni sociali ridotte (solo vicini o parenti), con un processo di decision making lento e dotati di risorse limitate.

L’idea centrale del modello di Rogers, che sviluppato negli anni Sessanta è stato poi rielaborato in maniera compiuta soltanto all’inizio del 21° sec. (Rogers 2003)⁵. è una concezione di tipo sociologico secondo cui il processo che rende la società permeabile a una tecnologia si fonda su due momenti chiave: adozione e diffusione.

L’**adozione di un’innovazione** (tecnologica) riguarda le strategie decisionali che portano un dato soggetto (l’impresa ovvero il consumatore) a fare propria una particolare tecnologia. Queste dinamiche si basano su un processo a cinque fasi così organizzato:

- I. la fase di consapevolezza (*awareness*), in cui il soggetto interessato all’utilizzazione della tecnologia (*user*) è esposto all’innovazione e

⁵ E.M. Rogers, *Diffusion of innovations*, New York 2003

senza detenere specifiche informazioni in proposito prende atto dell'innovazione;

- II. la fase di interesse (*interest*), in cui l'*user* dispone di prime informazioni, si appassiona all'idea e cerca informazioni aggiuntive su di essa;
- III. la fase di valutazione (*evaluation*), in cui l'*user* applica mentalmente l'innovazione in uno scenario d'uso per spiegarne le opportunità e si prefigura la situazione futura;
- IV. la fase di prova (*trial*) in cui l'individuo sperimenta l'innovazione al fine di comprendere completamente le opportunità;
- V. la fase dell'adozione vera e propria (*adoption*), nella quale l'*user* diventa pienamente consapevole dei benefici apportati dalla tecnologia e in base a ciò decide di continuarne l'uso.

Ognuna di queste fasi attiva un parallelo processo decisionale, articolato nei seguenti passaggi:

- conoscenza;
- persuasione;
- decisione;
- implementazione;
- conferma.⁶

⁶ Ovviamente, in ogni fase del processo, l'innovazione può essere rifiutata. Il rifiuto può essere, secondo Rogers, attivo o passivo. Il **rifiuto attivo** (*active rejection*) si verifica quando il potenziale adopter prende in considerazione la possibilità di assumere l'innovazione, mentre il **rifiuto passivo** (*passive rejection*) si ha quando il rigetto avviene negli stadi iniziali del processo decisionale e quindi prima che il soggetto prenda effettivamente in considerazione la possibilità di adottare l'innovazione. Il rifiuto non va confuso con l'atto di interrompere il ricorso all'innovazione dopo la sua adozione, denominato da Rogers "**discontinuance**". La *discontinuance* può avvenire, secondo l'autore, o a causa dei risultati non soddisfacenti dell'innovazione (*disenchantment discontinuance*) o perché si adotta un'innovazione migliore (*replacement discontinuance*).

Se l'adozione è il momento più genuinamente individuale, la **diffusione di un'innovazione** è quello profondamente sociale. Secondo Rogers (1985), l'innovazione, perché abbia successo, deve presentare cinque caratteristiche "critiche".

- *Relative advantage*. L'innovazione deve essere percepita come migliore rispetto alle soluzioni già disponibili. Il grado di "vantaggio relativo" può essere misurato in termini economici, ma altre componenti entrano in gioco, quali i fattori di prestigio locale, la convenienza o la soddisfazione personale.
- *Compatibility*. L'innovazione deve essere percepita come coerente rispetto ai valori esistenti, all'esperienza precedente e ai bisogni di chi la deve adottare.
- *Complexity*. Si tratta qui del grado in cui un'innovazione è percepita come difficile da comprendere e da utilizzare. Alcune innovazioni sono facili da capire e si diffondono più rapidamente di quelle più complesse.
- *Triability*. L'innovazione deve avere caratteristiche tali da poter essere sperimentata su basi limitate. Innovazioni "non divisibili" (che devono cioè essere assunte nel loro complesso, senza poter essere testate) si diffondono con minore velocità.
- *Observability*. L'innovazione che produce risultati visibili ha maggiori possibilità di diffusione.

La teoria della diffusione delle innovazioni è stata criticata da molti punti di vista. Alcuni la considerano uno strumento eccessivamente generico che non rende giustizia della specificità dell'innovazione tecnologica. Altri ancora hanno posto l'accento sul fatto che questa teoria è sì in grado di spiegare il successo delle tecnologie, ma spesso non riesce a dar conto del fallimento di alcune innovazioni.

Le critiche cui la teoria della diffusione delle innovazioni è stata sottoposta hanno spesso centrato uno degli elementi al quale si deve il successo del modello, ma anche i suoi limiti. È la dimensione macro-sociale su cui si colloca che, pur essendo in grado di spiegare le forme attraverso cui le innovazioni tecnologiche penetrano nella società, non riesce a cogliere alcune caratteristiche relative al significato culturale tramite il quale una tecnologia viene collocata nel contesto

sociale e che spesso ne determina il successo. Qualsiasi tecnologia riesce a integrarsi nel tessuto sociale grazie anche ai significati (latenti o manifesti) che porta con sé: non è, quindi, solo una questione meccanica che può essere spiegata dalla metafora del contagio a cui il diffusionismo ricorre. L'aspetto simbolico della tecnologia è molto importante, poiché è il solo veicolo in grado di farla diventare parte integrante della vita delle persone, esprimendo valori congruenti con una precisa dimensione culturale, socialmente e storicamente determinata⁷.

1.5.2 Il modellamento sociale della tecnologia

Altre teorie si sono cimentate con l'onere di spiegare la componente simbolico-culturale dell'adozione della tecnologia, mostrando come non sia la tecnologia a penetrare nella società o la società a rendere necessaria una specifica tecnologia (come vorrebbero le interpretazioni deterministe). In realtà, tecnologia e società cooperano dando vita non solo a un artefatto tecnologico, ma anche a una serie di fattori culturali nell'ambito dei quali contestualizzare l'oggetto tecnico. Una delle impostazioni più promettenti in questo senso è la teoria del modellamento sociale della tecnologia (*The social shaping of technology*, 19992). Anziché una teoria, tale impostazione potrebbe essere più correttamente considerata un approccio, in quanto non costituisce un modo univoco di affrontare lo studio del rapporto fra tecnologia e società, ma un punto di vista condiviso che può essere reso con due metafore. La prima è quella della *scatola nera* (*black box*), una metafora piuttosto celebre nel campo degli studi sociali della scienza. Secondo questa impostazione, le scienze sociali non possono studiare le teorie scientifiche e gli artefatti tecnologici come dati e limitarsi a identificare le conseguenze del loro impatto, bensì devono rivelare le

⁷ Si prenda, per es., il caso della telefonia mobile: la curva a campana riesce a rendere conto dei modi e dei tempi attraverso cui il telefonino è entrato a far parte integrante della vita quotidiana di un numero sempre più grande di persone, ma se non si comprendesse la condizione culturale della contemporaneità, fondata su concetti come deterritorializzazione, spostamento continuo, necessità di un costante contatto con i propri gruppi sociali di riferimento, sarebbe impossibile comprendere i motivi che hanno spinto gli *innovators* ad adottare la tecnologia del telefono cellulare.

dinamiche tecno-scientifiche, politiche, economiche e sociali che hanno reso possibile la loro accettazione. La seconda metafora è quella del *giardino dei sentieri che si biforcano*, seguendo il titolo di uno dei più famosi racconti di Jorge Luis Borges (*El jardín de senderos que se bifurcan*, 1941). Secondo tale metafora, una tecnologia prende posto all'interno della società a causa di una serie di scelte, alcune consapevoli altre meno, e delle conseguenze che esse hanno sull'organizzazione sociale. Le analisi che si riconoscono in questo approccio sono in grado di rendere conto dei processi di istituzionalizzazione meglio di altre prospettive.

Esistono molti percorsi strutturati all'interno del modellamento sociale della tecnologia che esprimono il significato culturale delle più diverse tecnologie, ma ai fini del presente saggio si esaminerà un'impostazione particolare conosciuta con il nome di *teoria dell'addomesticamento* (*domestication theory*; Silverstone, Hirsch, Morley 1992). Tale teoria ritiene che la tecnologia, per poter essere incorporata nella vita quotidiana, è sottoposta a un processo piuttosto articolato definito *addomesticamento* che prevede le seguenti fasi:

- I. *l'appropriazione (appropriation)*, ovvero il momento in cui l'artefatto lascia il mondo generalizzato e viene acquistato da un user entrando a far parte della propria sfera di azione;
- II. *l'oggettificazione (objectification)*, fase che consiste nell'esposizione dell'artefatto e nella sua valorizzazione da parte dell'user in funzione di una serie di negoziazioni che coinvolgono il tipo di tecnologia, il suo utilizzo previsto, il tipo di valore a cui fa riferimento, l'organizzazione che impone e così via;
- III. *l'incorporazione (incorporation)*, fase che definisce i modi con cui le tecnologie vengono usate, gestite in termini di accesso o di utilizzazione⁸.

⁸ Se l'oggettificazione è una fase relativa alla dimensione spaziale, l'incorporazione è una fase inerente alla dimensione temporale, non solo perché necessita che venga stabilito un momento nella giornata in cui usare la tecnologia, ma anche perché spesso l'uso della tecnologia stessa diventa uno strumento per sincronizzare la routine quotidiana. L'incorporazione, poi, consente anche di evidenziare determinate dinamiche relazionali all'interno dello spazio domestico e la relativa divisione culturale delle aree della casa. Si pensi, per es., a come gli

- IV. la *conversione (conversion)* ovvero il momento conclusivo del processo di addomesticamento della tecnologia e serve per stabilire le particolari posizioni di *status* (competitivo/sociale) che l' user detiene.

1.5.3 I modelli matematici di diffusione dell'innovazione

Un limite delle teorie sociologiche è che esse, basandosi sull'analisi dei fattori che influenzano l'adozione di una singola innovazione da parte di singoli individui, hanno **scarso valore predittivo**. Peraltro lo stesso Rogers metteva in rilievo come i ritmi di diffusione siano estremamente variabili e difficilmente prevedibili. Per superare questo limite, F. Bass (1969) ha elaborato un modello (oggi ampiamente adottato nelle previsioni di mercato), denominato, appunto, *Bass Diffusion Model*, che riprende parte delle tesi di Rogers, identificando tre fattori:

- le **potenzialità del mercato**, vale a dire il numero totale di persone che possono adottare l'innovazione;
- il **coefficiente di influenza esterna** (o di innovazione), vale a dire la probabilità che qualcuno che ancora non sta adottando l'innovazione inizi a farlo sotto l'influenza dei mass media o di altri fattori esterni;
- il **coefficiente di influenza interna** (o di imitazione), vale a dire la probabilità che qualcuno che ancora non sta adottando l'innovazione inizi a farlo sulla base del passa-parola o di altre forme di influenza diretta da parte di chi sta già utilizzando il prodotto.

Il modello presuppone che, in un primo momento, la diffusione avvenga lentamente, per l'azione degli agenti di cambiamento. A un certo punto, si avvia un *take-off*, una accelerazione nella diffusione, che si attiva dopo il raggiungimento di una massa critica di adozioni (tra il 5 e il 15% del mercato potenziale). Secondo D. Allen (1988), l'importanza del costituirsi di una massa critica deriva dal fatto che i potenziali adopters percepiscono un'utilità

adolescenti usano lo stereo a tutto volume per creare un vero e proprio muro di suono fra loro e i genitori.

nell'adozione dell'innovazione in misura maggiore se vedono anche crescere il numero di coloro che l'hanno già adottata.

Facendo muovere queste tre variabili, il modello consente di “prevedere” la forma della curva di diffusione. Ad esempio, nel caso in cui il grado di imitazione sia maggiore del grado di innovazione, la curva di diffusione assume la forma a S mentre nel caso inverso quello di una J rovesciata. Il modello è stato adottato per la previsione dei tassi e dei tempi di diffusione di molti prodotti, tra cui i telefoni cellulari o le innovazioni non commerciali.

A partire dagli studi di Bass (o parallelamente ad essi) sono stati sviluppati, a partire dagli anni '80, numerosi **modelli matematici**.

Secondo V. Mahajan e R. Peterson (1985), tali modelli, in linea generale, si possono dividere in tre famiglie:

- quelli che identificano nell'**influenza interna** (l'interazione personale) il fattore prioritario;
- quelli che identificano nell'**influenza esterna** (i media) il fattore prioritario;
- i modelli misti.

I modelli prevalenti sono quelli del primo tipo, che cioè che rilevano come le informazioni più efficaci e rilevanti siano quelle fornite da chi ha già adottato l'innovazione nell'ambito di relazioni interpersonali. Si parla, in proposito, di “**modelli epidemici**”, vale a dire quelli che presuppongono una diffusione “per contagio”.

Il principale assunto di questi modelli è che le innovazioni sono sempre migliori delle soluzioni già praticate, per cui la lentezza della loro diffusione o la presenza di modalità sbilanciate o incoerenti di diffusione dipende essenzialmente dalla mancanza o dalla ineguale distribuzione di informazioni all'interno del sistema sociale.

L. Rosenkopf e E. Abrahamson (1999), muovendosi in avanti lungo la tesi del contagio, hanno elaborato un modello fondato sul concetto di “bandwagon” (letteralmente “carro della banda”, ma anche “trend popolare”, da cui l'espressione “to jump on the bandwagon”, cioè salire sul carro del vincitore, adottando le sue tesi).

La teoria del *bandwagon* — che assume la forma di modello matematico a carattere predittivo — tende ad opporsi alle tesi della teoria della scelta efficiente. Secondo quest'ultima, una organizzazione adotta una innovazione sulla base di una valutazione in merito alla sua validità, utilizzando le informazioni di cui dispone (complete o incomplete che siano). Secondo gli autori, tuttavia, ogni atto decisionale avviene in un contesto di **ambiguità** in merito all'informazione sull'innovazione. Per “ambiguità”, si può fare riferimento a tre condizioni possibili:

- **ambiguità di stato** (*state ambiguity*), cioè incertezza in merito al futuro stato dell'ambiente in cui l'organizzazione opera;
- **ambiguità degli effetti** (*effects ambiguity*), vale a dire incertezza in merito agli effetti che il futuro stato dell'ambiente produrrà sull'organizzazione;
- **ambiguità di risposta** (*response ambiguity*), ovvero incertezza in merito alla validità delle risposte date dall'organizzazione rispetto allo stato futuro dell'ambiente.

Nelle condizioni di ambiguità, si attivano allora altri criteri di valutazione, denominati *fad-theories*, **teorie di moda**, che non fanno leva sui contenuti dell'innovazione, bensì sulla lettura dei segnali sociali relativi al comportamento degli altri attori.

Ad esempio, se attori di alta reputazione adottano l'innovazione, il numero degli *adopters* aumenta e si crea una pressione sociale perché l'innovazione si diffonda. La *bandwagon pressure*, in tal modo, assume il carattere di **pressione istituzionale**, in conseguenza della quale l'adozione dell'innovazione diviene una norma sociale. Tutto questo si connette anche con una **pressione competitiva**, per cui si adotta un'innovazione per paura di perdere in competitività.

Il modello prende in considerazione differenti variabili per poter misurare la soglia di attivazione di una *bandwagon pressure*, i fattori che la facilitano e i meccanismi di reazione che essa attiva.

Diversa prospettiva adottano invece i fautori della teoria delle aspettative tecnologiche.

A partire dagli studi di N. Rosemberg (1976), si è sviluppato un ampio filone di studi sulla diffusione dell'innovazione che si basa sul concetto di “aspettativa

tecnologica” (technological expectation). Secondo questa impostazione teorica, i tempi di assunzione di un’innovazione e la scelta della stessa innovazione da adottare derivano dal tipo di aspettative che l’impresa ha rispetto alle tecnologie.

In effetti, la teoria economica classica dà per scontato che i soggetti puntino sempre ad applicare la tecnologia migliore. Al contrario, le aspettative tecnologiche di un imprenditore o di un’impresa possono essere differenti. Ad esempio, essi possono puntare su tecnologie intermedie (intermediate technologies) che consentano di ridurre il gap tecnologico rispetto alla frontiera tecnologica (technological frontier) raggiunta, senza tuttavia dover modificare l’intera impostazione organizzativa dell’impresa.

I modelli basati sulle aspettative tecnologiche, pertanto, presuppongono differenti tipi di comportamento, rispetto a quella della “adozione immediata della tecnologia migliore” o rispetto a quella del “rifiuto immediato della tecnologia migliore”. Tra le varie opzioni, ad esempio, vi è quella di aspettare senza operare, quella di scegliere una tecnologia intermedia come opzione tecnologica definitiva o quella di preferire una tecnologia intermedia, aspettando di prendere una decisione definitiva.

1.5.4 I modelli reticolari di diffusione dell’innovazione

Un altro settore di studi relativi alle modalità di diffusione dell’innovazione sono quelli incentrati sulla network analysis e sul concetto di rete. A differenza dei modelli matematici, di tipo macro-economico, quelli reticolari presuppongono che la forma, l’estensione e le modalità di funzionamento delle reti di relazione tra attori incidono sulle condizioni (tempi, ritmi, forme, ecc.) di diffusione di una tecnologia.

Punto di partenza di tali studi sono stati i modelli di interazioni finalizzati ad affrontare uno dei limiti delle teorie di Rogers, vale a dire il fatto che esse considerano le innovazioni come realtà “atomiche”, separate l’una dall’altra.

L. Marchegiani e C. Muzzi (s.d.) sottolineano, al contrario, come ogni innovazione si inserisca in un complesso insieme di relazioni con altri prodotti e altre innovazioni, fatto che modifica notevolmente i modelli di diffusione. Ad esempio, si possono rilevare:

- rapporti di **interdipendenza** tra innovazioni, per cui, pur essendo indipendenti da un punto di vista funzionale, l'adozione di una può favorire l'adozione di un'altra;
- rapporti di **complementarietà**, per cui l'adozione di un'innovazione favorisce l'adozione dell'altra;
- rapporti di **contingenza**, per cui l'adozione di un'innovazione causa necessariamente l'adozione di una seconda.

V. Mahajan, E. Muller e Y. Wind (2000) hanno anche elaborato un modello di interazione tra innovazioni e tecnologie esistenti a seconda degli effetti che esse producono l'una sull'altra.

Figura 1.5.3.1 – *Modello di interazione tra innovazioni e tecnologie esistenti*

Effetti dell'innovazione sui prodotti esistenti	Effetti dei prodotti esistenti sull'innovazione		
	Positivo	Negativo	Neutrale
Positivo	Complementarietà	<i>Enablers</i>	Situazione predatore-vittima
Neutrale	Prodotti ausiliari	Prodotti indipendenti	Fallimento del nuovo prodotto
Negativo	Situazione vittima-predatore	Sostituzione tecnologica	Sostituzione nei prodotti in uso

Se innovazioni hanno

è una che lo essere

diversi per ogni potenziale adopter, in quanto i network personali variano per dimensione e per caratteristiche ogni volta. Per ciascun potenziale adopter, pertanto, vi sarà una differente “adopter threshold”. Ad esempio, Valente sostiene che i soggetti con un'attitudine a svolgere la funzione di opinion leader hanno soglie più basse di adozione: il numero di persone presenti nelle loro reti di relazioni che hanno già adottato l'innovazione, necessario per spingerli a compiere la stessa scelta, è più basso rispetto a coloro che hanno un'attitudine gregaria (followers).

Valente sostiene che sia possibile applicare le categorie degli adopters elaborate da Ryan e Gross (vedi sopra), sia al livello del sistema sociale, sia al

livello di rete. Anche nella rete personale, dunque, è possibile identificare gli anticipatori, una maggioranza anticipatrice, una maggioranza ritardataria ed i ritardatari assoluti. Studiare come, al livello di rete, si superi la soglia di attivazione dell'adozione consente, secondo Valente, di comprendere meglio i meccanismi generali di diffusione e le interazioni tra le influenze esterne e quelle interne di rete.

Molti studiosi hanno invece assunto un **approccio topologico**, cercando di identificare le caratteristiche dei network che maggiormente incidono sulla rapidità di innovazione.

Ad esempio, W. Mason, A. Jones e R. Goldstone (2005) sottolineano come la lunghezza media dei percorsi (average geodesic path length) presenti nel network (vale a dire il numero medio di passaggi necessari per raggiungere due nodi) rappresenti una misura più esplicativa della velocità di diffusione di un'innovazione rispetto al grado medio di connessione (node average degree) di ogni nodo (vale a dire il numero medio di connessioni che legano un nodo a un altro).

Molti studi sui networks (si veda Mann Bruch, 2003) oltre a considerare la struttura delle reti, analizzano anche le caratteristiche che contraddistinguono i nodi, ed, in particolare, lo status socio-economico (livelli di istruzione, tipo di lavoro, livelli di carriera, ecc.) e le competenze interpersonali (abilità personali, motivazioni, cultura, orientamenti, personalità, ecc.), nonché i tipi di relazione che collegano i singoli nodi (di potere, familiari, professionali, ecc.). Altro elemento messo in campo, ripreso dalla teoria del capitale sociale, è rappresentato dal grado di fiducia nelle relazioni di rete.

1.6 I DRIVER DEI PROCESSI DI INNOVAZIONE TECNOLOGICA

I principali fattori che possono avere un certo grado d'influenza sulle decisioni degli attori economici di adottare innovazioni di prodotto e/o di processo possono essere riassunti nel seguente elenco:

- struttura del mercato di riferimento (grado di concentrazione in termini di numero di concorrenti diretti e l'intensità della competizione;
- capacità di assorbimento
 - delle imprese (orientamento strategico e posizionamento tecnologico; dimensione dell'impresa; struttura e cultura organizzativa; attività d'esportazione; intensità di capitali, come indicatore delle barriere all'entrata presenti sul mercato di riferimento o come pre-condizione degli investimenti; quantità di risorse disponibili per il finanziamento interno delle attività innovative; possibilità di finanziamenti esterni; livello di qualificazione dei dipendenti);
 - dei consumatori: (tipologia di bisogno, reddito, grado di soddisfazione, ecc..)
- stato della tecnologia nel momento dell'introduzione della soluzione innovativa

1.6.1 La struttura del mercato di riferimento

La struttura del mercato può facilitare, o viceversa frenare, la comparsa di innovazioni. Partendo dal presupposto che un'impresa per innovare deve finanziare progetti innovativi utilizzando i profitti precedentemente accumulati, senza avere alcuna certezza sul recupero di tali investimenti, la concorrenza perfetta è la forma di mercato che garantisce l'allocazione ottimale delle risorse; tuttavia il suo equilibrio nel lungo termine è caratterizzato dall'azzeramento dei profitti. Un'impresa monopolistica può allocare una parte degli extraprofitti in attività innovative anche rischiose, poiché ha la certezza di essere la sola ad

appropriarsi dei derivanti benefici economici. Quindi l'esistenza sul mercato di grandi imprese può facilitare la produzione innovativa. Molti studi hanno infatti dimostrato che la quantità di innovazioni aumenta al crescere delle dimensioni dei laboratori di ricerca, della varietà di progetti in corso in uno stato laboratorio grazie alle sinergie che si vengono a creare e della varietà di mercati in cui un'impresa opera. Quindi, per ragioni legate alla maggiore disponibilità di risorse, alle economie di scala e di scopo della ricerca, le grandi imprese monopolistiche o quasi monopolistiche risultano avvantaggiate nelle attività innovative. Tuttavia il monopolio non porta a condizioni di efficienza nell'allocazione delle risorse e non sono evidenti le ragioni che possano spingere un monopolista ad investire nell'innovazione. Soluzioni intermedie come l'oligopolio o la concorrenza monopolistica possono favorire l'allocazione di un'adeguata quantità di risorse all'attività innovativa, a causa dei maggiori livelli di competizione tra le imprese. Abernathy ed Utterback (1978) svilupparono un modello in cui innovazioni di prodotto ed innovazioni di processo evolvono in maniera interdipendente, attraverso fasi distinte alle quali corrispondono differenze nella struttura del settore e, conseguentemente, nella fonte del vantaggio competitivo.

A fasi iniziali dello sviluppo della tecnologia, caratterizzate da un'intensa competizione per l'affermazione della soluzione tecnologica preferita dal mercato, fanno seguito fasi caratterizzate dalla fondamentale importanza del recupero di efficienza attraverso interventi sul processo che consentano di ridurre i costi di produzione. Contemporaneamente cambia l'enfasi sull'allocazione delle risorse e delle aree tecnologiche critiche, che passano progressivamente dall'area del prodotto a quella del processo, con cambiamenti e progetti sempre meno radicali e sempre più finalizzati ad un miglioramento incrementale di soluzioni esistenti.

In questo modello, il processo produttivo viene definito come il sistema degli impianti, della forza lavoro, delle materie prime e dei flussi informativi utilizzati per la produzione di un prodotto/servizio. Osservando l'evoluzione del processo così definito, è possibile individuare una traiettoria tipica di evoluzione e sviluppo nel tempo scomponibile in tre stadi distinti al quale corrispondono altrettanti stadi di sviluppo del prodotto.

Figura 1.6.1.1 – Modello di Abernathy-Utterback.



Gli stadi riferiti allo sviluppo del processo sono:

- 1) Non coordinato: il processo si basa su una serie di lavorazioni per lo più non specifiche per le quali si utilizzano macchinari generici; l'obiettivo è di prepararsi a rispondere ad un mercato in rapida espansione, rendendo necessaria una strutturazione del processo che faciliti l'introduzione rapida di cambiamenti e riduca il rischio di obsolescenza tecnologica; in questo stadio l'innovazione di processo è poco critica;
- 2) Segmentato: a seguito dell'affermazione sul mercato di una combinazione di tecnologia di prodotto e di processo vincente, il processo produttivo si trova a dover fronteggiare volumi crescenti, riduzione della varietà di configurazioni richieste e maggiore necessità di riduzione dei costi di produzione; la criticità fondamentale diventa quindi la capacità di individuare soluzioni stabili sul fronte della produzione, attraverso l'ottimizzazione del processo sia nelle sue singole fasi che nel suo complesso; questo comporta l'adozione di

tecnologie innovative al fine di ottenere la standardizzazione del ciclo produttivo ed una maggiore efficienza interna;

- 3) Sistemico: la spinta verso una maggiore efficienza produttiva sposta il baricentro della competizione sul costo e si riflette in processi produttivi nei quali aumenta progressivamente l'attenzione per il controllo sul processo; in questo stadio l'innovazione di processo diventa per lo più di tipo incrementale, finalizzata all'introduzione di tanti piccoli miglioramenti in grado di aumentare l'effetto di riduzione sul costo di produzione.

Gli stadi corrispondenti riferiti allo sviluppo di prodotto sono:

- 1) Massimizzazione delle prestazioni (stadio fluido): in questo stadio il mercato è caratterizzato da una grande varietà nelle preferenze espresse relativamente alle prestazioni richieste al prodotto, la competizione è elevata e focalizzata sull'affermazione di soluzioni che consentano di beneficiare rapidamente di aumenti di quota di mercato associati a tassi di sviluppo elevati; la tecnologia di processo si trova nello stadio non coordinato e si trova ad essere penalizzata nell'allocazione delle risorse per lo sviluppo dell'innovazione;
- 2) Massimizzazione delle vendite (stadio di transizione): in questo stadio si manifestano gli effetti della competizione sullo standard tecnologico e d'uso legato al prodotto che ha caratterizzato lo stadio precedente, e l'attenzione si sposta sull'aumento dei volumi di vendita; l'innovazione di prodotto tende a concentrarsi su miglioramenti incrementali lungo le principali dimensioni d'uso del prodotto;
- 3) Minimizzazione dei costi (stadio statico): in questo stadio la varietà dei prodotti è ridotta al minimo e la standardizzazione viene indirizzata verso la creazione di una domanda sempre più omogenea e interessata al costo del prodotto; si riducono quindi sensibilmente le risorse allocate all'innovazione di prodotto.

Appare quindi chiaro come ad una prima fase, in cui le innovazioni di prodotto risultano più intense e frequenti, segua, secondo gli autori, una seconda fase di maturità in cui prevale l'innovazione di processo. Nella fase intermedia della crescita di transizione le due tipologie d'innovazione risultano ugualmente

importanti e generano il massimo tasso di innovazione congiunta prodotto/processo.

Questo modello consente da un lato di analizzare l'impatto sulle caratteristiche della singola impresa dell'evoluzione delle tecnologie di prodotto e di processo nel settore considerato; dall'altro permette di analizzare l'evoluzione strategica delle diverse forze competitive nell'arco del ciclo di vita e sviluppo delle tecnologie. Nelle diverse fasi varia quindi anche l'insieme delle opzioni strategiche disponibili. L'impresa che vuole garantirsi una redditività positiva nelle fasi iniziali dello sviluppo di una tecnologia dovrà privilegiare gli investimenti sul prodotto.

Tuttavia, una volta ridotta la varietà richiesta dal mercato, lo spazio d'azione sul prodotto si riduce sensibilmente e l'aumento dei volumi si riflette nella riconsiderazione della tecnologia di processo, fino alla focalizzazione sull'efficienza interna nella stadio sistemico.

Allo stesso modo è possibile individuare la tipologia di minaccia concorrenziale proveniente dalle cinque forze competitive individuate da Porter (1985), cioè concorrenti, fornitori, clienti, nuovi entranti e sostituti.

Per quanto riguarda i concorrenti, nel primo stadio la frammentazione dell'offerta e la dimensione relativa dei diversi *competitor* rappresentano fattori critici nella prospettiva di definizione di standard di settore; negli stadi successivi si va rafforzando la pressione concorrenziale sui prezzi.

I clienti rappresentano fonti importanti d'informazione nelle prime fasi, per trasformarsi poi in consumatori indifferenziati caratterizzati da un aumento della sensibilità nei confronti dei prezzi piuttosto che delle caratteristiche del prodotto. Per quanto riguarda i fornitori, mentre nelle fasi iniziali c'è la tendenza ad approvvigionarsi presso fonti generiche, nelle fasi successive diventa importante impostare un'attività di segmentazione della fornitura allo scopo di individuare potenziali partner da coinvolgere sempre più nell'ultimo stadio nel processo di riconfigurazione del prodotto.

Dal lato dei nuovi entranti, i tassi di sviluppo del mercato e l'elevata frammentazione dell'offerta rendono particolarmente interessante l'inizio d'attività nel settore, ed i nuovi entranti possono rappresentare un pericolo per le imprese già operanti sul mercato. Tuttavia negli stadi successivi, quando l'approccio all'innovazione diventa di tipo incrementale, si liberano risorse per aumentare gli investimenti in barriere all'entrata.

Nelle fasi iniziali è difficile parlare di prodotti sostitutivi, dal momento che non è ancora chiara la configurazione del prodotto, mentre diventano una minaccia sempre più rilevante quanto più la domanda diventa sensibile alle variazioni di prezzo.

1.6.2 La capacità di assorbimento delle imprese

Un altro filone di studi relativo alla diffusione delle innovazioni, sviluppatosi nell'ambito del business management, ruota intorno al concetto di "absorptive capacity" di una impresa, vale a dire la sua capacità di riconoscere il valore, assimilare e utilizzare nuova conoscenza.

Il concetto, elaborato da W. Cohen e D. Levinthal (1990), si basa su un modello teorico il quale presuppone che:

- ogni innovazione sia identificabile come nuova conoscenza;
- la conoscenza è un bene pubblico o semi-pubblico, nel senso che può essere trasmessa senza compensazione e senza danneggiare chi, consapevolmente o inconsapevolmente, la trasmette (la conoscenza ha il carattere della replicabilità);
- le imprese assumono conoscenze da altre istituzioni (imprese, enti di ricerca, ecc.) (knowledge spillovers);
- il grado di appropriazione di una nuova conoscenza da parte di un'impresa dipende dal livello della sua "absorptive capacity".

I fattori che entrano in gioco nella determinazione del grado di assorbimento di un'impresa sono differenti (Vinding, 2001).

Il principale elemento che determina la capacità di assorbimento di un'impresa è rappresentato dalla conoscenza di cui dispone. Tale capacità pertanto è primariamente dipendente da fattori quali la quantità e la qualità delle attività di ricerca e sviluppo realizzate dall'impresa, gli investimenti in ricerca o il capitale umano a disposizione.

Importante è anche il bagaglio di esperienze capitalizzate dalla istituzione o dal personale, rilevante soprattutto per l'acquisizione di conoscenze tacite.

Un'altra variabile che incide sul grado di absorptive capacity di un'istituzione è quella della struttura organizzativa. Ad esempio, un'efficace

gestione dei punti di contatto tra le differenti funzioni dell'impresa (marketing, produzione, gestione del personale, management strategico, ecc.) incrementa la capacità di assorbimento dell'impresa.

Un ulteriore elemento messo in rilievo che favorisce un aumento della capacità di assorbimento di una istituzione è costituito dalle sue reti di relazione. Più queste saranno ampie e strette, più aumenta la capacità dell'istituzione.

Perché una conoscenza possa passare da un'impresa a un'altra (ad esempio, nel caso di un'impresa e di una sua collegata) o da un'istituzione a un'altra (ad esempio, da un'università a un'impresa), è necessario che la capacità di assorbimento delle due entità sia compatibile, vale a dire che la capacità di gestire conoscenza sia simile.

1.7 LA STANDARDIZZAZIONE DELLA TECNOLOGIA E LA COMPETIZIONE TECNOLOGICA

1.7.1 Il modello concettuale per lo studio della competizione attraverso gli standard tecnologici

I tre fattori esaminati nel paragrafo precedente, possono essere misurati o rappresentati da variabili collegate tra di loro. Non tutte le variabili hanno lo stesso peso; la loro influenza è differente a seconda del contesto e si modifica nel tempo. Queste variabili possono, inoltre, operare in una direzione positiva o negativa, esercitando una pressione di tipo “*push*” dal lato dell’offerta e “*pull*” da parte della domanda nel rispetto dei vincoli della classe tecnologica di appartenenza e per i diversi stadi che caratterizzano il processo di affermazione dello *standard tecnologico*, ovvero della tecnologia universalmente riconosciuta e necessaria per lo sviluppo di un dato prodotto. Esso è frutto di innovazioni che presentano le caratteristiche di compatibilità rispetto alle tecnologie precedenti o determinano condizioni per nuovi sistemi di compatibilità, univocità nel contenuto, condivisione e collegamento a rete tra prodotti o processo⁹.

L’intensità e la direzione della pressione competitiva “*push*” e “*pull*” dipendono dall’interazione delle variabili e dalla combinazione dei tre macro fattori, tenuto conto delle condizioni di contesto in cui operano e delle strategie competitive messe in atto (antagoniste, cooperative basate su sistemi chiusi o aperti).

Dalla combinazione delle forze “*push*” e “*pull*” e dalla prevalenza di una rispetto all’altra, derivano diversi risultati competitivi tanto per le imprese che partecipano direttamente alla competizione quanto per gli assetti competitivi complessivi. Può trattarsi di equilibri di mercato del seguente tipo:

⁹ Parte della letteratura fa riferimento al disegno dominante (*dominant design*) come sinonimo di *standard tecnologico* (Anderson e Tushman, 1990, pp. 604-634; Arthur, 1989, pp. 116-131; Suarez e Utterback, 1995, pp. 415-430; Van De Kaa, *et al.*, 2007). Suarez e Utterback (1995), Van De Kaa *et al.* (2007) utilizzano i due termini con significati diversi. Laddove il disegno dominante indica le specifiche che definiscono l’architettura di un prodotto, lo *standard dominante* è quella tecnologia che ha raggiunto una quota di mercato superiore al 50% per un intervallo significativo di tempo in una categoria di prodotto o servizio. Pur evidenziando la necessità di rilevare la quota di mercato in un intervallo di medio e lungo termine, rimane tuttavia imprecisato in questa definizione la lunghezza del periodo di osservazione.

- *standard dominanti* (caratterizzati da un'impresa o gruppo di imprese vincenti a fronte di imprese o gruppi di imprese perdenti, con *pay-off* V/P);
- *standard coesistenti* (entrambe le imprese o gruppi di imprese sono vincenti, con *pay-off* positivi V/V);
- *standard convergenti* da precedenti soluzioni innovative (entrambi i gruppi antagonisti sono perdenti P/P rispetto alla loro tecnologia per convergere verso uno *standard* comune).

Il fattore tempo e la dimensione spaziale rappresentano la chiave di volta per definire l'aspetto dinamico degli assetti competitivi e dei *pay-off* riportati dalle imprese¹⁰.

Il confronto tra più tecnologie può essere fatto *ex post* per osservare i risultati competitivi raggiunti, oppure *ex ante* per tracciare i risultati raggiungibili.

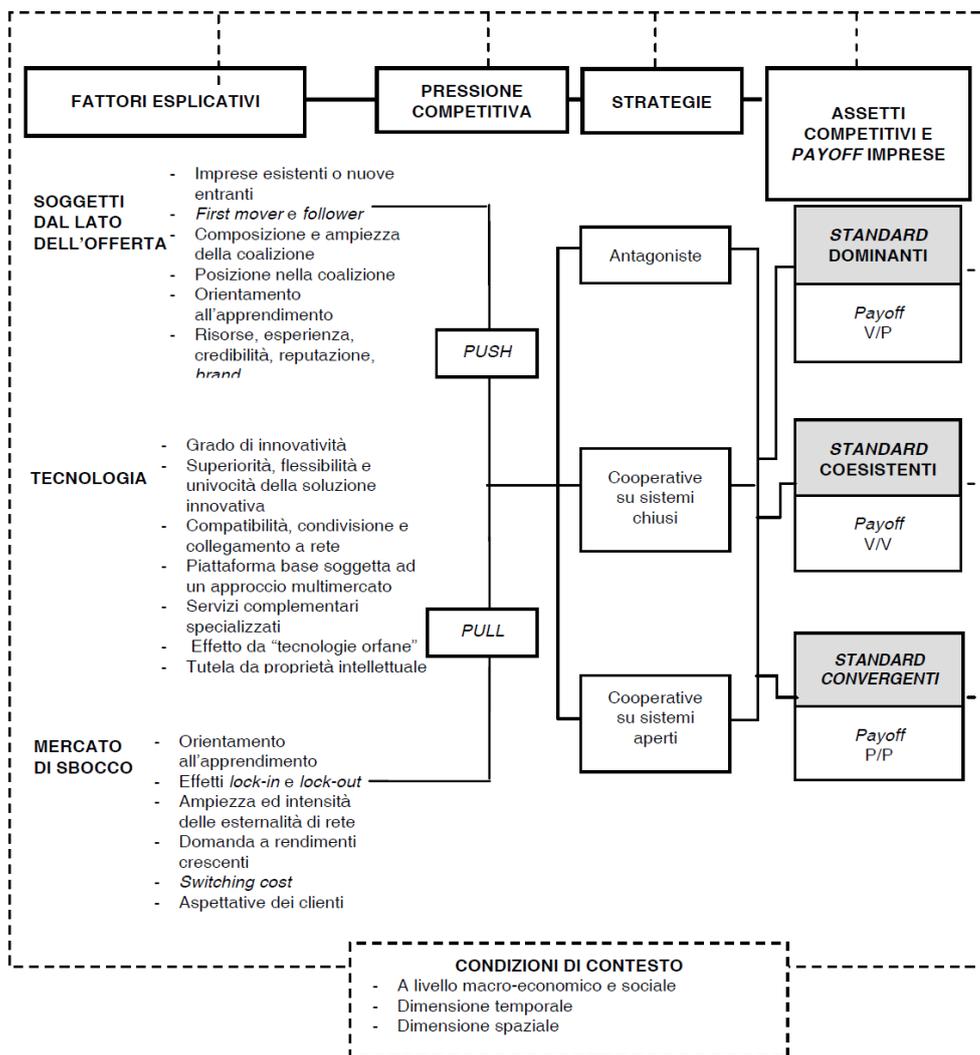
Inoltre, a seconda dell'orizzonte temporale e del contesto spaziale prescelti, la competizione può presentare andamenti ed esiti differenti.

Il modello concettuale è esemplificato nella figura 1.7.1.1.

Esso pone i tre fattori chiave (soggetti, tecnologia, mercati di sbocco) in relazione alla combinazione delle forze “*push*” e “*pull*” ed al valore a queste attribuito nell'ambito delle strategie competitive adottate basate su “sistemi chiusi” o “aperti”. Ne conseguono i tre assetti di mercato, ossia posizione dominante, *standard* coesistenti o *standard* convergenti con i rispettivi *pay-off* riportati dalle imprese direttamente coinvolte nella competizione.

Figura 1.7.1.1 – *Il modello concettuale per lo studio della competizione attraverso gli standard tecnologici*

¹⁰ Il rapporto tra variabili di contesto (tempo e spazio) e dinamiche degli assetti di mercato richiama uno dei concetti fondanti la visione sistemica del rapporto tra impresa e contesto, ossia la ricerca della consonanza di contesto quale momento imprescindibile dell'azione di governo. Cfr. Golinelli, 2005.



Fonte: BUTTÀ C., LONGO M. C., *Standard tecnologici e dinamiche competitive a confronto*, Sinergie n. 84, 2001

Le dinamiche competitive sono delimitate dalle specifiche condizioni di contesto spazio-temporali, che rappresentano anche l'aspetto dinamico del processo di affermazione degli *standard*. *Invero* il fattore tempo ed il contesto spaziale e i confini territoriali sono variabili non neutrali rispetto all'esito della competizione.

La dimensione temporale è proposta sia nella prospettiva di osservazione *ex post* ed *ex ante*, sia nella logica della competizione basata sul tempo.

È solo definendo in modo appropriato il periodo di osservazione (breve, medio e lungo termine) che si può comprendere quando una tecnologia diventa uno *standard* e, se lo diventa, in che misura essa è significativa per gli equilibri di mercato che determina. Ad esempio, la tecnologia 3D di Sensio, che consente una visione tridimensionale delle immagini su display 2D mediante occhiali e su TV-3D tramite *decoder*, è stata riconosciuta come *standard* ufficiale dal DVD Forum dopo dieci anni di continui investimenti. L'OpenCL 1.0, tecnologia che permette di sfruttare la potenza di calcolo delle GPU e dei processori multi-*core*, è diventata ufficialmente uno *standard* in soli otto mesi, contrariamente a quanto accade nel settore IT in cui i tempi necessari per fissare uno *standard* sono solitamente di cinque anni ed in casi limitati di 18 mesi.

Il confronto tra più tecnologie può effettuarsi *ex post* osservando gli stadi più significativi del loro processo di affermazione nel lungo o medio periodo. Ma l'analisi può anche essere *ex ante*, attraverso la simulazione di scenari probabili in funzione dei fattori chiave (soggetti, tecnologie e mercato) all'interno di specifici contesti spazio-temporali. L'influenza che la dimensione temporale esercita è anche collegata:

- alle decisioni sui tempi di azione e reazione nell'ambito della logica della *timebased competition*. L'affermazione degli *standard* è influenzata dalla rapidità, flessibilità, reattività delle decisioni delle imprese e, in generale, dalla capacità del *management* di ridurre i tempi nelle diverse fasi dei processi decisionali e operativi all'interno dell'impresa e rispetto ai concorrenti;
- alla relazione tra tempo e domanda a rendimenti crescenti. Nell'ambito di questa relazione, l'entità dei rendimenti crescenti della domanda per un particolare prodotto cambia nel tempo. Esiste un limite alla crescita di valore allorché la tecnologia diventa obsoleta e i benefici che gli utenti traggono da una nuova tecnologia sono superiori rispetto a quelli derivanti da una base di utenza ampia, sia in termini di compatibilità tecnologica quanto di efficienza delle esternalità di rete.

Spesso sono i settori *high-tech* ad essere dominati da poche imprese o da una sola. I mercati tendono a preferire quell'impresa o quella tecnologia che presenta il maggior numero di utenti effettivi e che ha potenzialità per attrarne di nuovi

(effetto *tipping*)¹¹. Ciò perché gli acquirenti sostengono sia rilevanti investimenti nell'acquisto dei prodotti altamente tecnologici e nei servizi complementari, sia elevati costi di riconversione (oneri, apprendimento, ricerca, informazioni disponibili) da una tecnologia all'altra. I rendimenti crescenti della domanda vincolano gli utenti l'uno all'altro, avviando meccanismi di “retroazione positiva” a causa dei quali un'impresa (o una tecnologia) diventa sempre più forte.

Unitamente al fattore tempo, occorre considerare gli elementi di contesto di tipo macro, non direttamente controllabili dalle singole imprese, in grado tuttavia di condizionare la dinamica competitiva.

L'esistenza di aree sistema e loro vocazioni, lo sviluppo tecnologico di un'area, la velocità di diffusione delle innovazioni tra settori, le caratteristiche dei mercati di approvvigionamento e di sbocco sono tutti elementi di contesto rilevanti. Altri elementi della dimensione spaziale sono riconducibili alle azioni degli organi governativi che intervengono *de iure* attraverso la fissazione di *standard* tecnologici pubblici oppure mediante interventi legislativi, politiche di sostegno e di *lobby*.

In generale, gli effetti di moderazione delle variabili tempo e spazio sottolineano la capacità dell'organo di governo di “ascoltare” il contesto in cui l'impresa opera e con cui si relaziona al fine di ridurre i tempi dei processi decisionali e operativi rispetto ai competitori e di garantire all'impresa la legittimazione necessaria ad operare in un contesto complesso (Golinelli, 2005).

¹¹ L'effetto *tipping* indica un punto di non ritorno, in conseguenza del quale si assiste all'affermazione progressiva di una soluzione tecnologica supportata dal leader di mercato a danno dei concorrenti. Tale effetto non si limita all'impresa produttrice dello standard dominante, in quanto coinvolge i fornitori e gli utilizzatori finali. La competizione attraverso posizioni dominanti di tipo tecnologico modifica il sistema di relazioni di filiera, all'interno del quale gli interessi di vari attori convergono in una soluzione comune. La competizione si sposta, quindi, da singoli interlocutori a gruppi di attori che si presentano sul mercato con un prodotto tecnologico condiviso, risultato di standard tecnologici tra loro complementari, il cui successo dipende dalla velocità di diffusione e dall'ampiezza degli ambiti di applicazione.

1.7.2 Il ciclo della tecnologia e le strategie competitive

Il successo (o l'insuccesso) della tecnologia come *standard* può essere collegato alle modalità con cui si combinano i tre fattori chiave (soggetti dell'offerta, tecnologia e mercati di sbocco) e all'intensità delle pressioni competitive “*push*” e “*pull*” che ne derivano. Le forze “*push*” e “*pull*” sono configurate in modo differente ed assumono pesi e direzione (positiva, negativa) diversi in relazione alle strategie competitive antagoniste o cooperative adottate dalle imprese, all'ambiente competitivo, all'orizzonte temporale e alla dimensione spaziale considerata.

Sulla base del grado di cooperazione e della natura degli assetti istituzionali e tecnologici, le strategie competitive possono sintetizzarsi nelle seguenti tipologie:

- strategie antagoniste tra gruppi o tra singole imprese,
- strategie cooperative o di *coopetition* basate su “sistemi chiusi”,
- strategie cooperative o di *coopetition* basate su “sistemi aperti”.

Obiettivo comune delle suddette strategie è la creazione di condizioni per una rapida diffusione della tecnologia ed un aumento dei costi di riconversione degli utenti che già utilizzano lo *standard*. Tuttavia diversi possono essere i meccanismi attuati, nonché gli ambiti ed i soggetti che intervengono nella competizione.

Le strategie antagoniste riguardano prodotti non assemblati o sistemi assemblati di natura non sistemica che, rispetto alle precedenti tecnologie, possono migliorare la compatibilità attraverso meccanismi di conversione o adattatori (strategia evolutiva con compatibilità a ritroso) oppure ridurre il grado di compatibilità (rivoluzione strategica).

Per ciascuna fase del ciclo tecnologico, le scelte delle imprese tengono conto del complesso di interazioni tra soggetti dal lato dell'offerta, della tecnologia e dei mercati di sbocco.

L'offerta di un nuovo *standard* può generare discontinuità nel settore e periodi di instabilità collegati con le incertezze sull'esito dello scontro tra vecchie tecnologie e nuove soluzioni.

Nella fase di turbolenza, l'impresa tende a costruire un'ampia base di utenti, eventualmente anche attraverso prezzi di penetrazione, una piattaforma tecnologica di base soggetta a numerose varianti di prodotto, l'offerta di

beni/servizi complementari specializzati, soprattutto di tipo commerciale, e la selezione di target di utenti che non abbiano costi di trasferimento e vincoli da effetto *lock-in*. In tal modo si possono creare le condizioni per la costituzione di barriere competitive all'entrata in conseguenza delle quali l'impresa *leader* può applicare nella successiva fase di sviluppo prezzi superiori di extraprofitto che bloccano l'ingresso a nuove imprese rivali.

Nella fase di sviluppo, l'esistenza di gruppi di utenti pionieri svolge un ruolo centrale nell'orientare le preferenze del mercato verso una data tecnologia e nel resistere a tecnologie alternative. Gli effetti *lock-in* e *lock-out* potrebbero aumentare nel tempo; in questo caso i nuovi utenti saranno propensi a scegliere la tecnologia che genera migliori *performance*. A meno che non si risolvano i problemi relativi al coordinamento degli attori e del mercato, tale tecnologia manterrà il suo vantaggio competitivo nel tempo a livello di mercato o di nicchie.

Se il *lock-in* e *lock-out* diminuiscono, in seguito alla progressiva adozione della nuova tecnologia da parte di un gruppo di utenti e a strategie aggressive messe a punto da imprese concorrenti basate su prezzi di penetrazione e alleanze verticali, la vecchia tecnologia potrebbe entrare in declino mentre gli assetti competitivi delle imprese potrebbero riconfigurarsi.

Ad esempio, nel passaggio dall'Etacs al GSM per la telefonia mobile, la diffusione in massa della nuova tecnologia isolò la vecchia base di utenti, costringendoli a migrare verso il GSM nonostante la presenza di costi di trasferimento oppure a rinunciare ai benefici da rendimenti crescenti della domanda da GSM nel caso in cui avessero continuato ad utilizzare l'Etacs. Spesso sono le imprese che operano in segmenti contigui a quelli dell'impresa dominante ad offrire tecnologie alternative differenziate che, pur attraendo una piccola base di utenti, offrono benefici potenzialmente superiori rispetto a quelli dello *standard* già affermato.

Laddove la tecnologia si presenta integrata a livello di componenti, sistemi e sottosistemi, la competizione si indirizza sullo sviluppo di sistemi di relazioni di filiera all'interno dei quali i diversi attori, a monte e a valle, condividono il valore creato dalla tecnologia e si contrappongono a imprese o gruppi di imprese che offrono soluzioni innovative alternative. Le strategie cooperative messe a punto

dalle coalizioni volontarie possono incentrarsi alternativamente su logiche di tutela della proprietà intellettuale oppure sull'*open innovation*¹².

Ne derivano strategie cooperative basate su “sistemi chiusi” e “sistemi aperti”.

Nel primo caso, le dinamiche competitive puntano sull'affermazione di *standard* proprietari che si caratterizzano per il ricorso a brevetti, licenze e *copyright* allo scopo di proteggere gli elementi specifici della tecnologia all'interno di un sistema integrato.

Il vantaggio competitivo si fonda sulla condivisione di *standard* complementari e diritti relativi alla proprietà intellettuale, sul coinvolgimento più ampio dei soggetti della filiera, sullo sfruttamento di sinergie relative alla reputazione ed al marchio di più imprese, sullo sviluppo di sistemi integrati compatibili all'interno ed incompatibili con altri sistemi. Le interazioni tra interessi economici, tecnologici e di business risultano centrali nella selezione delle alternative tecnologiche di base e delle classi tecnologiche di appartenenza. La tecnologia Echelon (CECED AIS) è adottata come *standard* per il controllo ed il monitoraggio degli elettrodomestici intelligenti e nel campo della domotica in Europa sulla base del riconoscimento di un gruppo di soggetti, comprendenti la Echelon Corporation, il CECED (Comitato Europeo dei Produttori di Elettrodomestici con più di 200 membri), la LONMARK International (associazione *no-profit* per il commercio con più di 500 membri).

La composizione delle coalizioni volontarie di tipo “chiuso” varia in termini di soggetti, ampiezza, obiettivi e attività nelle diverse fasi che caratterizzano il ciclo di sviluppo di una tecnologia.

Nella fase di turbolenza, le coalizioni intervengono sul processo di selezione dello *standard* attraverso la fissazione *de iure* di una serie di requisiti che esso deve avere. Emergono alleanze orizzontali e verticali che alimentano processi competitivi tra coalizioni strategiche. Nella fase di sviluppo, la coalizione che vince è quella che rafforza la sua posizione per effetto dell'allargamento della base di utenti in un mercato a rendimenti crescenti della domanda. Se gli effetti

¹² L'OpenCL (Open Computing Language) 1.0 è una tecnologia priva di *royalty*, basata su un sistema aperto e multi-piattaforma. Tra le imprese che vi aderiscono vi sono: Activision, Blizzard, AMD (Advanced Micro Devices) Apple, ARM, Broadcom, Electronic Arts, IBM, Intel, Nokia, Nvidia e Samsung.

lock-in e *lock-out* aumentano, la coalizione vincente consolida la sua posizione di mercato riportando, nella fase di maturità, un *payoff V/P*. Se l'effetto *lock-in* si riduce in seguito all'obsolescenza della tecnologia o alla perdita di efficienza derivante da una base di utenti troppo ampia, potrebbero determinarsi nuove coalizioni strategiche capaci di ridefinire i confini e gli assetti competitivi lungo la filiera tecnologica. Nella fase di declino, si assiste ad una situazione ibrida nella quale lo *standard* riduce il suo tasso di crescita mentre altre tecnologie si affermano sul mercato. Nuove coalizioni si contrappongono attorno a *standard* tecnologici coesistenti secondo equilibri espressi dal *payoff V/V*. Se una nuova tecnologia integra precedenti sistemi, le coalizioni in competizione potrebbero convergere tutte verso un nuovo *standard*. La struttura del settore e la sua concentrazione ne verrebbero modificate. È il caso della competizione tra Sony e Toshiba che, dopo avere lanciato due *standard* alternativi per sostituire il formato ufficiale del Dvd, hanno deciso di raggiungere un accordo per uno *standard* comune a supporto dei media digitali.

Nelle strategie cooperative “aperte”, la competizione è incentrata sulla logica dell'*open innovation* e sulla condivisione di conoscenza con soggetti terzi. Al fine di stabilire *standard* condivisi, che presentano diverse versioni e servizi complementari, ottenuti incrementalmente con il contributo dei vari operatori che partecipano al *network*, gli *standard* tecnologici di tipo aperto incentivano le attività di brokeraggio e coinvolgono numerose *community* e *network* di operatori. È il caso dell'alleanza contro l'iPhone (con piattaforma proprietaria) che raccoglie sotto la guida di Google, centinaia di sviluppatori, *software house*, operatori telefonici, fra cui Intel, eBay, Texas Instrumentrs, Samsung, Nvidia, LG Electronics, Telecom Italia. Tutti gli attori sono riuniti sotto la sigla di Open Handset Alliance (OHA) per sviluppare una piattaforma *open source*, Android, che possa essere usata su qualsiasi cellulare. Un'ulteriore alleanza fra imprese è la Open Mobile Alliance (OMA), nella quale partecipano Nokia, Vodafone, Microsoft allo scopo di definire gli *standard* che dovrebbero supportare i diversi dispositivi, incluso Android.

La strategia cooperativa con “sistema aperto” è adottata in presenza di sistemi integrati caratterizzati da gruppi di utenti dominanti che trainano il mercato e che sono in grado di intervenire sul contenuto della soluzione tecnologica, da meccanismi di coordinamento della domanda, da ridotti effetti *lock-in* e *lock-out*, da bassi investimenti da parte delle imprese produttrici, dall'esistenza di posizioni di rendita temporanea, da *feedback* positivi da

esternalità di rete e dalla tendenza dei mercati a convergere verso nicchie differenziate di prodotti. I rischi invece riguardano il mancato rispetto del diritto d'autore e la definizione di strumenti di tutela alternativi alla proprietà intellettuale, l'esistenza di comportamenti anticoncorrenziali e le problematiche di sicurezza, affidabilità e compatibilità dei sistemi.

1.7.3 Gli assetti competitivi derivanti dalla combinazione delle forze “push” e “pull”

Gli assetti di mercato collegati all'affermazione di *standard* tecnologici, secondo quanto indicato in figura xxx sono il risultato delle iniziative delle imprese e del processo di selezione operato dal mercato tenuto conto dei vincoli tecnologici e delle condizioni di contesto.

L'interazione tra le forze “*push*” e “*pull*” e la prevalenza di quelle che propendono per la ricerca di elementi di uniformità, compatibilità e univocità trovano riscontro nelle strategie antagoniste o cooperative delle imprese nelle diverse fasi del ciclo tecnologico. Il successo degli *standard* è, dunque, conseguenza della convergenza di interessi economici, sociali e tecnologici che tengono conto dei tempi di realizzo e dei margini di incertezza nei rapporti di forza tra le diverse tecnologie in specifici contesti spazio-temporali.

Si distinguono, in particolare, i seguenti assetti e risultati competitivi riportati dalle imprese (*playoff*)

- posizioni dominanti in cui una tecnologia prevale sulle altre (*standard* dominanti);
- coesistenza tra tecnologie per nicchie di mercato differenti (*standard* coesistenti);
- convergenza verso un nuovo *standard* che integra le tecnologie utilizzate in periodi precedenti (*standard* da convergenza).

Gli *standard* dominanti sono caratterizzati da una tecnologia “ampiamente accettata in un intervallo significativo di tempo”. Essi configurano una situazione di mercato caratterizzata da un'impresa o gruppo di imprese vincenti (*payoff V*) a fronte di imprese perdenti (*payoff P*). Il VHS (prodotto dalla JVC e Matsushita) del 1976 nello scontro con Betamax (Sony) ed il Video2000 (Philips), la tastiera QWERTY del 1864 rispetto alla tastiera semplificata Dvorak del 1936, la bicicletta a due ruote di uguali dimensioni del 1889 rispetto alla ruota in legno ed

al biciclo del 1861, la rotaia Vignoles usata per le linee ferroviarie del 1831 unitamente allo scartamento di Stephenson (cioè misura della distanza dei binari ferroviari), sono esempi di *standard* dominanti.

La situazione di dominanza è rappresentata da un *payoff* *V/P*, risultato di una delle seguenti situazioni:

- convergenza, per intensità e direzione, delle forze “*push*” e “*pull*” verso una data soluzione innovativa a seguito di un’esigenza di compatibilità, univocità, condivisione e collegamento a rete espressa dal mercato, creata dalle imprese e da una tecnologia non familiare;
- pressione della forza “*pull*” proveniente dal mercato e generata dalle esternalità di rete, dagli effetti *lock-in* e *lock-out* della conoscenza, dagli elevati costi di riconversione, anche in termini di apprendimento, per gli utenti;
- pressione competitiva delle forze “*push*”, in conseguenza dell’effetto *tipping* e dei circoli virtuosi messi in atto dalle imprese attraverso elevati investimenti in R&D, ampie coalizioni tra attori della filiera tecnologica, soluzioni innovative all’interno di classi tecnologiche familiari, elevata compatibilità tra sistemi, servizi complementari e approccio multimercato¹³.

Non sempre la competizione genera equilibri di mercato dominati da un singolo produttore o coalizione di attori dove *the winner takes all*. Le pompe centrifughe antincendio con sistema di adescamento della Sprinkler rispetto alle pompe mobili e a quelle senza sistema di adescamento rappresentano *standard* tecnologici coesistenti con una diversità di applicazioni.

¹³ L’effetto *tipping* indica un punto di non ritorno, in conseguenza del quale si assiste all’affermazione progressiva di una soluzione tecnologica supportata dal *leader* di mercato a danno dei concorrenti. Tale effetto non si limita all’impresa produttrice dello *standard* dominante, in quanto coinvolge i fornitori e gli utilizzatori finali. La competizione attraverso posizioni dominanti di tipo tecnologico modifica il sistema di relazioni di filiera, all’interno del quale gli interessi di vari attori convergono in una soluzione comune. La competizione si sposta, quindi, da singoli interlocutori a gruppi di attori che si presentano sul mercato con un prodotto tecnologico condiviso, risultato di *standard* tecnologici tra loro complementari, il cui successo dipende dalla velocità di diffusione e dall’ampiezza degli ambiti di applicazione.

La coesistenza tra *standard* può manifestarsi laddove le imprese in competizione godono di vantaggi di posizionamento in segmenti di mercato distinti, esistono spazi per la differenziazione del prodotto e la base installata di utenti si polarizza in segmenti opposti mostrando una preferenza per le offerte differenziate rispetto ai benefici derivanti da ampie esternalità di rete. Nel caso di *standard* coesistenti, entrambi i gruppi di imprese sono vincenti a seguito della divergenza della domanda e riportano *payoff* positivi V/V in specifici segmenti di mercato.

Infine, la competizione può evolvere verso nuovi equilibri di mercato caratterizzati dalla convergenza in un nuovo *standard* che integra le tecnologie precedenti. Il Blu-ray della Sony e l'Hd-Dvd di Toshiba sono esempi di *standard* antagonisti utilizzati nei videogames e nei video ad alta definizione. Essi sono stati in competizione dal 2002 al 2008; nonostante una prevalenza del Blu-ray sull'Hd-Dvd, le due tecnologie sembrano convergere verso uno *standard* comune che presenta la struttura del disco dell'Hd-Dvd (Toshiba) e la tecnologia di scrittura multi-strato di Blu-ray (Sony).

Nel caso di *standard* convergenti, le tecnologie in competizione sono perdenti ed i gruppi antagonisti riportano un *payoff* negativo P/P rispetto alla singola tecnologia. Questa situazione può verificarsi nell'ipotesi in cui le forze "pull" e "push" sono entrambe deboli a causa di produttori isolati dall'effetto esternalità, di limitata compatibilità delle tecnologie, di modesti livelli di condivisione e di collegamento a rete, di aspettative negative degli utenti in merito all'adozione della tecnologia su vasta scala e alla sua velocità di diffusione, di mancanza di gruppi di utenti dominanti. In alternativa, la convergenza può derivare dall'introduzione sul mercato di una nuova tecnologia che rende compatibili tutte le componenti di sistema con le varie tecnologie presenti sul mercato.

1.8 DIFFUSIONE DELL'INNOVAZIONE: UN CONFRONTO INTERSETTORIALE

La possibilità di standardizzare una tecnologia non è in grado da solo di determinarne il successo: l'impatto economico e sociale di nuovi prodotti e processi dipende dalla velocità con la quale si diffondono, cioè dalla accettazione da parte di potenziali utenti. Ciò significa che non sempre le innovazioni tecnologiche sono vantaggiose, in quanto per esserlo l'applicazione e la diffusione delle nuove tecnologie deve andare di pari passo con la crescita della capacità delle imprese e del sistema economico di gestirle razionalmente ed economicamente.

È chiaro che la natura dell'innovazione influenza il tempo che intercorre tra l'adozione della nuova tecnologia e la commercializzazione del prodotto innovato: l'introduzione di una nuova tecnologia particolarmente complessa richiede in genere maggiori investimenti e un trasferimento di know-how più lungo e articolato rispetto ad una più semplice, il che giustifica anche intuitivamente tempi di diffusione più lunghi.

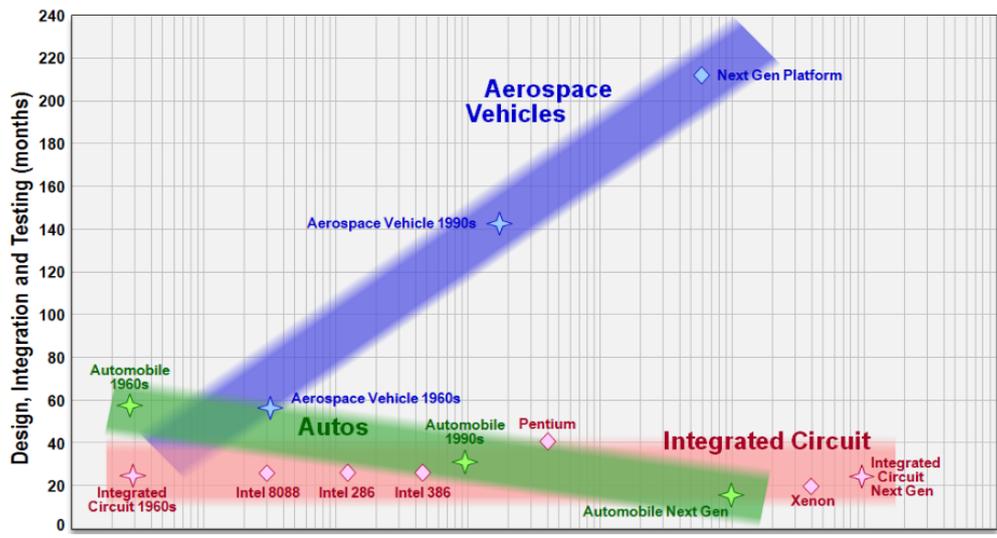
Tuttavia, per quelle innovazioni tecnicamente semplici e relativamente economiche è stato verificato che rispetto alle innovazioni più complesse e costose:

- a) tendono a diffondersi molto più rapidamente nei primi anni successivi alla loro prima applicazione commerciale,
- b) una volta trascorso lo scatto iniziale, riducono la propria velocità di diffusione in modo più marcato.

Diversamente, l'adozione al 100% (tutte le imprese del settore) di una tecnologia sembra più probabile per le innovazioni più complesse e costose. Ciò è dovuto, in gran parte, al fatto che gli svantaggi competitivi nel non adottare le innovazioni minori sono forse meno significativi e possono essere nascosti dalle differenti produttività delle imprese.

Al rigrado ne sono un esmpio i tassi di innovazione di tre settori: l'aerospazio, l'automotive ed il settore dei circuiti integrati.

Figura 1.8.1 – Tassi di diffusione delle tecnologie: un confronto intersettoriale



1.9 IL PROCESSO DI INNOVAZIONE NEL SETTORE AEROSPAZIALE: L'APPROCCIO BUILDING-BLOCK PER LO SVILUPPO DI COMPONENTI STRUTTURALI

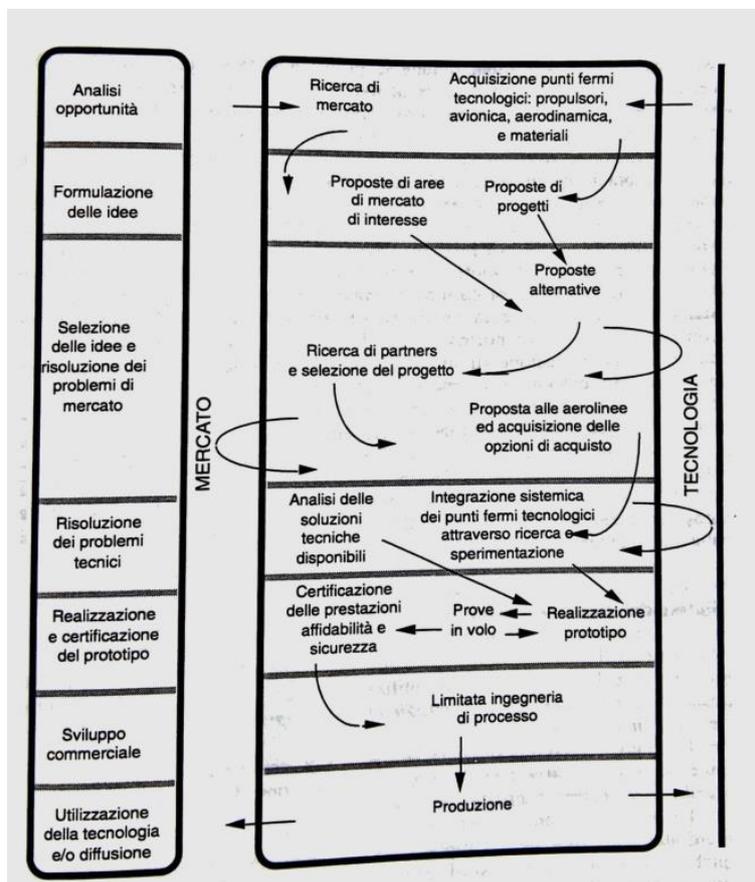
Il processo innovativo del settore aeronautico anche se segue in generale le stesse fasi esposte precedentemente presenta delle peculiarità che interessano principalmente le aree a monte dello sviluppo commerciale.

La *fase di ideazione* può essere suddivisa in due attività distinte: formulazione e selezione delle idee progettuali. Nella fase di formulazione si individuano le aree di interesse per le compagnie aeronautiche e studi di avamprogetto, nella fase di selezione vengono selezionati i progetti di interesse ed individuati i partner per lo sviluppo successivo. Una peculiarità del settore aeronautico è la *risoluzione dei problemi di mercato*, che difatti anticipa la risoluzione dei problemi tecnici relativi alla progettazione e costruzione. Infatti lo sviluppo di un nuovo prodotto è estremamente complesso ed implica l'integrazione di differenti aspetti quali lo studio della efficienza aerodinamica, lo sviluppo di materiali e progettazione della struttura primaria e lo sviluppo di sistemi di propulsione. Le aziende, quindi, prima del lancio definitivo di un nuovo programma si pongono l'obiettivo di garantirsi un numero di ordini ed opzioni di acquisto tali da mitigare il rischio d'impresa. A tal scopo i potenziali clienti (compagnie aeree) vengono coinvolti nelle fasi decisionali in modo da avere chiari i rischi connessi al lancio del programma.

La *fase di realizzazione e certificazione del prototipo* rappresenta un aspetto estremamente delicato dello sviluppo prodotto. Dopo la fase di produzione del prototipo, questo è soggetto allo sviluppo delle prove in volo. Solo al superamento di queste ultime l'iter di certificazione che permette di immettere il prodotto sul mercato è avviato. In questa fase, data la complessità tecniche di integrazione dei differenti sistemi il prototipo è soggetto a continue modifiche che portano al miglioramento delle prestazioni, della affidabilità e delle sicurezza nell'involucro di volo al fine di soddisfare tutti i criteri di certificazione.

La figura seguente riporta in modo schematico le differenti fasi di sviluppo di un prodotto innovativo per una filiera ad alta tecnologia come quella aeronautica in cui le esigenze di mercato e lo sviluppo tecnologico convergono nella realizzazione di un nuovo prodotto commerciale.

Figura 1.9.1 – Processo innovativo per il prodotto aeronautico



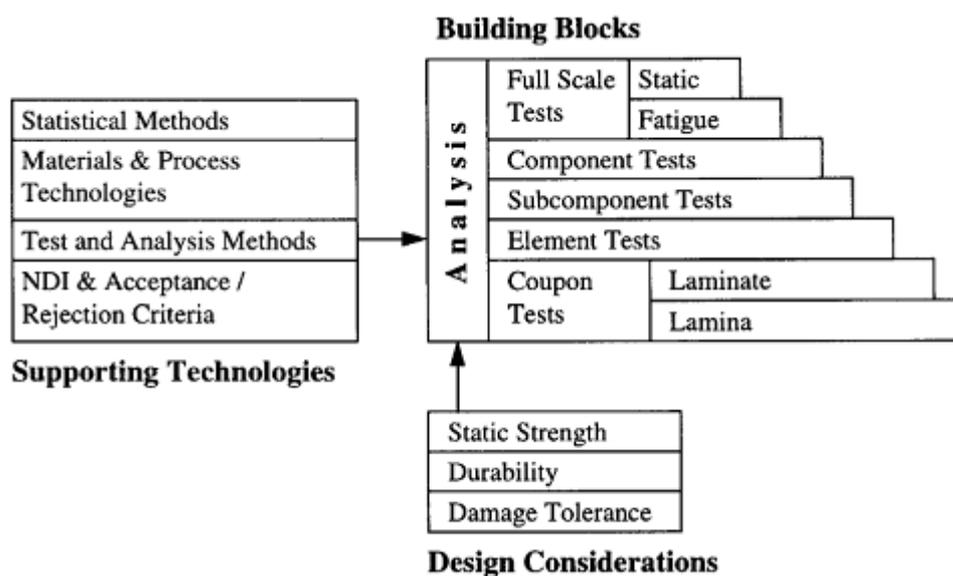
Si passa a descrivere brevemente l’approccio di sviluppo seguito per componenti aerospaziali, con particolare attenzione alla introduzione nel processo certificativo di materiali compositi secondo quanto riportato nel MIL HDBK 17-3F.

Quando l’industria aeronautica ha intravisto la possibilità di impiegare elementi strutturali in materiale composito ha dovuto affrontare il problema della verifica strutturale degli elementi prima che questi fossero effettivamente impiegati. La verifica e certificazione attraverso solo prove sperimentali avrebbe

avuto un costo esorbitante, per cui è stata sviluppata una metodologia di validazione che prevede l'utilizzo sinergico di analisi numerica e validazione sperimentale.

Il modello aeronautico prevede che vengano analizzati e testati componenti a differenti livelli di complessità (ogni livello è definito *building-block*). Ad ogni livello di complessità vengono sviluppate le tecnologie necessarie ed i modelli previsionali, in questo modo i costi complessivi ed i rischi sostenuti sono ridotti, inoltre viene sempre garantito che vengano rispettati i criteri definiti dal cliente e dalla normativa relativamente ai prodotti in sviluppo. Lo sviluppo di metodi di simulazione ed analisi statistiche sui dati permettono di ridurre i piani di sperimentazione, con relativa riduzione dei costi.

Figura 1.9.2 – *Integrazione delle fasi di sviluppo di un componente strutturale secondo l'approccio building-block*



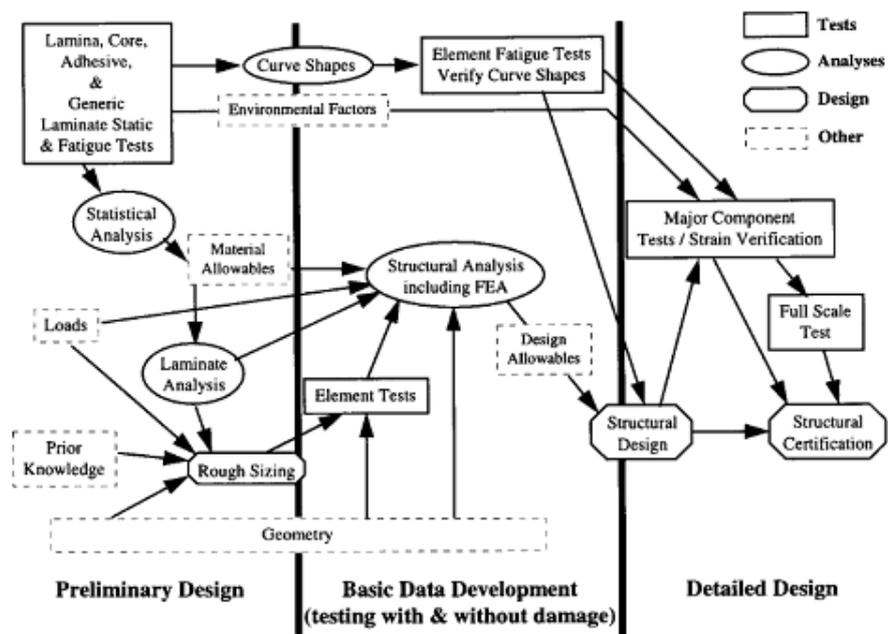
Nell'approccio *building-block* le tecnologie necessarie a supporto ed proprietà necessarie per il dimensionamento dei componenti sono valutate ad ogni livello di sviluppo (figura 1.9.2).

Il livello di conoscenza sviluppato ad ogni singolo livello (attraverso prove sperimentali ed analisi) è combinato con le esigenze strutturali legate alla nuova dimensionalità per sviluppare un livello successivo di sperimentazioni ed analisi. Attraverso una procedura iterativa la progettazione del componente e la verifica

sperimentale dei risultati viene eseguita in modo iterativo finché viene raggiunto un livello di soddisfacente di sviluppo.

Il livello più basso di sviluppo è rappresentato dallo studio di piccoli campioni per la valutazione delle proprietà base dei costituenti, ad esempio a questo livello vengono valutati i carichi massimi ammissibili. Al secondo livello vengono utilizzati i risultati precedenti per calcolare i carichi critici ed individuare aree a rischio failure per la struttura. Vengono poi definiti elementi di geometria complessa meglio rappresentativi del comportamento reale della struttura. La figura seguente riporta ad esempio come dovrebbe essere il flusso di sviluppo per un componente strutturale secondo l'approccio presentato:

Figura 1.9.3 - Sviluppo di un componente secondo l'approccio building-block



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Allen D., "New telecommunications services: Network externalities and critical mass", in *Telecommunications Policy*, 12, 1988

Arora A., Fosfuri A., Gambardella A., *Markets for Technology. The Economics of Innovation and Corporate Strategy*, MA: MIT Press, Boston, 2001

Bass F., "A New Product Growth Model for Consumer Durables", in *Management Science*, 15, 1969

Berklund H., *Interesting Theories of Innovation: the Practical use of the Particular*, Chalmers University of Technology WP No. 1, Goteborg, 2004

Cohen W.M., Levinthal D., "Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation", in *Administrative Science Quarterly*, Vol. 24, 1990

Davis F.D., "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology", in *MIS Quarterly*, 13, 1989

E. Esposito, *Le imprese ad alta tecnologia – il caso dell'industria aeronautica*, CUEN, 1996

Giannessi E., *Le Aziende di Produzione Originaria*, C. Corsi, Pisa, 1960

Hagerstrand T., *The propagation of innovation waves*, Lund Studies in Geography, Lund, 1952

Hagestrand T., *Innovation diffusion as a spatial process*, University of Chicago Press, Chicago, 1967

Lazarsfeld P.F., Menzel H., "Mass media and personal influence", in Schramm W., *The Science of Human Communications*, Basic Bookd, New York, 1963

Mahajan V., Peterson R. A., *Models for innovation diffusion*, Sage, Beverly Hills, 1985

Mahajan V., Muller E., Wind Y., *New product diffusion models*, Kluiver Academic Publisher, Boston, 2000

Mann Bruch K.D., *A development of a propositional diffusion model*, Paper submitted at 2003 Central States Communication Association Convention, 2003

Marchegiani L., Muzzi C., *The diffusion of mobile telephony: which scenarios for UMTS?*, IRSI27 Working group (<http://www2.hh.se>)

Mason W. A., Jones A., Goldstone R., *Propagation of innovations in networked groups*, Proceedings of the Twenty-seventh Annual Conference of the Cognitive

Science Society (July 21–23 2005, Stresa), Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates (in stampa)

Moore G.A., *Crossing the Chasm. Marketing and selling High-Tech products to mainstream customers*, HarperBusiness Book, New York, 1991

Rogers E.M., *Diffusion of Innovations*, Free Press, New York, 1962; 3rd edition, Free Press, New York, 1985

Rosemberg N., “On technological expectations”, in *Economic Journal*, 86, 1976

Rosenkopf L., Abrahamson E., “Modeling Reputational and Informational Influences in Threshold Models of Bandwagon Innovation Diffusion”, in *Computational and Mathematical Organization Theory*, 5, 1999

Ryan B., Gross N., “The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities”, in *Rural Sociology*, 8(1), 19

Tarde G., Parsons E.W.C., *The laws of imitation*, Holt, New York, 1903

Valente T.W., “Social network thresholds in the diffusion of innovations”, in *Social Networks*, 18, 1996

Vinding A.K., *Absorptive capacity and innovative performance: a human capital approach*, Paper presented at the 2002 DRUID (Danish Research Unit for Industrial Dynamics) Winter Conference.

Volpato G., *Concorrenza. Impresa, Strategie*, Bologna, Il Mulino, 1995.

CAPITOLO II – MATERIALI AVANZATI E RELATIVA DIFFUSIONE NELL’AMBITO DEI TRASPORTI

2.1 NUOVI BISOGNI E RISPOSTE TECNOLOGICHE

La risoluzione di molti dei moderni bisogni di mercato richiede l'impiego di materiali che offrano peculiari combinazioni di diverse proprietà difficilmente presenti contemporaneamente nei materiali di più tradizionale impiego, quali le leghe metalliche convenzionali, i ceramici ed i polimeri.

Ad esempio, l'uso di materiali compositi permette di alleggerire componenti strutturali ed al contempo di migliorare la prestazione in termini di smorzamento vibro-acustico attraverso l'addizione del fonoassorbente all'interno della laminazione strutturale.

Le imprese sono alla continua ricerca di materiali strutturali che presentino basse densità e al contempo buona resistenza, buona rigidezza, buona resistenza all'abrasione ed all'impatto e non siano facilmente soggetti a fenomeni di corrosione. In altre parole, viene ricercata una particolare combinazione di parecchie caratteristiche. Generalmente i materiali maggiormente resistenti sono anche relativamente densi, presentano cioè indici di bontà piuttosto bassi; inoltre, spesso l'aumento di resistenza e di rigidezza di un materiale porta anche alla diminuzione della sua capacità di resistenza agli impatti.

La possibilità di combinare diverse proprietà in un unico materiale e di ampliarne il campo di impiego è stata ottenuta facendo uso dei cosiddetti materiali compositi ovvero materiali costituiti da due o più componenti, chiaramente identificabili, i quali conferiscono al prodotto finito delle proprietà diverse da quelle caratteristiche dei singoli componenti¹⁴. I materiali compositi rappresentano, oggi, per molte produzioni un'innovazione rispetto ai

¹⁴ Il termine “composito” è del tutto generico ed indica un complesso di materiali, tra loro diversi, che uniti svolgono un lavoro che individualmente non sarebbero in grado di realizzare.

“tradizionali” materiali metallici¹⁵ e per le loro elevate capacità prestazionali trovano larga applicazione in tutti i campi dell’ingegneria.

Un composito risulta caratterizzato da due o più fasi chimicamente distinte, insolubili e facilmente distinguibili in modo da sfruttare nel modo migliore le caratteristiche positive di tutti i costituenti. Molti materiali compositi sono costituiti da due fasi: matrice e fase dispersa di rinforzo. La matrice, è in forma continua, e ha per lo più lo scopo di assicurare una certa forma al pezzo nonché quello di proteggere e trasmettere in modo uniforme il carico alla fase di rinforzo. L’altra, o le altre fasi, è rappresentata da un componente discontinuo: trattasi del rinforzo, carica o filler dir si voglia atto ad assorbire la maggior parte delle sollecitazioni meccaniche.

L’idea di base dei compositi è quella di ottimizzare, in termini di caratteristiche meccaniche e leggerezza, le prestazioni dei materiali cosiddetti convenzionali. Combinando, infatti, un materiale con una certa proprietà (p.e. un polimero), con un altro di proprietà differenti (p.e. fibre di vetro), è possibile ottenere un materiale, composto dai due, che ne esalti le caratteristiche migliori.

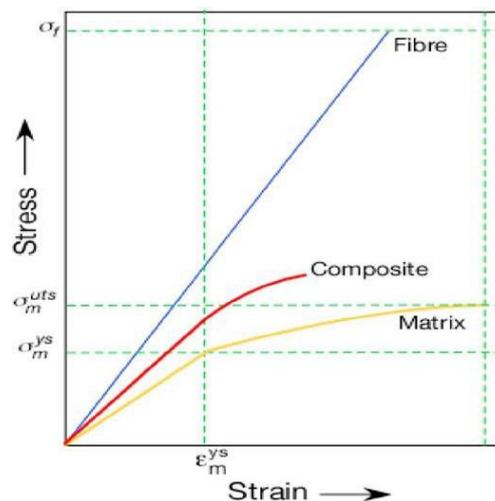
Invero, materiali compositi complessi sono largamente presenti in natura: nel legno delle piante un polimero di natura fibrosa, la cellulosa è tenuta assieme da sostanze cementanti, come la lignina; nelle ossa degli animali il tessuto connettivo contiene particelle di idrossiapatite. L’utilizzo dei compositi come materiali da costruzione ha origini antichissime: già nell’antico Egitto era usanza preparare i mattoni partendo da una miscela di fango rinforzato con paglia ed essiccato al sole.

Un materiale composito è quindi un materiale multifase creato artificialmente e diverso da quelli che si trovano in natura: in base al *principio delle azioni combinate*, l’ottimizzazione di una proprietà viene ottenuta mediante l’attenta e studiata combinazione di due o più materiali differenti a costo anche di peggiorarne alcune altre. Le proprietà finali di tali materiali dipendono strettamente dalle proprietà delle fasi costituenti, dalle loro quantità relative e dalla geometria delle fasi disperse, ossia forma, dimensione, distribuzione e orientamento degli elementi di rinforzo.

¹⁵ Mentre le leghe metalliche presentano caratteristiche termo-meccaniche di omogeneità e di isotropia, i compositi si caratterizzano per una spiccata anisotropia sia delle proprietà elastiche sia delle proprietà di resistenza.

La più importante caratteristica dei materiali compositi è che possono essere progettati e preparati partendo da opportuni componenti in modo tale da ottenere le proprietà finali desiderate. Quindi il concetto della progettazione è di fondamentale importanza: a differenza di quanto avviene per altri materiali, nei quali la struttura viene preparata dopo averne progettato la forma e calcolate le dimensioni, note le proprietà del materiale costituente, nel caso di materiali compositi la struttura può essere realizzata contemporaneamente al materiale che la costituisce, e il materiale progettato e fabbricato con le proprietà desiderate in funzione delle proprietà che si vogliono attribuire alla struttura. La progettabilità costituisce senz'altro la caratteristica più "stimolante" di un materiale composito, unico tipo di materiale che può essere prodotto nella forma definitiva e con le proprietà volute mentre viene prodotto.

Figura 2.1.1 – Il Principio delle Azioni combinate per la resistenza meccanica



Esistono diversi tipi di materiali compositi, classificabili a seconda dei materiali costituenti: in particolar modo in base al tipo di materiale di cui è costituita, la matrice assegna il nome ai vari tipi di compositi; avremo così compositi organici, metallici o ceramici a seconda che la matrice sia di materiale organico, metallico o ceramico. Tale distinzione, ancor prima che per motivi costruttivi o meccanici, si rende tanto più utile quanto più si risentono gli effetti della temperatura di esercizio. La matrice, infatti, deve poter rimanere allo stato solido e non viscoso per poter assicurare una certa tenuta tra gli elementi della fase di rinforzo. A tal proposito si può fare riferimento al seguente schema:

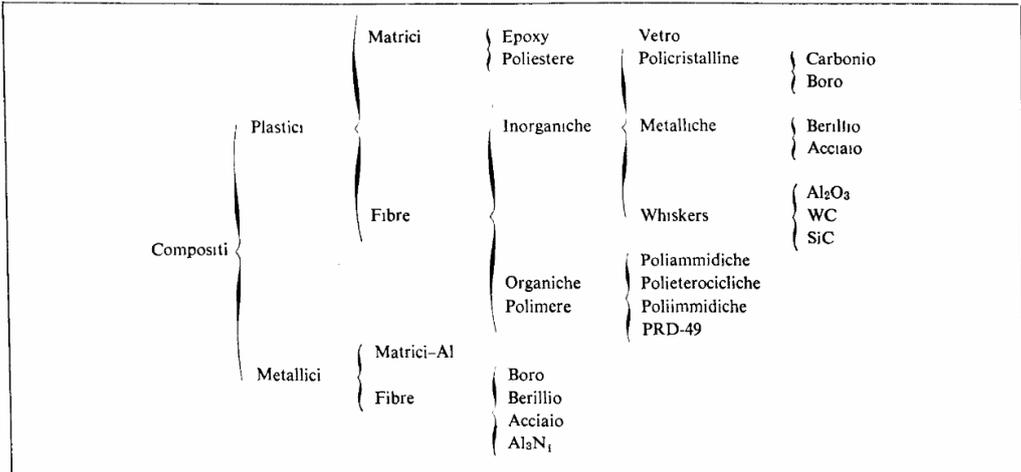
Temperatura di esercizio max MATRICE ORGANICA <250 °C MATRICE METALLICA < 1000 °C MATRICE CERAMICA > 1000 °C

I rinforzi, atti ad assorbire la maggior parte delle sollecitazioni meccaniche, possono a loro volta essere di varia natura e forma: particelle ovvero microsfeere e fibre (lunghe o corte). In funzione delle dimensioni della fase di rinforzo, i compositi si possono quindi distinguere in:

- **Compositi particellari** Sono rinforzati con particelle o microsfeere, la cui funzione è quella di ridurre la quantità di matrice impiegata e, di conseguenza, il peso del sistema matrice.
- **Compositi fibro-rinforzati** La fase dispersa è costituita da fibre (lunghe o corte)¹⁶ che costituiscono l'elemento resistente del materiale composito, oltre a determinarne le proprietà elettriche e i coefficienti di espansione termica.

I rinforzi possono essere inoltre di diversa natura: metallica, vetrosa, ceramica, organica ecc. Una classificazione sommaria è la seguente:

Figura 2.1.2 – *Classificazione dei compositi*



impiegate nei processi di injection molding. Le fibre lunghe, vengono tagliate durante il processo di fabbricazione del materiale composito, sono usate così come si presentano o sotto forma di tessuti.

I materiali compositi utilizzati in ingegneria sono tipicamente costituiti da fibre continue di elevato modulo tenute insieme da una matrice essenzialmente omogenea; a tali materiali si dà la denominazione di compositi avanzati¹⁷.

Nel campo dell'industria dei trasporti ampiamente intesa, i compositi rinforzati con fibre lunghe sono quelli che trovano il maggiore impiego; ciò è dovuto ad una molteplicità di motivi, tra i quali spiccano la possibilità di ottenere una forte integrazione strutturale e l'introduzione di processi automatici nella fase di produzione e riduzioni dei pesi strutturali.

SETTORE INDUSTRIALE	ESEMPI
AERONAUTICO - AEROSPAZIALE	parti di ali e code, fusoliere, antenne, pale di elicottero, carrelli di atterraggio, sedili, pavimenti, pannelli interni, serbatoi, involucri esterni e con terminali di razzi e missili, tubi di lancio
AUTOMOBILISTICO	parti di carrozzeria, cabine per camion, spoilers, quadri comandi, pannelli porta-strumenti, alloggiamenti per luci, paraurti, molle per sospensioni, organi di trasmissione, ingranaggi, cuscinetti
NAVALE - MARINO	scafi, ponti, alberi, vele e relative stecche, profili strutturali, sagole di salvataggio, boe d'ancora, protezioni per motori, pannelli interni

L'applicazione dei materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre nei settori dei trasporti può seguire due strade:

¹⁷ In generale è possibile definire come “avanzati” quei materiali che possiedono proprietà meccaniche, termiche, chimiche, elettriche decisamente superiori rispetto ai materiali tradizionali o che presentano elevati livelli prestazionali derivanti da particolari e inedite conformazioni chimico-fisiche. Si tratta di materiali “progettati su misura” per una specifica esigenza, ottimizzando le prestazioni espresse in relazione al “contenuto” materico.

- la creazione di nuovi componenti o la sostituzione diretta di quelli esistenti.
- l'integrazione di una molteplicità di parti in metallo in un'unica struttura in composito.

Come verrà più dettagliatamente descritto nel Capitolo III, la possibilità di ottenere materiali leggeri che permettano un risparmio di carburante, è stata, ed è tutt'ora, uno dei punti forza per lo sviluppo dei compositi nel settore dei trasporti. La sostituzione di componenti con altri realizzati in composito e quindi più leggeri, non solo contribuisce al risparmio energetico, ma si ripercuote anche nelle dimensioni del motore, del sistema frenante e dei serbatoi che potranno così subire sensibili riduzioni. Un peso ridotto migliora anche le prestazioni dinamiche del veicolo rendendolo più maneggevole e reattivo.

I vantaggi derivanti da una maggiore integrazione strutturale permettono di ridurre in modo significativo il numero delle singole operazioni di produzione e spesso anche il costo finale del componente.

Bisogna però tener presente che vi sono differenze notevoli per quanto riguarda l'applicazione dei compositi in campo aeronautico rispetto all'industria automobilistica. La differenza più evidente è legata alle richieste produttive dei due settori: in aeronautica il progetto strutturale viene ottimizzato per raggiungere determinate prestazioni richieste e in base a questo viene selezionato il processo produttivo più adatto, ma spesso anche il più costoso in termini di tempo e risorse. Al contrario, l'industria automobilistica richiede una velocità di produzione maggiore in grado di fornire i componenti che rientrino in un determinato costo unitario. Quindi, per prima cosa, vengono selezionati i processi produttivi in base ai volumi richiesti e la progettazione del componente dovrà adattarsi al processo di fabbricazione individuato¹⁸.

¹⁸ Il discorso cambia drasticamente quando si passa alle vetture da competizione ed alle supercar. In Formula 1 i compositi a fibra di carbonio vengono utilizzati per la totalità delle strutture che compongono la vettura, anche per particolari piccoli e non strutturali quali la pedaliera, il volante o i condotti di ventilazione dei freni. In questo caso si torna ad una progettazione pensata utilizzando le metodologie e le tecnologie aeronautiche.

2.2 SVILUPPO E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI AVANZATI: FIBRE DI RINFORZO E MATRICI

Il primo composito a matrice polimerica risale al 1908 ed era formato da resine fenoliche e fibre di cellulosa che, oltre all'azione rinforzante, avevano lo scopo di ridurre lo sviluppo di prodotti gassosi in fase di stampaggio a caldo. Da allora i materiali compositi hanno raggiunto lo status di commodity negli anni '40 con le fibre di vetro in poliesteri insaturi. La tabella seguente mostra una ordinata cronologia dello sviluppo dei materiali compositi polimerici.

Tabella 2.2.1– *Cronologia dello sviluppo dei materiali compositi polimerici*

Anno	Materiale
1909	Compositi con matrice fenolo-formaldeide
1928	Compositi con matrice urea-formaldeide
1938	Compositi con matrice melamminica
1942	Compositi con fibra di vetroresina poliestere insatura
1946	Compositi a matrice epossidica
1946	Compositi nylon-vetro
1956	Compositi fenolica-asbesto
1964	Compositi con fibre di carbonio
1965	Compositi con fibre di boro
1969	Compositi ibridi carbonio-vetro
1972	Compositi con fibre aramidiche
1975	Compositi ibridi grafite-aramidiche

In generale, i materiali compositi si caratterizzano per:

- bassa densità,
- alta resistenza meccanica,
- elevata rigidità rispetto al peso specifico,
- eccellente curvabilità,
- grande versatilità plastica e conduttività termica e elettrica.

caratteristiche queste, che rendono tale tipologia di materiali più leggeri e con alto gradiente di sicurezza rispetto alla corrosione e allo stress termico. In virtù di queste loro ottime caratteristiche di resistenza, rigidità e leggerezza, i

materiali compositi consentono di realizzare strutture con uguali prestazioni, ma caratterizzate da sensibili riduzioni di peso, per cui di conseguenza tali materiali sono oggi qualificati come “avanzati” e preferiti a quelli tradizionali in molte lavorazioni,

Le fibre più comunemente impiegate nei compositi avanzati sono le fibre di carbonio, grafite, Kevlar, vetro e boro. Una caratteristica generale sostanzialmente valida per tutti i tipi di fibre è la seguente: tanto maggiore è il modulo elastico della fibra, tanto minore è la sua resistenza a trazione. Le fibre di carbonio sono quelle più versatili (consentono di adattare il materiale e le sue configurazioni quasi ad ogni possibile applicazione) e di maggiore impiego nel campo dei trasporti (disponibili commercialmente con un'ampia varietà di prodotti sotto forma di nastri pre-impregnati unidirezionali o tessuti).

Le matrici per compositi avanzati sono altrettanto varie: si utilizzano materiali polimerici (termoindurenti e termoplastici), metallici e anche ceramici. Attualmente la resina epossidica rappresenta la matrice termoindurente di maggiore impiego nelle strutture aerospaziali. In tutti i materiali termoindurenti, la matrice viene polimerizzata in una struttura densa ed a basso contenuto di vuoti per effetto dell'esposizione a valori fissati di temperatura e pressione, per un determinato tempo. Un elemento importante nella determinazione del comportamento di un dato composito è la composizione della matrice che tiene insieme le fibre. La formulazione scelta per la matrice determina il ciclo di cura e influisce su molte proprietà; tra queste: resistenza a taglio, a compressione e a creep, resistenza termica, sensibilità all'umidità e a raggi ultravioletti, caratteristiche queste che si ripercuotono sulla stabilità strutturale del materiale ottenuto. Le proprietà meccaniche di un materiale composito sono proporzionali al quantitativo di fibre orientate nella direzione considerata. Caratteristiche resistenziali e di rigidità ridotte possono derivare dalla resistenza a taglio della matrice. Difatti, sia la resistenza sia il modulo elastico di un composito a livello di lamina si riducono in maniera considerevole quando la direzione di applicazione del carico devia dall'asse longitudinale di allineamento delle fibre. Quindi, a causa delle scarse proprietà in direzione normale a quella delle fibre, i laminati compositi necessitano di essere rafforzati o irrigiditi; ciò viene realizzato impilando più lamine (nastri unidirezionali o tessuti) con orientamenti differenti. Le lamine vengono dunque sovrapposte secondo una sequenza, a formare un laminato. L'impilamento definisce le proprietà meccaniche del laminato e la particolare sequenza è funzione dell'applicazione a cui è destinato il composito;

ad esempio, se il requisito di progetto è quello di fornire resistenza o rigidità in direzione assiale, una elevata percentuale di materiale dovrà essere orientata secondo questa direzione. È buona norma inserire un quantitativo nominale di lamine di rinforzo anche in direzione trasversale per tener conto di eventuali disallineamenti nell'applicazione del carico. I compositi avanzati ad elevate prestazioni sono spesso impiegati in applicazioni in cui il requisito fondamentale è rappresentato dalla rigidità. Di conseguenza, nello sviluppo di nuovi materiali, la tendenza è quella di massimizzare il modulo elastico longitudinale mantenendo al contempo livelli accettabili di resistenza statica, resistenza all'impatto, deformazione a rottura e fracture toughness. Le proprietà a trazione sono dominate dalle fibre; per questo motivo, la scelta del tipo di fibra è imposto dalla particolare applicazione.

Le proprietà a compressione nei laminati unidirezionali dipendono sia dalle fibre che dalla matrice. Mentre il modulo elastico a compressione è dovuto alla fibra, la resistenza a compressione è dettata prevalentemente dal modulo a taglio della matrice. Ma per un materiale omogeneo isotropo il modulo a taglio è legato anche al modulo di Young¹⁹. Perciò, l'impiego di una matrice molto tenace minimizzerà il problema della rottura intra-laminare in un composito soggetto ad un impatto e, inoltre, assicurerà livelli accettabili delle caratteristiche in direzione trasversale. La fracture toughness della matrice è una proprietà molto importante per rallentare la propagazione di cricche e difetti, soprattutto in prossimità delle interfacce tra le lamine. Il mantenimento della resistenza a compressione dopo un impatto è una delle proprietà di maggior rilevanza nei compositi ad alte prestazioni. A questo proposito si deve sottolineare che, nonostante sia auspicabile prevenire la comparsa di danni, il contenimento e la capacità di lavorare in presenza di danneggiamenti rivestono un'importanza cruciale nelle strutture di impiego aeronautico e spaziale. Quindi, per impedire che fessure generate da urti portino a ingenti delaminazioni, è necessario che il composito in esame possieda sufficiente fracture toughness interlaminare. Si va adesso ad analizzare in dettaglio quali siano le funzioni e le caratteristiche delle fibre di rinforzo e delle matrici.

¹⁹ Dato un materiale omogeneo isotropo, indicando con E il modulo elastico longitudinale, con G il modulo elastico tangenziale e con ν il rapporto di Poisson, vale la seguente: $G = E / 2(1+\nu)$.

2.2.1 Fibre di rinforzo

Le fibre di rinforzo, generalmente di sezione circolare, svolgono il compito fondamentale di portare il carico e conferiscono al materiale composito buone proprietà meccaniche. In generale, tanto minore è il diametro della fibra quanto maggiore è la sua resistenza. Per materiali cristallini la resistenza e il modulo elastico sono influenzati dall'orientamento dei cristalli nella fibra; ad esempio nelle fibre di carbonio i cristalli di grafite sono orientati nel senso della fibra e questo produce una maggior resistenza. Anche la densità del materiale di cui sono composte le fibre è un parametro molto importante, se il risultato finale deve essere un composito di basso peso ed elevata resistenza. Fibre leggere si ottengono generalmente da elementi con basso numero atomico, come carbonio, azoto, ossigeno, berillio, boro e silicio; fra queste le fibre di vetro (formate principalmente da silicio e ossigeno), sono già considerate pesanti. I valori di resistenza e modulo elastico delle fibre sono molto elevati; gli stessi valori relativi ai materiali compositi sono molto più bassi essendo presente la matrice e non potendo disporre tutte le fibre nella stessa direzione. I vantaggi che si possono ottenere rispetto ai materiali convenzionali sono comunque considerevoli.

Figura 2.2.1.1 – Curva sforzo-deformazione dei vari tipi di fibre

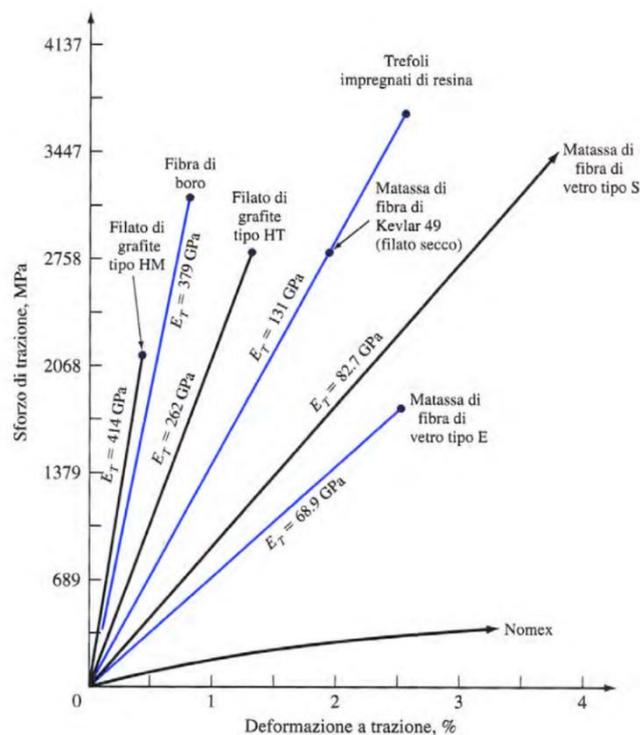


Tabella 2.2.1.1 – Proprietà meccaniche di alcune fibre di rinforzo

<i>Materiali</i>	<i>Peso specifico (Mg/m³)</i>	<i>Resistenza a trazione (GPa)</i>	<i>Resistenza specifica (GPa m³/Mg)</i>	<i>Modulo elastico (GPa)</i>	<i>Modulo specifico (GPa m³/Mg)</i>
Whisker					
Grafite	2.2	20	9.1	700	318
Nitrato di silicio	3.2	5-7	1.56 – 2.2	350 – 380	109 – 118
Ossido di alluminio	4.0	10-20	2.5 – 5.0	700 – 1500	175 – 375
Carburo di silicio	3.2	20	6.25	480	150
Fibre					
Ossido di alluminio	3.95	1.38	0.35	379	96
Aramide (Kevlar 49 TM)	1.44	3.6 - 4.1	2.5 – 2.85	131	91
Carbonio ^g	1.78 – 2.15	1.5 – 4.8	0.70 – 2.70	228 – 724	106 – 407
Vetro E	2.58	3.45	1.34	72.5	28.1
Boro	2.57	3.6	1.40	400	156
Carburo di silicio	3.0	3.9	1.30	400	133
UHMWPE (Spectra 900 TM)	0.97	2.6	2.68	117	121
Fili Metallici					
Acciaio ad alta resistenza	7.9	2.39	0.30	210	26.6
Molibdeno	10.2	2.2	0.22	324	31.8
Tungsteno	19.3	2.89	0.15	407	21.1

2.2.2 M

La matrice ha il compito fondamentale di dare forma e consistenza al manufatto. Possiede inoltre le seguenti funzioni aggiuntive:

1. trasferisce il carico in maniera omogenea tra le fibre;
2. protegge le fibre dall'ambiente esterno, impedendo il contatto con umidità, agenti corrosivi e ossidanti, che possono portare all'infrangimento e alla rottura prematura del componente;
3. mantiene le fibre di rinforzo nel giusto orientamento e impedisce il loro contatto reciproco;

4. fornisce resistenza alla propagazione di fessure e al danno da impatto.

Si possono classificare le matrici di possibile uso nei compositi plastici in due tipi fondamentali di resine²⁰: resine termoindurenti; resine termoplastiche.

Matrici polimeriche 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 classificazione di tali resine può essere fatta in base al campo di temperature alle quali le matrici dovranno lavorare.

Per temperature minori di 250°C si utilizzano le **resine epossidiche** che 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. Per temperature intermedie, cioè tra i 150° ed i 250°C, si trovano le resine epossidiche, come la *Novolac*, le epossidiche standard e le cicloinfatiche. Queste ultime 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.

Seguono le **resine poliestere** che trovano un'ottima applicazione in unione alle fibre di vetro (vettoresina); le poliestere sono caratterizzate da un basso

²⁰ Con *resina artificiale* (o *resina sintetica*) si intende in genere un materiale viscoso, di aspetto simile alla resina vegetale, capace di indurirsi a freddo o a caldo. Si tratta in genere di un'ampia classe di differenti e complessi polimeri, che si possono ottenere con una grande varietà di metodi e materie prime. Fra le resine sintetiche più comuni citiamo le *resine fenoliche*, le *resine epossidiche*, le *resine poliestere insature* (UPR, Unsaturated Polyester Resin) e le resine vinil-estere (VE). Una resina sintetica non viene in genere commercializzata come tale, ma ne vengono venduti i suoi precursori, nella forma di due componenti separati, l'oligomero e l'agente reticolante, che vengono miscelati al momento dell'uso. La miscelazione innesca la reazione di reticolazione che trasforma l'oligomero, solitamente un liquido oleoso poco viscoso capace di adattarsi ai più piccoli dettagli dello stampo, nel polimero solido, una materia plastica solitamente trasparente che può venire successivamente lavorata.

costo, da un breve tempo di polimerizzazione e da buone caratteristiche meccaniche. Esse sono utilizzate in applicazioni ferroviarie, marine, chimiche ed elettriche.

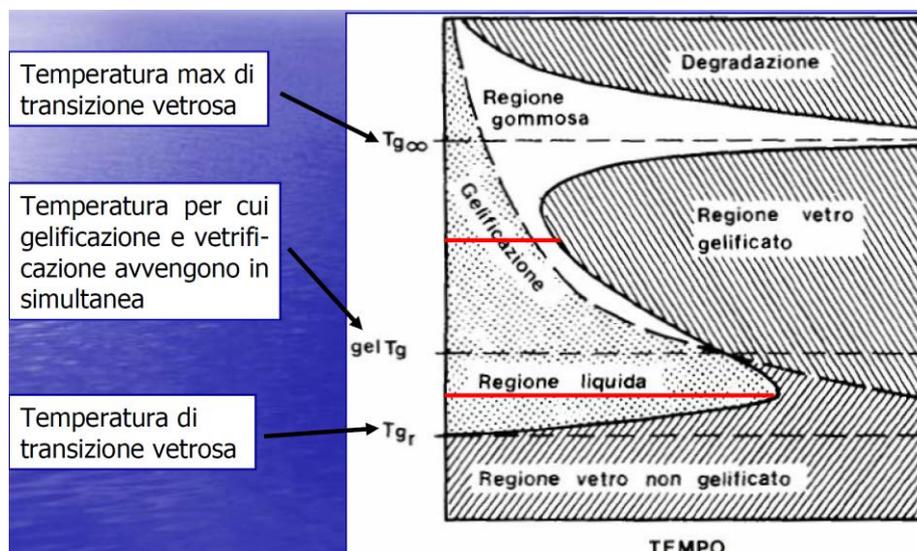
Per temperature oltre i 250°C si utilizzano le **resine fenoliche** che assicurano le stesse proprietà delle resine epossidiche anche ad alte temperature. Gli svantaggi principali, di queste ultime, sono legati alla elevata pressione necessaria durante la polimerizzazione, all'alto contenuto di vuoti ed al caratteristico colore nero. Le resine fenoliche trovano impiego in mezzi di trasporto dove è richiesta una certa resistenza al fuoco.

Si ricordano le **resine viniliche**, che presentano le stesse peculiarità delle resine poliestere ma con un legame fibra-matrice più forte; ed i polimeri poliammidici, che mantengono buone proprietà meccaniche nonostante le alte temperature di esercizio.

Il processo di reticolazione

Le matrici sono reticolate tramite un processo 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 2.2.2.1 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 "curing". Si possono riscontrare tre temperature critiche. Esse sono: $T_{g\infty}$ la temperatura massima di transizione vetrosa per sistemi completamente vulcanizzati; $gel\ T_g$ la temperatura isoterma alla quale la gelificazione e la vetrificazione avvengono simultaneamente; e la T_{g_r} , la temperatura di transizione vetrosa dei reagenti.

Figura 2.2.2.1 – Il diagramma TTT nel processo di "curing"



Se un materiale è vulcanizzato isotermicamente sopra la $T_{g\infty}$, 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 $T_{g\infty}$ 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. Alla temperatura di gel T_g , si ha vetrificazione appena il materiale gelifica. A temperatura al disotto della gel T_g ma sopra la T_{gr} il liquido viscoso può vetrificare semplicemente tramite un aumento del peso molecolare e se le reazioni chimiche sono congelate dalla vetrificazione il materiale non gelifica.

Nella Figura 2.2.1.1 si nota che il tempo che occorre per passare allo stato vetroso fra la T_{gr} e la T_g passa attraverso un massimo. Questo comportamento riflette la competizione nella dipendenza dalla viscosità, dalla temperatura e dal tempo del sistema. Se la temperatura di immagazzinamento è sotto la gel T_g , il fluido si converte in un solido vetrificato di basso peso molecolare stabile ma che può essere ancora liquefatto tramite calore e, quindi, vulcanizzato.

Sopra la gel T_g il materiale immagazzinato avrà invece una vita finita per i susseguenti processi. In generale, se la $T_{curing} < T_{g\infty}$ il materiale vetrifica e non è possibile una conversione chimica completa. Di solito il materiale viene post-cured sopra la $T_{g\infty}$ per sviluppare l'optimum delle proprietà. Per alcuni materiali polimerici la $T_{g\infty}$ può essere sopra i limiti di stabilità termica, nel qual caso non è ottenibile la completa conversione chimica.

In sintesi, nel caso di *matrici polimeriche termoindurenti*, a livello molecolare si ha la formazione di un reticolo tridimensionale tenuto insieme da forti legami co-valenti. La resina allo stato fluido subisce una serie di

trasformazioni passando per uno stato gelificato, uno gommoso sino a passare allo stato vetroso. Ne consegue che un polimero termoindurente non può essere più fuso e riformato mediante fornitura di calore o pressione.

Matrici polimeriche termoplastiche

Nel caso di ***matrici polimeriche termoplastiche***, (polimeri amorfo o polimeri semicristallini), tra le singole molecole ci sono dei legami secondari come le forze di Van der Waals e legami di tipo idrogeno \Rightarrow un polimero termoplastico può essere ammorbidito col calore, fuso e riformato tutte le volte che lo si desidera.

Si definiscono termoplastiche le resine a struttura molecolare lineare che durante lo stampaggio a caldo non subiscono alcuna modificazione chimica. Il calore provoca la fusione e la solidificazione avviene durante il raffreddamento. È possibile ripetere il ciclo per un numero limitato di volte poiché troppi riscaldamenti possono degradare le resine. Ci sono due classi di polimeri: quelli totalmente amorfi ed i semicristallini. 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%. I polimeri semicristallini sotto la temperatura di fusione T_m , sono formati da regioni amorfe 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 amorfe si compattano come i polimeri amorfi, mentre le regioni cristalline, sono aggregati di cristallite, catene piegate, usualmente sotto forma di

sferuliti. 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.

La Figura 2.2.2.2 mostra il volume specifico al variare della temperatura per polimeri amorfi e semicristallini

Figura 2.2.2.2 – *Variatione del volume specifico in f(T) per amorfi e semicristallini*

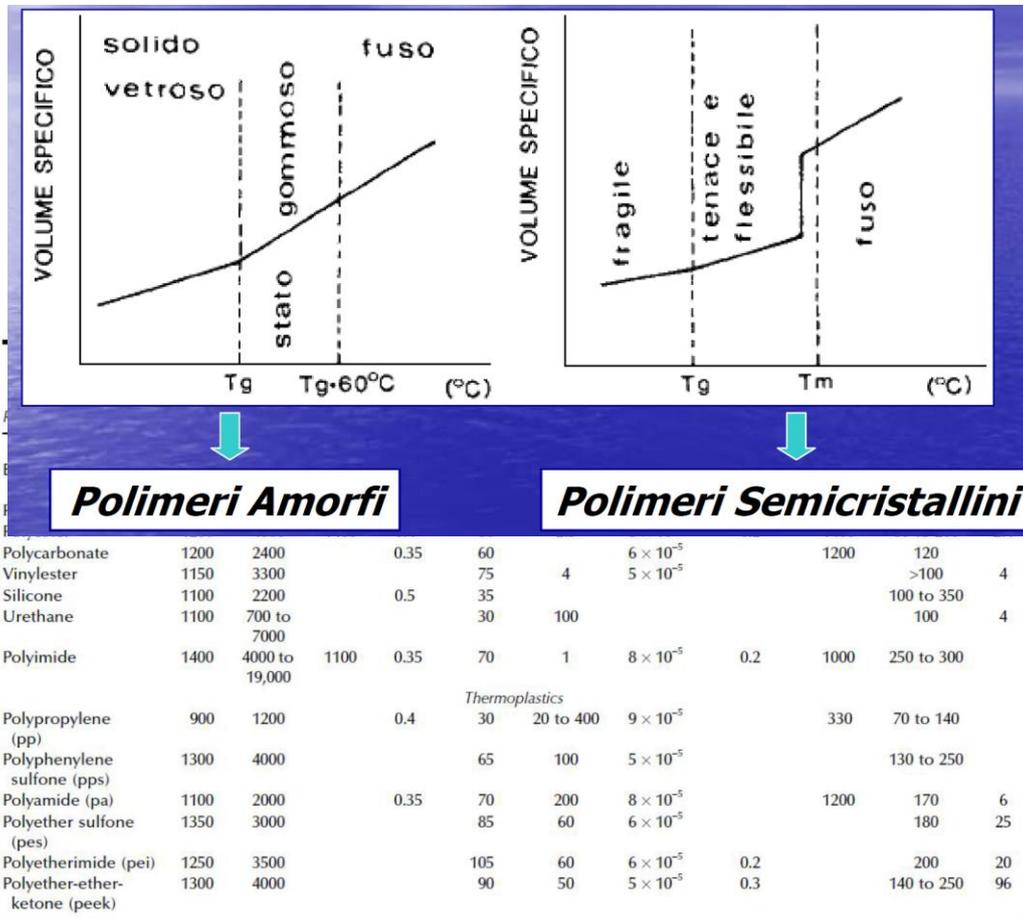


Tabella 2.2.2.1 – *Principali vantaggi e svantaggi dei polimeri termoindurenti e termoplastici*

	Termoindurenti	Termoplastici
Qualità	○	●
Stoccaggio	○	●
Durezza	○	●
Resistenza ai solventi	●	●
Tempi di processo	SLOW	FAST
Riduzione dei costi	○	●
Elevati volumi di produzione	○	●
Realizzazione parti complesse	○	●
Aderenza	●	○
Proprietà a lungo termine (creep, fatica)	●	○

2.3 CONFRONTO TRA COMPOSITI E METALLI: VANTAGGI E SVANTAGGI

I metalli sono per loro natura omogenei ed isotropi, possiedono cioè le medesime proprietà meccaniche in ogni punto e in tutte le direzioni; il loro comportamento in seguito all'applicazione di un carico è determinato una volta che siano note due sole costanti elastiche. D'altra parte, una lamina unidirezionale o un laminato simmetrico e bilanciato è assimilabile ad un materiale ortotropo, dotato cioè di tre piani di simmetria elastica mutuamente ortogonali. In alcune applicazioni, la sequenza di impilamento è tale che il laminato non è neppure ortotropo, bensì anisotropo. Per definire il comportamento di un materiale ortotropo e di uno anisotropo è necessaria la conoscenza, rispettivamente, di 9 e 21 costanti elastiche. Di seguito si riportano i vantaggi e gli svantaggi dell'impiego dei materiali compositi rispetto ai materiali metallici.

Vantaggi

I materiali compositi presentano proprietà strutturali molto elevate con indici di bontà (resistenza specifica, rigidità specifica, etc) molto superiori a quelli dei materiali metallici convenzionali.

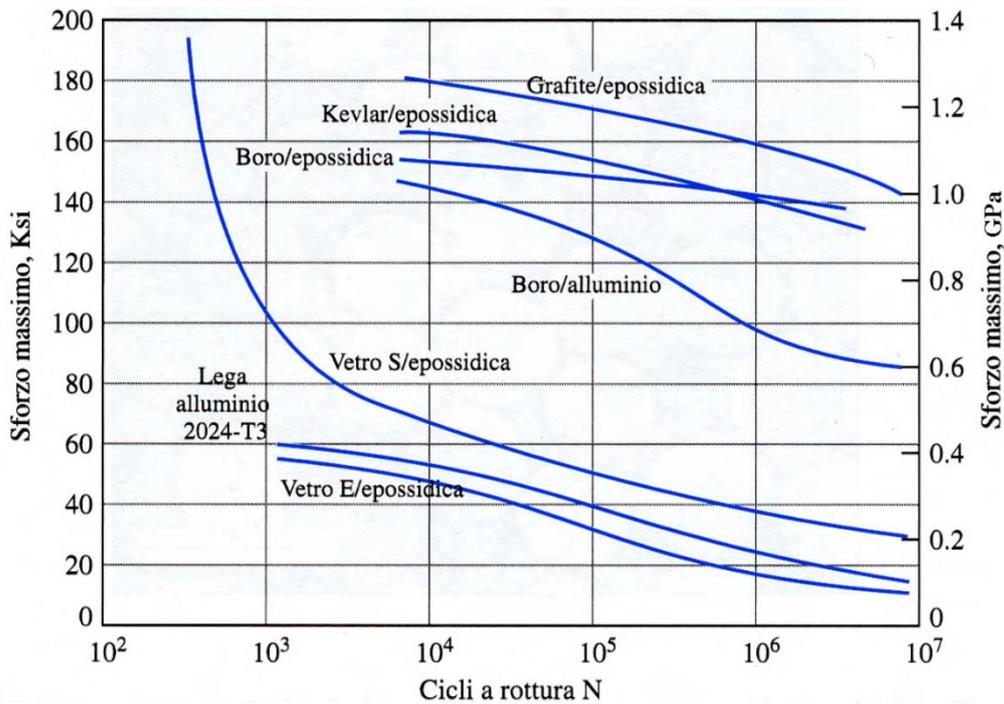
Tabella 2.3.1 – *Indici di bontà dei materiali compositi*

Materiali	Modulo (GPa)	Resistenza (MPa)	Densità (g/cm ³)
Carbonio-eposs. T300 (Vf=0.60)	148	1300	1.50
Carbonio-eposs. IM6 (Vf=0.66)	206	3500	1.60
Aramidica-eposs. Kevlar49 (Vf=0.60)	76	1400	1.46
Vetro-epossidica Eglass (Vf=0.45)	39	1100	1.80
Alluminio Lega 7075-T6	71	572	2.80
Acciaio - 1020 trafilato	207	420	7.85
Acciaio - AISI4340 normalizzato	207	1280	7.85

Queste caratteristiche permettono la realizzazione di componenti con un risparmio in peso fino al 30%.

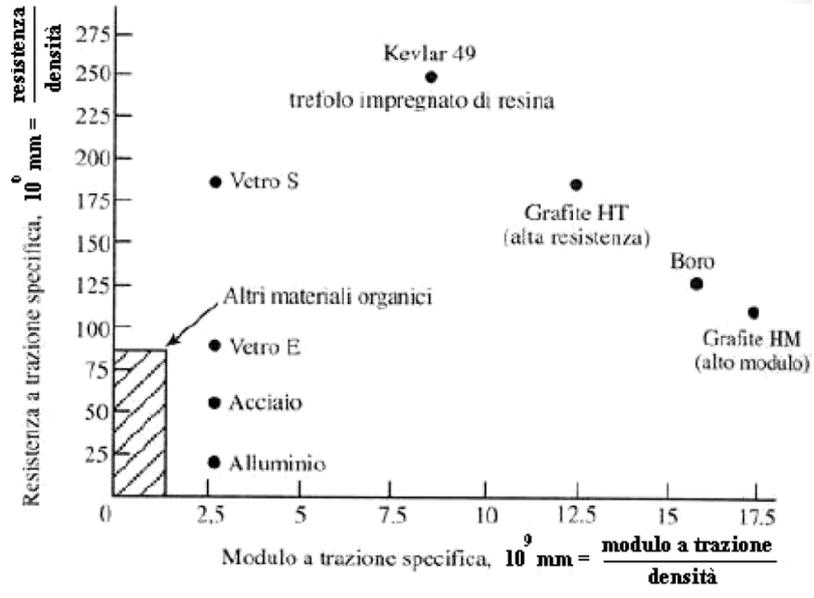
I materiali compositi hanno una elevata resistenza a fatica e possono facilmente essere resi insensibili agli ambienti ossidanti. La Figura 2.3.32 confronta la resistenza a trazione sulla densità con il modulo elastico (rigidezza) sulla densità di diversi tipi di fibre di rinforzo.

Figura 2.3.2 – Resistenza a trazione specifica in funzione del modulo a trazione specifico



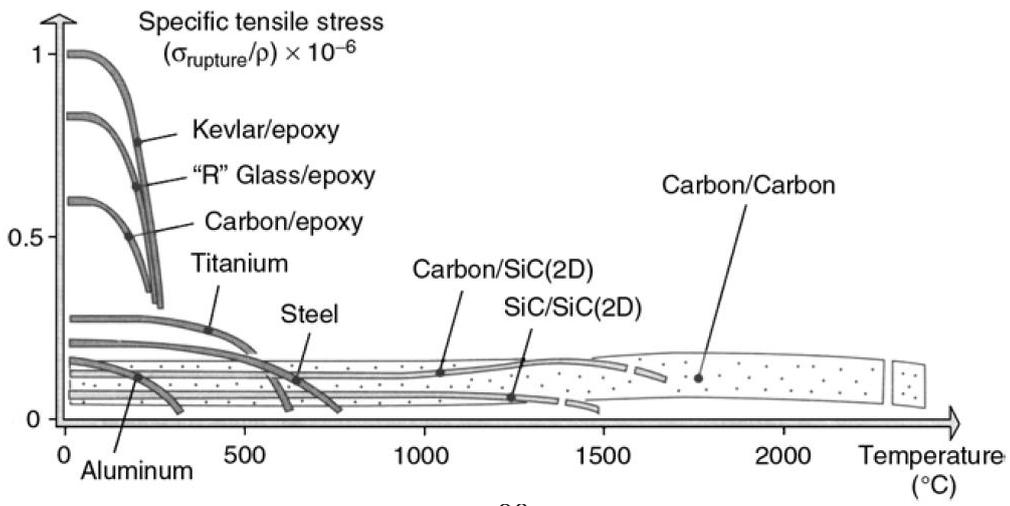
Questo confronto mostra gli eccezionali rapporti resistenza meccanica-peso e rigidezza-peso delle fibre di carbonio e aramidiche (Kevlar 49) rispetto alle stesse proprietà dell'acciaio e dell'alluminio. Grazie a queste proprietà favorevoli, i compositi rinforzati con fibre di carbonio e con fibre aramidiche hanno sostituito i metalli in molte applicazioni per l'industria dei trasporti

Figura 2.3.3 – Resistenza a trazione specifica in funzione del modulo a trazione specifico



I materiali compositi hanno una alta resistenza specifica in funzione della temperatura. Ciò consente di aumentare il controllo dell'Infiammabilità, l'emissione di fumi e la tossicità.

Figura 2.3.4 – Resistenza specifica dei materiali compositi e metallici in funzione di T



I materiali compositi offrono la possibilità di migliorare la rigidità del componente secondo la direzione della forzante, così da ottimizzare la prestazione finale del componente. I materiali compositi permettono di introdurre metodi di lavorazione automatica con conseguente riduzione dei costi di produzione connessi alla manifattura.

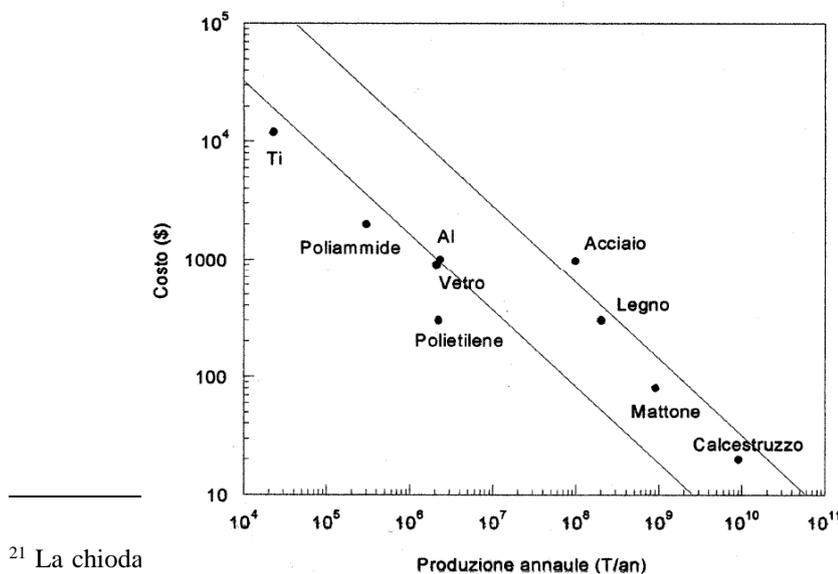
I materiali compositi assicurano una forte integrazione strutturale che è latrice di due effetti positivi: riduzione del numero di componenti strutturali ed eliminazione di una parte o di tutti i rivetti²¹. I materiali compositi presentano ridotti costi di manutenzione/ridotti costi del ciclo di vita.

I materiali metallici sono giunti alla loro maturità metallurgica; ogni piccolo miglioramento di una proprietà è pagato con un forte aumento nel costo di realizzazione. Le possibilità di miglioramento delle prestazioni e dei processi di fabbricazione dei compositi rappresentano un territorio ancora da esplorare e con possibili notevoli margini di miglioramento.

Svantaggi

- Il costo dei materiali costituenti un composito è molto più elevato del costo dei materiali metallici convenzionali.

Figura 2.3.5 – *Relazione tra il costo dei diversi materiali e la quantità prodotta*



²¹ La chioda

in termini di ore di lavoro e mal si presta ai processi automatici. L'installazione di rivetti crea una serie di effetti indotti, quali la fatica e la corrosione dei chiodi.

- i costi di progettazione di manufatti in composito sono più elevati di quelli della controparte in metallo; ciò è dovuto alle analisi strutturali maggiormente complicate e alle onerose campagne di prove necessarie per la caratterizzazione del materiale e l'ottenimento della certificazione del componente.
- La realizzazione delle infrastrutture prototipali e produttive richiede un investimento di capitale iniziale molto elevato.
- Il controllo qualità è molto costoso e presenta difficoltà nella corretta individuazione di eventuali difettologie presenti negli incollaggi.
- Hanno scarsa capacità di assorbimento di energia e sono molto sensibili al danneggiamento da impatto ed alla delaminazione. Il danno da impatto e la rottura per delaminazione devono essere studiati molto attentamente per applicazioni in strutture aeronautiche che devono risultare damage tolerant.
- Causano problemi di corrosione galvanica dovuti all'accoppiamento con metalli in presenza di umidità. Questo fenomeno può essere risolto isolando le zone di contatto tramite l'applicazione di rivestimenti protettivi su entrambi i materiali.
- Si assiste ad una rapida degradazione delle proprietà meccaniche dei compositi in presenza di umidità. L'umidità diffonde nella matrice e determina una diminuzione della temperatura di transizione vetrosa e si assiste ad una forte riduzione delle proprietà del composito dominate dalla matrice

2.4 APPLICAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI AVANZATI PER L'INDUSTRIA DEI TRASPORTI

2.4.1 LE CONDIZIONI DI CONTESTO

I trasporti sono attualmente il settore con il primato per le emissioni annuali di gas serra, determinando più del 20% dei consumi finali di energia il 46% e rappresentando una delle principali voce di spesa al consumo delle famiglie nei paesi avanzati. Accanto alla sfida della decarbonizzazione attraverso la ricerca dell'efficienza energetica del trasporto e l'impiego di fonti energetiche alternative, il sistema di mobilità e trasporto del futuro impone ulteriori sfide connesse alla 1) ricerca di una struttura del veicolo e sistemi di bordo con migliori proprietà funzionali e strutturali, di una maggiore efficienza energetica, in termini di consumi ed emissioni, 2) allo sviluppo di soluzioni in grado di migliorare l'affidabilità e la sicurezza in materia di mobilità, 3) all'implementazione soluzioni di trasporto con bassi costi di realizzazione ed esercizio caratterizzate da elevata disponibilità.

Di seguito si riportano le sfide che nei prossimi anni caratterizzeranno il dominio tecnologico dei trasporti e le possibili aree di intervento per perseguire coerenti obiettivi di sviluppo tecnologico.

Tabella 2.4.1.1 – *Compositi a matrice termoindurente: proprietà e applicazioni*

CHALLENGE	PRINCIPALI AREE DI INTERVENTO PER L'INNOVAZIONE
<i>Realizzazione di veicoli più puliti e silenziosi al fine di migliorarne la sostenibilità ambientale e ridurre il rumore percepito e le vibrazioni</i>	Migliore efficienza dei vettore mediante le tecnologie avanzate di propulsione più pulite e l'utilizzo di fonti energetiche alternative
	Maggiore efficienza dei veicoli attraverso la riduzione del peso e della resistenza aerodinamica e allo scorrimento
	Riduzione dell'impatto ambientale del vettore sia nelle fasi di produzione che in quelle per lo smaltimento dei materiali in esso impiegati alla fine del suo ciclo di vita
	Disponibilità degli input della produzione più efficienti
	Infrastrutture per vettori puliti e più silenziosi

CHALLENGE	PRINCIPALI AREE DI INTERVENTO PER L'INNOVAZIONE
	Intemodalità del trasporto
<i>Miglioramento dei trasporti e della mobilità di persone e merci</i>	Sistemi, materiali e tecniche avanzati per la manutenzione e ricostruzione non intrusive
	Infrastrutture telematiche avanzate (fit for purpose)
	Intelligent Traffic Management Strategies per la riduzione significativa della congestione del traffico
	Gestione integrata di tutte le operazioni ferrotranviarie/protuali/aeroportuali ed in prospettiva verso la gestione dei collegamenti usati dai passeggeri verso e da stazioni/porti/aeroporti
<i>Efficienza nella produzione e manutenzione</i>	Processi di produzione standardizzati al fine di aumentare la produttività nel tempo e ridurre gli scarti
	Impiego di input della produzione disponibili
	Sostenibilità ambientale del processo e delle produzioni a fine vita (riciclabilità)

Riduzione del peso e dei costi di produzione sono due degli obiettivi perseguiti dall'industria aerospaziale e sin da quando i materiali compositi sono stati introdotti in nuove aree di applicazione come l'industria automobilistica, la domanda di materiali a basso costo e di processi di produzione più rapidi per la realizzazione di prodotti più funzionali e per componenti di forma complessa, è aumentata. Allo stesso tempo, requisiti sempre più stringenti di contenimento delle emissioni di CO2 sia nella fabbricazione del prodotto che nell'esercizio di esso ed il massimo ritorno sugli investimenti di capitale, sono alcuni dei più importanti problemi che direttamente influenzano lo sviluppo dei nuovi materiali compositi.

Figura 2.4.1.1 – *Driver di sviluppo per l'industria dei trasporti*

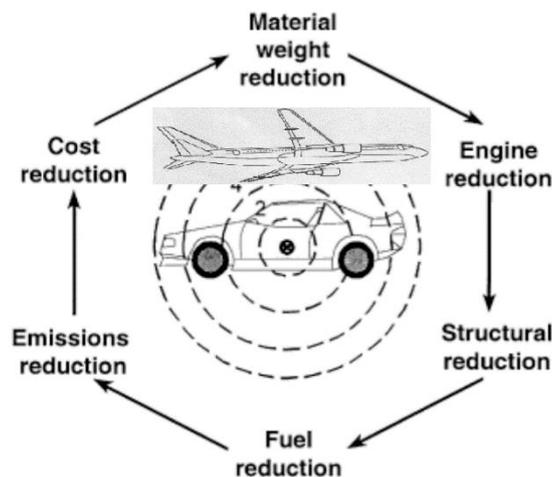


Tabella 2.4.1.2 – *Compositi a matrice termoindurente: proprietà e applicazioni*

Matrice	Proprietà	Temp. utilizzo [°C]	Costo	Settore applicativo	Processi trasformazione	Alcuni produttori
Poliestere	Reticolazione a temperature ambiente, basse proprietà meccaniche, buona resistenza chimica (specialmente agli acidi)	60-150	Basso	Condutture, piccole imbarcazioni, automotive, industria civile	Hand lay-up, RTM, VARTM, filament winding, pultrusione, spray lay-up, compression molding	Dow, Ashland, Reichhold, Scott Bader, Cray Valley, DSM, Matrasur, Mapei
Vinilestere	Migliori proprietà meccaniche delle poliesteri, temperature di reticolazione da ambiente a medie, buona resistenza chimica (specialmente agli acidi)	60-150	Basso	Condutture, navale, automotive, industria civile	Hand lay-up, RTM, VARTM, filament winding, pultrusione, spray lay-up, compression molding	Dow, Ashland, Reichhold, Scott Bader, Cray Valley.
Fenolica	Necessità pressione in fase di reticolazione per evitare formazione di bolle, proprietà meccaniche medie, eccellente resistenza al fuoco	70-170	Basso	Interni, laminati	Compression molding, RTM, filament winding	Dow, J.D. Lincoln, Gurit, Seal.
Epossidica	Eccellenti proprietà meccaniche, necessità di un indurente per la reticolazione, stabilità dimensionale, temperatura di reticolazione da ambiente ad alta, buona resistenza chimica (specialmente agli alcali), adesione ai metalli molto buona	80-215	Medio-Alto	condutture, profilati, automotive, navale, aerospaziale	Hand lay-up, pultrusione, filament winding, RTM, VARTM, autoclave, compression molding	Gurit, Dow, Huntsman, Reichhold, Hexion, Cray Valley, Cytec, Hexcel, ACG, Toray, Seal, Sika, Mapei
Benzoxazine	Proprietà meccaniche eccellenti, temperature di reticolazione da medie ad alte, eccellente resistenza al fuoco	80-250	Medio-Alto	Interni, componenti aerospaziali	autoclave, RTM	Henkel, Huntsman
Ftalonitrile	Buone proprietà meccaniche, temperature di reticolazione da medie ad alte, eccellente stabilità termica	80-250	Alto	Componenti aerospaziali, missili	autoclave, reticolazione in pressa riscaldata, RTM	Maverick, Renegade Materials, JFC Technologies.
Poliuretannica	Buone proprietà meccaniche, temperature di reticolazione da medie ad alte, può essere reticolata con cicli veloci	80-200	Medio-Basso	arredamenti, automotive, navale	RTM, SRIM	Bayer, BASF, Dow, Aptek, BCC Products
Estere-cianato	Buone proprietà meccaniche, alte temperature di reticolazione, la formulazione per la reticolazione deve essere studiata e controllata attentamente per evitare reazioni indesiderate esotermiche, eccellenti proprietà termiche, trasparente alle onde elettromagnetiche	150-250	Alto	Componenti aerospaziali, componenti elettronici	Autoclave, RTM	Lonza
Bismaleimide	Buone proprietà meccaniche, elevate temperature di reticolazione, eccellenti proprietà termiche	230-320	Alto	Componenti aerospaziali	Autoclave	Huntsman, Cytec
Polimide	Buone proprietà meccaniche, Alte temperature di reticolazione, eccellenti proprietà termiche	200-350	Alto	Componenti aerospaziali, componenti elettronici	VARTM, RTM, compression molding, autoclave	Cytec, Hexcel

2.4.2 Lo sviluppo dell'applicazioni dei materiali compositi per l'aeronautica

La prima applicazione nota e documentata dei materiali compositi in campo aeronautico risale al 1937, anno in cui Douglas Aircraft Company impiegò fibre di vetro in resina fenolica nella realizzazione di stampi per parti prototipali. Fino a quel momento gli stampi per prototipi erano realizzati in materiale metallico; ogni piccolo cambiamento al progetto strutturale del componente richiedeva la realizzazione di un nuovo stampo, con conseguente dispendio di risorse economiche e temporali. In un primo momento Douglas cercò di risolvere il problema ricorrendo a stampi realizzati per fusione in materiale plastico, che si mostrarono del tutto incapaci a sopportare i carichi in gioco nel processo di stampaggio. La soluzione arrivò successivamente grazie ad una collaborazione con Owens Corning Fiberglass e vide l'impiego di fibra di vetro in resina fenolica, la quale si dimostrò molto più *cost effective* di quanto fosse la controparte metallica.

Questo materiale assunse rapidamente un ruolo predominante nella realizzazione di scali di montaggio e attrezzature per la costruzione di manufatti di impiego aeronautico, grazie alle capacità alto resistenziali, leggerezza e facilità di formatura che contraddistinguono i materiali compositi.

Lo sviluppo dei materiali compositi fu accelerato dallo scoppio della seconda guerra mondiale. Si assisté non solo ad un aumento del numero di velivoli progettati e realizzati, ma anche all'affermazione di compositi di fibra di vetro in resina epossidica (inventata nel 1938) per la realizzazione di strutture secondarie, come superfici di controllo, allestimenti interni, etc. Si iniziarono a studiare in quegli anni anche possibili applicazioni a strutture primarie. A titolo di esempio, si può ricordare che per lo Spitfire fu costruita una fusoliera in *Gordon Aerolite* dall'azienda Aero Research Ltd a Duxford nel 1940, il progetto fu poi abbandonato a favore della soluzione metallica, facilmente industrializzabile in tempi brevi.²²

²² Tale materiale è costituito da fibre di lino non attorcigliate immerse in resina fenolica e fu sviluppato da Norman de Bruyne e Malcolm Gordon, cfr. Bruyne, N.A. Plastic Progress. Flight, pages a-c, 12 January 1939; Kinloch, A. Norman Adrian de Bruyne. 8 november 1904-7 march 1997 Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 46:127, 143, 2000.

- a) Il primo problema era l'insicurezza generale sul modo di operare di questi materiali e sulle loro capacità di soddisfare i requisiti imposti dalle normative.
- b) Vi erano gli elevati costi di ricerca e sviluppo, mirati alla realizzazione di prototipi da poter sottoporre a prove di volo. A questi si aggiungevano, e sono tuttora presenti, gli alti costi di acquisizione dei costituenti rispetto all'alluminio, la necessità di tecniche di lavorazione eseguite da personale altamente qualificato e i considerevoli capitali investiti nell'acquisto di attrezzature per la produzione
- c) Non vi era a disposizione alcun database contenente dati sulle capacità di resistenza a fatica e sui requisiti di manutenzione dei materiali compositi.

A guidare lo sviluppo fu però l'industria bellica, grazie a cui furono introdotte le prime strutture sandwich, i primi compositi resistenti ad alte temperature ed iniziarono ad essere commercializzati i *pre-preg*²³. Comparvero anche altre tecnologie innovative di manifattura: lo *spray-up* e il *filament winding*²⁴. Queste innovazioni furono continuamente migliorate durante la “corsa allo spazio” che iniziò negli anni immediatamente successivi alla fine della guerra. Il filament winding fu la tecnologia alla base della produzione di motori per razzi di grandi dimensioni. Negli anni '60 furono messe a punto fibre di carbonio in Regno Unito (Cortalds Limited fu la prima azienda a commercializzare tali fibre) e fibre di boro negli Stati Uniti. Con queste fibre è stato possibile costruire strutture che fossero molto rigide, oltre che leggere e resistenti. Diversi velivoli militari americani, F-111, F-4, F-14, F-15 hanno parti strutturali in fibra di boro/resina epossidica.

²³ I preimpregnati o pre-preg sono materiali compositi in cui le fibre, sotto forma di tessuto o nastro unidirezionale, vengono impregnate con la resina. Il materiale così trattato viene riscaldato in modo da ottenere una parziale polimerizzazione della resina.

²⁴ Come sarà analizzato nel Capitolo III, lo *spray-up* è un processo di fabbricazione dei compositi in stampo aperto; consiste nello spruzzare le fibre e la resina su di uno stampo riutilizzabile. Il *filament winding* è un processo per la produzione di compositi avanzati; consiste nell'arrotolare delle fibre continue, combinate con il sistema di resina, su un mandrino ruotante, che viene rimosso dopo il ciclo di polimerizzazione del materiale.

Lo sviluppo delle tecnologie richieste per l'impiego industriale dei compositi divenne l'obiettivo del programma congiunto USAF-NASA conosciuto come Long Range Planning Study for Composites (RECAST) e che ebbe inizio nel 1972. Il successo ottenuto con questi studi portò la NASA ad includerlo nel programma Aircraft Energy Efficiency (ACEE) e fu rinominato Composite Primary Aircraft Structures (CPAS). L'obiettivo dichiarato del programma CPAS era quello di sviluppare le tecnologie e di dare confidenza ai costruttori dei velivoli dell'aviazione commerciale in modo da poter impiegare i compositi nei velivoli di nuova progettazione. Le prime includevano lo sviluppo di nuove filosofie di progetto e l'instaurazione di processi produttivi convenienti dal punto di vista economico. La confidenza nell'impiego di questi materiali si sarebbe raggiunta tramite prove sulla durability dei compositi e la certificazione della FAA. Il programma della NASA ebbe successo nell'introduzione dei compositi in strutture primarie e secondarie dei velivoli da trasporto commerciale. Come risultato, la prima lega alluminio-litio, la 2020, fu sviluppata negli anni '50 per il RA-5C Vigilante, un bombardiere supersonico da porta-aerei della marina militare statunitense.

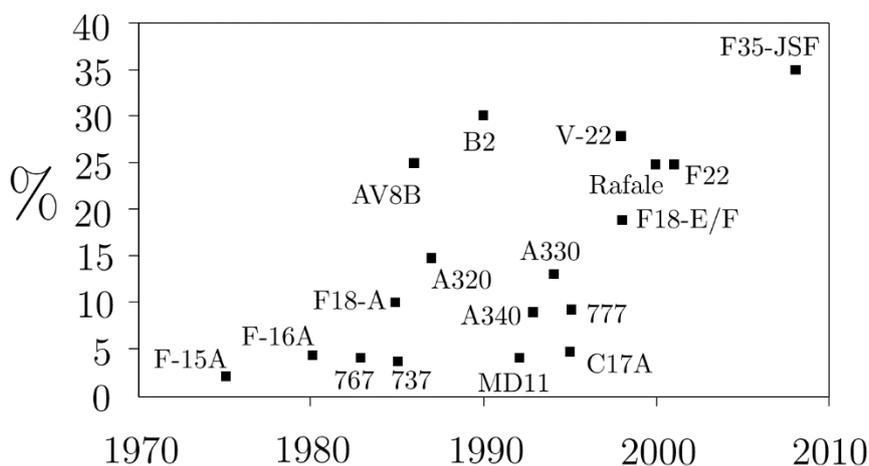
I produttori di velivoli civili si sentirono rassicurati nell'impiego di questi materiali e investirono nello sviluppo di tecniche costruttive più efficienti; l'incremento nella domanda portò quindi ad un abbassamento dei costi dei materiali compositi.

A partire dal 1975 anche negli Stati Uniti si imposero i compositi in fibra di carbonio/resina epossidica, Gr/Ep, principalmente a causa dell'elevato costo delle fibre di boro. Dagli anni '80 si è assistito ad un sempre maggiore impiego di compositi a matrice polimerica in strutture aeronautiche. Si pensi che nell'F-16 il 3% del peso della struttura è costituito da Gr/Ep; nell'F/A-18 tale percentuale sale al 9%, mentre nell'AV-8B (Harrier) arriva fino al 26%.

Nonostante il notevole risparmio in peso e gli altri vantaggi connessi all'utilizzo dei materiali compositi, il loro tasso di crescita non è stato così elevato come previsto in quegli anni. Ciò è dovuto principalmente agli alti costi dei componenti in composito se confrontati con quelli delle controparti in metallo. Altri fattori includono l'elevato costo di certificazione di nuovi componenti, la loro bassa resistenza al danno da impatto e limitazioni nel campo di temperature di utilizzo.

La crescita nell'impiego di compositi in strutture aeronautiche negli anni è mostrata nella seguente figura

Figura 2.4.2.1 - Crescita dell'impiego di compositi avanzati in strutture aeronautiche in percentuale del peso strutturale



Come si può notare scorrendo la figura lungo l'asse del tempo, l'adozione di materiali compositi nel settore civile è avvenuta in tempi successivi rispetto al settore militare; a differenza del primo, il settore militare è in genere più disponibile a sopportare i costi di sviluppo di nuovi materiali e ad accettare i rischi connessi con la loro utilizzazione.

Tuttavia negli ultimi 25 anni, il tasso di diffusione di materiali compositi nell'aviazione commerciale è cresciuto in modo esponenziale tanto è che quando la Boeing stava finalizzando il progetto del 747, che per la prima volta volò nei primi mesi del 1969, discussioni si sollevarono in Europa intorno al progetto ed alla costruzione di un aereo di linea europeo a larga capacità ed a breve/medio range. Dopo vari tentativi Francia e Germania Occidentale decisero di procedere alla realizzazione dell'aereo noto come European Airbus. Nel dicembre del 1970 l'Airbus Industrie, in Francia, finanziò lo sviluppo, la manifattura ed il marketing dell'A300: per la prima volta si cominciarono ad utilizzare materiali compositi nelle strutture secondarie come pannelli, spoiler e freni, poi, dal 1985 per la realizzazione seriale di strutture primarie. Fu realizzato in seguito infatti l'A310 con piani stabilizzatori fatti di plastica

rinforzata a fibra di carbonio (CFRP).

Durante la costruzione dell'A300 si dovette tener conto del fatto che il costo del carburante andava aumentando. Quindi risultò di primaria importanza la questione legata alla possibilità di ridurre il peso del velivolo per poter ridurre i costi operativi dello stesso. Il peso diventò un parametro vitale nell'economia operativa del velivolo.

Sempre restando nell'ottica della riduzione dei costi, particolare attenzione doveva essere rivolta alle problematiche legate alla minimizzazione dei costi di produzione ed alla riduzione di quelli di manutenzione per la loro incidenza sui costi operativi del velivolo.

Gli ostacoli che si ponevano sulla strada dello sviluppo, del progetto e dell'impiego dei materiali nelle strutture aeronautiche erano legati alle seguenti questioni:

- I livelli di sicurezza e di attendibilità, offerti dall'utilizzo dei materiali classici, non dovevano essere compromessi, utilizzando materiali compositi;
- L'accettazione dell'uso dei materiali compositi da parte delle autorità certificanti non era facile da superare;
- La manifattura dei componenti in un composito doveva essere tale da assicurare all'Airbus Industrie ed alle autorità certificanti che gli standard di qualità potessero essere mantenuti;

L'accettazione delle nuove tecnologie da parte delle compagnie di linea. Il primo aereo della serie, l'A300, ebbe varie fabbricazioni fatte a "sandwich", realizzati con compositi a fibra di vetro e con Nomex. In un primo momento le fabbricazioni erano tutte strutture secondarie come ad esempio i pavimenti: in questo caso a parte il risparmio del peso c'è da considerare che i pavimenti in metallo sono sempre predisposti alla corrosione, causata dal rovesciamento di ogni tipo di fluido

Attualmente, l'interesse per tali materiali è in continua crescita: i progetti dei velivoli più avanzati dei due principali costruttori (Boeing 787 e Airbus A350) fanno uso intensivo di questi materiali, tanto che più del 50% della struttura è realizzata in fibra di carbonio.

Tabella 2.4.2.1 –*Impiego dei compositi strutturati in Airbus*

MODELLO	COMPONENTE	ANNO DI INTRODUZIONE	% DI MATERIALE COMPOSITO
A310-200, A310-300	Spoiler, parte mobile del timone, freni aerodinamici	1970-1985	8%
A320	Flap, timoni orizzontali	1985	10%
A340-600	Serbatoi di combustibile sistemati nei piani cosa, cono di pressione posteriore	2002	11%
A380-A400M	Parti ala, sezione fusoliera, impennaggio di cosa, porte	2009	25-30% (30Tons)
A350-900 XWB	Fusoliera, box alare	2012	52%

2.4.3 L'APPLICAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI NELL'INDUSTRIA AUTOMOTIVE

In un contesto in cui l'evoluzione dei veicoli si ispira a obiettivi generali di qualità, contenimento di costi e riduzione dell'impatto sull'ambiente, in termini di inquinamento atmosferico e di consumi energetici, l'alleggerimento delle strutture e dei componenti del veicolo rappresenta una leva fondamentale per i costruttori automobilistici per raggiungere gli obiettivi richiesti di riduzione delle emissioni e per compensare l'incremento di peso derivante dai crescenti contenuti del veicolo e dalle normative di sicurezza sempre più severe. I materiali compositi termoplastici rappresentano una valida alternativa ai materiali tradizionali per la loro bassa densità, la loro possibilità di coniugare gli aspetti funzionali ed estetici, l'elevata produttività, l'elevata integrazione di parti e funzioni che consentono, la loro versatilità per quanto riguarda la scelta del polimero e del rinforzo (tipo, quantità e direzione delle fibre) in funzione delle caratteristiche richieste, per le loro caratteristiche di facile riciclabilità.

Negli ultimi 50 anni il peso delle vetture è costantemente aumentato, a dispetto delle migliorate tecnologie di produzione, dell'uso di materiali più performanti e del largo uso di parti in materiale plastico al posto dell'acciaio.

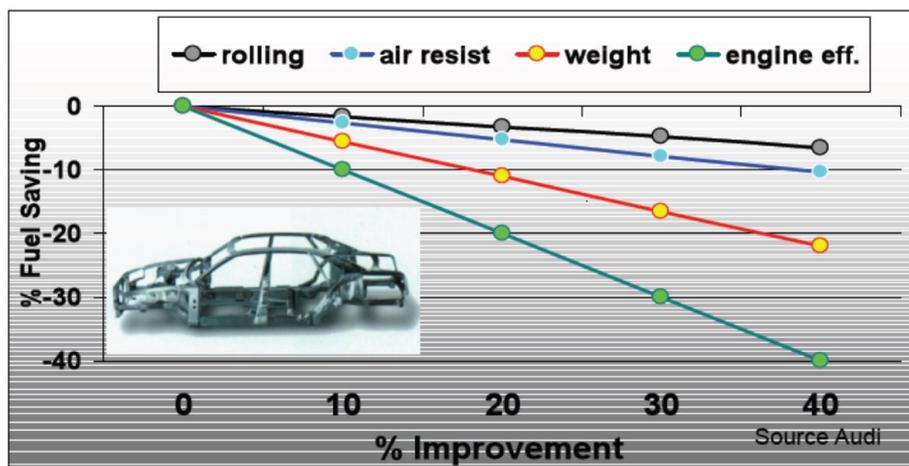
Secondo uno studio dell'Università di Trento, una berlina di classe media da 2000cc che pesava 1130 Kg nel 1966 oggi è aumentata di 410 Kg:

FUNZIONALITÀ	VARIAZIONE
Sicurezza dei passeggeri	+80Kg
Riduzione vibrazioni e rumorosità	+95 Kg
Aria condizionata	+20 Kg
Aumentata capienza di carico	+25 Kg
Protezione dalla corrosione	+80 Kg
Protezioni dall'inquinamento	+35 Kg
Accessori	+ 45Kg
Aumento delle prestazioni	+ 30 Kg
Totale	+410 Kg

Uno studio diffuso dell'International Council on Clean Transportation britannico ha concluso che un alleggerimento del 38% (organi meccanici esclusi) può essere ottenuto aumentando di appena il 3% la spesa prevista per le componenti. Secondo il Dipartimento Statunitense per l'Energia, un alleggerimento del 33% (organi meccanici compresi) permetterebbe di ridurre del 23% i consumi delle automobili.

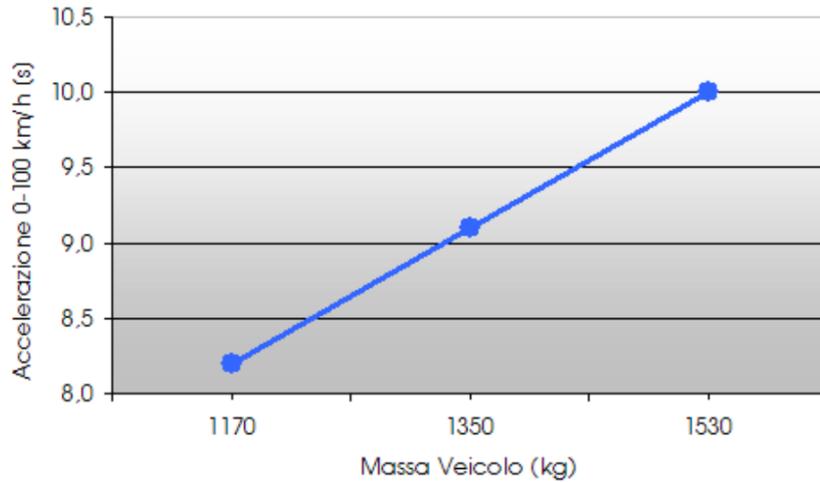
La figura 2.4.3.1 mostra il risultato degli studi Audi in relazione ai risparmi energetici connessi alle azioni possibili in automotive.

Figura 2.4.3.1 - *Influenza del miglioramento prestazioni veicolo sull'impiego di carburante*



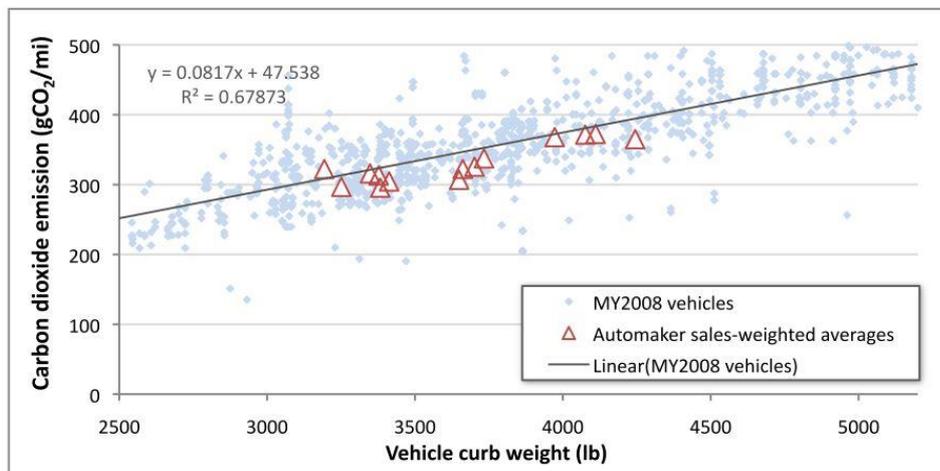
La figura 2.4.3.2 aggiunge un ulteriore elemento a favore della riduzione di peso (fonte: The Aluminum Association, Inc.). La riduzione della massa permette prestazioni più performanti con motorizzazioni proporzionatamente inferiori. La riduzione della catena del powertrain diviene essa stessa una riduzione di peso.

Figura 2.4.3.2 - *Influenza media tra accelerazione e massa veicolo*



Circa la riduzione degli inquinanti (Figura 2.4.3.3) e, in particolare di gas serra (CO₂), la letteratura dà il valore di riferimento²⁵ accettato di 2,85 Kg di CO_{2eq} per litro di carburante per i motori a combustione interna e una riduzione di 10,83 Kg di CO_{2eq} per 1000 km per ogni 100 kg risparmiati di massa del veicolo. E questo aspetto non è trascurabile se, come appare probabile, i limiti di emissione saranno abbassati da 130 g/km a 95.

Figura 2.4.3.3 - Riduzione dei gas serra per peso veicolo



I
 appli
 applicazioni tipiche di questi materiali su vettura sono le pitture sia interne (es.

²⁵ L. Ridge, EUCAR - Automotive LCA Guidelines - Phase 2, In: Total Life Cycle Conference and Exposition; Graz, SAE paper 982185, 193-204 (1998)

plancia, mobiletto) che esterne (es. paraurti); tutti componenti in cui è predominante l'aspetto estetico e di integrazione di parti/funzioni rispetto a quello strutturale. Esistono anche applicazioni strutturali ma sono molto limitate ai segmenti lusso e sportive di lusso delle auto (applicazioni con bassi volumi di produzione)

I materiali compositi sono ancora prevalentemente utilizzati per la realizzazione di elementi non strutturali e sono principalmente costituiti da resine termoindurenti rinforzate con fibre di vetro. Lo SMC (sheet molding compound) è predominante nelle applicazioni semi-strutturali, è uno dei processi che dà la possibilità di verniciatura in-linea, risparmiando in termini di costi, emissioni nocive e di processi di verniciatura non necessari. Circa 110 milioni di chilogrammi di compositi realizzati mediante SMC sono stati utilizzati dai produttori di automobili nel 1999, più del 160% rispetto ai 5 anni precedenti, questo grazie allo sviluppo della tecnologia. Le ragioni dello sviluppo dei materiali compositi a matrice polimerica sono da attribuire al loro peso ridotto ed all'opportunità che questi materiali offrono in fase di consolidamento, come resistenza alla corrosione, anisotropia e proprietà meccaniche. Sebbene questi benefici siano stati riconosciuti dall'industria automobilistica, l'uso dei compositi è stato smorzato dagli elevati costi dei materiali, dalla bassa velocità di produzione e da qualche problema legato alla riciclabilità. Inoltre ad impedire l'impiego di tali materiali su larga scala nelle applicazioni automobilistiche è stato un curioso mix di preoccupazioni sulla qualità dei materiali circa l'assorbimento di energia ad impatto, la mancanza generale da parte delle industrie di esperienza e di confidenza con i materiali e preoccupazioni circa le proprie possibilità

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Brooks J.D., G.H. Taylor , 1968: Chemistry and Physics of Carbon – ed. Walker , New York

Callister W. D., 1999: *Material Science and Engineering: An Introduction*, 5^a ed., John Wiley & Sons Inc,

Capone G.J. 1995: *Wet spinning technology in acrylic fiber technology and application*, ed.Masson. Dekker, New York

Ciampaglia G., 2003: *Tecnologia dei materiali compositi meccanici ed aeronautici*, 2^a ed., Roma, IBN Editore, 2003,

Crivelli Visconti I., Caprino G., Langella A., 2009: *Materiali Compositi: Tecnologie - Progettazione – Applicazioni, Holepi*

Diefendorf D., Tokarsky E., 1975: “High-performance carbon fibers”, *Polymer Engineering & Science* Vol. 15, No, 3.

Edie D., 1998: *The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers - Carbon* Vol. 36, No 4, Elsevier Science

Edie D., Diefendorf D.,1993: *Carbon fiber manufacturing in Carbon-Carbon materials and composites*, Noyes Publications, Park Ridges

Ilchner B., Lees J. K., Dhingra A.K., McCullough R. L., 2000: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, "Composite Materials"*, Wiley-VCH.

Jones R. M., 1975: *Mechanics of composite materials*. Mc Graw-Hill

Johnson D.J., 1987: *Structure property relationships in carbon fibers – Applied Physics*

Mazumdar S.K., *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*, CRC Press, 2002,

Tsai S. W., Hahn H. T., 1980: *Introduction to Composite Materials*. Technomic.

Tsai, S. W., 1985: *Composite design guide*. Technomic.

Turvey G. J., Marshall I. H., 1995: *Buckling and postbuckling of composite plates*. Chapman & Hall (edited).

Pedersen P., 1997: *Elasticity, anisotropy, laminates*. Corso di elasticità scaricabile all'indirizzo web www.fam.dtu.dk/html/pp.html

Vasiliev V. V., Morozov E. V., 2001: *Mechanics and analysis of composite materials*. Elsevier.

Vergani, L. 2002: *Meccanica dei Materiali*, Mc-Graw Hill

CAPITOLO III – TRASFERIMENTO TECNOLOGICO DEI COMPOSTI IN FIBRA DI CARBONIO PER PARTI STRUTTURALI: TRA STANDARDIZZAZIONE ED EMULAZIONE

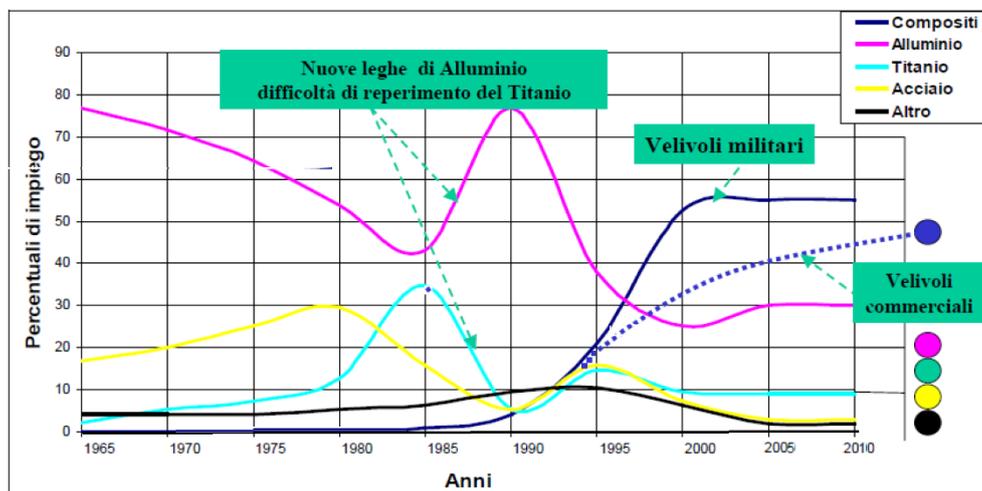
3.1 L'AFFERMAZIONE DEI COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO NELLE PRODUZIONI DI PARTI STRUTTURALI PER L'AERONAUTICA

Nel settore aerospaziale l'adozione massiva dei materiali compositi in fibra di carbonio ha interessato inizialmente le strutture secondarie (inizio anni '60) per poi passare nel corso degli ultimi trent'anni ad interessare parti sempre più estese delle strutture primarie.

All'inizio, i compositi sono stati adottati per applicazioni limitate su strutture secondarie al fine di minimizzare i rischi e capire il loro comportamento attraverso la raccolta di dati provenienti da test e l'esperienza.

Questo uso limitato è stato seguito da più ampio numero di applicazioni in piccoli aerei: nel 1986 il Beech-craft Starship fu il primo aereo con una struttura interamente costruita in materiali compositi in fibre di carbonio, che pensato per un uso militare fu in un secondo momento commercializzato per impieghi di trasporto civile (aereo privato). Anche il Rutan Voiger (1984), velivolo bi-posto progettato per il giro del mondo no-stop, aveva una struttura virtualmente tutta in composito.

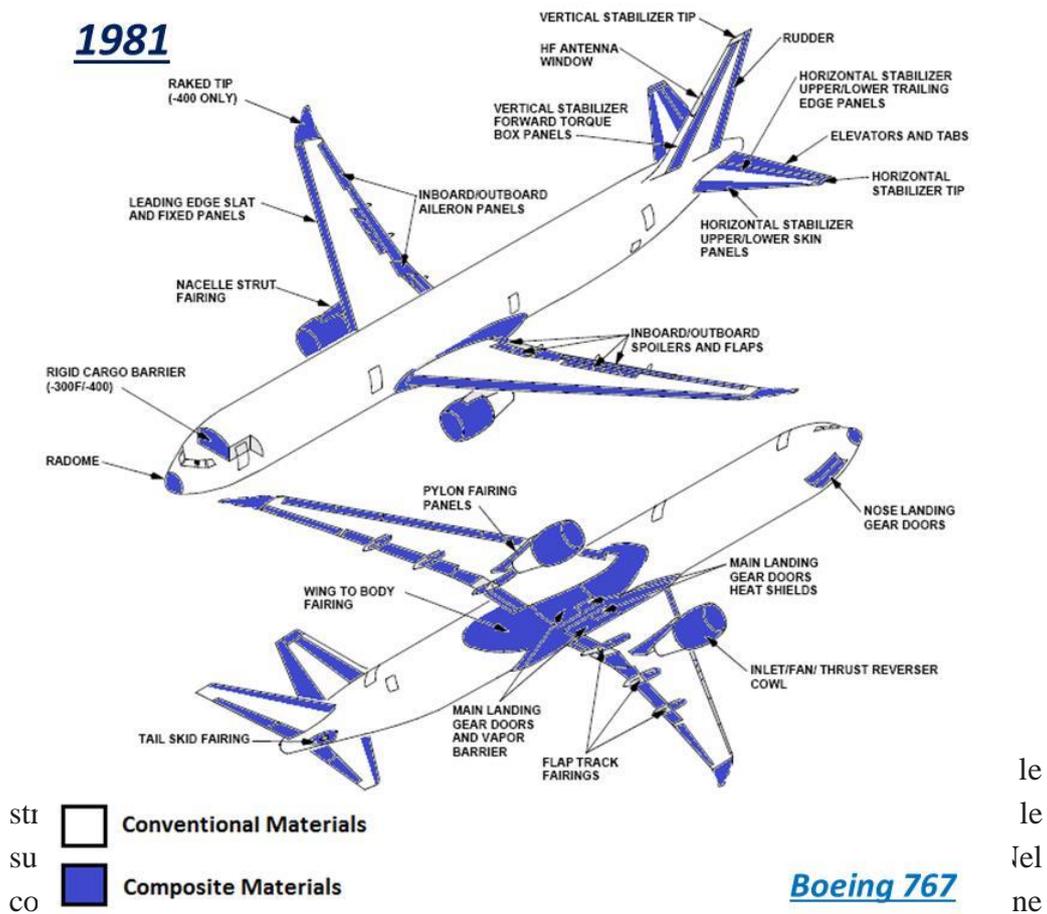
Figura 3.1.1 – Evoluzione negli anni dell'impiego dei materiali CFRP da impiego aeronautico



Solo dopo circa trent'anni dalle prime applicazioni, per effetto dell'aumento della domanda relativa all'efficienza e ai bassi costi di esercizio, i compositi in fibra di carbonio sono stati applicati ampiamente su aerei più grandi interessando

le strutture primarie. Alla fine del 1970 e inizio 1980 lo sforzo principale è stato dedicato alla costruzione del primo aereo interamente in composito di grandi dimensioni. Nel 1981 Il Lear Fan 2100 è stato il primo aereo civile interamente in composito ad ottenere la certificazione FAA. A causa dell'aumento del prezzo del carburante, i materiali compositi con il loro peso ridotto sono diventati una necessaria alternativa ai metalli. Nei primi anni 1980 compositi sono stati utilizzati per grandi applicazioni nel trasporto civile, come ad esempio gli stabilizzatori orizzontali Boeing 737 (costruzione a sandwich) e gli stabilizzatori orizzontali e verticali e le superfici di controllo del Airbus A-320.

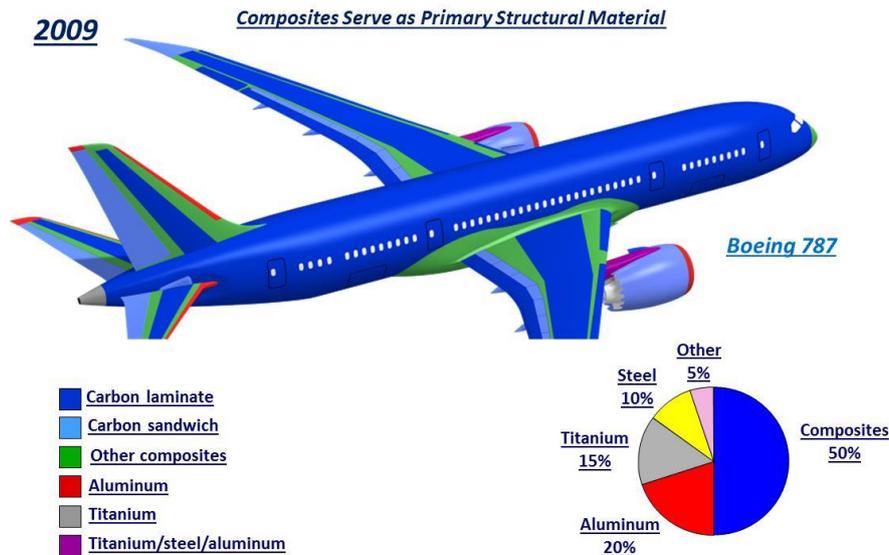
Figura 3.1.2 – Utilizzo dei materiali compositi per il BOEING 767



di strutture composite ha portato a progetti impegnativi, così come Airbus A350

XWB e Boeing 787 Dreamliner che rivendica la maggiore efficienza del carburante raggiunta per effetto dell'integrazione dei compositi avanzati in strutture primarie.

Figura 3.1.3 – Utilizzo dei materiali compositi per il 787 di BOEING



Lo sviluppo e produzione di 787 ha comportato la diffusione dell'applicazione dei materiali CFRP a livello internazionale attraverso la collaborazione di tipo cooperativo tra Boeing e fornitori locali: Mitsubishi Heavy Industries, in Giappone, è il fornitore del cassone alare centrale, mentre stabilizzatori orizzontali sono forniti da Alenia Aermacchi, (Italia) e Korea Aerospace Industries (Corea del Sud); sezioni di fusoliera sono fornite da Alenia Aermacchi (Italia), Boeing, Kawasaki Heavy Industries (Giappone), AeroSystems Spirit (Korean Air), ecc ...

Figura 3.1.4 – Attori coinvolti nella realizzazione di parti in composito per il 787 di BOEING



3.2 IL PROCESSO DI STANDARDIZZAZIONE DELL'APPLICAZIONE DEI CFRP IN AERONAUTICA

L'utilizzo dei compositi rinforzata fibra lunga di carbonio a matrice polimerica (CFRP) si è potuto diffondere anche grazie allo sviluppo di un ampio numero di tecnologie specifiche per la produzione di parti meccaniche di varie geometrie, dimensioni e in materiali diversi.

La comprensione dei principi ingegneristici fondamentali coinvolti in ciascuna delle tecnologie adottate è ancora al centro dello studio della lavorazione dei compositi sia a livello industriale sia accademico, al fine di realizzare componenti strutturali della migliore qualità. Ancora oggi, l'individuazione delle condizioni ottimali per il processo di produzione industriale dei compositi in carboresina si basa su un esteso e costoso programma di prove sperimentali.

Del resto la progettazione e la produzione di compositi avanzati comporta la soluzione di problemi di vario tipo (processo, invecchiamento, design, ecc.) che richiede la descrizione di un sistema complesso che coinvolge trasporto di massa, energia e quantità di moto; reazioni simultanee in sistemi multifase; proprietà dei materiali e condizioni al contorno tempo-dipendenti.

In particolare, la trasformazione chimico-fisica della matrice polimerica è correlata al processo di lavorazione del composito mediante l'integrazione di modelli fisico-matematici dipendenti dal tipo di materiale in un modello più generale che tiene conto degli aspetti tecnologici dello specifico processo di fabbricazione coinvolto e degli effetti delle diverse variabili di processo, al fine di dedurre l'influenza globale sullo sviluppo della struttura polimerica.

Tali complessità hanno portato ad un'istituzionalizzazione delle:

- a) Modalità di definizione dei modelli predittivi e di strategie di progetto;
- b) Procedure nell'esecuzione di prove sperimentali per la certificazione dei materiali e dei processi produttivi al fine di realizzare un velivolo che soddisfi i requisiti imposti dagli enti certificanti.

Rispetto alle leghe leggere, i compositi in carboresina presentano una forte anisotropia che rende difficile prevedere il loro comportamento in tutte le direzioni di sollecitazione che non siano quelle delle fibre di rinforzo. Per far fronte a questa difficoltà la progettazione di componenti in compositi richiede una stretta interazione tra progettisti, analisti e responsabili di produzione, a partire dalle fasi concettuali fino a quelle esecutive. Di qui lo sviluppo di sofisticati modelli predittivi e di strategie di progetto, che tengano conto delle modalità di rottura e di requisiti quali il *damage tolerance*, costituisce la chiave per incrementare l'efficienza della progettazione di componenti in composito

La necessità di sviluppare procedure nell'esecuzione di prove sperimentali per la certificazione dei materiali e dei processi produttivi al fine di realizzare un velivolo che soddisfi i requisiti imposti dagli enti certificanti, deriva invece dal

fatto che i compositi, ed in particolare quelli in carboresina, presentano un'ampia variabilità di proprietà e al fatto che ancora non si è ancora raggiunta una completa padronanza delle tecniche di progettazione. A differenza delle leghe metalliche per applicazioni aerospaziali che sono ormai giunte alla maturità sulla conoscenza di specifici obiettivi e sono ormai ben caratterizzate²⁶, gli ammissibili di progetto per materiali compositi - che creati in funzione del componente e dei carichi cui viene sottoposto devono garantire la stessa sicurezza delle relative soluzioni metalliche – sono appositamente normati in funzione del tipo di fibre e di resine e del processo produttivo utilizzato.

Nel 1978 la Federal Aviation Administration (FAA) emanò l'Advisory Circular AC20-107 sulla certificazione di strutture aeronautiche in materiale composito (Sullo stesso argomento, la FAA ha emesso due Advisory Circular successive, la AC20-107A nel 1984 e la AC20-107B nel 2009. Ogni normativa emessa abroga quelle antecedenti). Si tratta di un breve documento nel quale si specifica che la progettazione in composito deve raggiungere un livello di sicurezza almeno pari a quello richiesto dalle strutture in metallo. L'Advisory Circular sottolinea la necessità di determinare le proprietà meccaniche del materiale preso in esame attraverso la conduzione di prove sperimentali mirate; questi test devono essere svolti in condizioni climatiche ed ambientali il più possibile vicine a quelle operative²⁷.

I test tipicamente richiesti per la certificazione di una struttura in composito sono i seguenti :

- prova statica, in cui si sottopone la struttura al 150% del Design Limit Load (DLL), cioè all'Ultimate Load;
- prove a fatica sulle strutture primarie;
- damage tolerance compliance e resistenza all'impatto delle strutture primarie.

I velivoli civili e militari vengono certificati seguendo modalità distinte. La certificazione avviene ad opera degli enti certificanti, i quali hanno dimensione

²⁶ La fonte principale degli ammissibili di progetto, ottenuti su base statistica, per materiali metallici e giunti chiodati di interesse aerospaziale è rappresentata dal *Metallic Material Properties Development and Standardization (MMPDS) Handbook* emesso dalla FAA nel 2003.

²⁷ F. AC20-107B, Composite Aircraft Structure, September 2009.

nazionale o sovranazionale. Le normative emesse dagli enti statunitensi rivestono una maggiore importanza e sono considerate il punto di riferimento per tutti gli altri enti.

Velivoli civili

Le normative federali richiedono che tutti i velivoli che operino in territorio statunitense ricevano un certificato di aeronavigabilità. Tale certificato viene emesso qualora la FAA stabilisca che il velivolo in esame è stato realizzato in accordo con i requisiti normativi.

Le operazioni di ispezione, manutenzione e riparazione consentono al velivolo di mantenere lo status di aeronavigabilità (Niu M., 1993).

I regolamenti di interesse per i costruttori di velivoli sono le seguenti:

- a) FAR 23 - Normal, utility, acrobatic, and commuter category airplanes
- b) FAR 25 - Transport category airplanes
- c) FAR 27 - Normal category rotorcraft
- d) FAR 29 - Transport category rotorcraft

Velivoli militari

La certificazione di strutture aeronautiche in composito per velivoli di impiego militare richiede il soddisfacimento delle specifiche contenute principalmente nei seguenti documenti:

- a) Military Specs MIL-A-8860A e MIL-A-8870A;
- b) Military Specs MIL-A-8860B e MIL-A-8870B;
- c) Military Spec MIL-A-87221, General Specification for Aircraft Structures ;
- d) Military Standard MIL-STD-1530A - Aircraft Structural Integrity Program, Airplane Requirements ; (e) Joint Service Specification Guide JSSG-2006 (1998) - Aircraft Structures

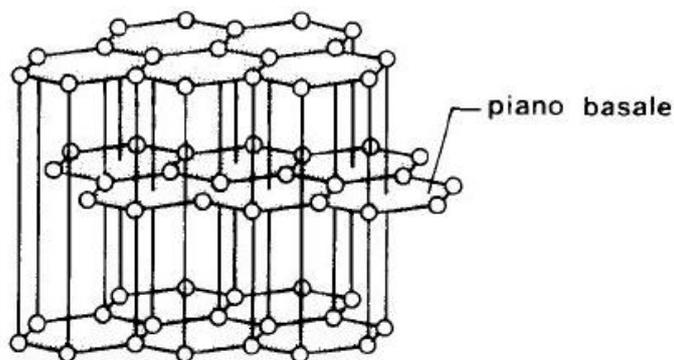
3.3 PROPRIETA E VANTAGGI DEI COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO

Le fibre di carbonio, scoperte nel 1878 da Edison e utilizzate per realizzare la prima lampada ad incandescenza, sono state prodotte commercialmente solo dal 1960 secondo un procedimento messo a punto da William Watt per la Royal Aircraft in UK, rappresentano il punto di separazione tra le fibre organiche e le fibre inorganiche in quanto prodotte per modificazione di fibre organiche o da peci organiche²⁸.

Le fibre di carbonio possono essere prodotte per trattamento termico (pirolisi controllata) di diversi precursori polimerici, materie prime contenenti carbonio, quali il *rayon*, il *poliacrilonitrile* (PAN), le poliammidi aromatiche e le resine fenoliche, ecc.. Recentemente sono state introdotte fibre di carbonio e di grafite ottenute da *materiali peciosi*, residui della distillazione del petrolio o del catrame (PITCH).

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più si riesce ad ottenere una valida struttura cristallina, tanto più si ottiene un materiale dalle caratteristiche notevoli. Un cristallo di grafite, Figura 3.3.1, ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio.

Figura 3.3.1 – *Rappresentazione di un cristallo di grafite*



²⁸ 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.

I legami fra gli stessi 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 riesce mai ad ottenere cristalli perfetti e precisione di orientamento per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche.

La struttura rigida delle molecole ad anelli ciclici a nastro o a scala a pioli, delle fibre di carbonio sia da PAN che da peci ha suggerito come costruire molecole organiche aromatiche per ottenere fibre ad elevate prestazioni.

In particolare, la fibra di poliacrilonitrile, PAN, è caratterizzata da una composizione chimica adeguata, da un particolare orientamento molecolare e da una certa morfologia.

Il poliacrilonitrile è un polimero lineare che possiede gruppi di carbonioazoto(nitrile), la cui polarità influenza notevolmente le proprietà fisiche e previene la decomposizione durante il riscaldamento ad alte temperature.²⁹

È interessante notare che le proprietà meccaniche di fibre prodotte da PAN sono influenzate dalla temperatura di carbonizzazione: con l'aumentare di detta temperatura il modulo elastico cresce sempre mentre la resistenza raggiunge un massimo a circa 1500 °C.

Tabella 3.3.1 – *Proprietà di fibre di carbonio prodotte da PAN*

Proprietà ultraelevato	Alta resistenza	Alto modulo	Modulo
Diametro (µm)	5,5-8,0	5,4-7,0	8,4
Densità (g/cm ³)	1,75-1,80	1,78-1,81	1,96

²⁹ Il processo di conversione consta di cinque passi: 1) trafilatura del precursore e riduzione in fibre; 2) stiramento del precursore; 3) stabilizzazione a 220°C in aria, sottoponendo contemporaneamente le fibre a trazione; 4) carbonizzazione a 1000°-1500°C in atmosfera inerte che porta alla rimozione di atomi dalla struttura e allo sviluppo della struttura grafita; 5) grafitizzazione a 2000°-3000°C.

Contenuto di carbonio (%)	92-95	>99	>99
Resistenza a trazione (MPa)	3105-4555	2415-2555	1865
Modulo tensile (GPa)	228-262	359-393	517
Allungamento a rottura (%)	1,3-1,8	0,6-0,7	0,38

La prerogativa della fibra di carbonio è l'elevata rigidità: alto carico di rottura con una bassa % di allungamento. Come evidenziano i grafici, le caratteristiche meccaniche specifiche dei compositi in carbonio risultano eccezionali se paragonate ai valori dell'acciaio. Confrontando poi questi valori con il peso dello stratificato: resistenza e modulo specifico, si ha la conferma del successo di questa fibra nei compositi.

Qualità fisico meccaniche:

I compositi in carbonio hanno una elevata resistenza al creep, lo scorrimento delle fibre nella matrice. Questo fa sì che i carichi vengono ripartiti grazie alla partecipazione di tutte le fibre. L'orientamento di queste all'interno della matrice è un fattore chiave: quando si applica un carico nella direzione delle fibre, la deformazione creep overall è bassa. Quando cessa il carico, la deformazione definitiva che rimane è insignificante.

Una qualità dei compositi rinforzati con fibra di carbonio sottoposti ad urto è di assorbire l'energia cinetica la quale non si propaga al resto della struttura. Infatti in caso di impatto si verifica un cedimento plastico limitatamente nella zona dove le forze applicate hanno superato il carico di rottura mentre il restante della struttura rimane intatta.

Questo concetto riguarda le strutture portanti, ad esempio una scocca per auto da competizione. Occorre però fare attenzione negli stratificati sottili, come nel caso delle costruzioni a sandwich. Una pelle sottile in fibra di carbonio, data la sua rigidità, potrebbe cedere se colpita perpendicolarmente da una forza concentrata come un urto. Per rispondere al meglio a questa sollecitazione si ricorre ai sistemi ibridi, ad esempio un tessuto carbonio/aramidica. La fibra di carbonio assicura la rigidità alla struttura e l'aramidica contribuisce con le sue proprietà a smorzare l'energia dell'urto

Figura 3.3.2 – Modulo elastico in funzione della densità

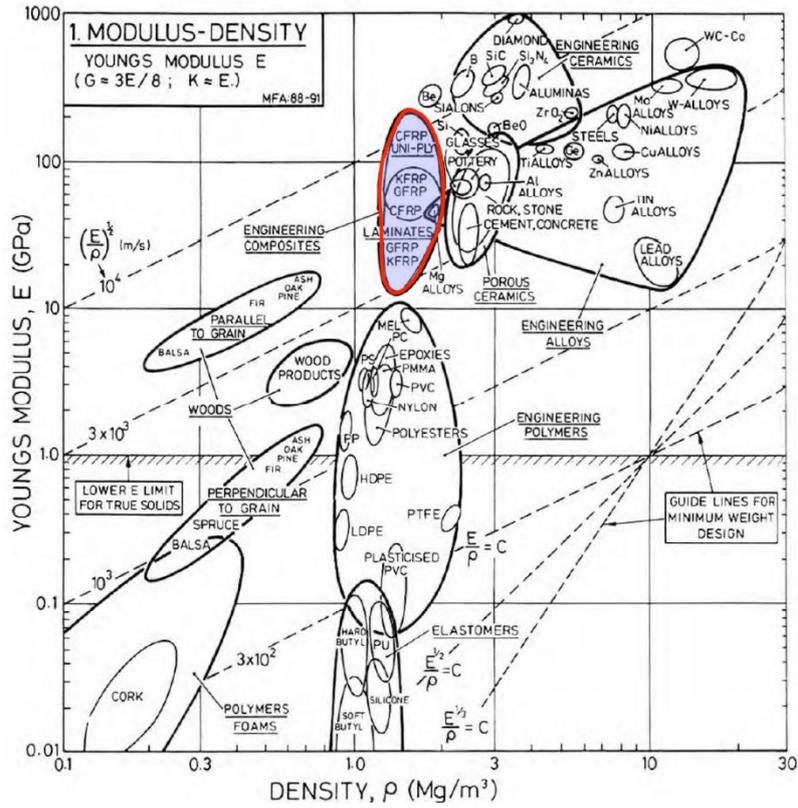


Figura 3.3.3 – Carico limite in funzione della densità

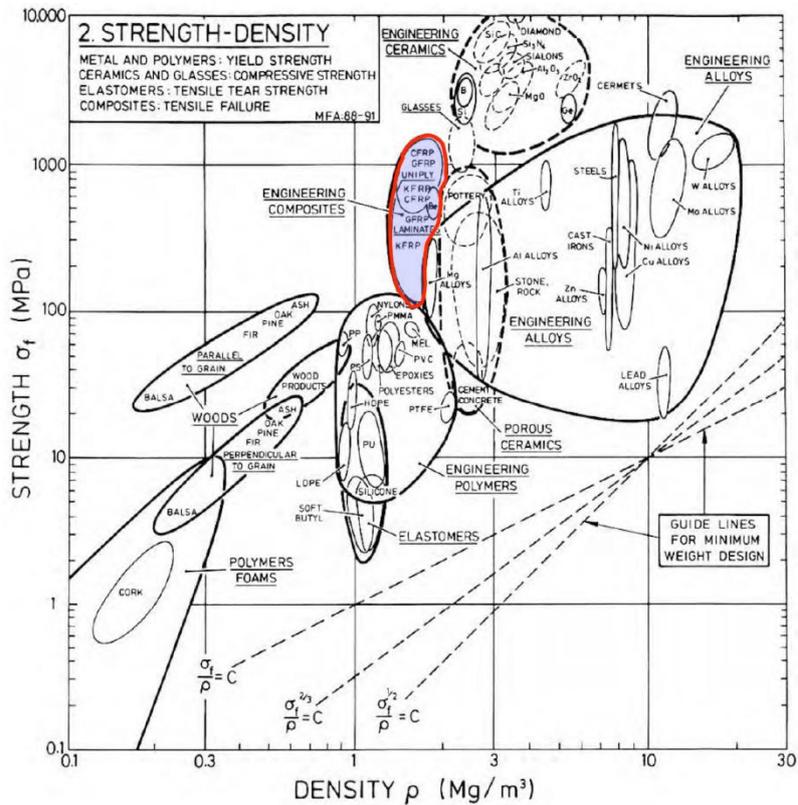
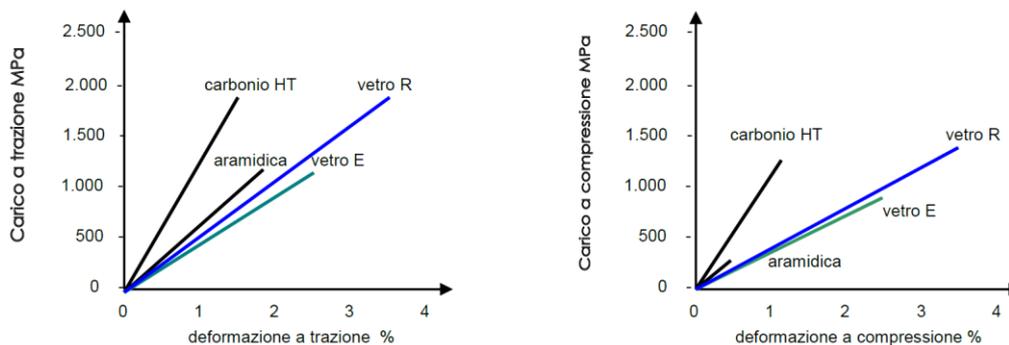


Figura 3.3.4 – Comparativa delle proprietà dei compositi con alcuni materiali

Tipo di composito	densità γ gr/cm ³	resistenza a trazione σ MPa	modulo elastico E GPa	resistenza a flessione MPa	resistenza specifica σ/γ	modulo specifico E/ γ
Vetro E	2,1* / 2,04 **	1.300* /450**	45*/ 23**	1.200* - 500**	619*/187**	22*/11**
Vetro R	2,04*/2,01 **	1.900* /650**	53*/ 26**	1.500*/ 800**	931*/323**	26*/13**
Aramidica HM (Kevlar 49)	1,38*/1,33**	1.380* /520**	83*/ 31**	620* /345**	1.000*/390**	60*/23**
Carbonio HT	1,56*/1,55**	1.900* /800**	141*/ 72**	1.600* /890**	1.217*/516**	90*/46**
Carbonio HM	1,58* /1,57**	1.600* /570**	206*/100**	1.300* /500**	1.012*/363**	130*/64**
Acciaio	7,8	500 - 1.100	210	---	14	27
Alluminio	2,8	460	72	---	16,5	26

- stratificati con fibre unidirezionali 60% vol. – resina epossidica 40% vol.
- ** stratificati con 7 strati tessuti bilanciati 58% vol. – resina epossidica 42% vol.



resistenza all'urto dei compositi

carbonio HT
 vetro E

Conducibilità elettrica

La fibra di carbonio è un conduttore elettrico; un vantaggio quando lo si applica a componenti per eliminare cariche elettrostatiche e radiofrequenze.

Conducibilità termica

L'eccellente conducibilità termica del carbonio permette una rapida dissipazione del calore. Non risente del calore prodotto dall'attrito dagli organi sottoposti a frizione. Il livello di conducibilità rilevato nella direzione delle fibre, si avvicina a quella dell'acciaio ed il coefficiente di dilatazione termico lineare risulta negativo.

Disponendo le fibre con opportuni orientamenti è possibile ridurre al minimo il coefficiente d.t.l. .

Ultimamente il carbonio ha incontrato interessanti applicazioni anche nel settore del restauro e consolidamento di edifici, vecchie opere murarie, travature in legno, volte, ecc.

Nella scelta del tipo di rinforzo più adatto nella progettazione di un manufatto in composito, occorre tener conto di un particolare comportamento della fibra di carbonio: il suo limite di snervamento è molto vicino al punto di rottura. Ciò significa che non si manifestano alterazioni tangibili che avvertono

un decadimento strutturale prima della rottura; nella fattispecie si definisce rottura catastrofica.

L'impiego della fibra di carbonio deve essere quindi limitato alla costruzione di manufatti che richiedono elevate resistenze meccaniche e specialmente rigidità, come ad esempio componenti per aerei e di auto da competizione; attrezzi sportivi di alta classe, telai di biciclette, mazze da baseball, racchette, canne da pesca e tanti altri oggetti. L'impiego appropriato di questa fibra da una risposta in termini di prestazioni ben superiore a quelle dei materiali tradizionali.

Evitare l'uso di questa fibra nelle strutture soggette a forti flessioni, come ad esempio le stecche per vele a profilo alare, o elementi elastici per sospensioni. In questi casi hanno un miglior comportamento le fibre aramidiche o ibridi

Le fibre vengono prodotte in diverse qualità: il tipo HT, definito anche HS, che è il modulo standard caratterizzate da buona tenacità e resistenza a trazione. Il tipo HM (alto modulo), con minor allungamento a rottura, ma con un modulo più elevato. Vi è anche il tipo UHM (ultra alto modulo) di costo elevatissimo. Tratteremo qui la fibra HT (alta tenacità o alta resistenza) normalmente utilizzata come rinforzo nelle costruzioni in composito con matrice epossidica e vinilestere. Le fibre HM e UHM sono generalmente disponibili in stato di preimpregnato, ed il loro impiego è limitato a settori molto specializzati.

Le tabelle riportano le proprietà fisiche e le caratteristiche del carbonio a confronto delle varie fibre, allo scopo di valutarne il comportamento nella scelta del rinforzo più adatto.

3.4 LE PRINCIPALI TECNOLOGIE NELLA LAVORAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI A FIBRA DI CARBONIO

Le proprietà finali dei materiali compositi, oltre che dalle specifiche proprietà costituenti rinforzo e matrice, sono intrinsecamente legate alle tecniche di fabbricazione dei semiprodotto 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. *In particolare è risaputo che la coesione interlaminare è strettamente connessa all'assenza di bolle d'aria ottenuta durante la formatura del materiale composito, per cui risulterà strettamente connessa alla qualità della lavorazione.*

Tutti gli sforzi sono oggi mirati ad ottenere strutture in materiale composito che presentino costi totali inferiori rispetto a quelli richiesti dalle corrispettive realizzate in metallo.

Si capisce bene che questa ottimizzazione sui costi ha ben presto coinvolto lo stesso mondo dei compositi e, infatti, oggi si può delineare una tendenza inesorabile che tende sempre di più, per esempio, a soppiantare le fibre di boro con quelle aramidiche e di grafite che presentano il vantaggio di combinare elevate prestazioni meccaniche, costi ridotti e facilità di lavorazione. 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.

Non potendo dedicare una trattazione soddisfacente per tutte le possibili tecniche di accoppiamento fra matrice e rinforzo si è deciso di rivolgere l'attenzione ad un particolare tipo di matrice, quella di origine polimerica, rispetto alla quale si riferiscono le metodologie di lavorazione illustrate nel prosieguo.

Il processo che porta dalle materie prime (fibre e matrice) al pezzo in materiale composito "finito" può essere suddiviso in *due parti*: nella prima fase i due componenti vengono uniti e viene data loro la forma definitiva, nella seconda tramite un processo di cura, se termoindurenti, o un raffreddamento, se a matrice termoplastica, si ha la completa solidificazione del materiale.

La *fase iniziale* comincia con la miscelazione, la più intima possibile tra matrice e rinforzo. Varie tecniche possono essere utilizzate: se la miscela viene ottenuta in loco si parla di *premiscelazione*, se invece si ottiene uno strato di rinforzo impregnato di matrice e solitamente confinato tra due fogli di polietilene si parla di *preimpregnato* (da notare che questo tipo di prodotto è quello più comunemente fornito dai produttori in virtù della sua facile conservazione, il rapido utilizzo e praticità di formatura).

A questo punto, sia che si disponga di un premiscelato o di un preimpregnato sono possibili varie tecniche per ottenere la forma definitiva ancora non indurita.

La progettazione dei compositi va fatta affrontando parallelamente il problema della fabbricazione. Fondamentale per una buona tecnica di fabbricazione è riuscire ad assicurare una certa ripetibilità ai processi e costanza nelle proprietà del manufatto.

Nella maggioranza dei casi di applicazioni strutturali si ha a che fare con sistemi di carichi non unidirezionali e ciò costringe ad utilizzare fibre posizionate in più direzioni. Questo si può ottenere:

- con una disposizione casuale delle fibre;
- mediante sovrapposizione di strati, a fibre allineate fra loro i quali sono sovrapposti con i relativi assi con orientazioni diverse;
- le fibre possono essere usate sotto forma di tessuti in cui esse sono già posizionate con orientazioni prestabilite.

Il secondo dei sistemi descritti è quello che permette di ottenere le migliori proprietà meccaniche.

Una classificazione dei sistemi usualmente adoperati per la fabbricazione di strutture in materiale composito plastico prevede:

- Laminazione manuale (hand lay-up e spray-up);
- Stampaggio in sacco a vuoto o a pressione (vacuum pressure bag molding);
- Avvolgimento (filament winding);
- Produzione continua-pultrusione (continuous production);
- Stampaggio per trasferimento.

Molti dei metodi indicati permettono di ottenere fibre orientate, non orientate o semi-orientate. La differenza dipende dal tipo di fibre adoperate, e dallo stato di fornitura; ciò sarà meglio chiarito esaminando brevemente i vari sistemi.

3.4.1 Laminazione Manuale: Hand Lay-Up E Spray-Up

Anche se oggi esistono diversi metodi di produzione che fanno uso di macchine o impianti automatizzati, la maggior parte delle strutture in materiale composito adoperate nei settori di maggior interesse industriale utilizza metodi di produzione manuali.

Nel metodo di lavorazione proposta la struttura viene realizzata attraverso un processo di laminazione (sovrapposizione manuale secondo orientazioni prestabilite) di strati successivi di tessuti di fibra, sotto forma di mat, pre-impregnati o meno, tessuti oppure lamine. La struttura laminata, supportata da uno stampo corrispondente alla forma che si vuole riprodurre viene poi inglobata in un sacco, nel quale viene effettuato il vuoto, ed infine posta in autoclave.

Nel caso di preimpregnato (foglio sottile, flessibile e appiccicoso costituito da fibre impregnate di matrice) il processo prevede le seguenti fasi:

- taglio del rotolo di fibre preimpregnate;
- sagomatura su stampo;
- rimozione del film distaccante;
- impilamento: la laminazione viene eseguita in stampo aperto di lega leggera o di materiale composito;
- confezionamento di un “sacco” a tenuta (vedi figura 3.4.1.1);
- consolidamento in autoclave mediante ciclo termico (vedi figura 3.4.1.2);
- compattazione;

- reticolazione della resina;
- consolidamento;
- estrazione e finitura

Figura 3.4.1.1 – Confezionamento di un “sacco” a tenuta

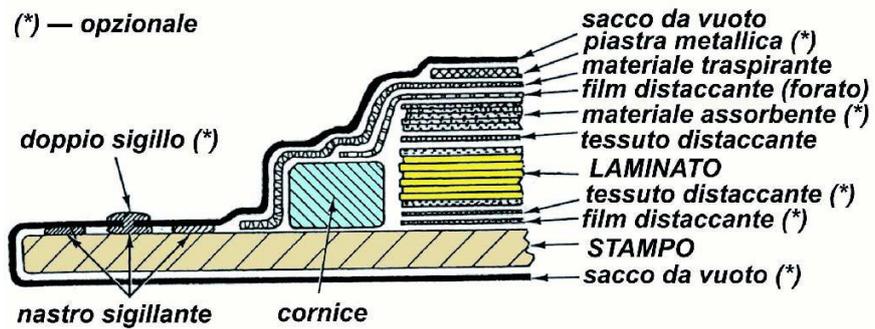
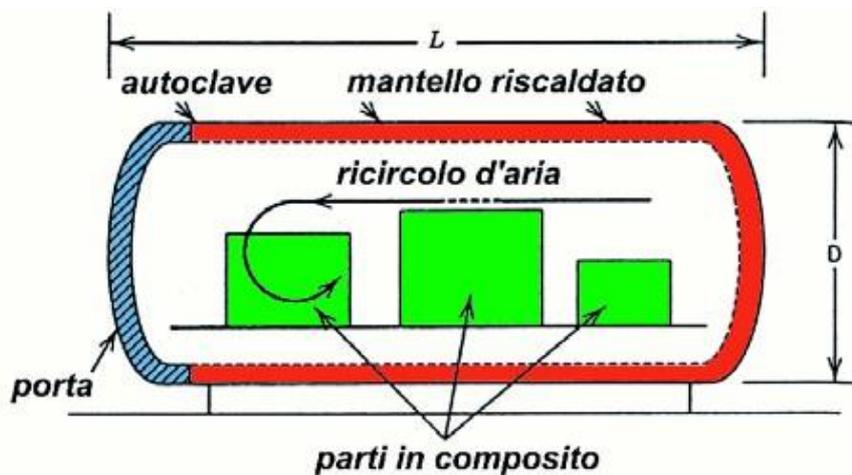


Figura 3.4.1.2 – Consolidamento in autoclave



Una variante molto usata è la tecnica di **spray-up** che consiste nello

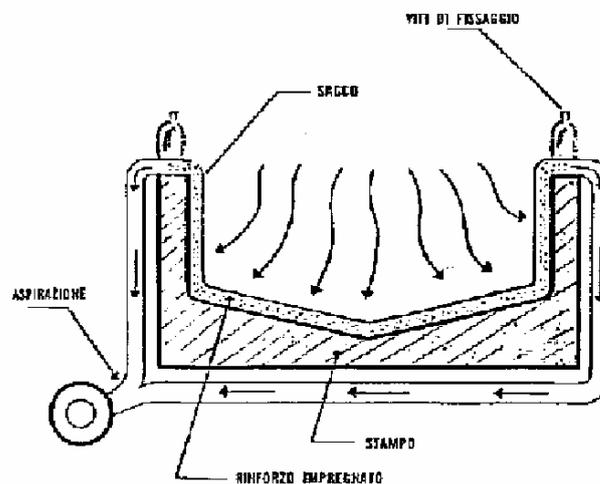
spruzzare contemporaneamente resina e fibre corte tagliate da una apposita taglierina. Aria compressa spruzza il miscuglio sullo stampo in genere rotante per uniformare la deposizione. Questa tecnica è usata per la formatura delle pre-forme, cioè semilavorati del pezzo finale, che vengono poi posti tra stampo e controstampo ed il pezzo finale viene formato per pressatura a caldo (*hot matched die molding*).

3.4.2 Stampaggio sotto vuoto o a pressione

Per ottenere una più elevata percentuale di fibre nel laminato, è necessario migliorare la compattazione dello stesso in fase di realizzazione. Uno dei modi di compattare il laminato è quello di sottoporre il sistema all'azione del vuoto. Con tale sistema si pressa il composito prima della polimerizzazione (cure) per eliminare la porosità.

La resina viene introdotta non con azione manuale o a spruzzo ma per azione del vuoto o della pressione in autoclave.

Figura 3.4.2.1 – Stampaggio sotto vuoto



Il metodo si presta per mat, tessuti e laminati (cioè lamine orientate), tutti

nella forma di pre-preg (pre-impregnati) preferenzialmente. È fra i sistemi più interessanti per la produzione di forme particolari in laminati, cioè dalle alte caratteristiche meccaniche. La tecnologia di fabbricazione per vacuum bag è ovviamente più costosa delle tecnologie analizzate in precedenza, per cui viene impiegata per la realizzazione di laminati di buone caratteristiche.

3.4.3 Avvolgimento-Filament Winding

Le tecniche basate sull'avvolgimento sono fra le più interessanti ma sono limitate a forme particolari dei solidi da formare.

Il principio è semplice e permette di avere fibre continue e disposizioni secondo laminati.

L'uso di roving o di nastri pre-impregnati o asciutti assicura di avere le fibre continue, e giocando su angolo di avvolgimento e larghezza del nastro è possibile avere lamine sovrapposte con l'angolazione voluta, cioè dei veri e propri laminati.

Il filament-winding è un tipo di lavorazione interamente automatizzata. Consiste nell'avvolgimento di filamenti continui di materiale di rinforzo su un corpo, generalmente rotante su un asse, detto mandrino; la forma del mandrino determina la geometria del pezzo da realizzare. Le fibre sciolte, avvolte in una o più bobine poste su una rastrelliera, passano attraverso un bagno di resina prima di giungere sul mandrino, dove, guidate dal braccio di deposizione della macchina avvolgitrice, vengono posizionate secondo ben precise angolazioni.

Al posto delle fibre sciolte si possono anche usare fili o nastri preimpregnati. Durante l'avvolgimento le fibre sono tenute tese da opportuni dispositivi meccanici o elettromeccanici (tensionatori). Al termine dell'avvolgimento lo stratificato viene sottoposto ad un ciclo di cura in forno.

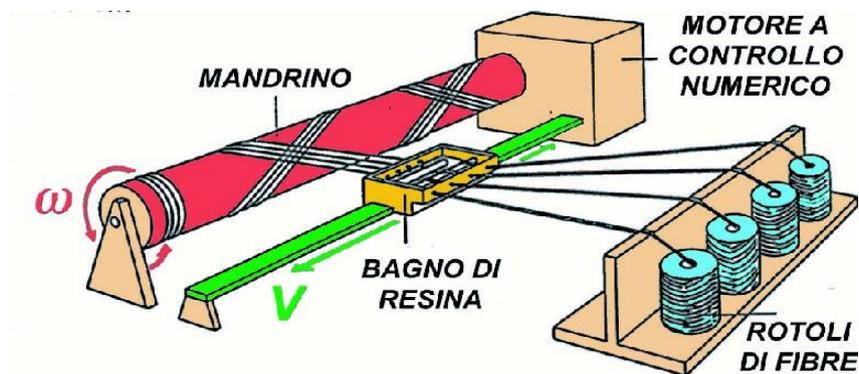
Se necessario la cura può avvenire in autoclave, ove il composito viene adeguatamente compattato sotto pressione.

Se il pezzo è aperto il mandrino viene ricoperto da un agente distaccante che serve ad agevolarne l'estrazione dopo il taglio delle estremità. Se il pezzo è chiuso l'avvolgimento viene effettuato intorno a forme cave in polistirolo o altro materiale a perdere che può essere tolto mediante fusione o sciolto con dei solventi.

Per i serbatoi di gas o di liquidi in pressione il mandrino è costituito da una sottile camicia metallica o in materiale plastico (liner) che viene lasciata a far parte integrante del serbatoio per evitare eventuali perdite di fluido a causa della permeabilità del composito.

Un parametro fondamentale è l'angolo d'avvolgimento, definito in ogni punto come l'angolo compreso tra la direzione delle fibre e la tangente al meridiano del mandrino. L'angolo d'avvolgimento può variare praticamente tra 0° e 90° a seconda delle proprietà meccaniche richieste al pezzo. Si parla allora, in modo abbastanza ovvio, di avvolgimento polare, elicoidale o circonferenziale.

Figura 3.4.3.1 – Avvolgimento polare filament winding



Nell'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. Così facendo le fibre non si sovrappongono durante l'avvolgimento e si può coprire l'intero mandrino con una singola lamina opportunamente orientata rispetto all'asse. Volendo realizzare laminati con angolazioni maggiori usando questo metodo è necessario utilizzare nastri di larghezza opportuna.

Nell'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.

Nell'avvolgimento *circonferenziale* mentre il mandrino ruota il braccio di

deposizione compie una traslazione longitudinale che ad ogni giro del mandrino è pari alla larghezza del nastro. In questo modo si ottengono delle lamine non intrecciate che servono a dare resistenza nella sola direzione circonferenziale.

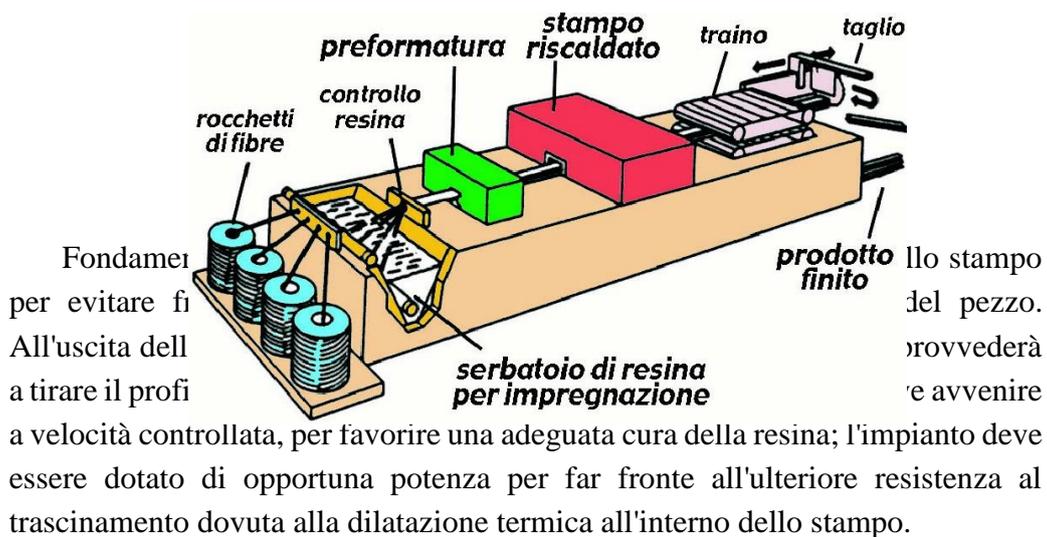
Spesso per poter soddisfare ai requisiti strutturali il composito viene realizzato sovrapponendo più avvolgimenti polari, circonferenziali ed elicoidali differenti.

È importante notare che il *filament winding* non è adattabile a sole figure cilindriche, ma anche ad altri solidi. Può per es. adattarsi alla fabbricazione di più pezzi, che tenuti insieme formino una struttura cilindrica o quasi.

3.4.4 Produzione continua (pultrusione)

La pultrusione è un processo altamente automatizzato e continuo. Da una calandra porta roving è tirato il rinforzo che viene fatto passare all'interno di una vasca contenente la resina, il tutto è indirizzato verso un sistema di preformatura che ha lo scopo di eliminare la resina in eccesso, l'aria intrappolata e abbozzare la forma finale del profilato. Ultima stazione del processo è una filiera che ha il duplice scopo di conferire al profilato la forma definitiva e se riscaldata di effettuare la polimerizzazione.

Figura 3.4.4.1 – *Produzione continua*



Si è già accennato al fatto che uno dei grossi vantaggi di questo processo e l'automazione che consente di realizzare un elevato numero di pezzi a velocità altrettanto elevata, tanto che il costo ora-macchina incide pochissimo sul costo del prodotto. Si presta bene per le produzioni di semilavorati profilati a sezione costante con fibre principalmente monodirezionali.

3.4.5 Stampaggio per trasferimento

Si predispongono le fibre "secche" all'interno di uno stampo avente la forma del pezzo da realizzare, si effettua quindi un'infiltrazione di resina termoindurente liquida a bassa velocità. La resina deve aver riempito completamente lo stampo prima che si inneschi la reazione di reticolazione.

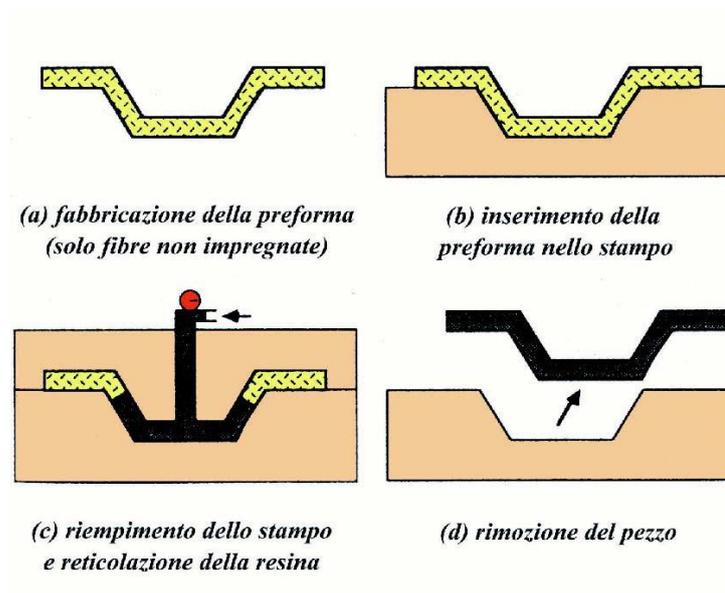
La preforma può essere costituita da strati di fibre pressati e consolidati con un opportuno "legante" chimico, o da tessuti tridimensionali o bidimensionali.

È necessario che la preforma abbia una certa resistenza meccanica perché le fibre non debbono spostarsi durante l'infiltrazione di resina; la trama non deve tuttavia essere troppo "stretta" per consentire alla resina di permeare agevolmente attraverso il letto di fibre.

Le fasi del processo dello stampaggio per trasferimento sono: Fasi del processo:

- Pulitura dello stampo (soffiatura, solventi, raschiatura);
- Applicazione del distaccante (cere sintetiche, opacità);
- Applicazione del gel-coat (rivestimento protettiva in resine termoindurenti, maggiore resistenza);
- Posizionamento del rinforzo (sovrapposizione di strati di fibra, preforma: preassemblato);
- Chiusura e bloccaggio dello stampo;
- Iniezione della resina;
- Apertura dello stampo ed estrazione del pezzo (dopo il tempo di polimerizzazione, fori di estrazione);
- Operazioni di rifinitura.

Figura 3.4.5.1 – Stampaggio per trasferimento



Vantaggi:

- buon controllo sulla disposizione delle fibre;
- elevate frazioni in volume di rinforzo;
- buona finitura superficiale;
- possibilità d'automazione del processo;
- buona tutela dell'ambiente di lavoro grazie all'utilizzo di uno stampo chiuso.

Svantaggi:

- limiti sulle dimensioni massime dei manufatti;
- stampi relativamente costosi.

3.4.6 I processi tecnologici per compositi a matrice termoplastica

Sin dai primi anni degli anni '80, la tecnologia nella chimica delle resine ha portato ad una nuova famiglia di compositi a matrice termoplastica come il

polietereterchetone (PEEK), il polifenilensolfuro (PPS), poliimmide (PI) ed il poliammideimmide (PAI) particolarmente adatti nelle applicazioni di tipo aerospaziale. A questi, in seguito, se ne sono aggiunti degli altri, quali il polipropilene (PP), il polietilentereftalato (PET) e la poliammide (PA), specialmente dedicati, per le loro buone caratteristiche ed il relativo basso costo, ai settori della industria, dello sport ecc. In genere l'uso per questi materiali è dettato da particolari caratteristiche quali le buone proprietà fisico-meccaniche, alta tenacità, buon comportamento alla fatica, bassi costi di stoccaggio e di trasformazione.

Due sono i principali tipi di resine usate per i compositi termoplastici.

*Il primo consiste in **resine termoplastiche convenzionali** le quali durante il processo di trasformazione subiscono solo cambiamenti fisici e non chimici. Questi termoplastici sono difficili da usare per l'impregnazione di rinforzi a causa della loro *alta viscosità*, ma si prestano alla trasformazione, poiché necessitano di operazioni semplici e veloci; questi materiali si suddividono a loro volta in *semicristallini, cristalli liquidi e amorfi*.*

*Il secondo tipo consiste in **resine pseudotermoplastiche**, nelle quali la chimica continua durante il processo di trasformazione eliminando gli elementi volatili e aumentando il loro peso molecolare.*

Queste resine possiedono ognuna vantaggi e svantaggi legati alla loro morfologia e chimismo; per esempio le *resine a cristalli liquidi e semicristalline* sono insolventi a quasi tutti i solventi e si impregnano generalmente via fusione del polimero. A causa di ciò occorre usare polimeri a viscosità relativamente bassa penalizzando così, le proprietà meccaniche e di impatto. I polimeri *amorfi*, invece, possono costituire dei compositi impregnando le fibre via fuso e via solvente; nel secondo caso occorre rimuovere il solvente durante la trasformazione del composito ed inoltre sono materiali più facilmente attaccabili dai solventi per cui la loro resistenza ambientale è più limitata.

Le resine *pseudotermoplastiche*, per la loro alta viscosità e resistenza chimica ai solventi non si prestano a processi simili a quelli citati per cui l'impregnazione viene eseguita in una soluzione di monomeri o prepolimeri mentre la

reticolazione viene effettuata in fase di trasformazione del composito in pezzo finito.

I prodotti termoplastici si dividono in due categorie:

- *preimpregnati*;
- *postimpregnati*.

I *preimpregnati* a loro volta si trovano sotto forma unidirezionale e tessuto.

È possibile trovare l'unidirezionale sotto forma di nastro con qualsiasi tipo di fibra, ma mentre i termoplastici tradizionali producono un prepreg rigido e non appiccicoso, quelli preimpregnati con materiale pseudotermoplastico sono più pieghevoli ed appiccicosi. I tessuti sono generalmente e più diffusamente costituiti da materiali fibrosi e matrici pseudotermoplastiche e amorfe sciolte in solventi. Per ottenere tali prodotti con resine semicristalline o con cristalli liquidi si tessono strisce strette di fibre impregnate via fusione. I *postimpregnati* constano di fibre e polimero variamente assiemati e solo durante la trasformazione la matrice potrà impregnare completamente la fibra.

Diversi sono i metodi di riscaldamento come aria calda, raggi infrarossi, laser, a contatto (sotto pressa) ecc. La scelta dipende molto dal ciclo di trasformazione, dal materiale e dal pezzo che si vuole realizzare. Molto importante è invece il raffreddamento poiché gradienti più o meno alti di temperatura provocano notevoli variazioni morfologiche nei compositi a matrice semicristallina, che a loro volta influenzano proprietà come la tenacità e la resistenza ai solventi. La maggior parte delle tecniche di trasformazione dei compositi termoplastici si basano sulla formatura del preimpregnato nella configurazione voluta con meccanismi tali da muovere e disporre le fibre nella posizione voluta.

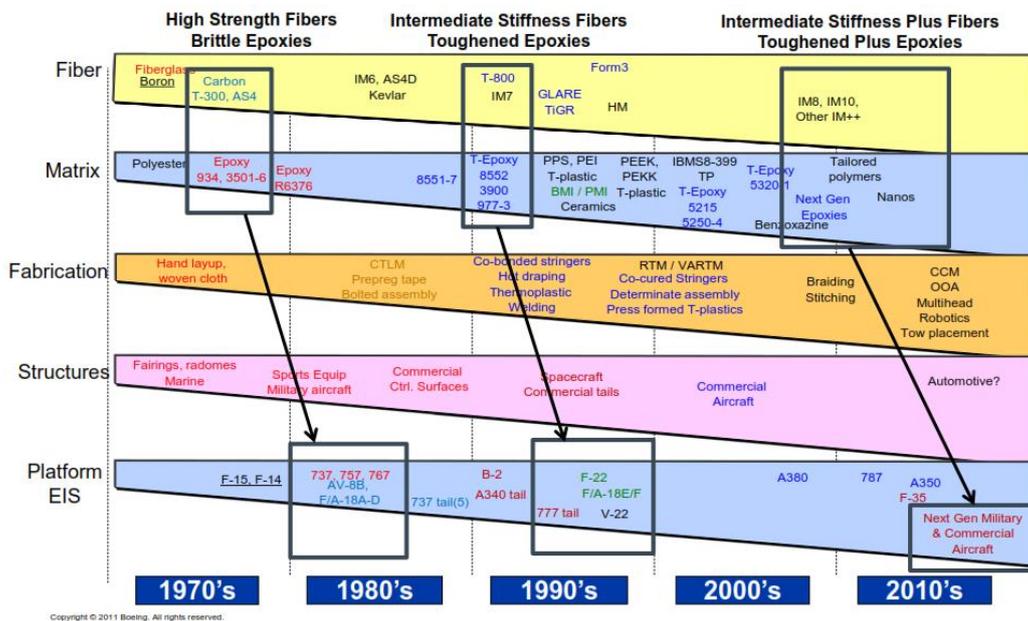
Il processo di formatura con **stampi metallici** è forse il più semplice e più usato. Il laminato composito preimpregnato è opportunamente disposto sul semistampo inferiore e posizionato tra i piani di una pressa. Dopo aver riscaldato sino alla temperatura di fusione della matrice, i due semistampi vengono chiusi con una certa pressione.

Una volta effettuato il raffreddamento il componente viene rimosso.

3.5 I PROCESSI IMITATIVI NELL'AMBITO DELL'INDUSTRIA AUTOMOTIVE

Il settore aeronautico è stato pioniere nell'introduzione, sviluppo e miglioramento continuo dei materiali avanzati in fibre di carbonio e delle relative tecnologie di lavorazione aprendo per essi ampie possibilità di diffusione in altri settori complementari in termini di requisiti di prodotto, in primis il settore dell'automotive.

Figura 3.4.1 – Evoluzione dei materiali CFRP e delle relative tecnologie di lavorazione nel settore dell'aeronautica



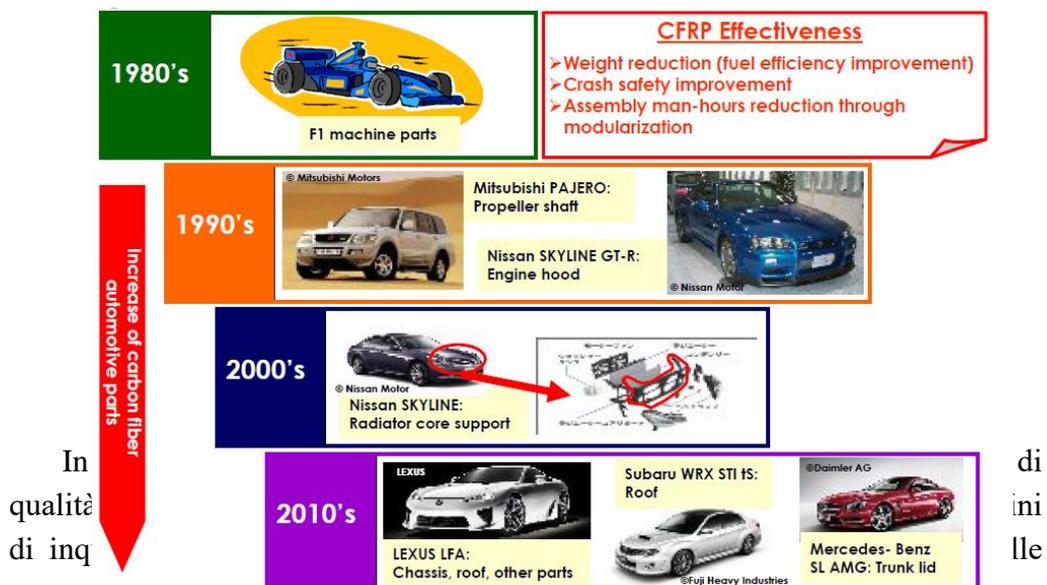
L'utilizzo della fibra di carbonio come materiale strutturale permette di raggiungere i requisiti di alleggerimento imposti dalla necessità di diminuire i consumi per le auto a propulsione tradizionale e di recuperare il carico pagante in auto ibride perso per la presenza delle batterie. Nel settore automobilistico il carbonio viene ormai considerato sia per componenti non strutturali (interni, volante) che per la produzione di scocche, telai, cerchioni ed altri componenti. Tuttavia, l'applicazione della carboresina costituisce attualmente il materiale strutturale primario esclusivamente nel caso di auto da competizione o supersportive (es. Ferrari F150, Lamborghini Murcielago, Porsche Carrera GT, Ferrari 599). Il primo utilizzo risale al 1981, quando la scuderia McLaren ha

utilizzato fibre di carbonio in resina epossidica (carboresina) per realizzare il telaio della propria monoposto. Tale soluzione risultò subito così superiore alle tecniche precedenti (anche sotto l'aspetto della sicurezza per il pilota) che nel giro di 2 anni venne adottata da tutti gli altri costruttori. Oggi, il 60% circa del peso di una vettura di Formula Uno, è fatta di materiali compositi (costituiti per lo più da fibre di carbonio); essi sono impiegati per costruire la monoscocca, il musetto, parti delle sospensioni e ancora la frizione ed i dischi dei freni. Oltre a soddisfare al meglio i requisiti di peso e rigidità, l'utilizzo di materiali composito permette di riprodurre geometrie complesse permettendo di ottimizzare i consumi e di perseguire nuove visioni funzionali da parte dei progettisti.

Negli ultimi 15 anni, l'utilizzo del carbonio ha ricevuto grande successo anche per la produzione di vetture di alto profilo con vocazione sportiva.

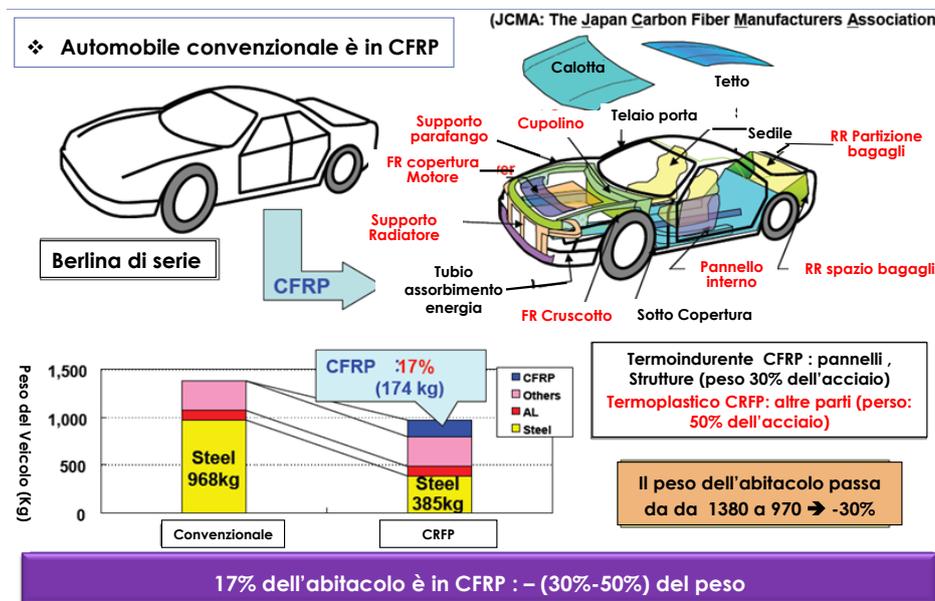
Il carbonio non è però da considerarsi una esclusiva delle fuoriserie; infatti la FIAT ha iniziato a usare compositi rinforzati con questi tipi di fibre per serbatoi di auto a metano ma anche in alcuni prototipi di vetture di serie che utilizzano come vettore di energia l'idrogeno (FIAT Panda Hydrogen, Panda MultiEco); più in generale i compositi offrono una vasta gamma di potenziali applicazioni nel settore automobilistico: body panel, calotta, tetto, sottocopertura, pannello interno, supporto radiatore, ecc.

Figura 3.5.1 – Evoluzione dei compositi nell'industria automotive



strutture e dei componenti del veicolo rappresenta una leva fondamentale per i costruttori automobilistici per raggiungere gli obiettivi richiesti di riduzione delle emissioni e per compensare l'incremento di peso derivante dai crescenti contenuti del veicolo e dalle normative di sicurezza sempre più severe. I materiali compositi termoplastici rappresentano una valida alternativa ai materiali tradizionali per la loro bassa densità, la loro possibilità di coniugare gli aspetti funzionali ed estetici, l'elevata produttività, l'elevata integrazione di parti e funzioni che consentono, la loro versatilità per quanto riguarda la scelta del polimero e del rinforzo (tipo, quantità e direzione delle fibre) in funzione delle caratteristiche richieste, per le loro caratteristiche di facile riciclabilità.

Figura 3.5.2 – Le applicazioni dei materiali compositi in fibra di carbonio su di una vettura di serie



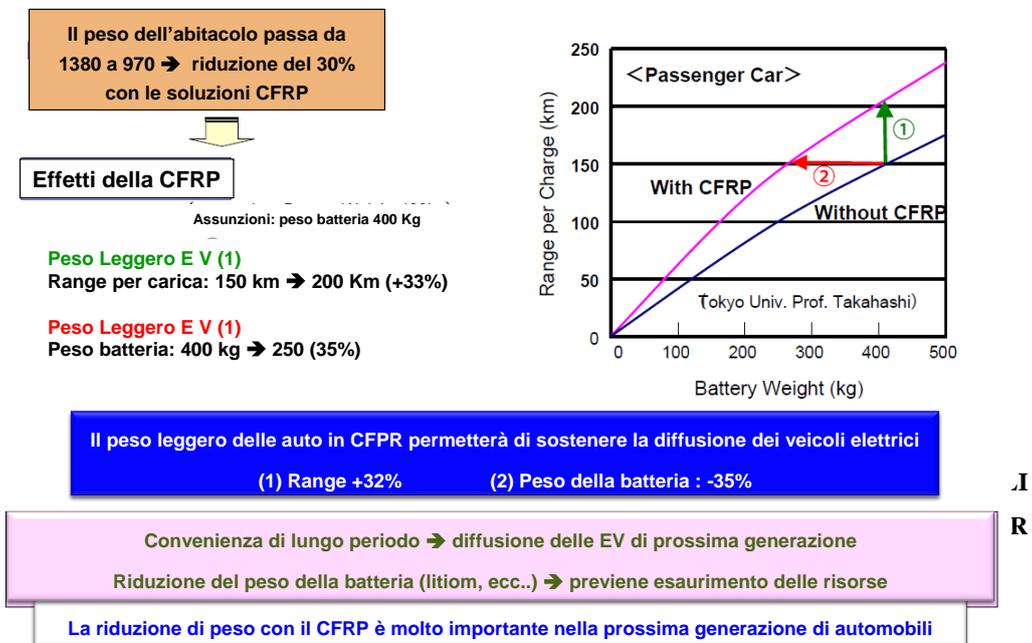
Il motivo per cui i compositi stanno evolvendosi sempre di più, è soprattutto per i vantaggi che offrono sotto il profilo della sostenibilità economico-ambientale:

- auto più leggere, implicano l'utilizzo di minor carburante. Il progetto tedesco Camisma, che punta a sviluppare sistemi multimateriale basati su compositi fibrorinforzati (in particolare con fibre di carbonio) e inserti in metallo, in grado di sostituire efficacemente acciaio e leghe

leggere nei componenti strutturali destinati ai veicoli, ha ipotizzato che nei prossimi anni si potranno avere auto con riduzioni di peso del 40% rispetto a quelle attuali (www.polimerica.it, articolo 9057). L'ultimo van della UPS (United Parcel Service), il CV23, con un risparmio di peso di 1000 libbre rispetto al modello C70, ha un risparmio di carburante del 40% (http://gas2.org/2011/05/29/ups-testing-highmpg-composite-vans-video/). Ciò è di notevole importanza, se si considera il fatto che l'unione europea ha delineato un piano che porterà entro il 2050 alla riduzione delle emissioni di CO2 del 60%;

- l'utilizzo di compositi avvantaggia il riciclo delle componenti quando le vetture sono a fine vita. In particolare l'utilizzo di matrici termoplastiche e di fibre naturali hanno bassi impianti ambientali, e possono essere riutilizzate o stoccate senza inquinare;
- l'avvento delle auto elettriche richiede anch'esso un risparmio in termini di peso, non essendo ancora proponibili potenze paragonabili a quelle dei motori a combustione interna.

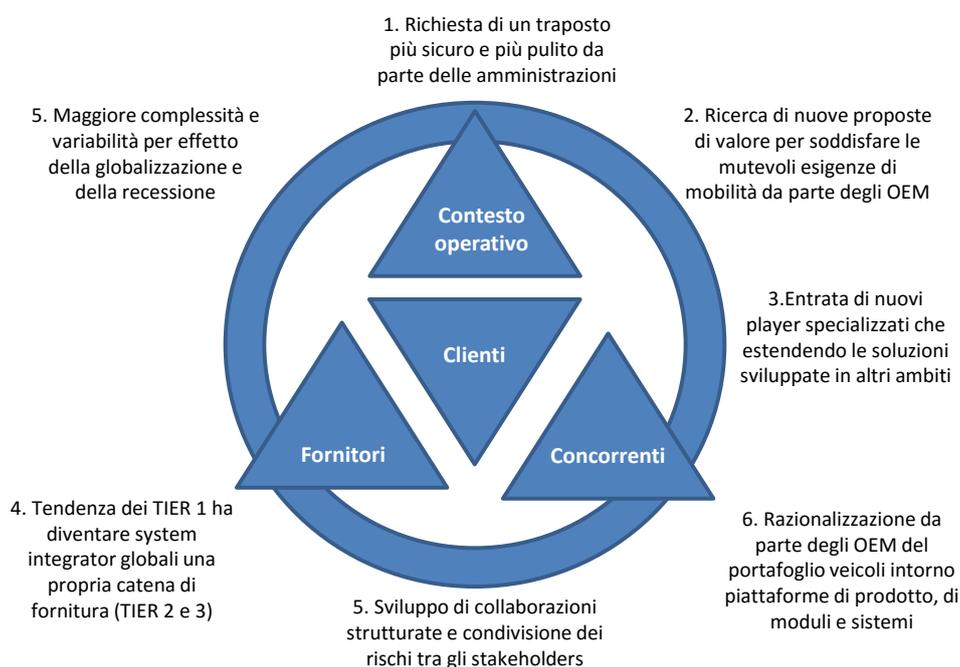
Figura 3.5.3 – L'utilizzo del carbonio come driver per la diffusione dei veicoli elettrici ed ibridi



L'ambiente competitivo del settore automotive è cambiato molto negli ultimi decenni a causa dei progressi tecnologici, dell'automazione della produzione, della regolamentazione e della crescente concorrenza al di fuori dell'Europa.

Una recente pubblicazione dell'Automotive Center di Ernst & Young individua ed esplicita i mega-trend che caratterizzeranno nei prossimi decenni l'evoluzione dell'industria automotive.

Figura 3.6.1 – *Eight mega trends shaping the global vehicle industry*



Tra i più significativi effetti di tale trend, vi è la decarbonizzazione attraverso da un lato, la ricerca dell'efficienza energetica del trasporto e l'impiego di fonti energetiche alternative e, dall'altro, la riduzione di peso ed incremento della *safe&security* dei veicoli e sicurezza in materia di mobilità.

Le soluzioni innovative sviluppatesi nel decennio successivo, e ancor più quella del decennio in corso, è stata (e sarà) più fortemente determinata da sviluppi nella tecnologia di prodotto, in primis l'elettronica, i materiali ed i nuovi sistemi propulsori.

Tabella 3.6.1 – *Rilevanza delle tecnologie nel settore automotive*

TIPO DI TECNOLOGIA	2000	2010	2020
Tecnologie meccaniche	51,0%	40,5%	32,0%
Tecnologie idrauliche	14,0%	7,5%	2,5%
Pneumatica	3,0%	4,0%	3,5%
Elettronica	22,0%	32,0%	28,0%
Propulsione	8,0%	14,0%	24,5%
Materiali	2,0%	4,0%	10,5%

Fonte: Hypovereinsbank/Mercer

Di fronte all'una attesa di una sostenuta crescita della domanda a livello globale, tra le sfide rispetto a cui le imprese dell'automotive devono confrontarsi nel medio termine è possibile includere:

1. la disponibilità di input della produzione in grado, da un lato di conferire alla struttura del veicolo migliori proprietà funzionali e strutturali e, dall'altro, di permettere all'impresa di non subire le previsioni di scarsità delle materie prime quali il platino, il nichel, l'acciaio ed il rame;
2. l'ottimizzazione dell'efficienza dei processi di produzione e dei costi di gestione,
3. l'applicazione di sistemi di trazione più efficienti e puliti in grado di ridurre l'impatto ambientale della mobilità e di far fronte alle previsioni di scarsità delle risorse nei settori del petrolio e del gas.

Tali ambiti di competitività sono in realtà tra loro strettamente interconnessi e caratterizzati da una significativa dimensione di innovazione tecnologia dei veicoli: la disponibilità degli input della produzione più efficienti richiede lo sviluppo di materiali innovativi che oltre a rispondere ad una maggiore performance in termini produttivo-ingegneristica per l'impresa e estetico-funzionale per il mercato della mobilità, consentano alle imprese produttrici di ridurre il rischio di approvvigionamento degli input della produzione.

La concreta applicazione di nuovi materiali rispetto a quelli tradizionali impone sua volta lo sviluppo di nuovi processi produttivi (formatura, giunzione, assemblaggio, protezione della superficie, verniciatura) che, in grado di superare

vincoli tecnici e confini economici, permettano alle impresa di accedere alla fase di industrializzazione.

Sotto una dimensione diverse, ma in relazione ad un'analogia prospettiva, la ricerca di soluzioni innovative per sistemi di propulsione a basso impatto ambientale, opportunamente connesse a soluzioni innovative per sistemi di recupero di energie nelle fasi di moto passivo, sono finalizzate all'efficienza energetica e concorrono, così come le tematiche dell'alleggerimento, a ridurre il fabbisogno energetico e le emissioni inquinanti.

Le soluzioni proposte a tali problematiche sono concorrenti per lo sviluppo di nuovi sistemi di mobilità e si autosostengono: da un lato, la possibilità di un'applicazione diffusa della propulsione elettrica unita al propulsore termico richiede notevoli sforzi in termini di alleggerimento veicolo, dall'altro, la sostenibilità economica della produzione di veicoli e/componenti veicoli in materiali compositi richiede, oltre alla ricerca di più efficienti tecnologie di produzione, la disponibilità da parte del mercato a riconoscere un premium-price giustificato dai risparmi futuri in termini di carburante e minori esternalità che i veicoli ibridi ed elettrici possono garantire.

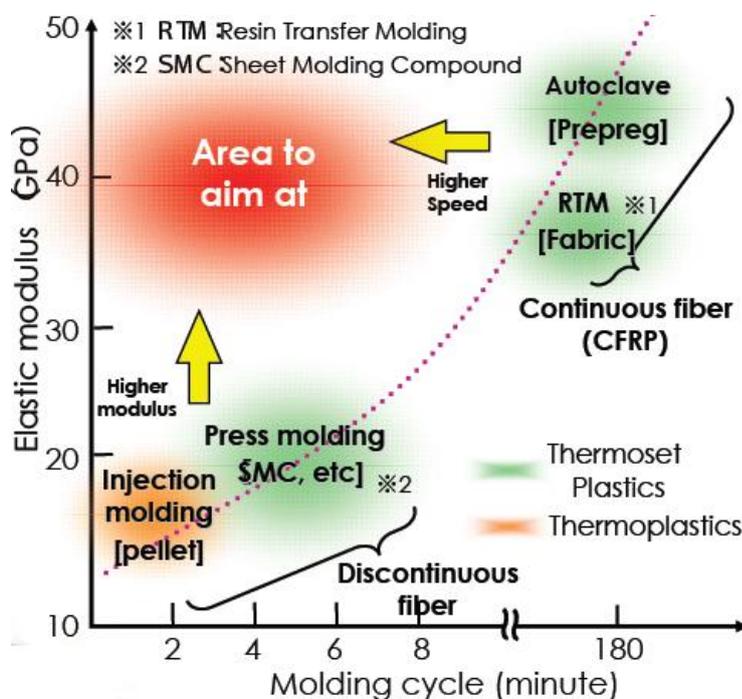
La disponibilità di strutture di veicoli più efficienti per la mobilità, ovvero più leggeri e meno inquinanti, costituiscono la base di una maggiore competitività per l'industria automotive, aumentando il valore percepito del veicolo e mantenendo o riducendo i costi e gli investimenti per il mercato.

Maturata la fase dell'interazione e integrazione fra struttura, proprietà e processo, collegata ai diversi materiali; condotta a conclusione la fase sperimentale della progettazione ingegneristica e delle tecnologie applicate per la fabbricazione dei compositi; acquisita l'integrazione di competenze specialistiche a fattore catalizzante; oggi la sfida è rappresentata dall'interazione con il mercato, attraverso l'abbattimento dei costi di produzione, l'industrializzazione delle produzioni, la crescita di un indotto di qualità competitivo ed affidabile, per prodotti, tempi e costi, il tutto all'interno di un dominio ad elevato tasso di innovazione a tutela e garanzia della non imitabilità ed esportabilità verso bassi profili concorrenziali.

In tale scenario, gli OEM e e System Integrator del settore automotive ntende perseguire, attraverso la realizzazione del presente Programma di R&S, nell'obiettivo di realizzare compatibilità tra produttività e prestazioni elevate attraverso la combinazioni due opzioni strategiche

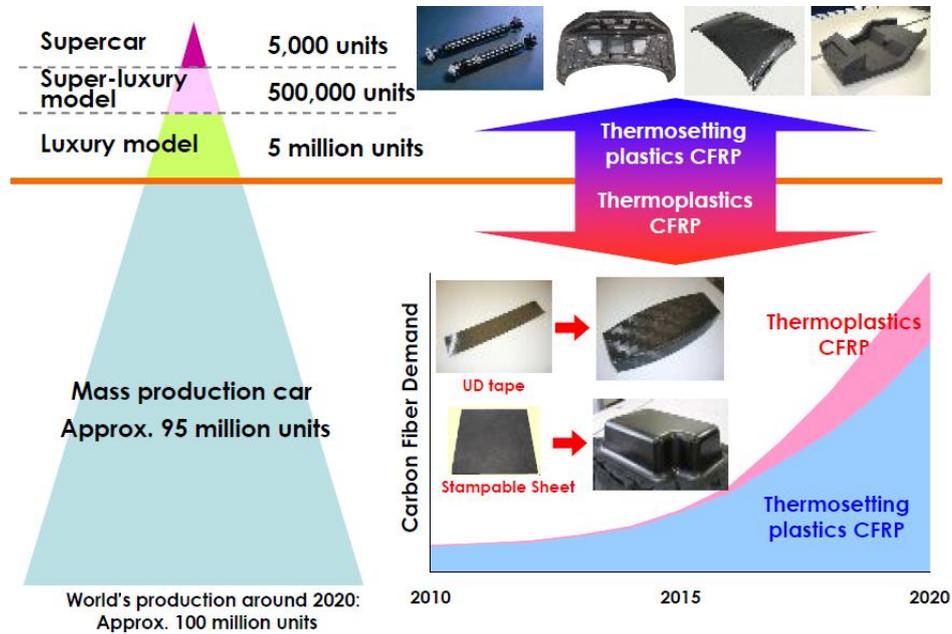
- scale-up tecnologico degli attuali processi produttivi per la produzioni di parti strutturali in materiali composito mediante termoformatura;
- acquisizione di tecnologia di stampaggio di componenti strutturali in composito ad elevato ciclo
- produzione di grandi moduli/sistemi di prodotto con materiali termoplastici

Figura 3.6.2 – L'evoluzione innovativa per l'applicazione dei materiali CFRP perseguita nell'ambito dell'automotive



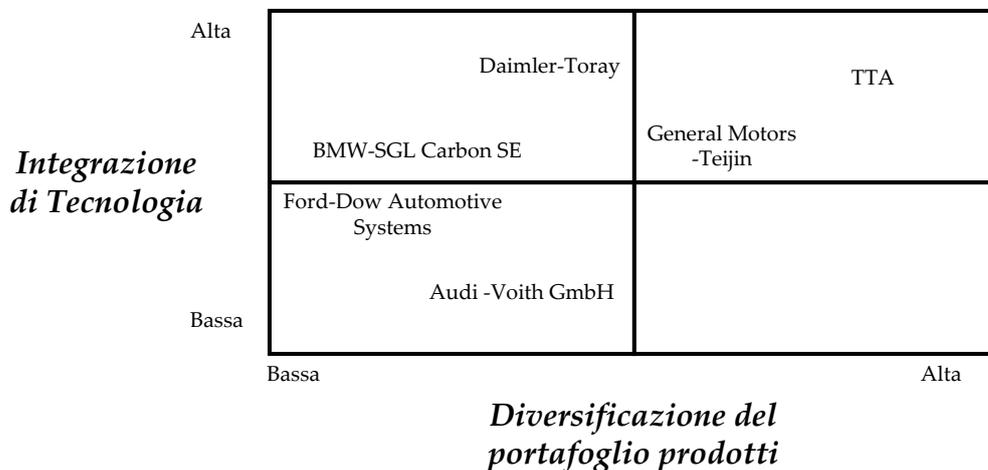
Un tale percorso di evoluzione innovativa permetterebbe di implementare produzioni in serie su grandi volumi, aprendo la possibilità di spostarsi dal segmento delle supercar e superluxury (attuali segmenti target dei principali gruppo automobilistici mondiali) al segmento dei veicoli luxury e di massa (veicoli leggeri), con un notevole ampliamento del mercato di sbocco ed un notevole vantaggio competitivo rispetto ai concorrenti.

Figura 3.6.3 – Il posizionamento ricercato per le produzioni in materiali CFRP nel settore automotive



Un tale percorso strategico è in linea con quanto si sta verificando nel mercato dell'automotive con i grandi OEM che attraverso rapporti di collaborazione, joint venture e fusioni stanno acquisendo competenze e tecnologie necessarie per la lavorazione con materiali in fibra di carbonio delle automobili.

Figura 3.6.4 – I percorsi di cooperazione degli OEM del settore automotive con i produttori di fibra di carbonio



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Brooks J.D., G.H. Taylor , 1968: *Chemistry and Physics of Carbon* – ed.Walker , New York

Callister W. D., 1999: *Material Science and Engineering: An Introduction*, 5^a ed., John Wiley & Sons Inc,

Capone G.J. 1995: *Wet spinning technology in acrylic fiber technology and application*, ed.Masson. Dekker, New York

Ciampaglia G., 2003: *Tecnologia dei materiali compositi meccanici ed aeronautici*, 2^a ed., Roma, IBN Editore, 2003,

Crivelli Visconti I., Caprino G., Langella A., 2009: *Materiali Compositi: Tecnologie - Progettazione – Applicazioni*, Holepi

Diefendorf D., Tokarsky E., 1975: “High-performance carbon fibers”, *Polymer Engineering & Science* Vol. 15, No, 3.

Edie D., 1998: *The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers* - Carbon Vol. 36, No 4, Elsevier Science

Edie D., Diefendorf D.,1993: *Carbon fiber manufacturing in Carbon-Carbon materials and composites*, Noyes Publications, Park Ridges

Ilshner B., Lees J. K., Dhingra A.K., McCullough R. L., 2000: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, "Composite Materials"*, Wiley-VCH.

Jones R. M., 1975: *Mechanics of composite materials*. Mc Graw-Hill

Johnson D.J., 1987: *Structure property relationships in carbon fibers* – Applied Physics

Mazumdar S.K., *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*, CRC Press, 2002,

Niu M., 1993, *Composite airframe structures: practical design information and data.*, Adaso Adastra Engineering Center.

Tsai S. W., Hahn H. T., 1980: *Introduction to Composite Materials*. Technomic.

Tsai, S. W., 1985: *Composite design guide*. Technomic.

Turvey G. J., Marshall I. H., 1995: *Buckling and postbuckling of composite plates*. Chapman & Hall (edited).

Pedersen P., 1997: *Elasticity, anisotropy, laminates*. Corso di elasticità scaricabile all'indirizzo web www.fam.dtu.dk/html/pp.html

Vasiliev V. V., Morozov E. V., 2001: *Mechanics and analysis of composite materials*. Elsevier.

Vergani, L. 2002: *Meccanica dei Materiali*, Mc-Graw Hill

CAPITOLO IV – MODELLO DECISIONALE NELLA DEFINIZIONE DEI PROCESSI DI PRODUZIONE INNOVATIVI PER COMPONENTI IN CFRP

4.1 LA VISIONE DELL'IMPRESA PER PROCESSI

Gli studi della letteratura economico-aziendale di questi ultimi anni si sono rivolti in particolare *alla visione dell'impresa per processi*. Accanto alla visione tradizionale *per funzioni* si è scoperta l'importanza che riveste un'organizzazione per processi nel conseguimento di obiettivi di efficacia ed efficienza dell'azienda, in termini sia di maggiore soddisfazione dei clienti che di riduzione dei costi e quindi di creazione di valore. Una gestione per processi con orientamento al cliente, valorizzazione delle risorse umane presenti in azienda e una continua tensione all'innovazione, rappresentano aspetti chiave per essere competitivi rispetto alla concorrenza. Il cambiamento organizzativo, e cioè il passaggio dall'organizzazione per funzioni a quella per processi, è un momento molto delicato dato che non solo rivoluziona il modo di “lavorare” in azienda, ma ha anche un impatto culturale non indifferente, soprattutto se tale cambiamento è accompagnato pure dall'introduzione di strumenti informatici.

L'organizzazione di successo è quella “vicina al cliente”, cioè in grado di fornire elevate prestazioni agli acquirenti di prodotti e servizi, in termini di costi, tempi e qualità. Ciò richiede un'adeguata gestione aziendale per processi. Ma che cos'è un processo aziendale?

Possiamo definire un processo come “un insieme organizzato di attività e di decisioni, finalizzato alla creazione di un output effettivamente domandato dal cliente, e al quale questi attribuisce un valore ben definito (Bartezzaghi E., 2010).

I processi sono quindi delle aggregazioni di attività finalizzate al raggiungimento di uno stesso obiettivo; per esempio tutte le attività svolte per trasformare le materie prime in prodotti finiti costituiscono il processo di produzione. Ogni processo si caratterizza per l'utilizzo di *input*, e cioè di risorse in entrata o di partenza, e la produzione di *output* come risultato delle attività di quel processo; nell'esempio precedente le materie prime costituiscono parte degli *input* del processo di produzione mentre i prodotti finiti ne costituiscono l'*output*.

L'output di un processo può poi costituire l'input di un processo successivo così come l'input di un processo può essere l'output di quello precedente. Da quanto detto si può rilevare come all'interno dell'azienda stessa esista una catena di clienti- fornitori da soddisfare. Il cliente infatti, non necessariamente deve essere esterno, e cioè acquirente di beni e servizi in cambio di denaro, ma può essere altresì un'unità organizzativa dell'impresa stessa che utilizza il risultato finale di un processo come *input* necessario per lo svolgimento di altri processi aziendali. Le materie prime, per esempio, possono essere l'output del processo di approvvigionamento ma sono l'input di quello di produzione. Quindi riassumendo, il processo non è altro che una catena di attività attraverso le quali, partendo da determinati *input*, si ottengono gli *output* voluti.

Le attività che costituiscono un processo, e quindi il processo stesso, sono caratterizzate da tre elementi fondamentali:

- *costo* delle attività, e quindi del processo;
- tempo* di svolgimento delle attività, per giungere dagli *input* del processo al suo risultato finale comprendendo gli eventuali tempi morti tra un'attività e l'altra;
- qualità* dell'output finale, che risulta dalla qualità di esecuzione delle attività del processo.

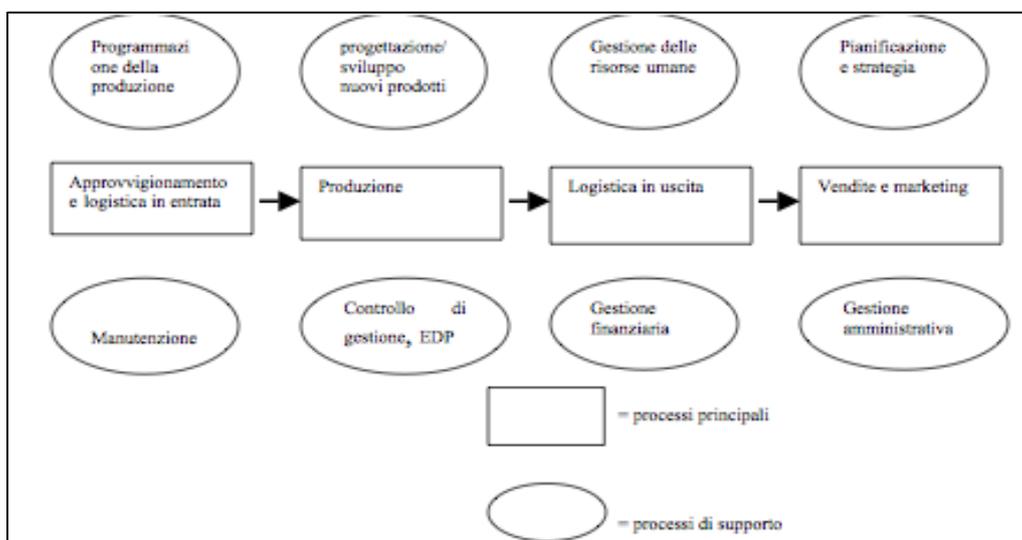
Questi elementi costituiscono una misura dell'efficacia ed efficienza con cui si svolge il processo: tanto minori sono i costi e i tempi impiegati per ottenere i risultati voluti e tanto maggiore è la loro qualità, allora tanto più positivo risulterà il giudizio su quel determinato processo. Un processo che possiede queste caratteristiche è un processo che crea valore perché consente all'impresa di poter offrire al cliente, rispetto alla concorrenza, un beneficio superiore alle risorse impiegate, che si traduce nella corresponsione di un prezzo adeguato.³⁰

Secondo Porter i processi possono poi essere distinti in due tipologie: processi primari e secondari. Quelli primari sono così chiamati perché creano direttamente un valore riconosciuto dal cliente esterno; tali processi sono

³⁰ Il concetto di creazione di valore è così importante che alcuni autori lo richiamano direttamente nella definizione di processo; M. Hammer e J. Champy definiscono i processi come "un insieme di attività che richiede uno o più *input* e crea un *output* che ha valore per il cliente"; e ancora C. Armistead e P. Rowland: "i processi formano delle reti in cui le attività di un certo processo servono ad aggiungere valore agli *input* derivanti dal processo precedente"

sostanzialmente quello della produzione, logistica e vendita. Quelli secondari o di supporto invece sono così detti perché servono per la realizzazione dei processi primari ma non creano di per sé un valore riconosciuto dal cliente esterno, il loro cliente è sostanzialmente interno, generano costi e solo indirettamente benefici; esempi ne sono l'amministrazione, la finanza, la pianificazione, ecc.). Tanti altri autori hanno poi elaborato altre classificazioni dei processi ma in generale tutti concordano nell'individuare due gruppi principali di processi: uno racchiude i processi che si occupano dell'acquisto, trasformazione e vendita, e l'altro comprende tutti quelli di ausilio ai precedenti.

Figura 4.1.1 – Tipologia di processi produttivi aziendali



Impostare l'organizzazione aziendale, e quindi la sua struttura, sulla base dei processi contrasta con l'oramai storica organizzazione per funzioni. Le funzioni, infatti, sono aggregazioni di uomini e mezzi necessari per lo svolgimento di attività della stessa natura, quindi una struttura organizzata per funzioni significa che le attività simili, che assolvono cioè la stessa funzione, che richiedono le stesse competenze e che utilizzano lo stesso tipo di risorse e di tecnologie, vengono raggruppate in un'unità organizzativa sotto un'unica responsabilità; esempi ne sono la funzione acquisti, vendite, produzione, amministrativa, ecc...

L'intera azienda viene dunque suddivisa in unità organizzative funzionali ciascuna delle quali potrà poi suddividersi in reparti e o uffici a seconda delle esigenze; ad esempio la funzione amministrativa si può suddividere in ufficio contabilità, ufficio clienti, ufficio fornitori, ecc., mentre la funzione produzione può suddividersi in reparto assemblaggio, reparto confezioni, reparto controllo qualità, e via dicendo.

Ma qual è allora la relazione tra “funzione” e “processi”? Da quanto detto in precedenza si dovrebbe intuire che mentre le funzioni raggruppano attività che hanno la stessa natura, i processi sono formati da attività anche di diversa natura ma che sono finalizzate al raggiungimento dello stesso *output*. Da ciò si può affermare dunque che i processi aziendali “tagliano trasversalmente” le strutture organizzative e questo perché richiedono il contributo di diverse unità funzionali: un processo “attraversa” più funzioni o analogamente più funzioni concorrono alla realizzazione di un unico processo.

Il valore aggiunto, per l'impresa, nell'utilizzare una visione per processi piuttosto che per funzioni risiede sostanzialmente nell'obiettivo generale di creazione del valore che, come afferma Guatri, significa “accrescere la dimensione del capitale economico, cioè il valore dell'impresa come investimento”. In sintesi, una visione per processi sembra facilitare la realizzazione di obiettivi di profitto, di monitoraggio più efficace delle performance di costo, tempo e qualità; tali meccanismi di controllo infatti consentono di far funzionare meglio i processi creando soddisfazione al cliente e quindi valore per l'impresa.

Da una parte, infatti, si crea soddisfazione nel cliente attraverso l'offerta di beni o servizi che hanno o un prezzo più competitivo a parità di qualità, o una maggiore qualità a parità di prezzo, garantendo una riduzione del tempo di evasione dell'ordine. Questo risultato è raggiungibile solamente se tutte le attività svolte dall'impresa sono efficienti e soprattutto coordinate tra loro; questo significa che deve esserci efficienza dei processi trasversali: l'impresa risulta in grado di soddisfare il proprio cliente solo nella misura in cui può garantire un livello accettabile di efficienza e coordinamento di tutti i processi aziendali.

Dall'altra, una visione per processi consente di identificare più efficacemente le responsabilità nei confronti del cliente esterno e della direzione aziendale e questo grazie alla presenza di una figura responsabile del processo e quindi dei risultati attesi da un insieme di attività appartenenti a più funzioni.

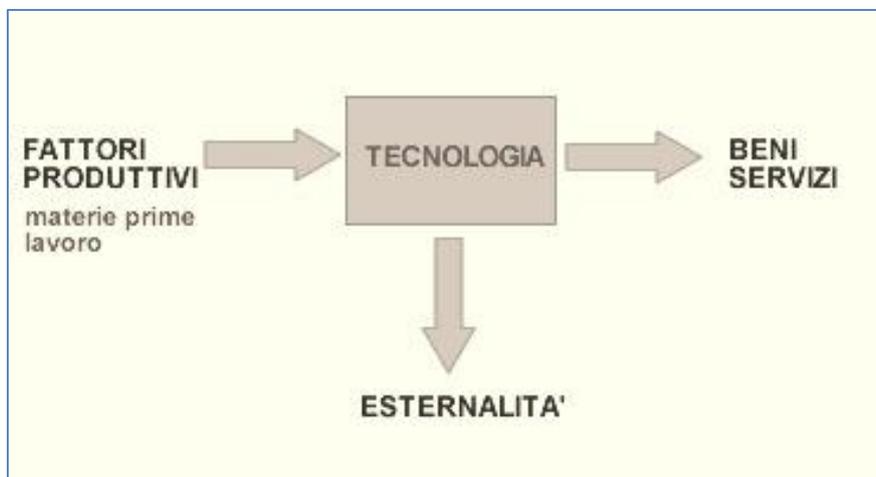
Nella realtà concreta però, non si verifica una completa sostituzione tra i due tipi di struttura, ma piuttosto coesistono: rimangono le funzioni con unità organizzative e metodologie tipiche della visione per processi. Questo succede perché una struttura funzionale consente di identificare con chiarezza i vari settori dell'azienda e quindi i ruoli e la posizione gerarchica che ogni soggetto ricopre; dà un maggiore senso di sicurezza e stabilità rispetto alla struttura per processi. Il compito maggiore è quindi quello di cercare il giusto equilibrio tra le due strutture affinché possano produrre i vantaggi sperati.

4.2 DAI PROESSI AI SISTEMI DI PRODUZIONE

4.2.1 I VINCOLI TECNICO-ECONOMICI ED I FATTORI PRODUTTIVI

Il **processo produttivo** è un procedimento tecnico per realizzare un determinato prodotto. Consiste in una serie sequenziale di operazioni che, sulla base di determinate conoscenze tecniche possedute, permette la lavorazione e la trasformazione degli input di produzione (materie prime e lavoro³¹) al fine di ottenere un prodotto finale.

Figura 4.2.1.1 – *Flusso fisico della produzione*



I fattori produttivi (input) entrano nel processo per essere combinati e trasformati nel prodotto finale (output). La "scatola" al centro dello schema racchiude in sé

- la tecnologia, l'insieme di tutti i processi produttivi disponibili per la produzione di un determinato bene
- e il modo di produzione prescelto dall'impresa.

Come si può facilmente osservare, oltre al prodotto finale (output) la produzione genera anche delle esternalità. Con questo termine si indicano gli

³¹ Prestazioni umane manuali o intellettuali che contribuiscono alla produzione dei beni o dei servizi

effetti esterni che, pur non avendo valore per l'impresa, hanno un impatto sulla società esterna. Un esempio tipico di esternalità negativa è l'inquinamento.

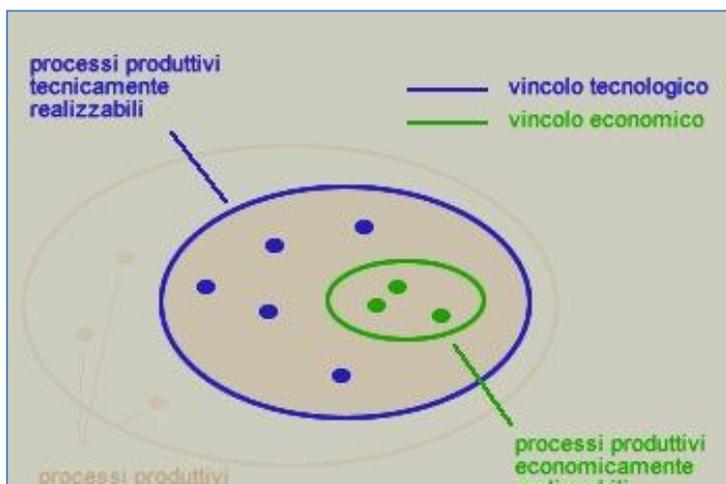
La scelta di un processo produttivo – ovvero del modo tra tanti per produrre un determinato prodotto - è legata sia ai vincoli economici che ai vincoli tecnici dell'impresa.

Il **vincolo tecnologico** consiste nei processi produttivi realizzabili sulla base delle conoscenze tecnologiche e scientifiche dell'impresa o, più in generale, dell'uomo in una determinata epoca.

La produzione non è determinata soltanto dal vincolo tecnologico. In via generale, la scelta della quantità di produzione e del modo di produzione sono determinati essenzialmente dal **vincolo economico**. Alcuni processi produttivi possono essere tecnicamente realizzabili ma economicamente poco convenienti (es. fusione nucleare). Un processo produttivo economicamente non conveniente in un determinato momento temporale potrebbe diventare conveniente nel tempo col progredire della conoscenza scientifica o con il mutare delle condizioni economico-sociali.

Generalmente, il vincolo tecnologico delimita la frontiera dell'insieme dei processi produttivi possibili mentre il vincolo economico determina il sottoinsieme dei processi produttivi fattibili. Nella figura 3.1.2.2 utilizziamo gli insiemi per indicare l'insieme dei processi produttivi tecnicamente realizzabili (blu) e il sottoinsieme dei processi produttivi economicamente realizzabili (verde). I processi produttivi al di fuori dell'insieme del vincolo tecnologico indica i processi tecnicamente non ancora realizzabili (grigio).

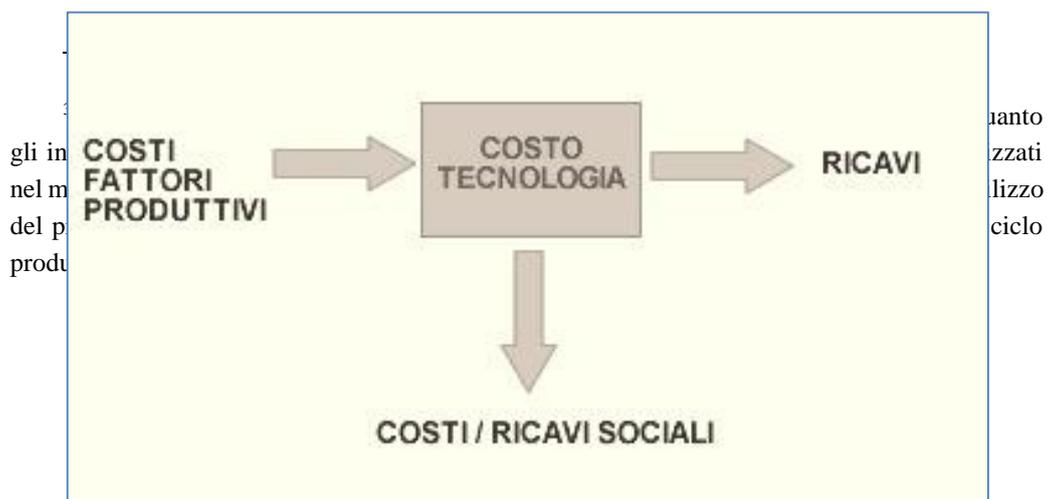
Figura 4.2.1.2 – I processi produttivi realizzabili



Nel medio periodo, ogni impresa sceglie il processo produttivo più conveniente sulla base delle condizioni di ambiente (capitale, concorrenza, brevetti, domanda, ecc.) e delle informazioni a sua disposizione (know-how)³². In condizioni razionali l'imprenditore opta per il processo produttivo che consente di minimizzare i costi di produzione a parità di quantità e qualità del prodotto ottenuto o, in alternativa, di massimizzare la produzione a parità di costi.

Riscrivendo in chiave economica il precedente schema input-output della produzione si ottiene:

Figura 4.2.1.3 – *Approccio economico del flusso produttivo*



Al posto dei fattori produttivi troviamo i costi dei fattori. Ogni fattore produttivo ha un prezzo di acquisto sul mercato (salario, costo di trasporto, costo delle materie prime ecc). La stessa tecnologia ha un prezzo di acquisto in termini di know-how, di ricerca e di capitale investito. In un mercato concorrenziale l'impresa dovrà scegliere la tecnologia, il mix dei fattori produttivi e la quantità di produzione facendo sempre in modo che i ricavi totali siano superiori ai costi totali. Ciò significa che la produzione dovrà essere venduta sul mercato in quantità sufficiente per coprire i costi della produzione. In questa ottica l'impresa dovrà agire sulla produzione tenendo in conto la domanda di mercato e la concorrenza. Concludiamo evidenziando come nel secondo schema abbiamo sostituito il termine esternalità con costi e ricavi sociali. Una esternalità negativa, ad esempio l'inquinamento, è un costo per la società (costo sociale). Anche se l'impresa che lo causa non lo considera tale, il costo sociale entra a far parte dei costi di produzione di altre imprese o delle famiglie. L'inverso accade con le esternalità positive ed i ricavi sociali.

4.2.2 I vincoli di flessibilità e varietà produttiva

I sistemi manifatturieri possono essere classificati in base a diverse caratteristiche. Tra queste, quella riferita al flusso dei materiali che viaggiano nel sistema `e una delle più diffuse ed efficaci, in quanto il flusso caratterizza l'interazione tra gli elementi ed i processi del sistema stesso.

In questa ottica un sistema di produzione si può classificare secondo quattro differenti categorie:

- sistemi orientati al prodotto,
- sistemi orientati al processo,
- tecnologie di gruppo,
- sistemi a postazioni fisse.

I *sistemi orientati al prodotto* sono progettati attorno al prodotto. Essi sono noti anche come linee di produzione dato che il prodotto, una volta entrato nel processo, subisce le operazioni in modo sequenziale, senza mai tornare su macchine o risorse in generale che hanno già effettuato lavorazioni sul prodotto. Quindi i materiali entrano nella linea e procedono nello stesso verso fino all'uscita del sistema. Indubbiamente, le linee di produzione sono i più efficienti ed i più efficaci "layout" produttivi quando si ha a che fare con elevati volumi produttivi. Formare una disposizione delle macchine e delle risorse orientata al prodotto significa rendere dedicati i processi richiesti da quest'ultimo; quindi c'è una tendenza di questi sistemi ad essere economicamente più costosi in termini di macchine complessive utilizzate, a meno che il prodotto abbia un volume tale da assorbire il costo per riarrangiare le varie "facility" in una linea e il costo dovuto al deprezzamento dell'equipaggiamento mentre la linea `e in essere.

Spesso però molti prodotti non hanno una domanda sufficiente per giustificare una linea. Infatti, le macchine scelte per un processo in linea non sono facilmente adattabili per altri prodotti. La risposta a necessità diverse, dove si può avere a che fare con prodotti a domanda bassa o che richiedono variazioni sostanziali in tempi decisamente brevi, `e data dall'uso di job shop o dei cos'i chiamati sistemi produttivi orientati al processo. In questo tipo di layout i "reparti" o "centri" di lavoro sono composti da macchine in grado di poter eseguire lo stesso tipo di lavorazione. In un sistema produttivo di questo tipo, ad esempio, un reparto può essere formato da torni, un altro da presse ed un altro ancora da macchinari per test termici. Parti di un prodotto assegnate ad uno stesso centro di lavoro possono richiedere lo stesso tipo di lavorazione con attrezzaggi diversi e tempi di set-up diversi. Sistemi produttivi di tipo group technology

possono essere utilizzati per convertire sistemi orientati al processo in sistemi pseudo orientati al prodotto. Parti simili di un prodotto, ovvero parti che richiedono processi lavorativi simili, sono raggruppati insieme in quantità sufficienti da giustificare le loro macchine “personali”. Tale raggruppamento forma una cella di lavorazione che è atta a produrre esclusivamente questo insieme di parti. Un sistema a postazioni fisse si realizza in caso di prodotti, quali una nave, un palazzo, un aeroplano, che a causa della loro elevata dimensione rendono impraticabile (spesso impossibile come nel caso di un edificio) lo spostamento del prodotto tra le operazioni da processare. A differenza delle altre tipologie di sistemi produttivi appena discussi, nei sistemi a postazioni fisse tutti i processi produttivi “girano” attorno al prodotto. La classificazione dei sistemi produttivi può essere fatta attraverso lo schema riportato in Figura 4.2.2.1.

Figura 4.2.2.1 – *Classificazione dei sistemi di produzione*



In base allo schema in figura si possono utilizzare tre principali caratteristiche per classificare un sistema di produzione:

- il modo di rispondere alla domanda;
- il modo di realizzare il prodotto;
- il modo di realizzare il volume di produzione.

Relativamente al *modo di rispondere alla domanda* possono essere individuati tre differenti scenari:

- **Produzione su commesse singole:** l'azienda riceve ordini per diversi prodotti per quantità unitarie o lotti di piccole dimensioni per i quali elabora il processo produttivo che può andare dalla progettazione (totale o parziale) allo sviluppo dei cicli di lavorazione fino alla produzione finale. Tale sistema di produzione va adottato qualora sussiste un'elevata differenziazione dei prodotti ovvero è richiesto un elevato contenuto di servizio; la commessa necessita dell'elaborazione di un progetto ad hoc; l'innovazione dei prodotti è frequente; i clienti sono sensibili a: progetto, qualità, velocità e affidabilità delle consegne;

- **Produzione su commesse ripetitive:** l'azienda lavora su catalogo o comunque su una gamma di prodotti ben definiti; vengono definiti anticipatamente tutte le caratteristiche progettuali e tecnologiche del prodotto, ma la produzione inizia solo dopo il manifestarsi dell'ordine del cliente. Tale sistema di produzione va adottato qualora l'azienda è chiamata a produrre prodotti differenziati per clienti stabili; a fornire scaglionate nel tempo; i clienti sono sensibili a: qualità, velocità e affidabilità delle consegne, varietà dei prodotti, prezzo

- **Produzione per magazzino (su previsione):** l'azienda realizza, in genere prima del manifestarsi degli ordini, volumi elevati di prodotti che colloca in un magazzino da cui successivamente servirà i clienti. Tale sistema di produzione va adottato qualora l'azienda è chiamata a produrre volumi di prodotti spesso poco differenziati (prodotti standard); il progetto e la qualità dei prodotti sono determinati sulla base di indagini di mercato per determinare necessità e preferenze (possibile segmentazione); le varietà dei prodotti sono rigidamente determinate; i clienti sono sensibili a: prezzo, velocità di consegna, qualità

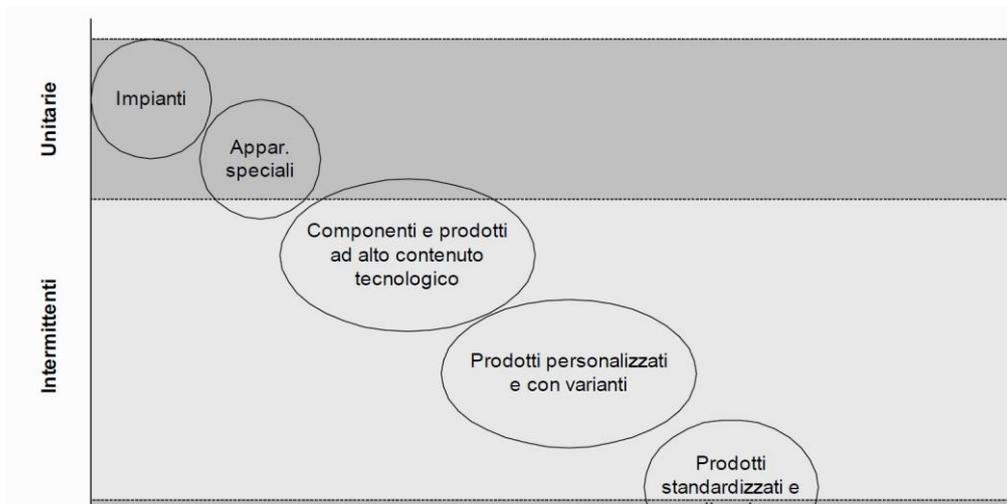
Un'ulteriore classificazione da analizzare è quella in base alla **realizzazione del volume di produzione**. Anche in questa classificazione possiamo individuare tre tipologie di produzioni:

• **Unitarie**: la variabilità dei cicli di produzione è molto elevata e l'attività produttiva è organizzata per ottenere le quantità richieste dai singoli ordini; per tali sistemi di produzione la flessibilità è condizione necessaria e tale condizione viene spesso raggiunta con l'acquisizione di capacità produttiva esterna per: a) sopperire a carenze di capacità transitorie; b) realizzare lavorazioni specializzate;

• Per **lotti (intermittenti)**: i cicli sono meno variabili nel tempo, i prodotti vengono realizzati per lotti di dimensioni anche superiori ai fabbisogni immediati in modo da formare delle scorte destinate a soddisfare eventuali richieste quando gli impianti saranno impegnati per la realizzazione di altri prodotti. Tenuto conto di incrementi nei costi di investimento e di crescente complessità gestionale, può assicurare un'alta varietà di prodotti e di volumi. In particolare, incrementi di utilizzazione degli impianti si possono ottenere: a) raggruppando elevati volumi di prodotti in ogni fase del processo produttivo, b) producendo molti prodotti dello stesso tipo (riduzione dei tempi di riattrezzaggio), c) utilizzando i tempi di attesa tra lavorazioni successive (ad esempio, per ispezioni).

• **Continue**: i cicli restano costanti nel tempo anche per periodi estesi, si ha quindi la produzione ininterrotta di un prodotto dalle caratteristiche omogenee nel tempo e un magazzino polmone. In tali casi, le stazioni di lavoro sono disposte secondo la sequenza delle fasi successive di lavorazione; i volumi elevati e le caratteristiche dei materiali base ne consentono un facile trasferimento lungo le diverse fasi; gli impianti operano spesso 24 ore al giorno tutti i giorni; le fasi di lavorazione sono altamente automatizzate, spesso l'operatore umano ha solo funzioni di controllo; si hanno elevati investimenti tecnologici e impiantistici; il fattore critico è il costo di produzione ⇒ necessità di elevati volumi; ⇒ elevata rigidità dei sistemi di produzione; l'elemento base della gestione è la tecnologia produttiva

Figura 4.2.2.2 - *Classificazione dei sistemi di produzione secondo il volume di produzione*



Nello schema assume particolare rilievo la classificazione secondo il ***modo di realizzare il prodotto***. A volte gli elementi che costituiscono il bene finale non possono essere facilmente identificati: il prodotto non può pertanto essere scomposto a ritroso, poiché i componenti originali non sono più distinguibili o hanno cambiato natura. In questi casi si parla di **produzione per processo**, ne sono un esempio i procedimenti utilizzati per ottenere acciaio, carta e cemento.

Le produzioni per processo si caratterizzano per:

- la trasformazione fisica, chimica o della natura dei componenti;
- un ciclo tecnologico definito e, spesso, vincolante (ciclo tecnologico obbligato);
- l'adattabilità ad una gestione di tipo continuo o intermittente (indipendentemente dai flussi continui o discontinui di materiali –buffer di processo).

Altre volte il bene ottenuto è costituito da un certo numero di componenti, o parti, in genere di diversa natura. Si può parlare allora di **produzione per parti o manifatturiera**; si pensi per esempio a prodotti quali automobili, elettrodomestici e apparecchiature elettroniche. Mentre le produzioni per processo sono caratterizzate da un ciclo tecnologico ben definito e vincolante

(ciclo tecnologico obbligatorio) i procedimenti per parti invece sono caratterizzati da una grande varietà nei cicli tecnologici delle parti componenti, cicli che spesso ammettono numerose varianti, e possono essere pertanto definiti come cicli tecnologici non obbligati che spesso portano ad affrontare problematiche di tipo impiantistico e gestionale. Una caratteristica immediata di questo tipo di produzione è che un prodotto richiede una fase di assemblaggio con la conseguenza che il processo produttivo associato comprende quindi sia *fasi di fabbricazione* che *fasi di montaggio*.

Per quanto riguarda la fase di fabbricazione si distingue tra

- Produzione per reparti (job shop) nelle quali ciascun ordine di lavorazione (pezzo unico o lotto) richiede operazioni da più centri di lavoro; il ciclo tecnologico può ammettere alternative (aggregazione delle macchine/reparti per lavorazioni omogenee ed utilizzo di attrezzature comuni); spesso sono utilizzate stazioni di lavoro *general purpose*³³.

³³ La *produzione per reparti* è tipica dei processi intermittenti che svolgono più cicli produttivi per più prodotti. Le macchine e le altre risorse sono dunque versatili, aggregate in reparti specializzati (stampaggio, torneria, verniciatura, ecc.). Questi reparti possono svolgere una certa gamma di operazioni grazie alla tecnologia delle macchine e vengono dotati di una certa autonomia che può essere vista anche come la risoluzione di problemi legati alla risorsa umana. La versatilità degli impianti così organizzati, permette di effettuare molti cicli di lavorazione intermittenti con una vasta gamma di combinazioni delle fasi di lavorazioni. I problemi che tale disposizione può far sorgere sono relativi all'aumentare della movimentazione dei materiali che fanno nascere categorie di costo di tipo "improduttivo", la presenza di giacenze di materie, di semilavorati, di componenti e di prodotti che sorgono anche per motivi dei tempi diversi delle macchine, quindi dei vari reparti, la maggiore difficoltà nella programmazione e nella gestione del processo produttivo che, quindi, porta anche ad un aumento dei costi amministrativi. L'evoluzione tecnologica e l'evoluzione nei sistemi di programmazione e di controllo hanno fatto sì che la versatilità che l'impianto recupera con questa disposizione sia compatibile in termini economici con le istanze provenienti da mercati sempre più maturi e saturi. La disposizione per reparto viene adottata dalle imprese a cui è richiesta alta flessibilità e che quindi producono su commessa per progetto o su modello per piccoli lotti. I settori merceologici in cui è frequente riscontrare questa soluzione sono quelli meccanici, macchine utensili, carpenteria, elettromeccanico, ecc. Queste due soluzioni rappresentano gli estremi di una vasta gamma di soluzioni che derivano da esigenze diverse delle aziende che vanno dalla loro evoluzione organizzativa, da esigenze di mercato, dalla scelta del grado di automazione e quindi della tecnologia

- Produzione per cellule (cell production) in cui si assiste alla lavorazione di famiglie di prodotti con cicli omogenei; cellule di macchine tecnologicamente non omogenee; flessibilità operativa contenuta; si può perseguire maggiore efficacia qualora: il progetto dei prodotti preveda molti elementi comuni, le informazioni e le attrezzature necessarie siano posizionate all'interno della cellula, gli operatori abbiano una formazione interfunzionale³⁴;

- Linee di produzione per prodotto (transfer lines) caratterizzate da produzioni di elevate quantità poco differenziate; insieme di macchine che realizzano una sequenza rigida e prestabilita di lavorazioni; rigida e prestabilita di lavorazioni; flusso di materiali lineare teso a garantire il contenimento del work-in-process; la specificità delle stazioni di lavoro consente un contenimento dei costi (attrezzaggi); la costanza delle sequenze implica semplicità gestionale ma scarsa flessibilità operativa; sono associabili alla produzione ripetitiva e continua

³⁴ La *produzione per cellule* rappresenta la soluzione verso la quale si sono orientate o si stanno orientando le aziende per ovviare alla rigidità della produzione in linea non più economica per i motivi già evidenziati e per ovviare alla complessa e non sempre economica gestione della produzione per reparti. Con questa disposizione le unità produttive vengono aggregate in gruppi secondo la sequenza delle operazioni elementari contenute in fasi complesse del ciclo produttivo. In ogni gruppo, quindi, le macchine sono disposte in sequenza rispettando la sequenza delle fasi di lavorazione fino a ricostruire l'intero processo produttivo. Il processo produttivo può essere suddiviso in una logica di disposizione di linea, quindi all'interno del gruppo ogni unità può essere specializzata in una determinata operazione, mantenendo, dunque, certi caratteri della disposizione per reparti. Questa organizzazione è possibile solo nei casi in cui è possibile suddividere in fasi tecnicamente simili il ciclo produttivo o i vari cicli produttivi, dovendo produrre più prodotti, in modo tale che, cumulando i singoli flussi produttivi si possano ottenere volumi che permettano di saturare e di bilanciare la capacità produttiva dei singoli gruppi e, quindi, dell'intero processo produttivo

Figura 4.2.2.4 – *Classificazione dei sistemi di produzione sulla base del modo di realizzare il prodotto*

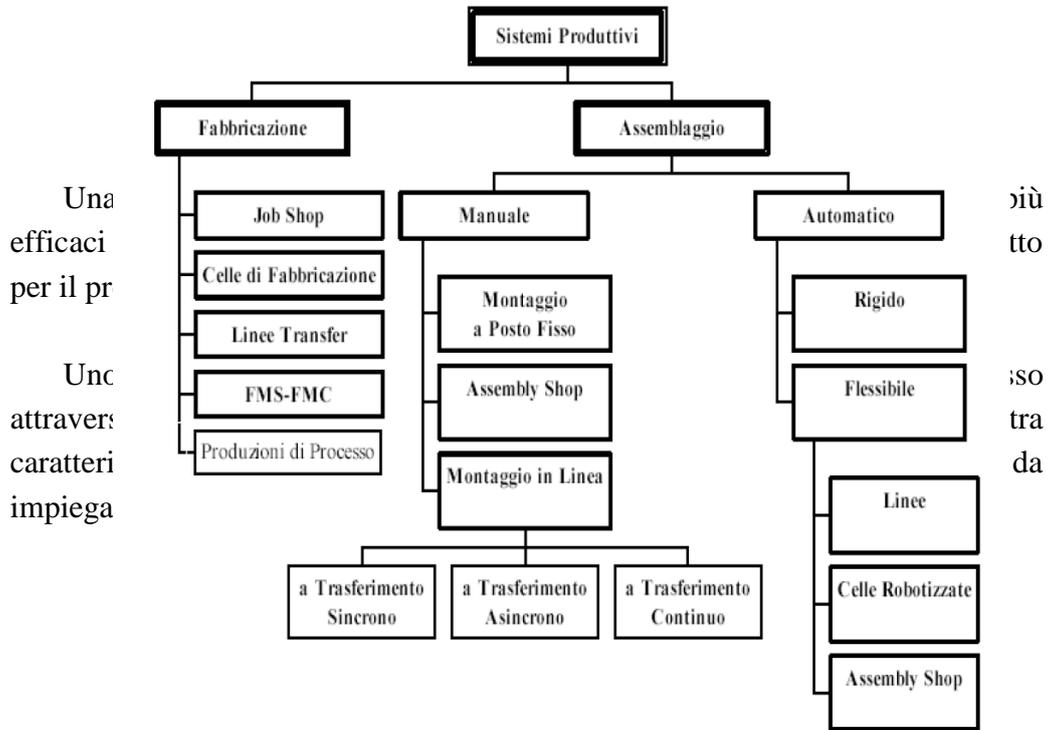
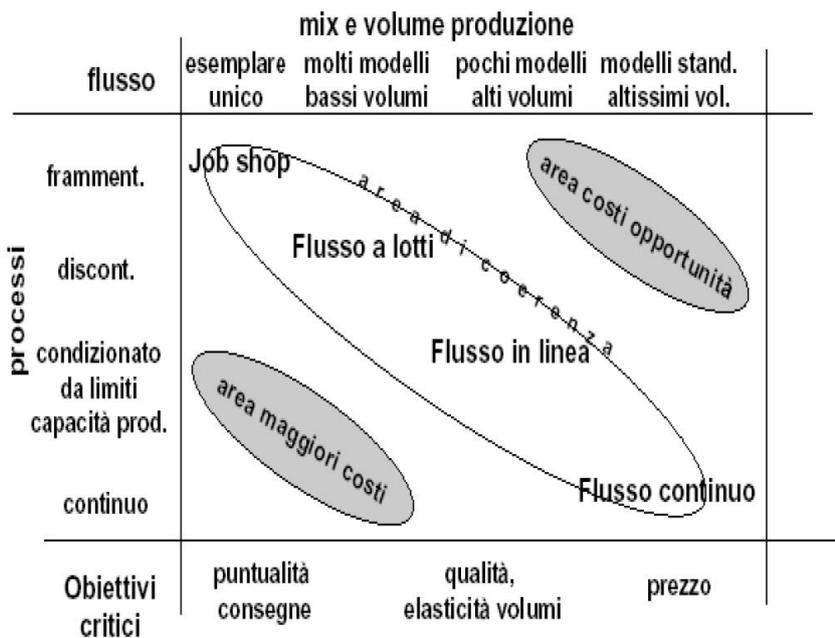


Figura 4.2.2.5 – *Matrice prodotto - processo*



Le condizioni ideali sono quelle corrispondenti ai punti della diagonale principale (area di coerenza). In tal senso un'azienda che lavora pezzi con caratteristiche assai variabili e ciascuno in serie pressoché uniche, è opportuno che impieghi un processo di lavorazione discontinuo di tipo job shop. Un'azienda la cui produzione è di tipo standard, limitata ad un numero non elevato di modelli, ciascuno però fabbricato in grandi quantità, fa ricorso ad un processo produttivo di tipo ripetitivo organizzato su linee di assemblaggio. La produzione di beni di largo consumo, o comunque richiesti in grandi quantità, dovrà necessariamente operare mediante processi di lavorazione continui.

Il posizionamento dell'azienda in punti al di sopra o al di sotto della diagonale principale è indicativo di condizioni di lavoro non perfettamente bilanciate, sulle quali si possono formulare le considerazioni che seguono:

Un punto al di sopra della diagonale indica che:

- gli investimenti essi realizzati sono limitati;
 - il sistema produttivo ha una struttura sufficientemente flessibile da consentire variazioni abbastanza rapide dell'assetto produttivo in caso di mutamento della domanda. Infatti la parte alta della matrice è caratterizzata da macchine “general purpose” organizzate in base al layout \di processo.
 - i costi di fabbricazione sono elevati giacché vengono impiegate nella produzione macchinari ed attrezzature non specialistiche.

Un punto al di sotto della diagonale indica che:

- Gli investimenti fissi realizzati sono molto elevati in quanto sono stati installati impianti e macchinari \specialistici, costruiti su misura per lo specifico processo che si intende sviluppare.
 - il sistema produttivo ha una struttura scarsamente flessibile, dovuta alla natura specialistica delle risorse utilizzate. In tal senso risulta difficile adeguare la produzione ad eventuali mutamenti nelle caratteristiche del prodotto desiderato.
 - i costi unitari di fabbricazione sono ovviamente i più bassi possibili, in virtù delle attrezzature e delle macchine specialistiche impegnate nella produzione.

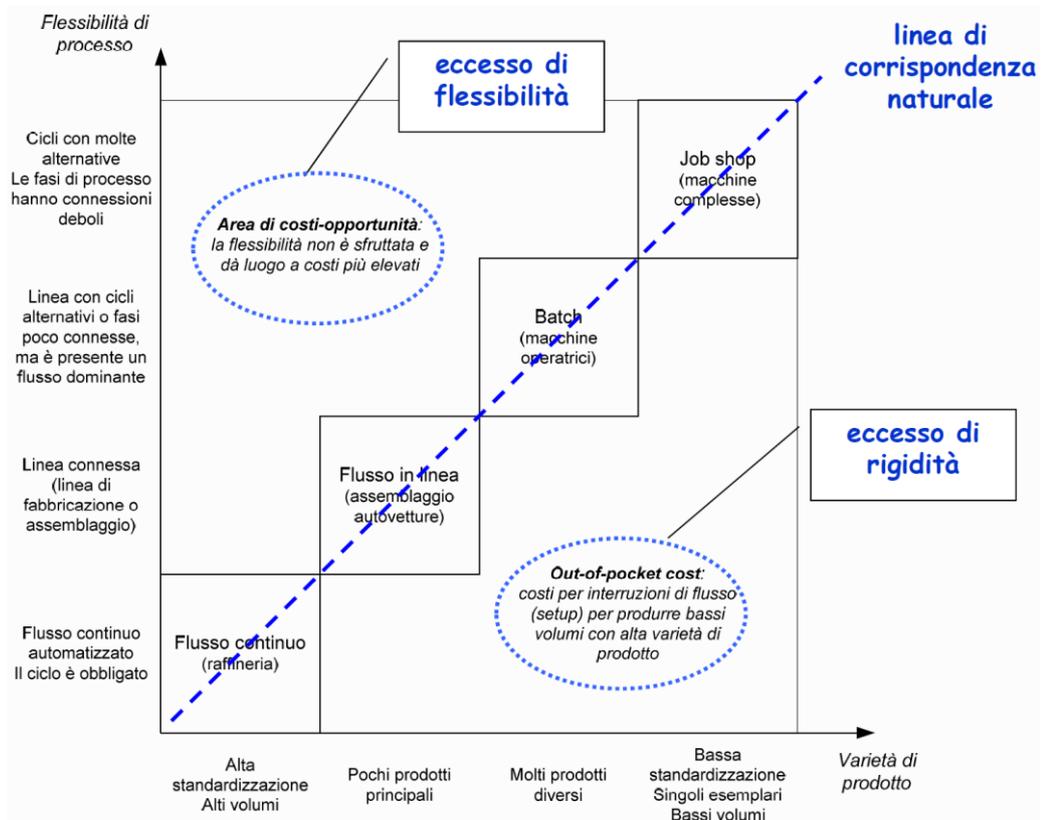
In definitiva la matrice prodotto processo dà l'idea del corretto equilibrio tra economia di scala e flessibilità operativa. L'automazione flessibile consente di realizzare anche piccoli volumi di produzione in maniera rapida ed economica. In tal senso l'automazione flessibile induce ad uno spostamento a destra della diagonale principale; ossia rende l'organizzazione del lavoro di tipo discontinuo job shop conveniente anche nel caso di produzione di articoli in piccole quantità ma molto numerosi e diversificati.

Si osservi che la matrice pone in relazione un solo attributo di prodotto con una sola competenza di processo.

In realtà sono presenti relazioni:

- tra flessibilità di processo e costo del prodotto (la standardizzazione comporta economie di scala);
- tra flessibilità di processo e tempi di risposta (il tempo di attraversamento delle linee è più breve di quello dei job shop).

Figura 4.2.2.6 – Matrice varietà – flessibilità



4.3 ANALISI COMPARATIVA DELLE TECNOLOGIE PER I MATERIALI COMPOSITI: I KPI ED IL MODELLO DI ANALISI

Nell'industria manifatturiera i criteri di scelta dell'utilizzo di una determinata tecnologia sono molteplici e la selezione per l'analisi comparativa tra i vari processi disponibili può assumere significato in termini di macro-distinzioni, essendo questo un settore in continua evoluzione in cui l'innovazione modifica a ritmi elevatissimi il panorama tecnologico di riferimento.

In relazione ai materiali compositi in fibra di carbonio la selezione della tecnologia di riferimento è strettamente vincolata a tale tipologia di materiali.

Il campo dei materiali compositi si caratterizza, infatti, per la peculiarità di non poter disgiungere la progettazione del materiale da quella della geometria della parte da realizzare e del relativo processo tecnologico da implementare ed in questo senso nella figura del progettista si vanno, quindi, a riassumere sinergicamente le competenze riguardanti i tre ambiti: materiale – prodotto – processo.

Il punto chiave dell'utilizzo dei materiali compositi è che essi possono essere progettati e preparati partendo da opportuni componenti in modo da ottenere le proprietà finali desiderate. Il concetto di progettazione è quindi di fondamentale importanza: la struttura non è più preparata dopo averne progettato la forma e calcolate le dimensioni, note le proprietà del materiale costituente, così come avviene nei materiali "convenzionali", ma la struttura può essere realizzata contemporaneamente al materiale che la costituisce e il materiale progettato e fabbricato avrà le proprietà desiderate in unione delle proprietà che si vogliono attribuire alla struttura. L'essere "progettabili" costituisce, quindi, l'impulso che spinge sempre più all'utilizzo di materiali compositi.

Nell'affrontare la progettazione di componenti strutturali in materiale composito il progettista meccanico ed il tecnologo si trovano, quindi, a dover collaborare sinergicamente nel design for manufacturing delle parti.

Tale caratteristica associata alla continua evoluzione dei materiali compositi e alla crescente innovazione che modifica a ritmi elevatissimi il panorama tecnologico di riferimento, rende, quindi, molteplici i criteri sia alla base della scelta dell'utilizzo della tecnologia di riferimento che nella selezione per l'analisi comparativa tra i vari processi disponibili.

Pertanto, in base suddetti presupposti, un'analisi comparativa che evidenzi in maniera oggettiva i limiti delle tecnologie per le produzioni basate

sull'impiego dei materiali compositi in fibra di carbonio all'attuale stato dell'arte e le potenziali direzioni di sviluppo può essere coadiuvata focalizzando l'attenzione su tre fondamentali KPI, che ne devono rappresentare i temi di indagine e confronto:

- prestazioni strutturali (resistenza statica e rigidezza, modulo elastico, frazione in volume di fibre, prestazioni in riferimento all'urto);
- costi (tempi e ratei produttivi, costo di manodopera, costi di attrezzamento e ripetibilità ed affidabilità del processo);
- vincoli di natura morfologica (geometria del componente, limiti sulla resa estetica).

Per permettere di discriminare quale processo tecnologico possa essere più opportuno per una serie di componenti allora vengono proposti in questo paragrafo dei parametri identificativi della tecnologia, di semplice valutazione che sia rappresentativi delle proprietà finali.

La prima classe di parametri da analizzare sono quelli legati alle proprietà meccaniche, infatti dalle stime l'utilizzo di compositi in fibra di carbonio permetterebbe un alleggerimento fino al 70% del peso rispetto ad una equivalente struttura in acciaio (Wheatley et al 2014).

Quali parametri caratterizzanti dal punto di vista meccanico vengono individuati i parametri elastici e di resistenza del materiale. Materiali prodotti con tecnologie differenti avranno una propria firma in termini di rigidezza che potrebbe discriminare o meno il loro utilizzo in funzione dei requisiti strutturali a cui il progettista deve attenersi.

Nel capitolo seguente verranno riportate le caratteristiche meccaniche di compositi prodotti con le tecnologie di consolidamento in autoclave, in RTM con matrice di tipo epossidico e di laminati prodotti per termoformatura. Come parametro meccanico addizionale verrà considerata la resistenza interlaminare, questa proprietà rappresenta una peculiarità di elementi realizzati in composito a fibra lunga e viene misurata in accordo agli standard ASTM ed è direttamente influenzato dalla tecnologia in esame e dai parametri di processo utilizzati.

Crashworthiness è la capacità di una struttura di assorbire energia d'urto in modo controllato. La sopravvivenza è governata dalle forze di decelerazione indotte durante l'impatto. La Crashworthiness è determinata dalla progettazione della struttura e dal materiale con cui è fabbricato. I metalli duttili riescono ad

assorbire l'energia cinetica d'urto deformandosi. Al contrario, i materiali compositi non sono duttili, essi sono rinforzati da fibre relativamente fragili. Anche se tali fibre sono contenute da una matrice relativamente duttile, un composito assorbe energia d'urto dura principalmente per delaminazione, e debonding, all'interfaccia fibra / matrice e frantumandosi in frammenti - cioè, creando grandi quantità di nuova superficie libera. Così, la sfida progettuale è promuovere una rottura controllata della struttura composita. Una attenta progettazione della struttura in composito può raggiungere assorbimenti di energia molto maggiore di quanto possibile con i metalli.

Poiché è la struttura assemblata che in ultima analisi deve entrare in servizio, crash test della struttura completa - per esempio, l'automobile totale - è l'ultima prova, Ovviamente, tali test sono costosi per cui i sottoinsiemi possono essere testati prima; ciascun sottogruppo può essere valutata per le prestazioni e poi ridisegnato e rianalizzato, se necessario. Ma questo livello di test può essere preceduto da molto meno costose prove su piccoli coupon su scala di laboratorio per valutare più la capacità di assorbimento di energia dei materiali. Per cui vengono individuati come parametri caratteristici per la valutazione delle proprietà di impatto la capacità di assorbire energia di un pannello in composito realizzato con le tecnologie di processo in esame.

Un requisito fondamentale da tenere in considerazione per l'esperienza automotive è la valutazione dei tempi ciclo. Per includere nella analisi questo parametro vengono considerate le singole operazioni unitarie in cui può essere scomposto il processo di produzione, il tempo necessario ad ognuna di queste, stimato in ore di lavoro è utilizzato per la valutazione. Ovviamente alcune fasi di lavoro saranno coincidenti ed escluse dalla valutazione comparativa.

La alta standardizzazione propria del settore automotive ha portato alla automazione della maggior parte delle operazioni attraverso la massiccia inclusione di robot nelle catene di assemblaggio componenti. Un parametro di qualità che andremo ad analizzare sarà allora la valutazione di quante ore uomo sono necessarie per la tecnologia presa in considerazione. Questo tipo di indicatore in termini statistici fornirà una valutazione di possibili deviazioni dalla standardizzazione di prodotto. Allo scopo un indice qualitativo che verrà considerato è dato dalla possibilità di automatizzare il process.

Infine, viene esaminata la qualità estetica dei prodotti in termini di finitura superficiale, della possibilità di realizzare geometrie complesse che possano portare alla realizzazione di strutture ad alto valore aggiunto.

Sulla base dei suddetti drivers è possibile infatti effettuare un'analisi comparativa tra le differenti tipologie di sistemi produttivi attualmente in essere nel settore aeronautico ed in quello dell'automotive, ossia:

- le tecnologie che si basano sul lay-up di tessuti preimpregnati: Prepreg + Autoclave Prepreg senza Autoclave (Prepreg + Pressa);
- le tecnologie di injection moulding: RTM e simili; Vacuum Infusion e simili;
- le tecnologie che si basano sul posizionamento continuo del rinforzo: Filament Winding; Pultrusione; Pull Winding; Braiding;
- le tecnologie che utilizzano preimpregnati con resina termoplastica: come il Termoforming.

Questo *modello* di approccio sintetico ha come scopo il fornire una illustrazione ragionata di un modello decisionale rispetto all'intero panorama del set di tecnologie disponibili ed in questo senso sarà di supporto nell'analisi della fattibilità in merito al trasferimento di tecnologie che, standardizzate nell'ambito del settore aeronautica, possono trovare applicazione in quello dell'automotive.

4.4 LA CARATTERIZZAZIONE DELLE TECNOLOGIE DI LAVORAZIONE DEI MATERIALI CFRP SULLA BASE DEL MODELLO DI ANALISI

4.4.1 Prepreg lay-up

Il manual prepreg lay-up consiste nella deposizione manuale di rinforzi preimpregnati su stampi aperti con compattazione mediante sacco a vuoto e cura in autoclave.³⁵

Le fibre continue sono allineate e sottoposte ad un trattamento superficiale che ne migliora l'adesione con la matrice. Esse vengono poi rivestite per immersione in un bagno di resina fino ad ottenere un foglio o nastro. In seguito, i singoli fogli vengono assemblati in una struttura laminata. Importante è sottolineare che la completa polimerizzazione della matrice deve avvenire durante l'assemblaggio dei fogli, per fare in modo che la matrice sia un costituente unico. Quindi si deve fare particolare attenzione durante la prima fase di lavorazione, creando delle strutture pre-impregnate (prepreg) che non devono completare la polimerizzazione. Essa dovrà completarsi come detto durante la formazione del composito, attraverso un aumento della temperatura e della pressione.

I processi a stampo aperto offrono alcuni vantaggi rispetto ad altre tecnologie più complesse e capaci di ratei produttivi medio alti, e sono utilizzati per numerose applicazioni specializzate

Sotto il profilo delle *prestazioni meccaniche* il manual prepreg lay-up con cura in autoclave, insieme alle tecnologie di braiding, garantiscono le maggiori proprietà meccaniche in rapporto al gruppo di tecnologie considerate.

Nel primo caso il raggiungimento di ottime prestazioni in termini di resistenza statica ed elevata rigidità è permesso dall'uso di rinforzi preimpregnati che garantiscono un ottimo controllo dell'uniformità della distribuzione di resina e delle percentuali di vuoto, ed un'ottima compattazione, sicuramente migliori rispetto alle tecnologie di infusione di resina ed in generale alle tecnologie che fanno uso di rinforzi secchi. Inoltre la grande libertà di realizzazione di qualunque tipo di geometria, tipica di questo processo, e la possibilità di inserire nel lay-up rinforzi localizzati unidirezionali in

³⁵ Per un dettaglio della tecnologia del prepreg lay-up si rimanda al paragrafo 3.4.1.

corrispondenza delle isostatiche di tensione per poter meglio rispondere alle linee di carico permette l'ottimizzazione delle capacità strutturali alto-resistenziali della parte. Tuttavia, rispetto ai processi di compression molding, tale tipologia di tecnologie presenta una limitata possibilità di utilizzare riempitivi quali schiume o pannelli sandwich per modificare le proprietà.

Le prestazioni in riferimento all'urto dei componenti realizzati con questa tecnologia sono seconde solo a quelle realizzate per mezzo del processo di braiding. In virtù della grande libertà di progettazione propria del manual prepreg lay-up, le già alte proprietà meccaniche possono essere accompagnate alla realizzazione di parti dalla geometria appositamente studiata per massimizzare la quantità di energia assorbita in caso di impatto (elevato crash-worthiness).

Sotto il profilo del *rateo produttivo e tempo di ciclo* questa tecnologia garantisce il peggior rateo produttivo in riferimento ai processi produttivi basati sull'impiego dei materiali compositi. L'estrema manualità della manipolazione dei tessuti preimpregnati e l'esecuzione della lunga cura in autoclave si ripercuotono, infatti, sul tempo di ciclo che risulta molto lungo. Questi limiti rendono il manual prepreg lay-up più adeguato per ratei produttivi non superiori ai 200 – 300 pezzi/anno. Molto elevato risulta, inoltre, anche il tempo di post-stampaggio e riattrezzaggio, in quanto dopo ogni ciclo lo stampo deve essere ripulito e riparato manualmente per il ciclo successivo. Il manual prepreg lay-up risulta, quindi, una tecnologia applicabile solamente alle piccole serie di parti dalle dimensioni compatibili con la grandezza dell'autoclave e grazie alla sua versatilità ed affidabilità tipicamente viene utilizzato per tutte quelle applicazioni di compositi per veicoli ad alta performance, quali auto da corsa, aerei e veicoli spaziali.

In riferimento, invece, ai *costo di attrezzamento* il manual prepreg lay-up risulta la tecnologia più efficiente. Gli attrezzamenti si limitano, infatti, per lo più alla realizzazione di uno stampo aperto, che è generalmente costruito in materiale composito e, quindi, è molto meno costoso degli stampi in acciaio tipici dei processi a stampo chiuso quali RTM o Compression Molding. Altro vantaggio rispetto agli stampi metallici è il fatto che questo sia realizzato con materiali dal comportamento termico simile rispetto ai materiali di formatura. Questa caratteristica fa sì che stampo e pezzo presentino le stesse dilatazioni

termiche in presenza degli stessi gradienti di temperatura, il che limita i problemi di deformazione e degradazione estetica che si potrebbero avere a seguito di scorrimento tra le superfici. La forte manualità tipica di questo processo e il basso costo di attrezzamento, con la conseguente possibilità di modificare senza spese eccessive lo stampo, permette, quindi, una grande facilità di modifiche del progetto

Sotto il profilo del *costo di manodopera* in linea con quanto esposto riguardo all'estrema manualità di questo tipo di laminazione, il manual prepreg lay-up risulta la tecnologia dal maggior costo di manodopera. Negli ultimi anni si sta infatti osservando uno spostamento della produzione di questo tipo di parti nei paesi dal minor costo del lavoro, quali Taiwan e Cina per quel che riguarda l'oriente, e Romania per quel che riguarda i paesi europei emergenti.

In merito al driver della *ripetibilità ed affidabilità*, il manual prepreg lay-up risulta una tecnologia poco efficiente. L'elevato ricorso al lavoro manuale ed alla perizia delle maestranze può portare, infatti, a ridotti livelli di affidabilità del processo produttivo ed alla conseguente bassa ripetibilità dei componenti. Questo può causare un aumento degli eventuali successivi costi di finitura e/o assemblaggio per necessari aggiustamenti e modifiche.

Sotto il profilo, invece, dei *vincoli di forma*, il manual prepreg lay-up consente di realizzare forme di qualunque tipo e dalla estrema complessità geometrica.

Infine, dal punto di vista della *resa estetica* la qualità superficiale dello stampo è di fondamentale importanza. Stampi e utensili per l'industria dello stampo aperto sono spesso realizzati in materiale composito e per l'ottenimento di buone finiture superficiali vengono utilizzati stampi appositi e particolari gel da utensile che realizzano una patina protettiva sulla superficie del pezzo finito. Insieme alle tecnologie di compression molding, il manual prepreg è il processo produttivo a cui si ricorre di solito nel momento in cui si voglia ottenere il classico effetto "carbon look". Il manual lay-up può fornire buone prestazioni ma solamente su un lato del laminato finale, cioè quello affacciato allo stampo, e per questo in applicazioni in cui sia necessaria l'esposizione completa di entrambe le superfici della parte saranno preferibili tecnologie a stampo chiuso.

In conclusione dall'analisi svolta in relazione alle sei variabili di riferimento del modello di calcolo adottato si può affermare che il manual prepreg lay-up è particolarmente adatto a componenti caratterizzati sia da un volume produttivo annuale approssimativamente di 1 tonnellata sia da curvature che impediscono qualsiasi forma automatizzata di lay-up. Esso utilizza l'eccezionale destrezza della mano dell'uomo per disporre e conformare prepreg a superfici con doppia curvatura e a dettagli di macchine come flange, nervature, fori e pale.

Dal punto di vista dei costi questo tipo di processo richiede elevati investimenti iniziali. Il manual prepreg lay-up, inoltre, non è un processo pulito, dato che le maestranze vengono a contatto fisicamente con i materiali in lavorazione e l'utilizzo di materiali preimpregnati è caratterizzato da elevata evaporazione, emissione e quindi esposizione a composti volatili organici (VOCs)³⁶.

Un ulteriore sforzo finanziario iniziale elevatissimo, necessario per tale processo produttivo, è poi quello necessario per l'acquisto di un autoclave. Al giorno d'oggi, nonostante molti tentativi sperimentali, il lay-up manuale di prepreg costituisce l'approccio che offre la migliore qualità rispetto al costo reale per la creazione di molti componenti di grandi o piccole dimensioni

4.4.2 Prepreg lay-up + Pressa calda

Il processo consiste nella deposizione manuale o automatizzata di rinforzi preimpregnati su di un semi-stampo caldo, in modo molto simile a ciò viene fatto in manual prepreg lay-up, e nel sostituire le fasi di compattazione con sacco a vuoto e cura in autoclave con una più rapida compattazione e cura in pressa calda, allo stesso modo di ciò che è fatto per i prodotti SMC in compression molding³⁷.

³⁶ Negli anni '80 dello scorso secolo molte aziende per fuggire agli importanti investimenti in impianti di depurazione dell'aria resi necessari dalle normative di sicurezza sul lavoro, hanno preferito convertire la propria produzione a tecnologie più pulite quali quelle di stampo chiuso.

³⁷ Nelle migliori applicazioni il tessuto prepreg viene preliminarmente preformato per permettere un facile e rapido caricamento nello stampo caldo. Le due metà dello stampo sono realizzate in materiale metallico e lo spazio chiuso dall'accoppiamento maschio/femmina definisce la forma e lo spessore del componente

L'attrezzaggio è montato sui piatti di una pressa ed è usualmente riscaldato elettricamente o da sistemi ad olio o vapore. Nel caso di riscaldamento ad olio o vapore i condotti di passaggio sono direttamente ricavati nello stampo. Quando si usa elettricità, le resistenze vengono installate dentro allo stampo. Per componenti piccoli il calore può essere trasmesso attraverso piastre riscaldate all'interno della pressa stessa. Il ciclo di cura può essere accuratamente controllato in modo tale che il processo possa realizzare componenti dalle altissime proprietà meccaniche, con elevate tolleranze di stampaggio realizzabili ed il processo può essere velocemente automatizzabile.

A causa dell'elevato costo delle attrezzature questo processo è particolarmente adeguato per volumi produttivi medio-alti. Per produzioni di lotti poco numerosi possono essere realizzati stampi in nickel elettroformati o in fibra di vetro o spray metal.

In riferimento al del prepreg lay-up con utilizzo di pressa calda l'utilizzo di tessuti preimpregnati che garantiscono un'ottima uniformità di distribuzione di rinforzo e resina permettono il raggiungimento di ottime *proprietà meccaniche* in termini di resistenza, modulo elastico e comportamento all'urto. Inoltre, diversamente dal manual lay-up l'eliminazione della necessità di un'autoclave rende il processo di deposizione manuale o automatizzata di tessuti preimpregnati molto più appetibile per il mercato automobilistico o aerospaziale di media serie, in quanto permette l'abbattimento di costi e tempi di ciclo altrimenti insostenibili.

Ad un forte aumento di *rateo produttivo* corrisponde però la convenienza di realizzare stampi più duraturi in acciaio e, quindi, un calo della libertà di forme realizzabili in quanto vengono a dover essere rispettati quei vincoli tipici dei processi di stampaggio legati agli sformi, cioè alla necessità di estrarre la parte dagli stampi.

Questo tipo di processo si caratterizza, inoltre, per elevati *costi di manodopera* a causa del basso livello di automazione realizzabile nella difficile maneggiabilità degli appiccicosi prepreg e dalle difficoltà che si possono accompagnare all'estrazione della parte dalla pressa, che di solito viene effettuata manualmente. Recentissimi sviluppi nella realtà industriale stanno portando alla luce la possibilità di elevare l'automazione sia del processo di deposizione, sia di estrazione dello stampo.

L'utilizzo di pre-impregnati garantirà anche una ottima *resa estetica*, che l'uso della pressa al posto del sacco a vuoto riporterà su entrambi i lati del prodotto. La tecnologia di prepreg + pressa risulta quindi molto promettente anche se ancora poco applicata. Tuttavia, una tecnologia di prepreg + pressa altamente automatizzata presenta come svantaggio principale i notevoli costi di attrezzaggio e automazione.

Per quanto riguarda *vincoli di forma* si può dedurre che dovendo estrarre la parte da stampo e controstampo metallici è necessario considerare vincoli di sformabilità più stringenti rispetto alle parti prodotte con la tradizionale tecnologia di stampo aperto, e per quanto concerne la possibilità di un'elevata automazione del lay-up, questa potrà essere realizzabile solamente per componenti dalla geometria non troppo complessa.

L'elevata automazione e minor *tempo di ciclo* rispetto all'autoclave rendono la tecnologia di prepreg + pressa molto interessante in quanto unisce le altissime caratteristiche meccaniche garantite dall'uso di preimpregnati e la ripetibilità e affidabilità del processo garantita dall'automazione. Probabili applicazioni sono pezzi dalla grande responsabilità strutturale e forme relativamente complesse quali quelli già realizzati in piccola serie in prepreg + autoclave.

4.2.3 Injection molding

Le tecnologie di injection molding consistono nella impregnazione completa di fibra secca, preformata o meno, contenuta in uno stampo di formatura chiuso o aperto, opportunamente preriscaldato, mediante la resina che entra per iniezione o infusione.

Sotto il profilo delle *prestazioni meccaniche*, la natura stessa del processo impone alcuni importanti limiti per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche dei prodotti finali. La procedura di impregnazione del rinforzo secco è progettata in base alle leggi che governano la permeabilità delle fibre, quali la legge di Darcy. Nonostante la possibilità esecutiva di un controllo abbastanza rigoroso del fenomeno, i processi di injection molding non possono garantire gli stessi livelli di uniformità di distribuzione di resina e bassa percentuale di vuoti dei processi

in cui sono utilizzati rinforzi preimpregnati. Inoltre le resine utilizzate in questi processi debbono avere basse caratteristiche di viscosità per poter garantire una buona permeabilità tra le fibre. A bassa viscosità corrisponde però un aumento della fragilità una volta sottoposta al trattamento di cura. Altro aspetto che inficia le proprietà meccaniche dei prodotti realizzati in injection molding è la difficoltà di utilizzare fibre unidirezionali con funzione di rinforzi localizzati, in quanto queste verrebbero generalmente spostate rispetto alla loro deposizione dal fluire della resina. Per questi motivi le proprietà meccaniche dei prodotti realizzati in injection molding sono generalmente peggiori rispetto a quelle dei prodotti realizzati con rinforzi preimpregnati. Tipiche applicazioni sono pannellature e parti semistrutturali quali appendici aerodinamiche, coperchi e parti di carrozzeria. Il processo di *vacuum infusion* presenta caratteristiche meccaniche ancora inferiori in quanto ad una minore pressione di infusione corrisponde una peggiore compattazione degli strati di tessuto ed una maggiore tendenza alla delaminazione. Solamente processi accuratamente controllati e ad alta pressione di iniezione che possano dare ottime garanzie sull'uniformità della distribuzione di resina e sulla buona compattazione possono estendere il campo di impiego a componenti dall'elevata responsabilità strutturale quali parti di telaio.

Le peggiori caratteristiche meccaniche rispetto alle altre tecnologie produttive si riflettono anche nelle *prestazioni in riferimento all'urto*. La maggiore fragilità del materiale composito e la struttura meno compattata e densa sono, infatti, precursori di una bassa tenacità dello stesso, e conseguentemente di un basso livello di assorbimento di energia in caso d'urto. Per quanto riguarda in particolare il vacuum infusion, la minor compattazione realizzabile a causa della minor pressione di infusione rispetto all'RTM comporta un peggiore comportamento meccanico soprattutto in caso di urto, in cui l'interazione inter-laminare è molto importante. Nella realizzazione di strutture per assorbimento energie d'impatto si possono però trovare alcune applicazioni in cui processi RTM di elevata qualità vengono convenientemente usati al fianco degli esistenti processi in prepreg.

In riferimento al driver del *rateo produttivo*, diversamente dal manual prepreg lay-up, le tecnologie di stampaggio per infusione di resin consentono il raggiungimento di volumi produttivi maggiori, in quanto garantiscono la produzione in media serie di parti in tempi di ciclo e costi molto minori. Per

quanto riguarda l'RTM, la deposizione del rinforzo secco nello stampo può avvenire nelle forme di fogli impilati di tessuto o di preforme, ed in quest'ultimo caso può essere inserito un certo grado di automazione del lay-up³⁸. L'attrezzaggio e il processo possono essere configurati in modo da seguire l'economia dell'applicazione. Per lo stampaggio di singole strutture di grandi dimensioni è comune consigliato l'utilizzo di impregnazione per mezzo di sacchi a vuoto, mentre per alti volumi è tipico l'utilizzo del processo reactive combinato con opportuni stampi in acciaio ed assemblaggio robotizzato di preforme di fibre per il raggiungimento del più alto rateo produttivo.

Questa alta flessibilità permette processi economicamente ottimizzati su di un'ampio *range di volumi di produzione*. Infatti parti prodotte in piccoli volumi o preforme semplici sono ottimamente assemblate manualmente nello stampo usando mats o tessuti, mentre parti prodotte in medi o alti volumi possono essere realizzate attraverso la deposizione automatica di preforme nello stampo. I tipici volumi di interesse sono circa di 35.000 pezzi/anno per l'RTM, e 100.000 pezzi/anno per lo SRIM. I processi di liquid molding possono competere con la maggior parte delle alternative a stampo aperto e chiuso. Per quanto riguarda il vacuum infusion, anche se è stato sviluppato inizialmente per sostituirsi ai più costosi processi di hand lay-up e spray-up nelle zone di piccoli volumi produttivi di pezzi di grandi dimensioni e basse performance tuttavvia questo processo è, oggi, applicato in più ampi campi di impiego, fino a volumi produttivi medi (1000 pezzi/anno), parti piccole e grandi e dalle alte o piccole caratteristiche meccaniche.

Sotto il profilo del *tempo di ciclo*, i processi di injection molding presentano performance migliori rispetto manual prepreg lay-up. L'utilizzo di tessuti secchi per la deposizione del rinforzo nello stampo, magari sotto forma di preforme con

³⁸ Nell'utilizzo di tecnologie a stampo chiuso Ford ha raggiunto una forte riduzione dei costi attraverso l'automatizzazione della produzione e deposizione nello stampo di preforme. Il suo sistema F3P Ford's Programmable Preform Process ha garantito sostanziali vantaggi nella produzione di molti modelli tra cui l'Aston Martin Vanquish (2001). In questa vettura diverse parti di telaio, puntoni anteriori e posteriori, montanti anteriori, struttura di assorbimento urto anteriore e tunnel di trasmissione sono state realizzate con processi RTM

lay-up automatizzato, la compattazione e la cura in pressa sono fattori che velocizzano molto questo tipo di processi nei confronti del manual prepreg lay-up. Il tempo di attrezzaggio può risultare molto minore, mentre la fase di iniezione della resina ha una durata proporzionale alle dimensioni della parte ed inversamente proporzionale alla portata fluente, e quindi alla pressione di iniezione. Ne consegue che il vacuum infusion è, quindi un processo più lento dell'RTM. Ad influire positivamente sul tempo di ciclo è anche il minor impegno nell'estrazione dallo stampo di rinforzi secchi rispetto a tessuti preimpregnati.

In riferimento ai *costi di attrezzamento*, la necessità della realizzazione di costosi stampi d'acciaio rende il processo RTM il più costoso dal punto di vista dei costi di attrezzamento. Sono necessari anche macchinari per il riscaldamento e l'iniezione della resina, attrezzature per la chiusura ermetica dello stampo ed attrezzaggi per l'estrazione della parte dagli stampi. Parti realizzate in resin transfer molding sono oggi comuni in mercati di nicchia o di media serie nel settore dell'automotive, in cui l'utilizzo di stampi di metallo risulta antieconomico e vengono utilizzati stampi in materiale composito irrigidito da strutture interne metalliche. Per quanto riguarda gli attrezzaggi, la diminuzione dei costi può essere realizzata attraverso l'integrazione dei componenti, in quanto stampi e procedure di stampaggio più complesse sono ripagate da una forte diminuzione degli assemblaggi e gli investimenti di attrezzaggio. Nell'ottica della sostituzione, nel settore automotive, di componenti e assemblaggi metallici, il concetto di integrazione delle parti in materiale composito risulta sempre vincente.

Un esempio può essere la realizzazione in un unico pannello sandwich in RTM che ha sostituito lo stampaggio separato di due pelli ed una successiva operazione di giunzione a caldo nella realizzazione di pannelli giroporta. Chiaramente lo stesso approccio può essere esteso a strutture più complesse come dimostrano numerosi studi nel settore automotive. Il vacuum infusion ha sostituito i più costosi processi di hand lay-up e spray-up anche, in virtù del fatto che consente di utilizzare gli stessi stampi aperti con conseguente bassissimo costo di riconversione.

I processi di injection molding presentano *costi di manodopera* tra i più elevati del gruppo, inferiori solamente al processo di manual prepreg lay-up con cura in autoclave. L'automazione della deposizione di preforme è, infatti, ancora

oggi poco diffusa e quindi tutte le operazioni di lay-up, di realizzazione dell'ermeticità dello stampo per mezzo di tenute sigillanti, ed estrazione della parte dallo stampo sono realizzate manualmente. Un'applicazione industriale del processo di RTM può avere senso solamente se accompagnata all'uso di preforme.

Sotto il profilo della *ripetibilità ed affidabilità*, la formatura in stampo garantisce un migliore controllo dimensionale rispetto alla tecnologia di manual prepreg lay-up e quindi la realizzazione di forme ripetibili è maggiore, fatto che facilita le successive operazioni di assemblaggio con conseguente riduzione dei costi. In riferimento a tale driver le tecnologie injection molding risultano meno efficaci rispetto al processo di compression molding in quanto alla ripetibilità delle forme corrisponde una scarsa ripetibilità delle caratteristiche meccaniche. Anche con i migliori sistemi di controllo della procedura di iniezione, i processi di injection molding non possono garantire una ottimale distribuzione uniforme di resina e di vuoti. Da pezzo a pezzo quindi, anche se di geometria ragionevolmente uguale, possono presentarsi grandi differenze di prestazioni meccaniche, il che limita di solito l'utilizzo di parti in RTM ad applicazioni semistrutturali quali pannellature. Una buona ripetibilità del processo può essere raggiunta solamente dopo un'ampia messa a punto dei parametri di iniezione, quali numero e posizione dei punti di iniezione, legge di andamento della pressione di iniezione, tempo e temperatura del ciclo di cura, che è giustificabile solamente per lotti produttivi medio-alti.

Infine, in riferimento ai *vincoli di forma* i processi di injection molding risultano leggermente inferiori rispetto a quelli di manual prepreg lay-up qualora sussista la necessità di estrazione delle parti dagli stampi, e quindi dei vincoli di angoli di sforno. Le tecniche di resin-film infusion o vacuum-infusion possono essere felicemente usate nella realizzazione di strutture di ampie dimensioni con forme semplici quali pannelli e profili aerodinamici. In injection molding è possibile poi realizzare spessori maggiori rispetto a quanto è possibile fare in manual prepreg lay-up.

Per quel che riguarda la *resa estetica*, attraverso il processo RTM i componenti possono essere realizzati con entrambe le facce dello stampo di buona finitura, in modo da poter ottenere resa estetica su entrambe le facce del

pezzo. Il Vacuum infusion presenta, invece, solamente un lato con buona resa estetica. La natura stessa del processo non garantisce però rese di qualità comparabili con i processi che fanno uso di preimpregnati. Il fenomeno dell'impregnamento per iniezione non garantisce il riempimento completo degli spazi inter-fibra e questo può comportare la presenza di antiestetiche macroporosità sulla superficie della parte. Per questo motivo di solito componenti realizzati in injection molding vengono poi rivestiti di uno strato di trasparente e poi verniciati. Non è possibile ottenere l'effetto "Carbon Look" con superfici RTM in vista.

In conclusione, si può, quindi, affermare che i processi di injection molding si prestano in modo ottimale alla realizzazione in media serie di parti semistrutturali quali pannellature e profili aerodinamici. Ad alti investimenti di attrezzaggio e macchinari corrisponde una forte riduzione dei costi dei materiali in quanto vengono utilizzati rinforzi secchi, invece che costosi prepreg, con anche conseguente riduzione ed eliminazione di emissioni di VOC. Questo processo impone grande responsabilità nel garantire la qualità dei prodotti in quanto il controllo del processo di iniezione viene ad assumere un ruolo chiave nell'ottenimento delle specifiche prestazionali.

4.4.4 Compression Molding

Attre tecnologie che permettono il raggiungimento di ratei produttivi più elevati rispetto al manual prepreg lay-up con cura in autoclave sono quelle di stampaggio per compressione.

Nell'affrontare l'analisi dei processi di compression molding³⁹ è necessario distinguere due principali categorie di produzione per stampaggio. Secondo la classificazione ASM fanno parte della categoria compression molding i processi di formatura per polimerizzazione su stampo e controstampo di rinforzi

³⁹ In questa sezione si focalizza l'attenzione considerando come processi di compression molding solamente i tre processi di formatura per polimerizzazione su stampo e controstampo, che rappresentano la famiglia di processi di fabbricazione di parti in materiale composito più largamente usata oggi in applicazioni nel settore automotive.

preimpregnati in matrice termoplastica o termoidurente, quali quelli di stampaggio ad alta pressione di Glassfiber- mat-reinforced in matrice termoplastica (GMT), Long-fiber-reinforced in matrice termoplastica (LFT), e Sheet molding compounds (SMC) in matrice termoindurente. E' necessario distinguere questa tipologia di processi, che si caratterizzano per scarse prestazioni meccaniche, dalle tecnologie identificate con il nome di Prepreg + pressa, denominate anche Prepreg low P/T (bassa pressione e temperatura), per indicare il fatto che il processo di compattamento e cura non è paragonabile ai tradizionali processi di stampaggio ad alta pressione, in quanto il materiale non è soggetto a grandi scorrimenti all'interno dello stampo visto che il rinforzo preimpregnato già ricopre completamente la superficie della forma finale. Le parti realizzate in Prepreg + pressa presentano caratteristiche meccaniche elevatissime al pari di quelle ottenibili con manual prepreg lay-up.

Sotto il profilo delle *prestazioni meccaniche* i processi di compression molding offrono le peggiori performance strutturali dell'intero panorama tecnologico di produzione di parti finite in materiale composito. I processi GMT e LFT utilizzano matrici termoplastiche che per loro natura forniscono prestazioni strutturali molto minori rispetto a quelle termoindurenti, in quanto sono caratterizzate da bassa rigidità e modulo elastico. I processi GMT e LFT si possono paragonare ai processi di stampaggio di materie plastiche, con però l'introduzione di rinforzi fibrosi. Il processo SMC invece utilizza matrice termoindurente, ma la presenza di fibre corte ne limita fortemente le caratteristiche meccaniche. Requisito necessario per l'impiego di materiali compositi in applicazioni dall'elevata responsabilità costruttiva quali parti di telaio è la presenza di rinforzi a fibre lunghe in matrice di resina termoindurente. Il processo di stampaggio GMT e LFT è caratterizzato da un forte scorrimento del materiale all'interno dello stampo e quindi l'orientamento del rinforzo e conseguentemente le proprietà varieranno significativamente all'interno del componente. Al contrario con materiali di partenza con rinforzi di fibra continua, la carica dovrà avere almeno le stesse dimensioni planari del componente, ed è difficile realizzare componenti con geometrie complesse o con formature profonde, che sono relativamente semplici con il GMT. Molto lavoro è indirizzato nel combinare le buone proprietà strutturali dei prepreg con la semplice fabbricazione con i GMT attraverso la combinazione delle due forme di materiale (ma generalmente con la stessa matrice e tipi di fibra in entrambi i

materiali). Questo può essere realizzato per esempio posizionando strati di prepreg tra fogli di GMT, dove l'ultimo fluisce generando la complessa geometria del componente. In base alle suddette considerazioni i processi di compression molding non sono sicuramente adatti ad impieghi strutturali, ma trovano le loro maggiori applicazioni in pannellature semistrutturali e parti di carrozzeria. Frequente è l'utilizzo di questa tecnologia nella realizzazione di pannelli frontali di autovetture.

Sicuramente inferiori a processi quali il manual prepreg lay-up o il braiding, nonostante le scarse proprietà meccaniche in termini di rigidità e modulo elastico i materiali in matrice termoplastica forniscono però discrete *prestazioni in riferimento all'urto*, garantendo buoni livelli di energia d'urto assorbibile presentando una bassa fragilità e quindi discreta tenacità.

In riferimento al driver del *rateo produttivo* è necessario osservare che per un primo approccio alla tecnologia compression molding gli investimenti in macchinari e attrezzature per il processo di compression molding possono essere sostenibili a partire da un volume produttivo generalmente di 50.000 pezzi/anno, usando tooling a singola cavità in quanto generalmente le pressioni richieste risultano molto elevate e necessitano la realizzazione di importanti stampi in acciaio e l'utilizzo di presse di discreta potenza; per piccole serie sono più redditizie altre tecnologie produttive. Nel settore automotive i volumi annuali possono raggiungere massimi di 1.000.000 di parti/anno utilizzando diversi tool di stampaggio in parallelo per ogni applicazione. In particolare il GMT compression molding è un processo continuo in linea per la produzione di grandi volumi di parti. Questo è il processo più economicamente conveniente quando procede continuamente nella realizzazione di un tipo di pezzo che non richiede il cambiamento delle condizioni di processo o il tool di stampaggio durante il processo stesso.

Come tutte le tecnologie di stampaggio, il compression molding permette una forte riduzione dei *tempi di ciclo* rispetto alle tecnologie di deposizione manuale e anche rispetto alle tecnologie di infusione di resina. Nonostante l'utilizzo di preimpregnati è possibile un elevato grado di automazione del lay up e le fasi di chiusura stampo, formatura e cura sono molto rapide. Questo

bassissimo tempo di ciclo ha permesso il raggiungimento di ratei produttivi molto elevati.

Sotto il profilo dei *costi di attrezzamento* l'elevatissimo rateo produttivo realizzabile in compression molding rende velocemente ammortizzabili gli elevati costi relativi alla fabbricazione degli stampi

d'acciaio ed ai macchinari di automazione del lay-up e dell'estrazione della parte dello stampo. La realizzabilità di forme complesse poi si ripercuote sulla grande facilità di integrazione possibile in compression molding. È possibile realizzare pezzi unici dove prima diversi pezzi metallici erano connessi con numerose saldature e giunzioni, con grande risparmio in costi di attrazzamenti e assemblaggi successivi.

Essendo, il compression molding un processo altamente automatizzato per elevati ratei produttivi, il relativo *costo di manodopera* è tra i più bassi. Solamente i processi di posizionamento del rinforzo continuo sono migliori sotto questo aspetto.

Inoltre, l'uso di rinforzi preimpregnati, il lay-up generalmente automatizzato ed il processo di stampaggio garantiscono una elevata *ripetibilità ed affidabilità del processo*, inferiore solamente ai processi di posizionamento di rinforzo continuo in cui la disposizione di rinforzo e matrice è esattamente nota e controllata. Il compression molding grazie all'uso di prepreg garantisce un controllo qualitativo molto più semplice rispetto al più complesso processo di injection molding, in quanto l'uniformità della distribuzione di resina e vuoti è garantita dai fornitori del materiale e non dal rigoroso controllo del processo.

In riferimento ai *vincoli di forma* attraverso il compression molding possono essere realizzati i pezzi geometricamente più complessi dall'estensione superficiale molto variabile, tipicamente però inferiori ad 1 m², possono essere realizzate pareti dalla sezione sottile fino a 1.3 mm, nervature complesse e strutture corrugate e pezzi stampati con inserti. Gli unici vincoli sono quelli legati alla sformabilità del pezzo dagli stampi che impedisce la realizzabilità di sottosquadri. Generalmente infatti si trovano solo applicazioni per parti di pannelleria e carrozzeria.

Infine, in riferimento al drivers della *resa estetica* alla stregua del processo di manual prepreg lay-up il compression molding permette il raggiungimento di finiture superficiali ottime e permette la realizzazione dell'effetto "Carbon look" tanto ricercato dalle case automobilistiche per valorizzare i propri prodotti.

Questo processo di stampaggio presenta anche il vantaggio di poter garantire ottime finiture sulle superfici di entrambi i lati della parte, caratteristica che rende i prodotti compression molded anche non verniciati utilizzabili in tutte quelle applicazioni quali profili aerodinamici, parafranghi, inserti d'arredamento interno a sbalzo, che sono completamente a vista.

4.45.4 Tecnologie di posizionamento di rinforzi di tipo continuo

Le tecnologie di posizionamento di rinforzo di tipo continuo possono essere prese in considerazione per la produzione di parti strutturali dalle ottime qualità meccaniche nel momento in cui la forma del componente sia compatibile con le geometrie realizzabili dalle stesse.

Mentre il filament winding consiste nella deposizione di filamenti, yarn o tape preimpregnati o meno su mandrini ruotanti con successiva cura in forno e quindi è in grado di realizzare prodotti quali serbatoi in pressione, alberi di trasmissione, e comunque forme non cave, la pultrusione consiste nella realizzazione di profili continui a sezione trasversale costante e le produzioni tipiche sono di verghe solide e barre commerciali e profili strutturali particolari.

La tecnologia braiding consiste invece nella tessitura di due o più sistemi di yarn che sono attorcigliati secondo direzioni preferenziali a formare una struttura integrata attorno ad un mandrino, e nell'utilizzo di questo rinforzo secco in un tradizionale processo di RTM.

Sotto il profilo delle *prestazioni meccaniche* grazie all'utilizzo di rinforzi continui a fibra lunga in matrice termoindurente, i processi di posizionamento di rinforzo continuo garantiscono le migliori proprietà meccaniche in relazione alle tecnologie sotto esame. Per quanto riguarda il Filament winding il lay-up delle

fibre lungo le geodetiche di un mandrino rotante permette la realizzazione di prodotti caratterizzati dalla ottima uniformità di distribuzione di rinforzo e resina, con basse frazioni di vuoto e ottima compattazione. Le tipiche frazioni in volume di fibre sono simili o superiori a quelli dei compositi realizzati con altri metodi, e che il contenuto in fibre per sistemi di deposizione circolari o elicoidali possono essere differenti e può essere ottimizzato dal costruttore attraverso il controllo del contenuto in resina e del lay-down con un più preciso affiancamento delle fibre e delle striscie di quello che è possibile col prepreg. Le prestazioni strutturali che un prodotto filament wound può garantire sono ovviamente anche legate alle forme con cui questo può essere realizzato. Le tipiche sezioni trasversali realizzabili con questo processo sono corone assialsimmetriche o quasi assialsimmetriche, e per questo motivo presentando di solito elevati momenti di inerzia polari e baricentrici sono sfruttate nella produzione di parti soggette a forte torsione o flessione. Per quanto riguarda la realizzazione di profili a sezione costante la tecnologia di produzione con materiali compositi a cui immediatamente si pone l'attenzione è la pultrusione. Attraverso questo processo è possibile ottenere un rinforzo continuo di fibre, caratteristica che rappresenta un suo punto di forza e garantirà buone caratteristiche meccaniche lungo la direzione longitudinale anche dieci volte superiori rispetto a quelle misurate trasversalmente. Questo aspetto, insieme al fatto di poter realizzare sezioni trasversali qualunque, può essere di grande interesse in tutte quelle applicazioni in cui è richiesta una grande resistenza soprattutto in trazione e flessione, quali sono tutte quelle strutture reticolari tipiche delle applicazioni civili e telaistiche nel campo dell'autotrasporto. Similarmante al filament winding il controllo della deposizione del rinforzo e dell'impregnazione è molto elevato e garantisce grande uniformità di caratteristiche meccaniche quali elevata resistenza a trazione e rigidità. I rinforzi inoltre possono essere posizionati localmente con precisione dove c'è bisogno di maggiore consistenza e migliori caratteristiche meccaniche.

Nel momento in cui si ricercano altissime prestazioni meccaniche come risposta a stati tensionali complessi magari torsionali, grandi capacità di assorbimento di energia d'impatto e grande flessibilità di realizzazione di forme discretamente complesse si può prendere in considerazione la tecnologia braiding. La tecnologia di tessitura ad intreccio di sistemi di yard bidimensionale o tridimensionale garantisce una eccezionale flessibilità ed adattabilità della

disposizione di fibre nel seguire le isostatiche di tensione e le linee di carico. Inoltre la possibilità di realizzare spessori anche elevati e completamente rinforzati per mezzo della deposizione di più strati di tessuto braiding, permette il raggiungimento delle più elevate prestazioni meccaniche raggiungibili con l'utilizzo di materiali compositi. Le ottime qualità del rinforzo braiding sono sempre accompagnate dai migliori processi RTM, che con un controllo elevato della corretta esecuzione dell'impregnamento, garantiscano una buona uniformità della distribuzione di resina e basse frazioni di vuoto, in modo da non inficiare le qualità del prodotto finito. L'estensione del braiding bidimensionale e tridimensionale ha aperto nuove opportunità nella realizzazione di forme finite e strutture in composito uniche per il loro alto livello di conformabilità, stabilità torsionale e resistenza al danneggiamento. Molte tecniche complesse di disposizione del materiale per i processi di fabbricazione in prepregs sono state convertite e modificate in braiding. Di notevole importanza è anche il fatto che utilizzando il processo braiding tridimensionale non solo è possibile prevenire i cedimenti interlaminari tipici del filament winding o dei processi di tape lay-up, ma possono anche essere migliorate le caratteristiche meccaniche interlaminari tipiche dei compositi laminati.

In riferimento alle *prestazioni da urto* i prodotti realizzati con deposizione di rinforzo continuo rispondono in maniera diversa in funzione delle loro capacità di realizzare forme e strutture adatte all'assorbimento di energia da impatto. Prodotti realizzati in filament winding e pultrusione anche se posseggono elevate caratteristiche meccaniche sono meno adatte rispetto ad altre tecnologie, quali manual prepreg lay-up e soprattutto braiding, alla realizzazione di strutture di assorbimento urti. Questo fatto è dovuto soprattutto ai forti limiti di natura morfologica che queste tecnologie presentano, in quanto risulta molto difficile progettare buone curve di rigidità ad impatto avendo a disposizione elementi di assorbimento con geometrie dalla sezione costante. Una delle grandi proprietà che rende i compositi in braiding di grande interesse è l'ottimo comportamento all'impatto in termini di energia assorbita e limitazione delle aree di danneggiamento e braiding tridimensionali in fibra di vetro o carbonio assicurano notevoli aumenti di livelli di assorbimento di energia sia durante le prime fasi di impatto che nella propagazione del danno rispetto ai compositi laminati. Studi recenti hanno dimostrato che la resistenza a compressione dopo l'impatto dei compositi braiding è molto più elevata e stabile rispetto ai compositi laminati.

Questo ottimo comportamento è garantito sia dalla forte triassialità dell'intreccio che ostacola fortemente il propagarsi delle cricche di frattura e richiede quindi maggiore energia per l'avanzamento del processo di frattura, sia dalla grande flessibilità di realizzazione di forme adatte all'assorbimento di urti con limitazione delle aree di danno, quali sono ad esempio quelle coniche.

Sotto il profilo dei drivers del *rateo produttivo* e del *tempo di ciclo*, Il filament winding si presenta come una tecnologia dall'alta affidabilità di processo che permette volumi produttivi adatti ad una media serie per la realizzazione di quelle parti la cui forma è compatibile con la natura di avvolgimento rotante tipica del processo. Grazie allo sviluppo di apparati e processi che permettono il cambiamento di ampiezza di banda e spessore delle fibre nelle strutture di avvolgimento, è possibile ipotizzare un aumento del numero e tipologie di prodotti che possono essere convenientemente realizzati con filament winding. Molti componenti filament wound possono essere costruiti simultaneamente con la stessa attrezzatura, con accurati angoli di avvolgimento delle fibre e con un buon controllo della resina.. Per piccoli articoli come ad esempio piccoli rulli è possibile avvolgere fino a 20 componenti simultaneamente. In quanto processo continuo la pultrusione è caratterizzata da altissimi ratei produttivi, di gran lunga superiori rispetto a tutte le altre tipologie di produzione di compositi. Macchinari di pultrusione possono operare con tassi produttivi che vanno dai 25 mm/min a 5 m/min. Oggi tipiche linee produttive vanno dai 0.6 ai 1.5 m/min. E' possibile raggiungere alte produttività con l'utilizzo di flussi multipli con una sola macchina. Quasi il 100% dei materiali pultrusi sono utilizzabili direttamente senza ulteriori lavorazioni e la pultrusione di grandi volumi produttivi può essere eseguita con una percentuale di materiali di scarto inferiori al 2%. A questo grande vantaggio ovviamente fa riscontro una grande limitatezza di forme realizzabili, e quindi la pultrusione si presta ottimamente alla produzione di componenti commerciali quali barre e verghe a sezione costante. Negli anni '90 un gran numero di componenti meccanici è stato realizzato in materiale composito pultruso ed è aumentata la competitività economica del processo anche grazie ad adeguati sviluppi nel design for manufacturing. La facile realizzabilità che negli ultimi anni ha avuto questo processo ha fatto sì che i materiali compositi pultrusi diventassero nel ventesimo secolo un materiale tradizionale quali l'acciaio o l'alluminio.

La tecnologia di braiding è caratterizzata da ratei produttivi compatibili con la media serie, indicativamente tra i 5.000 ed i 30.000 pezzi/anno, comparabili a quelli raggiungibili con filament winding a causa del simile processo produttivo.

L'operazione di tessitura dell'intreccio è completamente automatizzata e per pezzi di dimensioni non eccessive ha durate comparabili a quelle del successivo processo di RTM. La produttività non presenta quindi sostanziali colli di bottiglia e possono essere raggiunti gli stessi ratei produttivi tipici dei migliori processi di injection molding. In relazione al processo di Manual prepreg lay-up + pressa, che a buon ragione si può considerare il suo maggior competitor in applicazioni strutturali telaistiche, il processo di braiding presenta un rateo produttivo leggermente superiore, potendo vantare una più automatizzata e rapida fase di realizzazione del rinforzo rispetto alla deposizione manuale dei tessuti preimpregnati.

Sotto il profilo dei *costi di attrezzamento*; uno dei più grossi vantaggi del filament winding rispetto ad altri metodi di produzione di compositi è la semplicità di attrezzatura. Il mandrino, che presenta una accurata geometria interna, è generalmente il solo strumento di tipo speciale. Attrezzature e installazioni richieste sono di solito semplici e spesso sono costituite solamente da una macchina per l'avvolgimento e da un forno per il curing. Il progetto del mandrino può essere semplice o complicato in base a quel che la parte richiede. I fattori che devono essere presi in considerazione sono: riutilizzabilità nel processo produttivo, tolleranze richieste, controllo della dilatazione termica, peso (limitazioni delle attrezzature), deformazioni (avvallamenti), rimozione della parte dal mandrino e il costo. Materiali a basso costo per il mandrino come il cartone ed il legno possono spesso venire usati all'inizio della produzione del winding. All'altra estremità dello spettro di utilizzazione, dove parti critiche necessitano di tolleranze strette, può essere necessario usare costosi mandrini in acciaio progettati per uso a lungo termine. I costi del mandrino possono essere più bassi dei costi di altri tipi di lavorazione perché normalmente c'è un solo strumento, il mandrino maschio, che regola il diametro interno e rifinisce la superficie interna. Per quanto riguarda la pultrusione, questo sistema produttivo presenta elevati costi di attrezzamento, tra i maggiori dell'intero lotto considerato. La necessità di sistemi di formatura, costose matrici in acciaio e sistemi di guida per i filamenti di rinforzo diverse per ogni macrotipologia di prodotto realizzato sono sostenibili solamente grazie all'altissimo rateo

produttivo che questo processo può garantire. Piccole modifiche allo stesso prodotto possono essere realizzate grazie alla semplice sostituzione delle matrici anche utilizzando il medesimo macchinario di formatura, il che rende il costo del tooling per piccole modifiche basso, se confrontato con modifiche in altri processi tecnologici. Dal punto di vista dei costi di attrezzamento la pultrusione presenta però il vantaggio di essere grandemente flessibile all'utilizzo di diversi tipi di rinforzo all'interno della stessa sezione e di poter posizionare localmente rinforzi unidirezionali in modo semplice senza interruzioni del processo continuo. Il processo di braiding a causa della sua grande complessità realizzativa presenta elevati costi di attrezzamento, più elevati anche del simile processo di filament winding, in quanto alle costose macchine di avvolgimento bi e tridimensionale che devono essere configurate specificatamente per ogni tipologia di intreccio e geometria da realizzare, vanno aggiunti i costi di realizzazione degli stampi e dei dispositivi necessari per la realizzazione del successivo processo di RTM. Da questo punto di vista è opportuno però osservare che la natura intrecciata dei tessuti in braiding garantiscono un alto livello di integrità strutturale, risultando più maneggiabili e facili alle giunture, il che semplifica le operazioni successive alla tessitura del rinforzo.

In riferimento al driver del *costo di manodopera*, si può affermare che il vantaggio più importante del filament winding è il suo basso costo, minore del costo del prepreg per molti compositi, che è dovuto alla alta velocità di lay-down delle fibre e bassa presenza ed esigenza di manodopera. Il processo risulta completamente automatizzato dalla deposizione delle fibre alla eventuale estrazione del mandrino e alla messa in forno per la cura. Stesso discorso vale per il processo di pultrusione, in cui la guida delle fibre, la formatura, la pultrusione e l'avanzamento e taglio del prodotto sono automatizzati, coerentemente alla natura continua dello stesso. Ciò garantisce altissima ripetibilità ed affidabilità, ed il costo di manodopera risulta conseguentemente tra i più bassi fra le varie tecnologie produttive. Per quanto riguarda il processo braiding l'uso di manodopera dipende dal rateo produttivo tipico di ogni applicazione considerata. Per piccoli lotti all'automazione del processo di intrecciatura corrisponde però la necessità di eseguire manualmente gli spostamenti del tessuto dalla stazione di tessitura a quella di stampaggio per iniezione. La manipolazione dei tessuti braiding è comunque facile in quanto secchi e strutturalmente integri. Per lotti di media serie è possibile anche una certa

automazione dei piazzamenti che rende ancora minore l'uso di manodopera. Studi realizzati dalla McDonnell Douglas Corporation hanno dimostrato che compositi realizzati in braiding possono essere prodotti al 56% del costo dello stesso realizzato in filament winding grazie alla riduzione di manodopera nell'assemblaggio ed alla semplificazione della progettazione.

In riferimento al driver della *ripetibilità ed affidabilità*, tutti i processi di posizionamento del rinforzo di tipo continuo sono caratterizzati dalla più elevata affidabilità del processo, in quanto la deposizione controllata di rinforzo e resina permette il raggiungimento dei migliori risultati circa qualità del compattamento e assenza di vuoti. L'altissimo livello di automazione garantisce poi una elevata ripetibilità in quanto il controllo dimensionale delle parti non è responsabilità dell'abilità dell'operatore, ma è demandato alle tolleranze di lavorazione dei macchinari. Per quel che riguarda il filament winding la sistemazione delle fibre è altamente ripetibile ed accurata sia da parte a parte che da strato a strato, e l'accuratezza può essere superiore a quella realizzata dalle macchine per sistemazione delle fibre o per tape-laying automatizzato. Inoltre la capacità di usare fibre continue su tutta l'intera area del componente (senza giunte) e di orientare facilmente le fibre nella direzione del carico semplifica la fabbricazione di strutture e riduce il numero di giunzioni da cui una maggiore affidabilità e costi inferiori. I prodotti RTM in braiding sono quindi caratterizzati da elevata ripetibilità ed affidabilità del processo, alta produttività compatibile con la media serie e costi di manodopera ed investimenti iniziali moderati.

Sotto il profilo dei *vincoli di forma*, i maggiori vincoli che limitano l'utilizzo dei processi di posizionamento di rinforzo di tipo continuo sono quelli riguardanti la geometria del pezzo, e di conseguenza questi processi possono essere presi in considerazione solamente nel caso in cui la forma del componente sia compatibile con le geometrie realizzabili dalle stesse. Filament winding e pultrusione sono le due tecnologie che presentano i limiti geometrici maggiori. La prima è in grado di realizzare parti quasi assialsimmetriche come quali tubi, cilindri e alberi cavi di sezione convessa, mentre la seconda parte di sezione trasversale generalmente costante. A questa limitatezza corrisponde l'estrema specializzazione dei campi applicativi che caratterizza queste due tecnologie produttive. In filament winding vengono realizzati rulli e piccoli alberi, ma soprattutto contenitori a pressione e serbatoi per veicoli a gas naturale sono stati

l'applicazione più impegnativa e più diffusa di questa tecnologia. Questa è l'unica tecnica di fabbricazione per contenitori a pressione ad alte performance. In pultrusione vengono invece realizzati tipicamente prodotti commerciali quali barre e verghe o profilati complessi. Filament winding presenta anche la necessità di una forma del componente che permetta la rimozione del mandrino. Mandrini lunghi, tubulari generalmente non presentano assottigliamento. A meno che le forme non uniformi possano venire meccanicamente disassemblate, i mandrini devono essere costruiti in materiale solubile e fragile. Differenti materiali per mandrini, a causa della differente dilatazione termica e delle differenti percentuali di plies circolari versus plies elicoidali nei materiali compositi e nei laminati realizzati con lay-up, presenteranno vari gradi di difficoltà nella rimozione della parte dal mandrino stesso. Forte limite nel filament winding è il fatto di poter realizzare solamente parti di spessore costante. Questo limite in pultrusione può essere aggirato mediante l'utilizzo di costose e complesse attrezzature che possono anche permettere la realizzazione di pultrusi leggermente curvi. Il vantaggio che presenta la pultrusione è di poter realizzare pezzi di qualunque lunghezza e di forme complesse con pareti sottili, altrimenti non realizzabili con altri processi di laminazione. Quindi nella sostituzione dei classici prodotti estrusi d'alluminio con prodotti in materiale composito in applicazioni automotive la scelta del processo da utilizzare è la pultrusione. Nel settore automobilistico oltre a parti semistrutturali quali strutture di trasporto dei carichi negli autocarri, si può menzionare la realizzazione di un prototipo di telaio di autocarro completamente realizzato con parti pultruse in materiale composito, con un rilevante aumento di caratteristiche meccaniche rispetto al tradizionale telaio in acciaio. Il futuro della pultrusione è molto promettente come uno dei metodi produttivi continui più convenienti nella realizzazione di soluzioni in composito anche con caratteristiche tridimensionali, grazie alla manipolazione dei parametri di processo, matrici intelligenti e macchinari appositamente progettati, e grazie alla continua evoluzione di processi ibridi che confondono i confini tra injection e compression molding e pultrusione. Consistendo nell'intreccio di sistemi di yarn attorno ad un mandrino anche il processo di braiding presenta notevoli vincoli di forma, ma sicuramente inferiori a quelli di filament winding e pultrusione. E' infatti possibile realizzare sezioni con spessore non costante e parti indifferentemente concave o convesse.

Dal punto di vista *della resa estetica* i processi di filament winding e braiding non offrono i migliori risultati. Per il primo la deposizione dei filamenti lungo le geodetiche non garantisce una superficie dalla tessitura fine e piatta come quelle realizzabili con lay-up o stampaggi di preimpregnati. Riguardo al braiding, invece, vi possono essere spostamenti per distensione delle fibre poco piacevoli dal punto di vista estetico in quelle parti che presentano sezioni con diametro variabile e comunque la resa estetica dell'intrecciatura tridimensionale non è paragonabile a quella dei prepreg utilizzati in manual prepreg lay-up o compression molding.

4.4.6 Termoformatura con rinforzo a fibra lunga

La tecnologia di thermoforming consiste nella formatura sotto stampo a caldo di preimpregnati in resina termoplastica.

Sotto il profilo delle *prestazioni meccaniche* a parità di rinforzo utilizzato, piatti realizzati in termoformatura presentano caratteristiche meccaniche pari a piatti realizzati con le tecnologie che fanno uso di pre-impregnati in resina termoindurente, in condizioni ambientali standard. Il grande svantaggio della tecnologia di termoformatura che ne limita l'utilizzo in costruzioni dalla grande responsabilità strutturale è la grande difficoltà nell'assicurare continuità e densità di fibra in presenza di formatura profonda in corrispondenza delle zone a forte curvatura in cui si verificano forti migrazioni di resina. Questa tecnologia si è affacciata sul panorama dei materiali compositi in tempi abbastanza recenti e le competenze tecnologiche di ogni singolo fornitore fanno la differenza nell'assicurare il mantenimento delle ottime proprietà meccaniche dei preimpregnati termoplastici attraverso l'operazione di termoformatura. E' possibile realizzare nervature di rinforzo tramite processo di iniezione di resina dando luogo alla tecnologia di termoformatura + injection moulding. L'aumento di proprietà meccaniche date da nervature prive di rinforzo è però non elevato, e può dare vantaggi minimi. Il grande sviluppo tecnologico che hanno avuto le resine termoplastiche permette l'utilizzazione delle parti realizzate in termoformatura anche in condizioni termiche abbastanza gravose, con temperature dell'ordine dei 150 – 180 gradi. Da investigare è però ancora il comportamento a fatica delle parti realizzate in materiale composito in matrice termoplastica, e da annotare è l'assenza ad oggi di tali pezzi in applicazioni dalla

grande responsabilità strutturale in campo aeronautico. Quindi la tecnologia di termoformatura risulta essere molto interessante nella realizzazione di parti non sollecitate a fatica, a temperature non eccessivamente elevate e che siano realizzabili con tecnologie di termoformatura tali da garantire buone proprietà meccaniche.

In riferimento al driver delle *prestazioni in riferimento all'urto*, le maggiori applicazioni di parti realizzate in termoformatura in fibra lunga in campo automotive sono rappresentate da strutture dotate di un'elevata capacità di assorbimento dell'urto. I fattori di tali prestazioni sono da ricercare nelle grandi capacità di assorbimento di energia d'urto dei materiali in questione, nelle possibilità realizzative di formature delle geometrie in gioco e nel fatto che tali parti non sono soggette a cicli affaticanti, ma solo a carichi impulsivi accidentali.

Sotto il profilo del *rateo produttivo* e del *tempo di ciclo*, l'operazione di termoformatura si caratterizza per tempi di ciclo brevi e produttività elevata in quanto può sopportare una elevata automazione del processo ed è svincolata dai lunghi tempi di cura caratteristici dei materiali compositi in resina termoindurente.

In riferimento al driver dei *costi di attrezzamento*, nella termoformatura ai costi degli stampi si aggiungono elevati costi per macchine automatiche di posizionamento. Il processo di termoformatura è altamente automatizzabile in quanto la movimentazione dei preimpregnati termoplastici a freddo non soffre i problemi di difficile maneggiabilità tipica degli appiccicosi preimpregnati termoindurenti.

Per il driver del *costo di manodopera*, in virtù dell'elevata automazione permessa, una produzione in media serie di parti realizzate in termoformatura non necessita di un'elevato contributo di manodopera.

Inoltre, uno dei maggiori vantaggi della tecnologia di termoformatura è l'elevato grado di *ripetibilità e affidabilità* realizzabili. L'utilizzo di preimpregnati permette un'elevato controllo della qualità a livello delle proprietà del laminato, mentre l'automatizzazione del processo di deposizione del

laminato e posizionamento nello stampo garantisce l'ottenimento di tolleranze geometriche stringenti.

Sotto il profilo dei *Vincoli di forma* la limitazione della profondità di formatura costituisce un importante vincolo realizzativo sia per quanto riguarda l'andamento geometrico generale della parte sia nella formatura di particolari che presentino forti curvature. Applicazione tipica della termoformatura è la realizzazione di gusci, pannelli e simili.

Infine in riferimento al driver della *resa estetica* attraverso la termoformatura sono raggiungibili le qualità superficiali elevate tipiche dei materiali preimpregnati. Gli stessi problemi riguardanti forti migrazioni di polimero in corrispondenza di piccoli raggi di raccordo si riflettono in corrispondenti difetti estetici.

4.5 UNA POSSIBILE MAPPATURA DELLE TECNOLOGIE DI LAVORAZIONE ESAMINATE

In base ai risultati dell'analisi comparativa svolta in merito alle tecniche di produzione di componenti strutturali in materiale composito è possibile impostare un modello di calcolo, in cui alle varie tecnologie sono assegnate delle valutazioni sintetiche sotto forma di punteggio in cui al valore 5 corrisponde lo stato di Best in Class ed 1 rappresenta il giudizio peggiore.

Tale comparazioni tra le tecnologie esaminate consente di determinare una mappatura teorica delle tecnologie disponibili (Tabella 4.5.1)

In funzione dei valori vincoli di un dato componente e del budget di risorse disponibile quali tecnologie sono candidate ad essere sperimentate per la realizzazione del componente desiderato.

Sotto l'aspetto macro, le tecnologie di lavorazione esaminate e caratterizzate sulla base del modello di calcolo possono essere posizionate nella matrice prodotto – processo⁴⁰, attraverso cui possono essere rappresentate le correlazioni esistenti tra caratteristiche del prodotto e le tipologie del processo di fabbricazione da impiegare.

Le condizioni ideali sono quelle corrispondenti ai punti della diagonale principale (area di coerenza). In tal senso un'azienda che lavora pezzi con caratteristiche assai variabili e ciascuno in serie pressoché uniche, è opportuno che impieghi un processo di lavorazione hand lay-up. Un'azienda la cui produzione è di tipo standard, limitata ad un numero non elevato di modelli, ciascuno però fabbricato in grandi quantità, fa ricorso ad un processo produttivo di tipo ripetitivo organizzato su linee di assemblaggio basate sulle tecnologie di termoformatura. La produzione di beni di largo consumo, o comunque richiesti in grandi quantità, dovrà necessariamente operare mediante processi di lavorazione continui.

Riprendendo le conclusioni del paragrafo 4.2.2, la scelta di una tecnologia che si posiziona in punti al di sopra o al di sotto della diagonale principale è indicativo di scelte subottimali, sulle quali valgono le considerazioni che seguono:

⁴⁰ Si veda al riguardo il paragrafo 4.2.2.. Attraverso cui possono essere rappresentate le correlazioni esistenti tra caratteristiche del prodotto e le tipologie del processo di fabbricazione da impiegare

Un punto al di sopra della diagonale indica che:

- gli investimenti essi realizzati sono limitati;
 - il sistema produttivo ha una struttura sufficientemente flessibile da consentire variazioni abbastanza rapide dell'assetto produttivo in caso di mutamento della domanda. Infatti la parte alta della matrice è caratterizzata da macchine "general purpose" organizzate in base al layout \di processo.
 - i costi di fabbricazione sono elevati giacché vengono impiegate nella produzione macchinari ed attrezzature non specialistiche.

Un punto al di sotto della diagonale indica che:

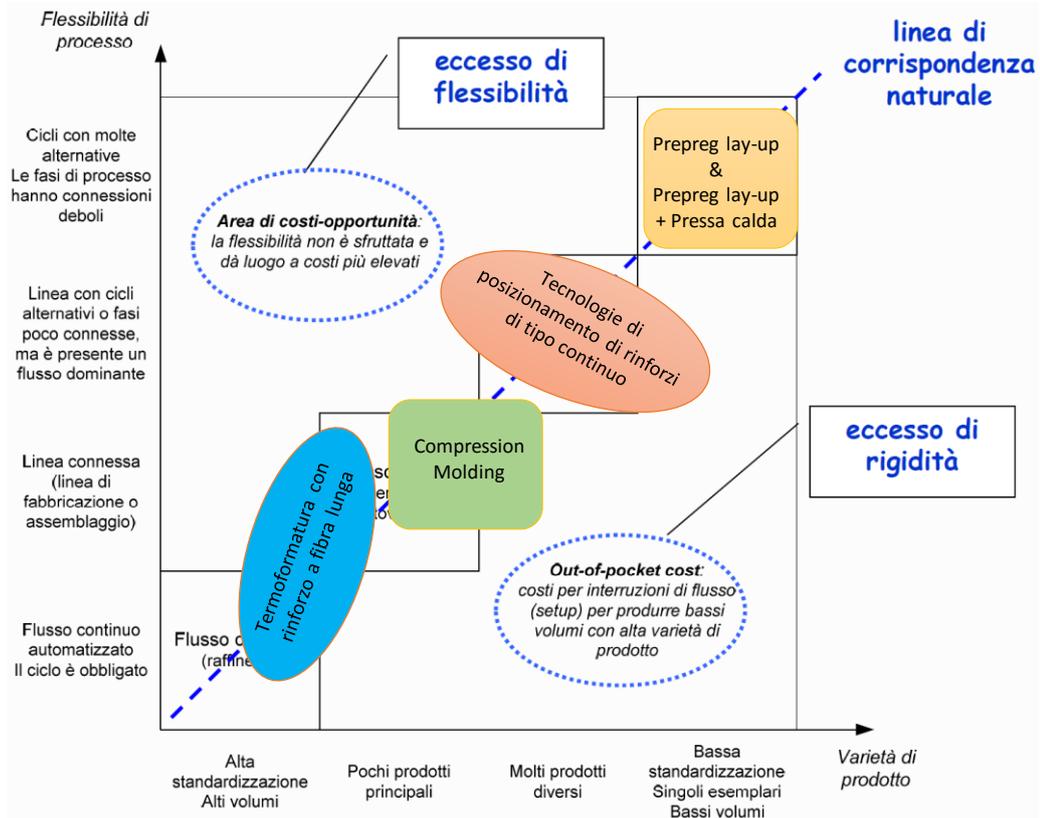
- Gli investimenti fissi realizzati sono molto elevati in quanto sono stati installati impianti e macchinari \specialistici, costruiti su misura per lo specifico processo che si intende sviluppare.
 - il sistema produttivo ha una struttura scarsamente flessibile, dovuta alla natura specialistica delle risorse utilizzate. In tal senso risulta difficile adeguare la produzione ad eventuali mutamenti nelle caratteristiche del prodotto desiderato.
 - i costi unitari di fabbricazione sono ovviamente i più bassi possibili, in virtù delle attrezzature e delle macchine specialistiche impegnate nella produzione.

Sulla base dei risultati ottenuti attraverso tale modello di calcolo in riferimento alle tecnologie di lavorazione ed ai processi attualmente utilizzati per l'industrializzazione in media-grande serie, si procederà attraverso un'analisi multiobiettivo all'individuazione della coppia tecnologia di lavorazione-componente automotive ottimale.

Tabella 4.5.1 - La mappatura delle tecnologie di lavorazione sulla base del modello di calcolo

	Mechanical	Crash	Productivity	Cicle	Equipment	Labour	Repeatability and Reliability	Shape	Aesthetic
	Performance	Performance		Time	Cost	Cost		Restriction	
Manual prepreg lay-up + autoclave	5	4	2	2	5	1	1	5	5 -
Manual prepreg + Press	5	4	3 -	3 +	5 -	2 -	1	5 -	5
Automated prepreg + Press	5 -	4	3 +	4	3	3	4	4	5
RTM	3 +	3	3	4	2	2	3	4	4
Vacuum Infusion	3	2	3	3	3	2	3	4	3
Filament Winding	4	3	3	4	3	5	5	1	3
Pultrusion	4	3	5	5	2	5	5	1	4
Pulwinding	4 +	3	4 +	4 +	2 -	5	5	1	4
Braiding - Overbraiding	5	5	3	3	2	4	5	2	3
Thermoforming	3	4 +	4	4	2	2	4	4	4
Thermoforming + Injection Moulding	3	4 +	4	4	2	2	4	4	4

Figura 4.5.2 – Matrice varietà – flessibilità dei sistemi produttivi per la lavorazione di componenti in CFRP



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Bartezzaghi E., 2010: *L'organizzazione dell'impresa. Processi, progetti, conoscenza, persone*, 2010 Rizzoli Etas

Hammer M. e Champy J.,2006: *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*, Harper Business Essential

Pegoretti. A, 2008: *Compositi polimerici strutturali per l'ingegneria industriale: realtà e sfide tecnologiche*, Dipartimento di Ingegneria dei materiali e Tecnologie industriali, Università di Trento

CAPITOLO V – UNA POSSIBILE APPLICAZIONE DEL MODELLO DI ANALISI: LA CARATTERIZZAZIONE DEI KPI PER IL SUPPORTO DECISIONALE

5.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo i KIP (key index parameters) individuati nel capitolo 4 vengono discussi e valutati sperimentalmente. A tal scopo dimostratori di geometria comparabile prodotti con le tre tecnologie in esame sono stati preparati.

Il capitolo è organizzato come segue: dapprima i parametri caratteristici delle proprietà meccaniche vengono valutati sperimentalmente, una breve descrizione delle modalità di prove eseguite è riportata. Successivamente vengono discusse in dettaglio le tematiche riguardanti la produzione, attraverso i tempi di lavorazione ed affidabilità dei processi produttivi.

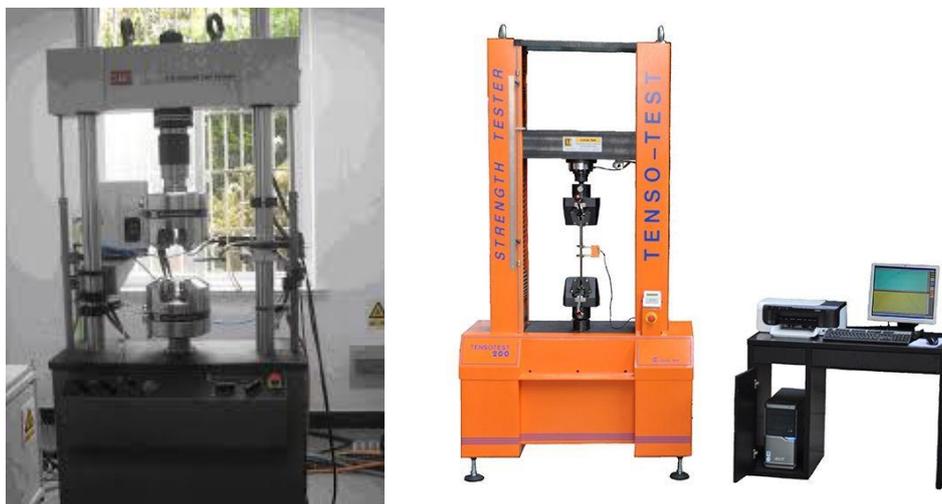
5.2 MECHANICAL PERFORMANCES

In questo paragrafo vengono riportate i risultati della campagna di caratterizzazione delle proprietà meccaniche relative a campioni tagliati da pannelli CFRP prodotti con le tecnologie di consolidamento in autoclave di preimpregnati, Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding e di stampaggio per materiali termoplastici.

5.2.1 Metodi di caratterizzazione meccanica

Tutte le prove di trazione statica sono state eseguite sui campioni utilizzando macchine di prova universali (MTS 810 equipaggiata con cella di carico da 250kN e Lonos TensoTEST equipaggiata con cella di carico da 20 e 100 kN), seguendo le indicazioni dello standard ASTM D3039-04 per le prove di trazione.

Figura 5.2.1 - *Macchine di prova utilizzate per i test*



La misura della deformazione dei provini è stata effettuata con l'utilizzo di estensimetri tipo CEA-13-125UN-120, applicati nella direzione di applicazione del carico. Tutte le prove sono state condotte a temperatura ambiente (RT), in condizioni standard di umidità e in controllo di spostamento impostando la velocità della traversa a 1 mm/min.

In accordo con la norma il modulo a trazione è stato calcolato come la pendenza della curva sforzo-deformazione nella regione compresa tra $1000 \mu\epsilon$ e $3000 \mu\epsilon$ scalata per le dimensioni del provino.

Le proprietà interlaminari dei compositi esaminati in questo lavoro sono state valutate attraverso lo studio della resistenza a delaminazione con provino tozzo (Short Beam Strength, ASTM D2344-04) e mediante prove mirate a valutare la resistenza alla propagazione della frattura.

In accordo con la norma il carico massimo di taglio è valutato come:

$$F^{sbs} = \frac{3 P^{\max}}{4 b d} \quad [MPa] \quad 1$$

Dove P^{\max} [MPa] rappresenta il carico massimo misurato durante la prova, mentre b e d sono le dimensioni caratteristiche della sezione del provino [mm], larghezza e spessore rispettivamente.

5.2.2 Proprietà meccaniche di compositi prodotti da preimpregnati

In questo paragrafo sono riportate le proprietà meccaniche misurate su campioni prodotti da rotoli di preimpregnato in fibra di carbonio e resina epossidica

La seguente tabella riporta le proprietà di taglio interlaminare misurata secondo lo standard ASTM D2344

Description	w (mm)	t (mm)	F^{SBS} (MPa)
SBS-prepreg-001	12,74333	2,876667	43,60474
SBS-prepreg-002	13,63333	2,84	47,68807
SBS-prepreg-003	13,06333	2,88	54,11433
SBS-prepreg-004	12,08333	2,853333	42,45476
SBS-prepreg-005	13,19333	2,823333	48,0443
<i>mean</i>			47,18124

Nella seguente tabella sono riportate le proprietà delle prove a trazione con campioni tagliati lungo la direzione delle fibre.

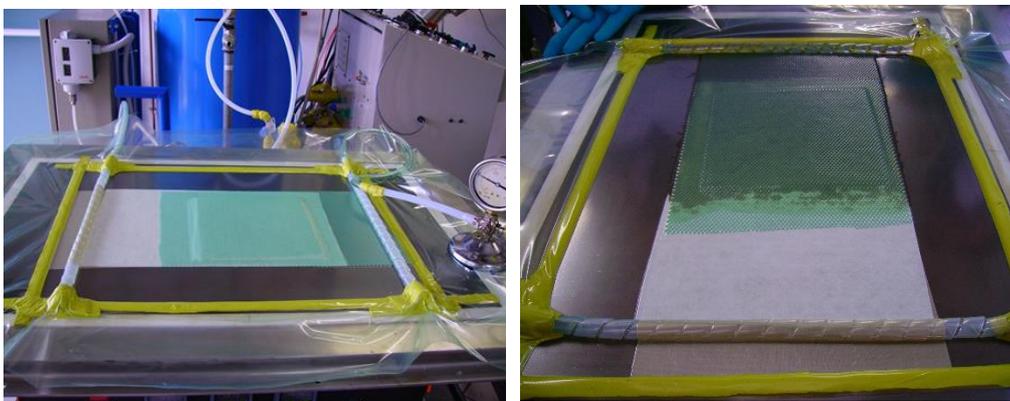
<i>Description</i>	w (mm)	t (mm)	E1 (GPa)	v12	Fut1 (MPa)	εut1 (%)
UNTO-prepreg-001	14,85	1	160,101	0,333	1797,172	0,9552
UNTO-prepreg-002	15,45	1	133,2362	0,3275	1609,838	1,1462
UNTO-prepreg-003	15,15	1	161,6502	0,3685	1942,706	1,1806
<i>mean</i>			151,6625	0,343	1783,239	1,094

Nella seguente tabella sono riportati i risultati delle prove a trazione con campioni tagliati ortogonalmente alla direzione delle fibre

Description	w (mm)	t (mm)	E2 (GPa)	v21	Fut2 (MPa)	εut2 (%)
UNT90-prepreg-001	25,66	1,93	9,271569	0,015936	26,25001	0,2725
UNT90-prepreg-002	26	1,97	9,234674	0,021	27,17688	0,2832
UNT90-prepreg-003	25,44	1,94	8,902366	0,018887	29,44061	0,333
UNT90-prepreg-004	25,81	1,9	9,380289	0,02	23,40994	0,2509
mean			9,136203	0,018956	27,6225	0,296233

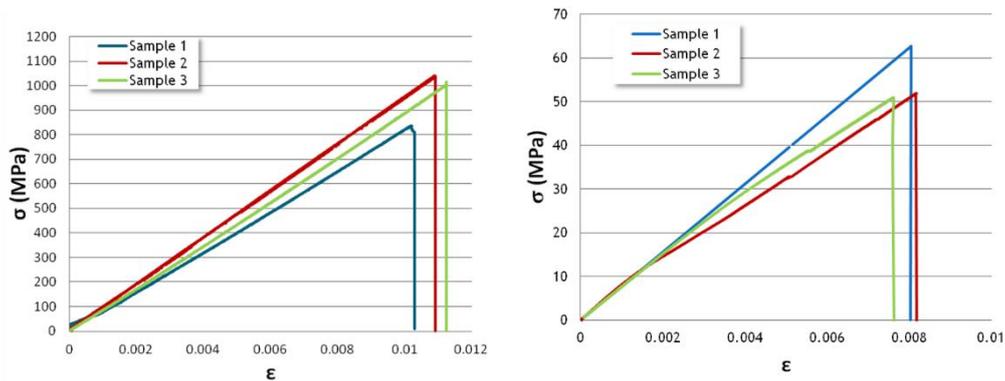
5.2.3 Proprietà meccaniche di compositi prodotti per RTM

In questo paragrafo sono presentati i parametri meccanici valutati attraverso le prove meccaniche su provini ricavati da un pannello prodotto in laboratorio secondo il processo di vacuum assisted RTM



Le proprietà a trazione sono state misurate in accordo allo standard ASTM D3039 per campioni in cui le fibre sono orientate lungo l'asse principale ed ortogonali ad esso

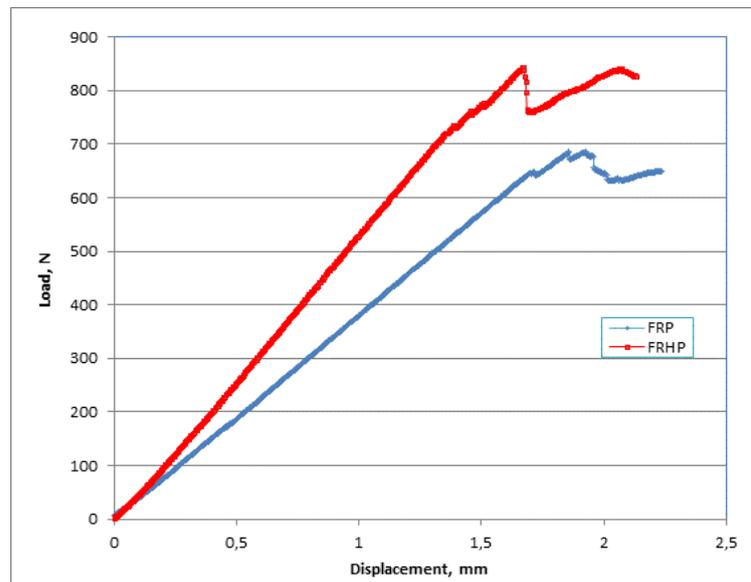
Figura 5.2.3.1 - Prove di trazione su campioni prodotti per RTM



Composite	E (GPa)	σ (MPa)	ε
UNTO-RTM samples	86.7± 4.5	973.8 ±80.7	0.012±0.0028
	7.7± 0.6	51.43±0.54	0.0075±0.0008

Di seguito sono riportati i dati di resistenza interlaminare per compositi CFRP prodotti mediante processo RTM

Figura 5.2.3.2 - curve spostamento deformazione in prove di taglio interlaminare per provini prodotti oin RTM



La elaborazione dei dati è riportate nella seguente tabella

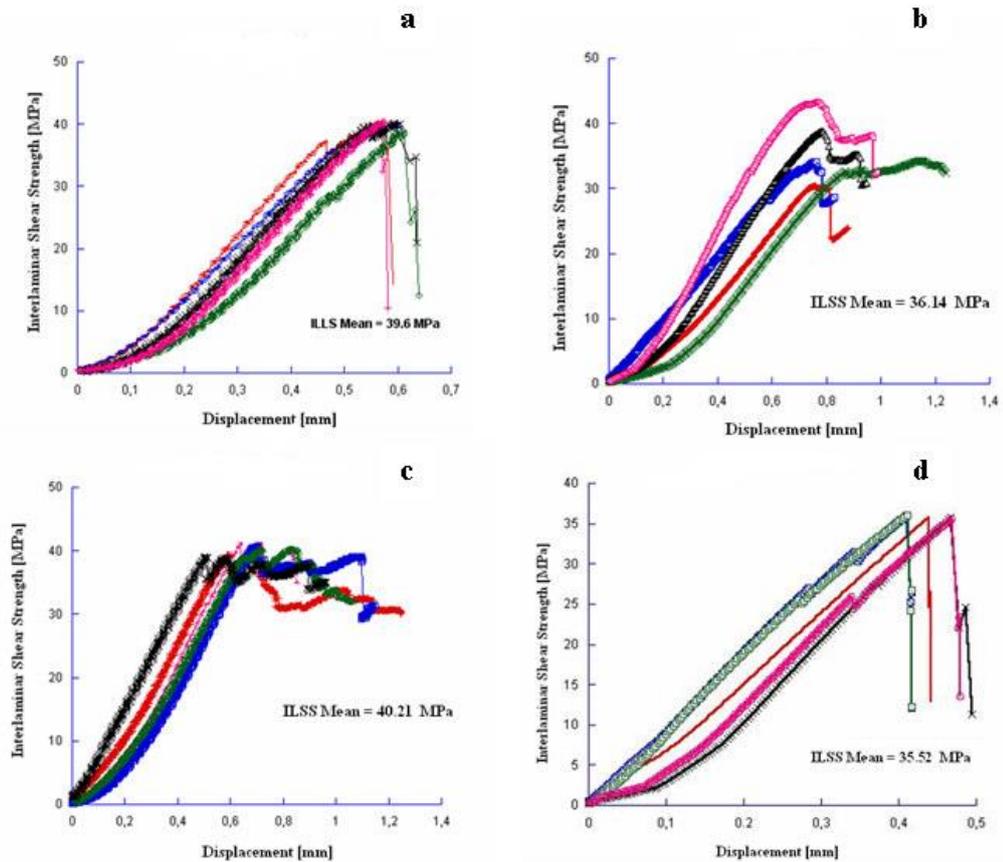
Samples	τ (MPa)
CFRP-RTM	2.76

5.2.4 Proprietà meccaniche di compositi prodotti per termoformatura

Preliminarmente allo studio delle proprietà di compositi prodotti per termoformatura, è stata fatta una verifica dei parametri di processo, in particolare la pressione di consolidamento, la temperatura di processo è fissata in 235°C compatibile con la fusione del materiale per permettere il consolidamento in situ dello stesso.

Il parametro scelto per verificare le proprietà è la resistenza interlaminare, proprietà dominata dalla quantità di matrice distribuita tra le lamine che quindi discrimina il buon esito del processo. Le figure sotto riportano le prove eseguite su campioni processati a pressione di consolidamento differente.

Figura 5.2.4.1 – *Prove di interlaminar shear strenght su provini prodotti con differente pressione di consolidamento*



La miglior combinazione di parametri ha portato a avere un taglio interlaminare di 40.21 MPa

Di seguito i risultati delle prove di trazione eseguite su provini tagliati nella direzione delle fibre ed ortogonali ad essi. La

Figura 5.2.4.2 – Modulo a trazione

Il consolidamento ad un carico di 10 bar produce anche la miglior combinazione di termini di rigidezza elastica.

Figura 6 – Carico ultimo

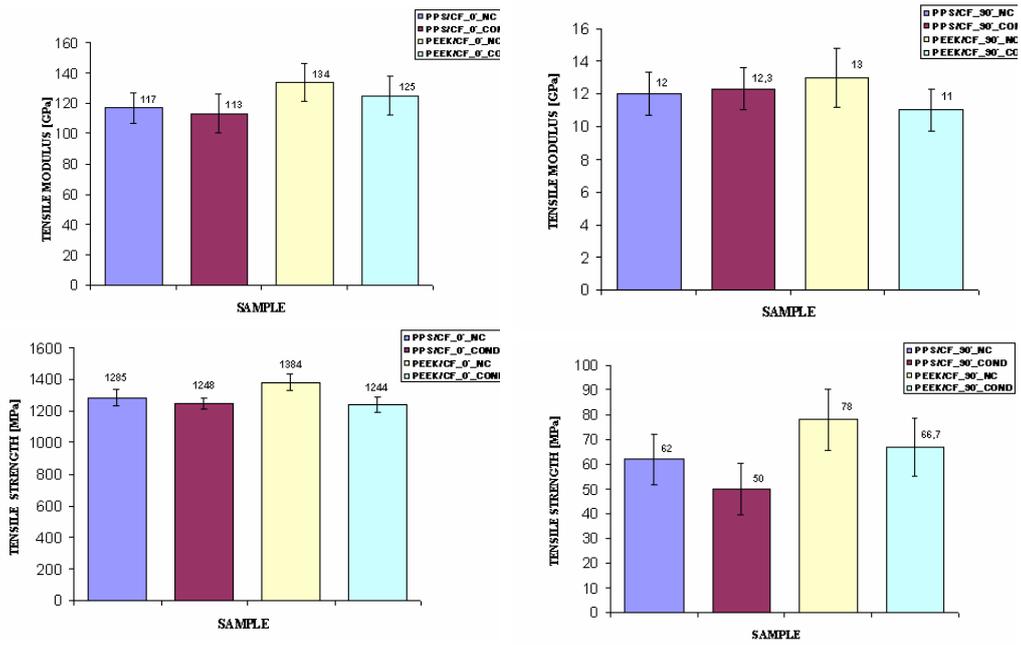


Figura 1 – Carico ultimo

5.3 ASSORBIMENTO DI ENERGIA AD IMPATTO

La capacità di assorbimento di energia di materiali compositi, in particolare i compositi, in vetro e fibra di carbonio, è stata studiata da molti anni. Tuttavia, non esistono ancora metodi di prova standard, quindi la maggior parte di questi test sono stati comparative in natura. Cioè, ciascun laboratorio sviluppa una particolare configurazione di test e il protocollo e la usa per confrontare una varietà di materiali compositi candidato. Un esempio popolare sottopone un tubo corto composito assiale di compressione. Negli ultimi anni, tuttavia, ci sono stati concentrati sforzi per sviluppare metodi di prova standard, specificamente per quantificare la capacità di assorbimento di energia del materiale composito stesso. Questi metodi hanno assunto due forme primarie, vale a dire, la sperimentazione di forme autoportanti e la sperimentazione di campioni piani supportata, come richiesto per evitare deformazioni. Entrambe le forme richiedono un iniziatore di cricca inserito nella geometria provino per creare concentrazioni di sforzi locali che avviano il processo di delaminazione e rottura. Ovviamente, la geometria del provino può influenzare la modalità di rottura e l'assorbimento di energia; Pertanto, la forma deve essere standardizzata.

Per evitare le influenze della geometria del provino, una misura più diretta della capacità di assorbimento di energia del materiale composito è sottoporre un semplice provino piano ad una forza di compressione assiale. Un certo numero di apparecchi di prova sono evoluti negli ultimi anni.

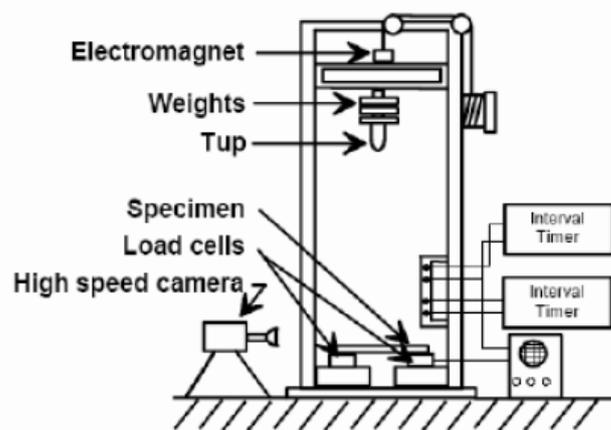
5.3.1 Test di impatto

Nella definizione di prove di impatto rientrano diverse tipologie di prove:

- impatti a bassa velocità e bassa energia: si valuta l'entità del danneggiamento e la residua capacità di resistenza della struttura;
- impatti a bassa velocità e alta energia: si studia la capacità del laminato di resistere alla penetrazione della punta e, nel caso che ciò avvenga, alla capacità di dissipazione dell'energia di impatto;
- impatti ad alta velocità e bassa energia: rappresenta il campo degli urti di corpi di massa ridotta animati da un'alta velocità;
- impatti ad alta velocità ed alta energia: ricadiamo nel campo degli urti di corpi di massa elevata animati da un'alta velocità.

In questo lavoro di tesi si sono svolte prove a bassa energia e velocità. Lo scopo del test descritto di seguito è quello di misurare l'energia trasferita o "persa" dal corpo mobile durante il contatto con il campione. La prova d'impatto "a caduta libera" (Drop-Weight Test) utilizza un peso noto rilasciato da una determinata altezza (vedi Figura).

Figura 5.3.1.1 – *Drop Weight test*



Il campione può essere semplicemente appoggiato sul supporto o afferrato. L'energia cinetica del percussore può essere variata regolando in modo opportuno la quota di rilascio. Mediante la strumentazione alloggiata in testa al dardo o nei supporti, è possibile misurare il carico dinamico cui è sottoposto il provino. L'energia assorbita è calcolata facendo uso della seguente relazione:

$$U = \frac{W}{2g}(u_1^2 - u_2^2) \quad 2$$

dove:

W = peso del dardo

u_1 = velocità del percussore immediatamente prima dell'impatto

u_2 = velocità del percussore misurata subito dopo l'impatto

g = accelerazione di gravità

h = altezza di rilascio

C'è da notare che tutti i risultati ottenuti mediante le tipologie di prova descritte dipendono dal rapporto fra la lunghezza e lo spessore effettivo del campione. Al di sotto di un valore critico di questo parametro, si osserva un considerevole incremento dell'energia d'impatto legato alla estesa delaminazione.

Per l'esecuzione delle prove si è utilizzata una macchina a caduta di peso della serie Fractovis (CEAST). In Figura è riportato lo schema generale dell'apparato.

Figura 5.3.1.2 – *Strumentazione per prove Impatto*

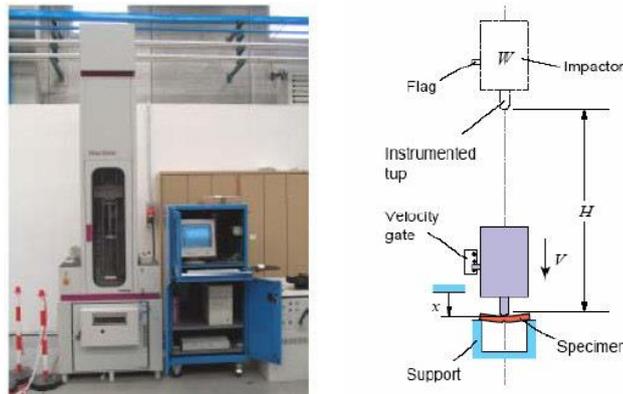
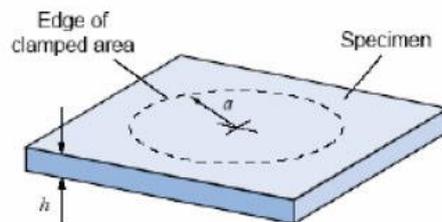


Figura 2

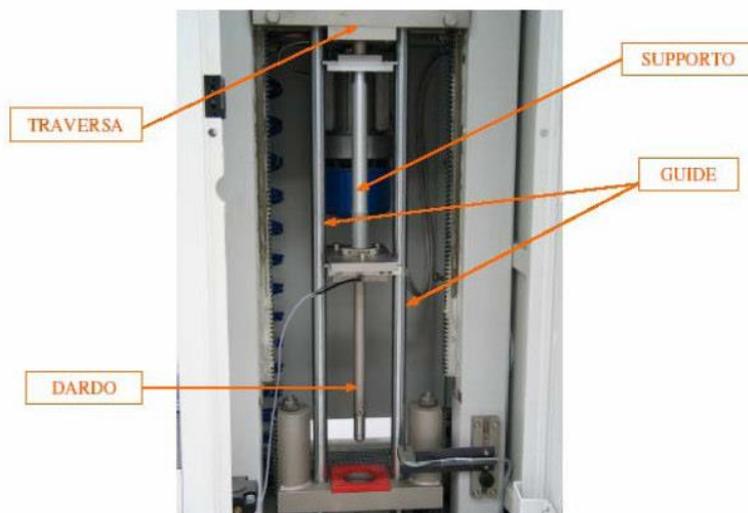
Il supporto per il campione presenta una cavità interna di diametro pari a 4cm ed è dotato di un apposito dispositivo pneumatico per l'afferraggio (clamp). In Figura è illustrata l'area del provino sottoposta a clamp.

Figura 5.3.1.3 – *Campione rappresentativo per prove impatto*



In figura è illustrata la parte interna della torre di caduta, di cui si nota chiaramente il supporto, le guide lungo le quali scorre, la traversa a cui è fissata e il dardo che rappresenta l'oggetto impattante.

Figura 5.3.1.1 – *Dettaglio macchina di prova*



La velocità del percussore viene misurata, immediatamente prima dell'impatto, da un trigger ottico posizionato in corrispondenza del supporto del campione. La testa del dardo è equipaggiata con sensori a semiconduttore. Questi ne misurano la deformazione a compressione per tutta la durata del contatto con il provino. In Figura 3 è mostrato il particolare della testa del dardo usato nelle prove ad impatto di nostro interesse. L'altezza massima raggiungibile è pari a 1000 mm. Tuttavia, vi è la possibilità di aumentare indirettamente tale valore massa sospesa, invece, può essere variata aggiungendo i pesi in dotazione. La macchina dispone infine di un sistema anti-rimbalzo che evita impatti multipli.

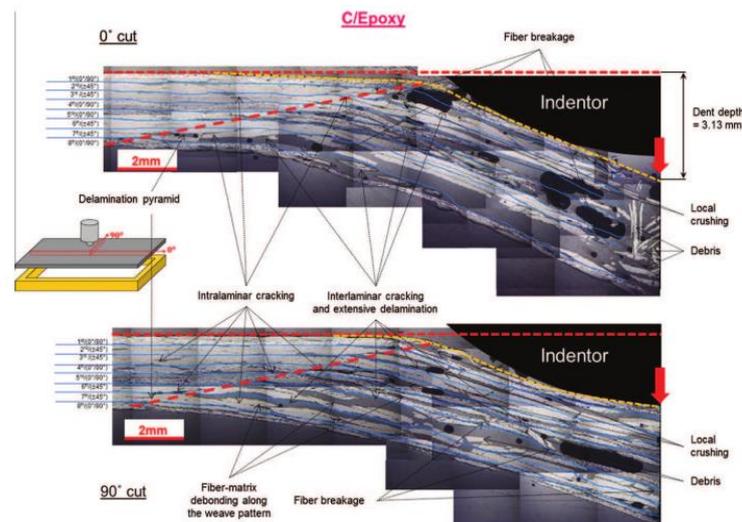
La forza $P(t)$, che il provino esercita sulla testa del percussore è l'unica quantità che la macchina misura come funzione continua del tempo. A tal proposito è importante notare che il campione è totalmente sprovvisto di sensori. Pertanto, non essendovi bisogno di alcuna operazione preliminare, il tempo di prova è molto breve. Per costruire il diagramma carico-spostamento è necessario

che la deflessione del provino sia determinata in funzione del tempo. Questa operazione viene effettuata indirettamente mediante integrazione numerica dell'equazione del moto del dardo. La misura dell'energia risulta un valore di estrema importanza fornendo informazioni sulla tenacità del materiale sottoposto ad una prova di impatto.

5.3.2 Comportamento ad impatto di compositi prodotti da pre-impregnati

In questo paragrafo vengono illustrate le proprietà ad impatto di compositi a base epossidica prodotti in autoclave. La bassa resistenza interlaminare di laminati a base epossidica è coerente con la vasta delaminazione osservata nei campioni in esame.

Figura 5.3.2.1 – *Analisi superficie frattura composito a matrice epossidica*



Le curve forza-spostamento mostrano la rappresentano la rigidità del provino (pendenza della curva), la deformazione massima, e alcune informazioni relative al danneggiamento ed alle relative energie d'impatto. Nei campioni a base epossidica si evidenzia una variazione di rigidità per forze di impatto di circa 2 kN ed un abbassamento della piastra di circa 4 mm.

Figura 5.3.2.2 – Comportamento tipico di compositi prodotti mediante autoclave per effetto di energie di impatto a differente livello cfr

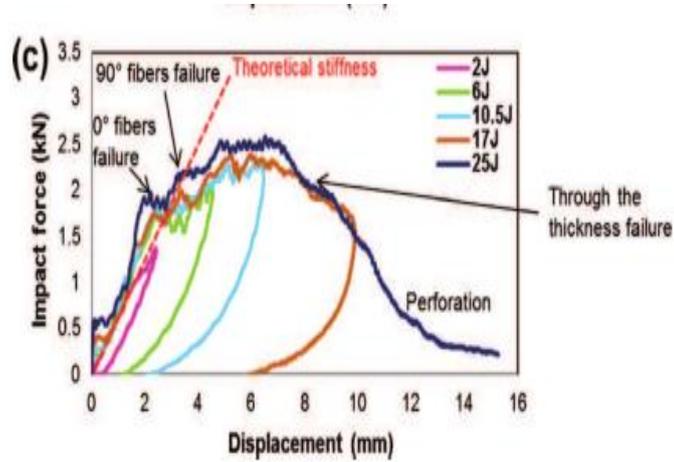


Figura 3 –

In tabella sono riportati i valori corrispondenti alle energie assorbite nel caso di impatto con energia di 5 J

<i>F_{max}</i> (kN)	<i>E_{max}</i> (J)	<i>E_{fin}</i> (J)	<i>Abbassamento</i> (mm)	<i>Dimensione</i> (mm)
2.85±0.05	5,85±0.1	3.7±0.05	4.55±0.03	4.32±0.25

5.3.3 Comportamento ad impatto di compositi prodotti per RTM

Nel valutare il danneggiamento da impatto i parametri di maggior interesse sono la energia assorbita durante l’impatto. Il materiale può assorbire energia attraverso differenti meccanismi quali la deformazione elastica, attrito, la deformazione plastica ed alcune modalità prettamente relative all’uso di compositi quali il danneggiamento progressivo della matrice, delaminazioni e la rottura delle fibre.

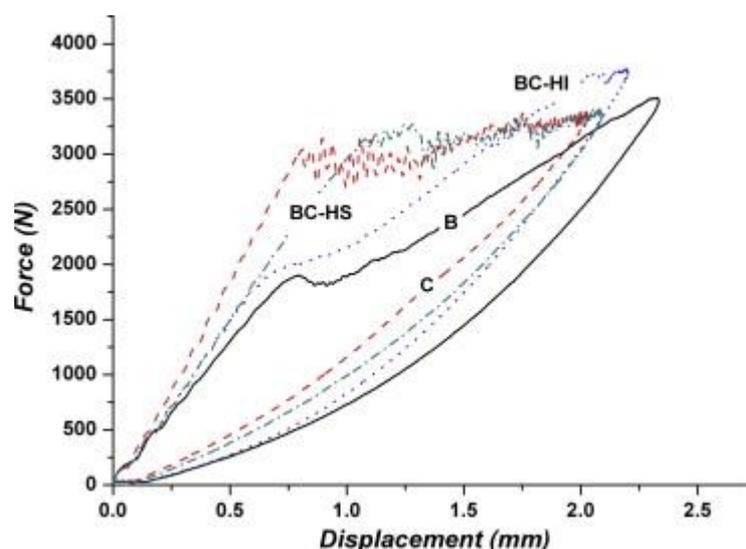


Figura 5.3.3.1 – Andamento curva forza spostamento per compositi prodotti attraverso processo RTM, cfr Sarasini et al.

Nella figura precedente è riportato il comportamento tipico di compositi prodotti per Resin Transfer Moulding per effetto di un impatto con livello energetico del dardo pari a 5 J. In grafico sono presenti compositi prodotti con sistemi di fibre secche ibridi, carbonio-basalto. La seguente tabella riporta i parametri principali relativi alle caratteristiche ad impatto di compositi realizzati con matrice epossidica (cura a temperatura ambiente) e fibra di carbonio.

I pannelli prodotti con questa tecnologia hanno assorbito meno energia in seguito all’impatto ed hanno riportato un’area di danneggiamento più ampia.

<i>Fmax (kN)</i>	<i>E_{max} (J)</i>	<i>E_{fin} (J)</i>	<i>Abbassamento (mm)</i>	<i>Dimensione (mm)</i>
3.74±0.2	4.85±0.07	2.30±0.09	1.83±0.12	5.34±0.10

5.3.4 Comportamento ad impatto di compositi a matrice termoplastica

I pannelli realizzati di spessore nominale pari a 2.2 mm sono stati realizzati per stampaggio a compressione. Tutti i pannelli prodotti prima di essere tagliati e testati sono stati prima visionati tramite indagine non distruttiva per essere sicuri che nei manufatti non ci fossero delle delaminazioni e/o porosità indotte dal processo e/o condizionamento.

Tutti i provini prodotti sono stati tagliati dai pannelli realizzati utilizzando una troncatrice metallografia.

Le prove sono state condotte utilizzando la macchina di prova e la procedura descritta nel paragrafo 5.3.1. Per ogni prova è possibile acquisire, al variare del tempo, i valori di parametri di grande interesse tecnologico quali:

- Rigidezza del materiale (pendenza del tratto elastico);
- Damaging force e Damaging elongation (denominazioni conformi alla norma ISO 6603/2 che rappresentano i valori di forza e deformazione registrati immediatamente prima della nascita del danno);
- Energia totale e Damaging energy (costituiscono le energie assorbite durante l'intero decorso della prova e sino alla generazione della prima delaminazione, rispettivamente)

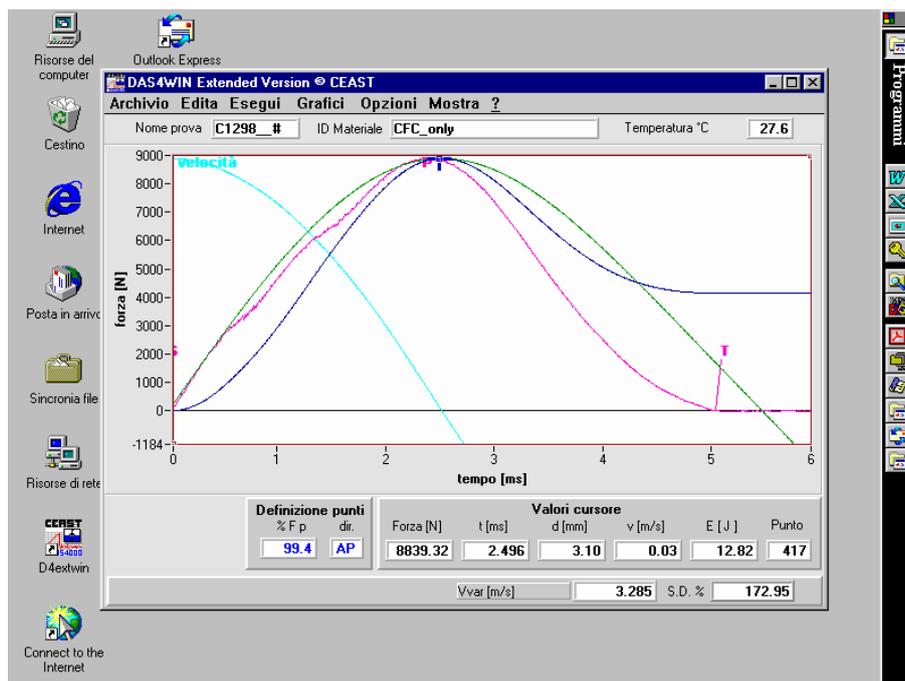


Figura 5.3.4.1 – interfaccia software macchina di prova

Tabella 1- Caratteristiche ad impatto di compositi unidirezionali in matrice termoplastica

<i>Fmax (kN)</i>	<i>E_{max} (J)</i>	<i>E_{fin} (J)</i>	<i>Abbassamento (mm)</i>	<i>Dimensione (mm)</i>
2,83±0.2	5,05±0.15	3,32±0.1	3,31±0.03	5,46±0.2

5.3.5 Tempi ciclo per la produzione di componenti in CFRP

Tra i parametri caratteristici riferiti ai processi di produzione di elementi in composito non si può non valutare i tempi ciclo necessari per la realizzazione di componenti. I tempi di produzione del componente sono legati strettamente alle caratteristiche dei prodotti trasformati. Ad esempio preimpregnati realizzati con epossidici con proprietà meccaniche non ottimizzate, offrono da un lato il vantaggio di poter essere curati a temperature basse, ma richiedono tempi di cura molto elevati (fino a 12h) quindi tra i parametri caratterizzanti il i tempi di ciclo occorre operare una distinzione tra il tempo necessario alla messa in posa del componente e quello necessario al suo consolidamento.

Di seguito si riportano in tabella i tempi relativi ad i cicli di produzione considerando le tecnologie prese in esame.

<i>Cycle duration (hrs)</i>	Messa in posa	Consolidamento	Rifilatura	Assemblaggi
<i>Autoclave</i>	4.6	6.0	0.15	1.0
<i>RTM</i>	1.4	4.0	0.15	1.0
<i>Thermoforming</i>	0.15	0.25	0.15	1.0

5.4 VALUTAZIONE CICLO CURA SISTEMA EPOSSIDICO

In questo paragrafo è riportata la valutazione dei tempi di consolidamento legate ad un sistema epossidico. L'attività ha come scopo ultimo la messa punto di uno strumento software per analisi e l'ottimizzazione dei cicli termici per due tipologie di materiali, i.e. SAATI e AMBER.

5.4.1 Definizione della problematica

L'utilizzo del sistema autoclave per la produzione di componenti in materiale composito determina la problematica della definizione del ciclo operativo dell'autoclave stessa in termini di programmata di temperatura e pressione. In generale, la fase di consolidamento per polimerizzazione della matrice del composito rappresenta una fase cruciale per la produzione del componente in materiale composito. In particolare, la temperatura del componente da realizzare deve essere portata, mediante scambio termico connettivo con il fluido circolante in autoclave, alla temperatura di attivazione delle reazioni di polimerizzazione che essendo esotermiche contribuiscono a loro volta alla determinazione della temperatura finale del componente stesso. Il controllo dei profili termici nel componente è fondamentale sia allo scopo di minimizzare i gradienti di temperatura, di gelificazione che possono comportare un degrado delle prestazioni meccaniche attese sia per la determinazione del minimo tempo ciclo.

La posizione del componente all'interno dell'autoclave, l'efficienza di trasferimento termico dell'autoclave, l'inerzia termica del componente completo di tool e la cinetica di generazione di calore per effetto delle reazioni di polimerizzazione contribuiscono egualmente alla determinazione del ciclo ottimale per la realizzazione di un componente in composito al meglio delle sue prestazioni.

L'attività che viene riportata nel seguente documento è stata suddivisa in quattro parti principali:

- Modellazione del processo di scambio termico in autoclave mediante un approccio esemplificato
- Studio e modellazione della cinetica calorimetrica
- Simulazione e confronto con i dati rilevati durante l'esercizio dell'autoclave HP compositi mediante l'utilizzo di termocoppie

- Realizzazione di un software per l'ottimizzazione

5.4.2 Modellazione del processo di scambio termico in autoclave

L'approccio seguito per la modellazione dello scambio termico dell'autoclave è basata su due ipotesi esemplificative la cui validità è lasciata all'efficacia stessa del metodo a valle delle verifiche sperimentali.

- Il campo di temperature all'interno del componente è rappresentata dai profili di temperature acquisiti in due punti specifici durante la qualifica termica mediante sistemi di termocoppie, in particolare la locazione della termocoppia che registra l'aumento di temperatura più lento, T_{lag} , e rispettivamente la locazione della termocoppia che registra l'aumento di temperatura più veloce, T_{lead} .
- Il gradiente termico attraverso lo spessore della parte in T_{lag} e T_{lead} è trascurabile, in modo da permettere una modellazione zero dimensionale che rappresenta sia l'inerzia termica del composito+tooling che il contributo di generazione termica per le reazioni esotermiche.

Il modello numerico, semplice nel suo sviluppo ma molto potente nelle applicazioni pratiche, assume quindi l'assenza di un gradiente termico attraverso lo spessore del composito ($Biot \ll 1$ e $Damkohler \ll 1$), e pertanto la massa termica del sistema può essere concentrata (lump model) permettendo una trattazione puntiforme (zero dimensionale). Così come descritto dallo schema in figura.

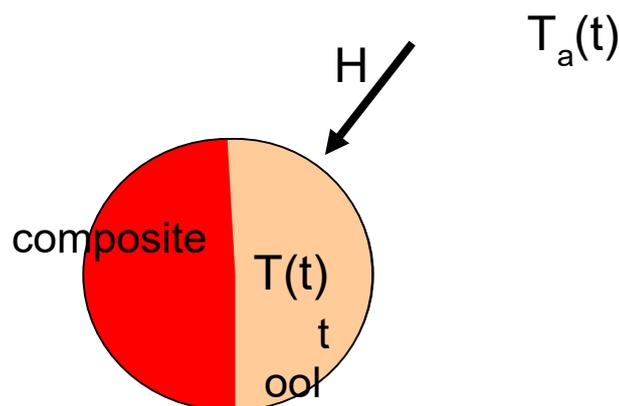


Figura 5.4.21 – Schematizzazione del sistema a parametri concentrati

Il modello tiene in conto dello scambio termico convettivo, h , tra la locazione delle termocoppie, T_{lag} e T_{lead} , e il fluido di riscaldamento dell'autoclave, T_a , dell'inerzia termica della parte di tooling, $\rho_t c_{p_t} l_t$, della parte di matrice reattiva, $\rho_c c_{p_c} l_c$, e della esotermicità della reazione di polimerizzazione, $\rho_r l_c \varepsilon \Delta H$, nonché della cinetica della reazione di polimerizzazione,

Il sistema di equazioni che ne deriva è caratterizzato da due parametri che identificano univocamente le proprietà termochimiche della posizione della termocoppia nel componente:

- H , cioè il coefficiente globale di scambio termico e
- ΔT_a , i.e. l'incremento adiabatico associato alla polimerizzazione del sistema.

Definendo il ciclo termico dell'autoclave, $T_a(t)$, la temperatura della termocoppia in esame $T(t)$, velocità di polimerizzazione mediante il modello cinetico $f(\alpha, T, t)$ il sistema di equazioni accoppiate da risolvere è, Eqs 1:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = H(T_a(t) - T(t)) + \Delta T_a \dot{\alpha} \\ \dot{\alpha} = f(\alpha, T, t) \end{cases}$$

In particolare, il coefficiente globale di scambio termico, H , definisce la velocità di riscaldamento convettiva mentre la temperatura adiabatica, ΔT_a , l'incremento massimo di temperatura per effetto dell'esotermicità, rispettivamente. relative alla locazione della termocoppia sotto esame. In particolare le eqs 2 mostrano le relazioni tra i parametri concentrati e i i parametri del laminato.

$$\begin{cases} H = \frac{h}{\rho_c c_{p_c} l_c + \rho_t c_{p_t} l_t} \\ \Delta T_a = \frac{\rho_r l_c \varepsilon \Delta H}{\rho_c c_{p_c} l_c + \rho_t c_{p_t} l_t} \end{cases}$$

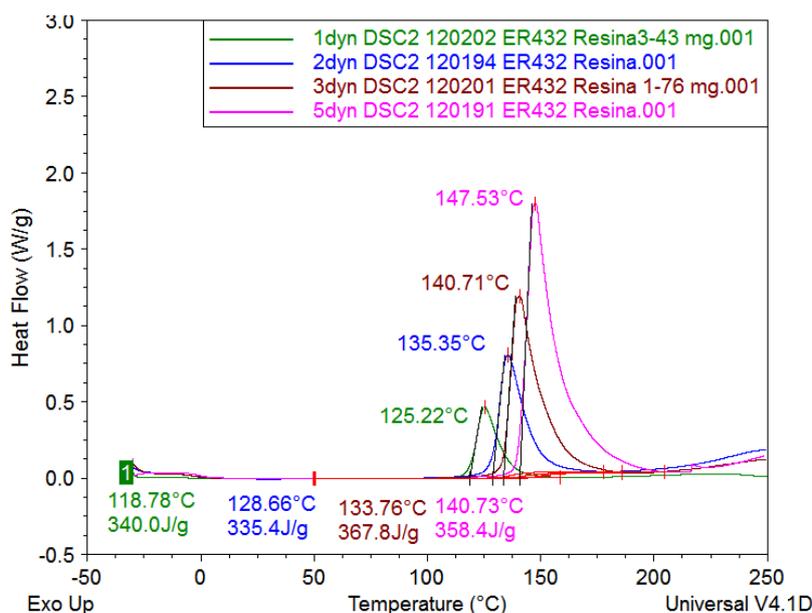
5.4.3 Modellazione Cinetica SAATI

Nel presente paragrafo, la cinetica calorimetrica del sistema SAATI viene studiata a partire dai dati sperimentali disponibili e forniti da SAATI: 4 curve dinamiche a 1°C/min, 2°C/min, 3°C/min e 5°C/min tre curve isoterme, rispettivamente a 80°C, 90°C e 100°C.

Analisi termica

Le scansioni dinamiche a 1°C/min, 2°C/min, 3°C/min e 5°C/min, riportate in figura 2, sono state utilizzate per la valutazione del calore di reazione. Mentre la scansione standard a 10°C/min è stata utilizzata per la valutazione della temperatura di transizione vetrosa del sistema uncured e fully cured.

Figura 5.4.3.1 - Scansioni dinamiche utilizzate per valutare il calore totale di reazione medio della reazione



Il calore totale di reazione medio è stimato in 350.4 J/gr. La variabilità relativamente alla curva 3°C/min rientra nell'ambito della letteratura corrente. La temperatura di transizione vetrosa del sistema completamente curato è circa 115°C, mentre la temperatura di transizione vetrosa del materiale uncured.

Figura 5.4.3.3 - DSC dinamico standard a 10°C/min

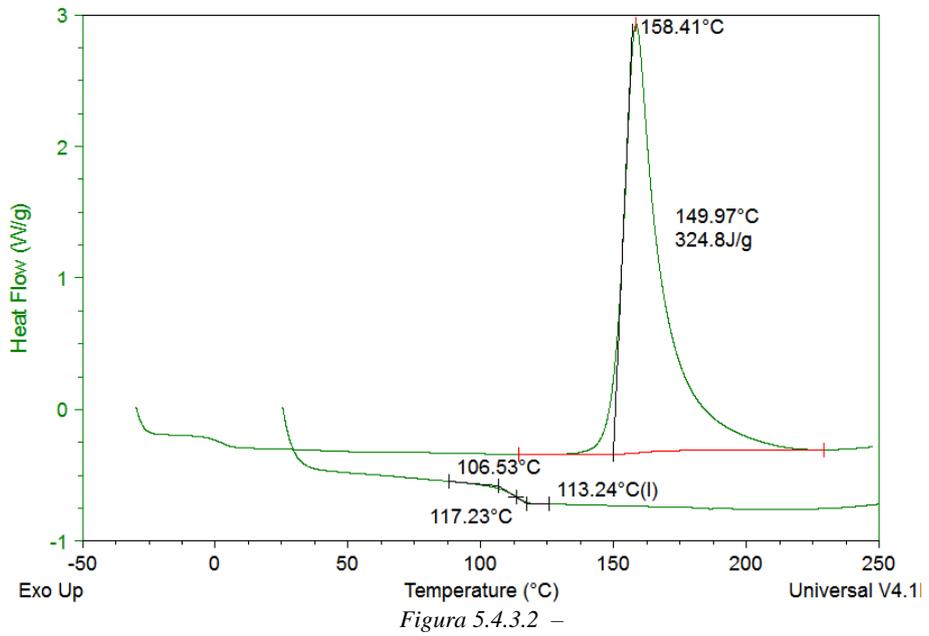
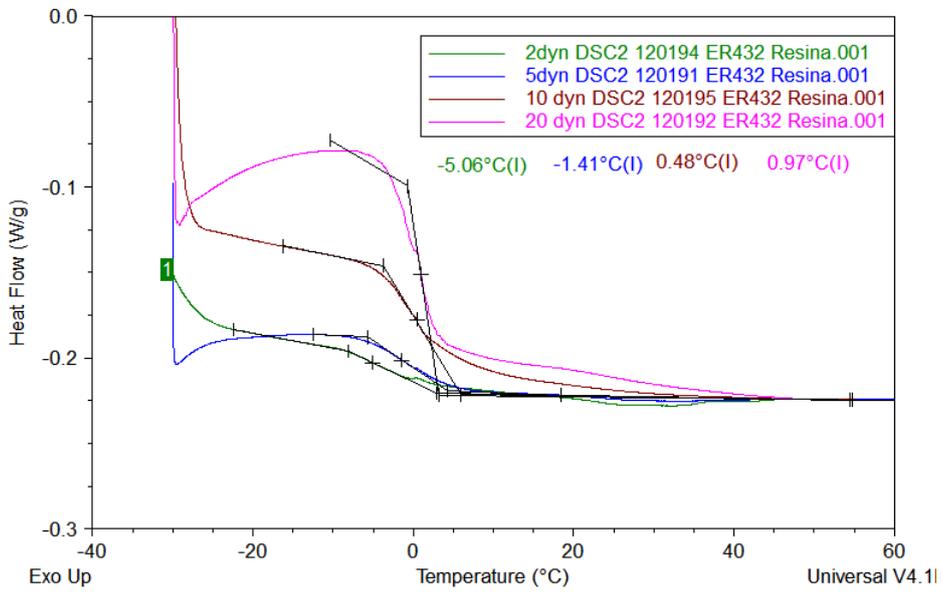
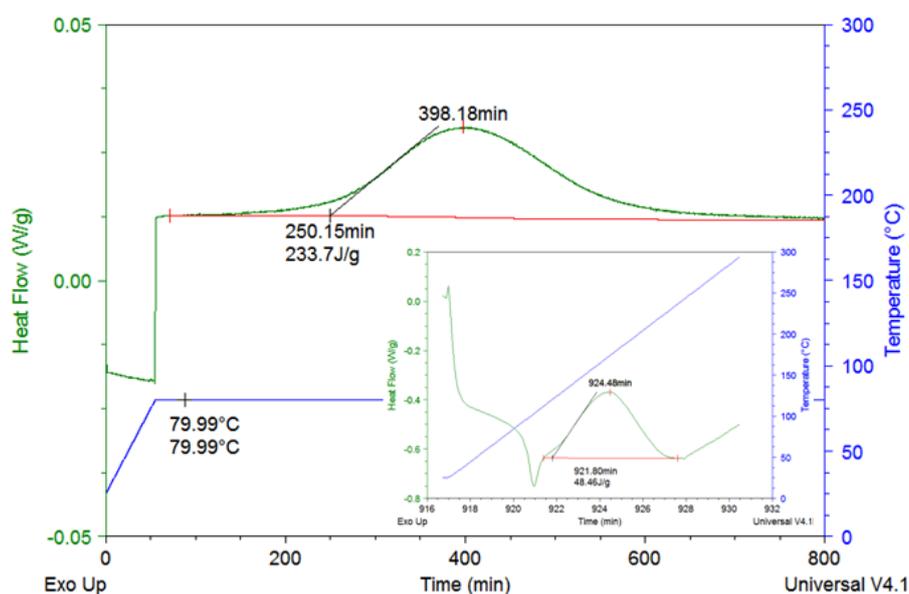


Figura 5.4.3.4 - Temperatura di transizione vetrosa del sistema non curato



Le scansioni utilizzate per la determinazione dei parametri isotermi sono: scansioni isoterme a 80°C, 90°C e 100°C. Le figure 5, 6 e 7, riportano termogrammi alle temperature 80, 90 e 100°C. La reazione a 80°C risulta essere non completa, la conversione finale stimata è 80%. La reazione a 90°C risulta essere non completa, la conversione finale stimata è 90%. La reazione a 100°C risulta essere non completa, la conversione finale stimata è 95%. Le curve di velocità suggeriscono una parte auto catalitica per le reazioni di polimerizzazione, così come atteso.

Figura 5.4.3.5 - Scan isoterma a 80°C



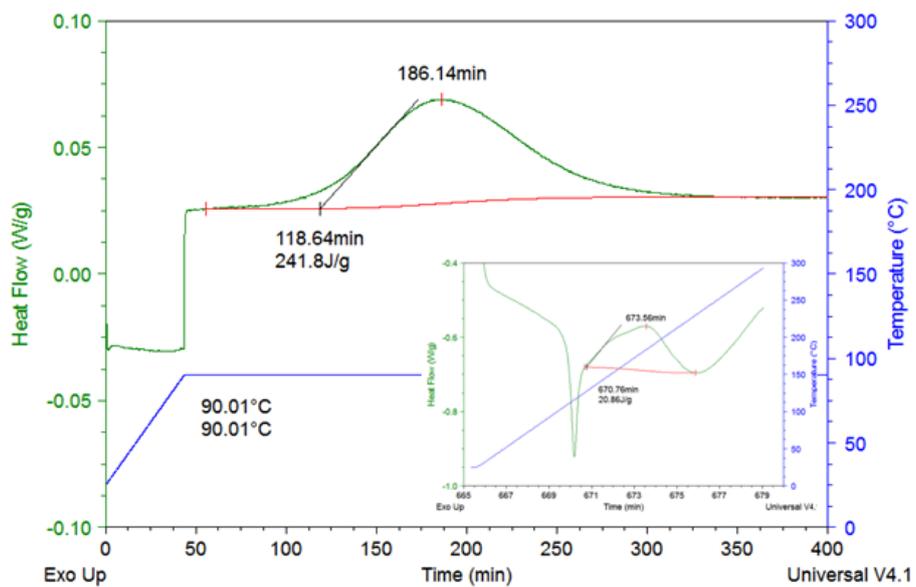


Figura 4 Scan isoterma a 90°C

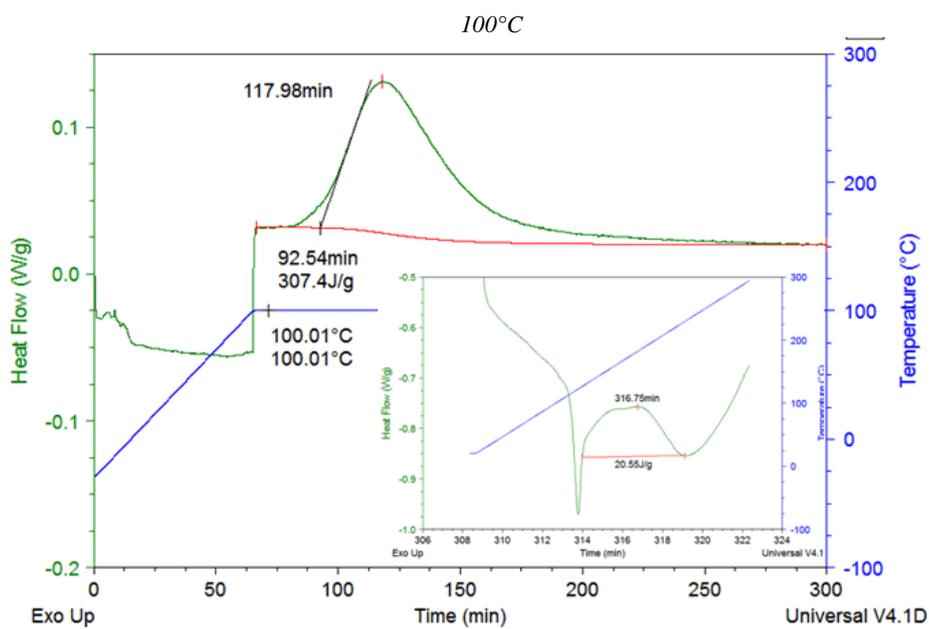


Figura 5 Scan isoterma a 100°C

5.4.4 Identificazione del modello e parametri cinetici (SAATI)

Il modello considerato per la cura del materiale in esame è il modello di Kamal, comunemente usato per questa tipologia di resine:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2\alpha^m)(1-\alpha)^n$$
$$K_i = K_{i0} \exp(-\Delta E_i / RT) \quad (i=1,2)$$

La figura 6 mostra i risultati della determinazione dei parametri cinetici. Per confronto con i dati sperimentali. I parametri individuati per la cinetica sono:

Tabella 5.4.4.1 - Parametri cinetica della resina SAATI secondo il modello di Karmal

K10	E1	K20	E2
log(1/s)	KJ/mol*K	log(1/s)	KJ/mol*K
9.05	95.05	9.1	84.52
m			n
2			1

La figura mostra le previsione del modello in termini di conversione per vari isoterme

Figura 5.4.4.1 - Fitting to isothermal curves

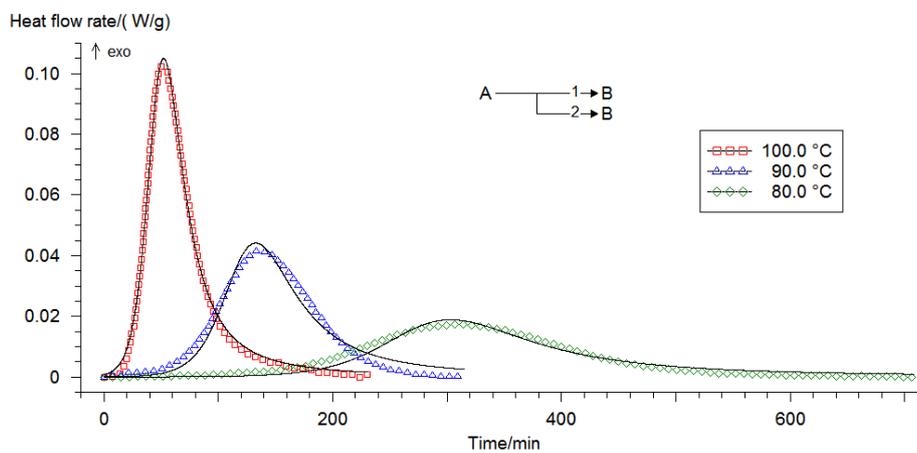


Figura 5.4.4.2 - Predizioni per la conversione isoterma a varie temperature

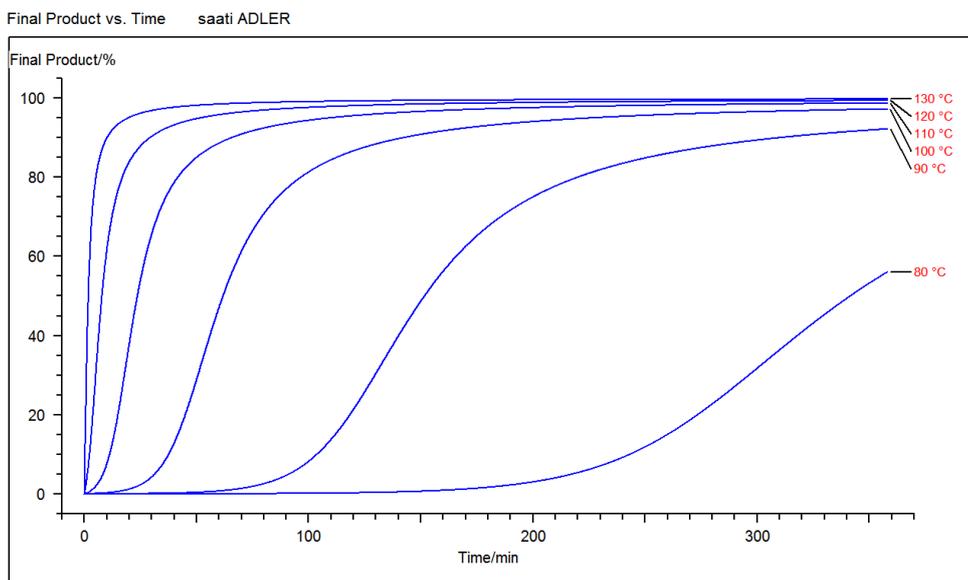
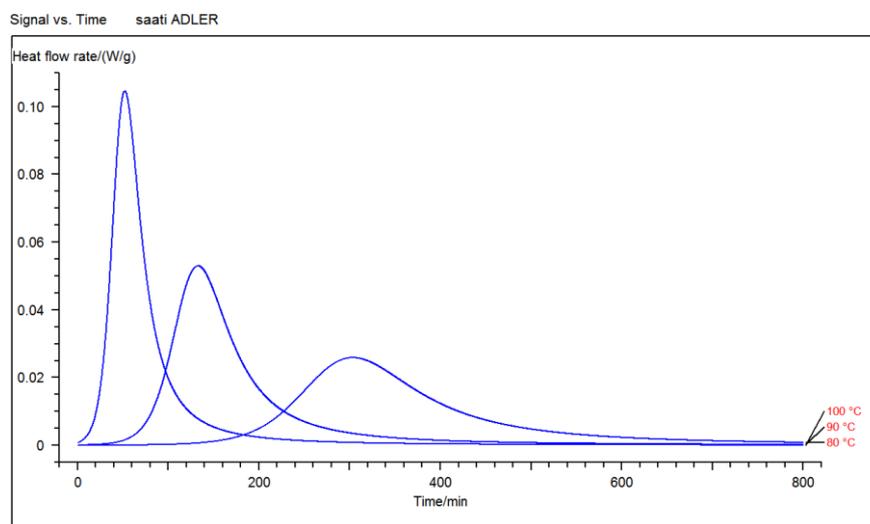


Figura 5.4.4.3 - Previsioni del modello cinetico a 80°C-90°C e 100°C

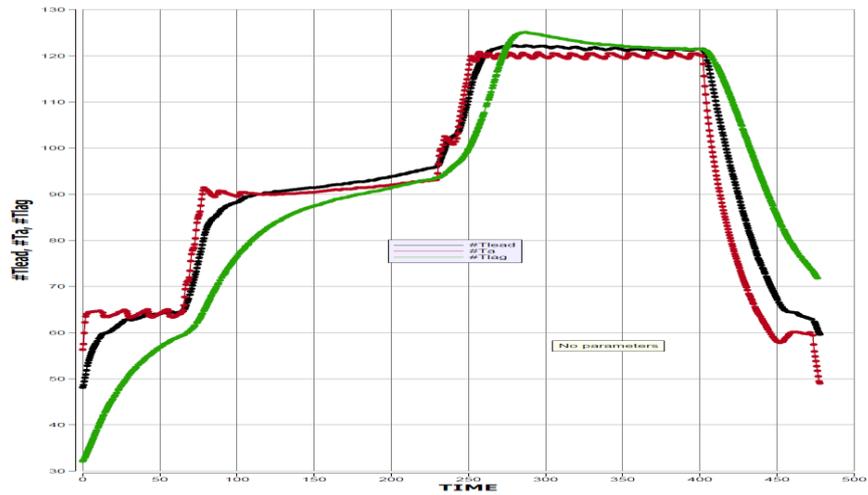


Figura

5.4.5 Identificazione dei parametri per la cura in Autoclave HP compositi (SAATI)

La produzione dei primi prototipi della vasca A4C ha permesso la presa dati per le termocoppie identificate come più veloci, Tlead, e più lenta, Tlag, rispettivamente, oltre che alla programma della temperatura del fluido in autoclave, T_a . La figura 18 mostra le acquisizioni fatte nella autoclave HP compositi. Le temperature sono in °C e i tempi in minuti. La termocoppia di lettura del fluido in autoclave sembra risentire di un leggero off set rispetto a quelle lag e lead di circa 1 °C.

Figura 5.4.5.1 - Acquisizioni delle temperature in autoclave.



Il modello descritto dall'eqs.1, corredato dalla cinetica chimica descritto dall'eqs.3 è stato utilizzato per identificare i parametri H e ΔT_a , sia per la posizione lag che per quella lead. Le figure successive mostrano i risultati dell'identificazione parametrica. La figura 20 riporta l'errore tra la stima del modello e i dati sperimentali per la termocoppia più lenta, T_{lag} . L'errore massimo commesso per T_{lag} è di circa 2.5 K. La figura riporta l'errore tra la stima del modello e i dati sperimentali per la termocoppia più veloce, T_{lead} . L'errore massimo commesso per T_{lead} è di circa 4 K.

Figura 5.4.5.2 - Errore commesso dalla stima dei parametri per la posizione lenta

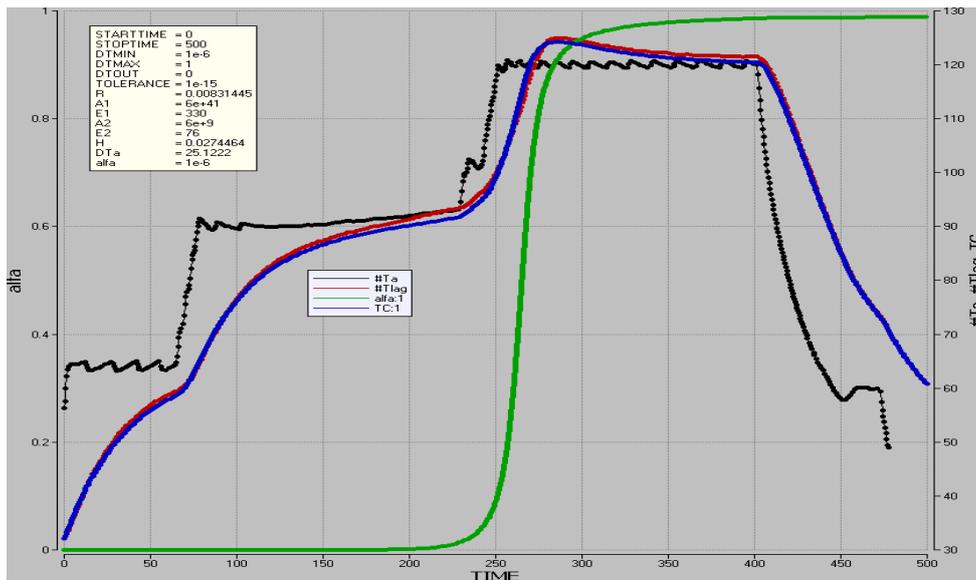
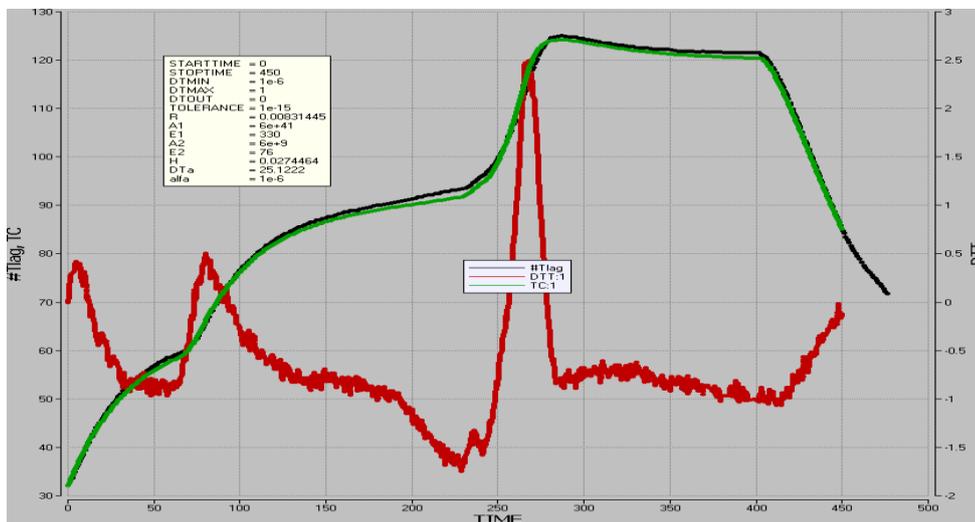


Figura 6 Determinazione dei parametri H, Dta per la termocoppia lenta



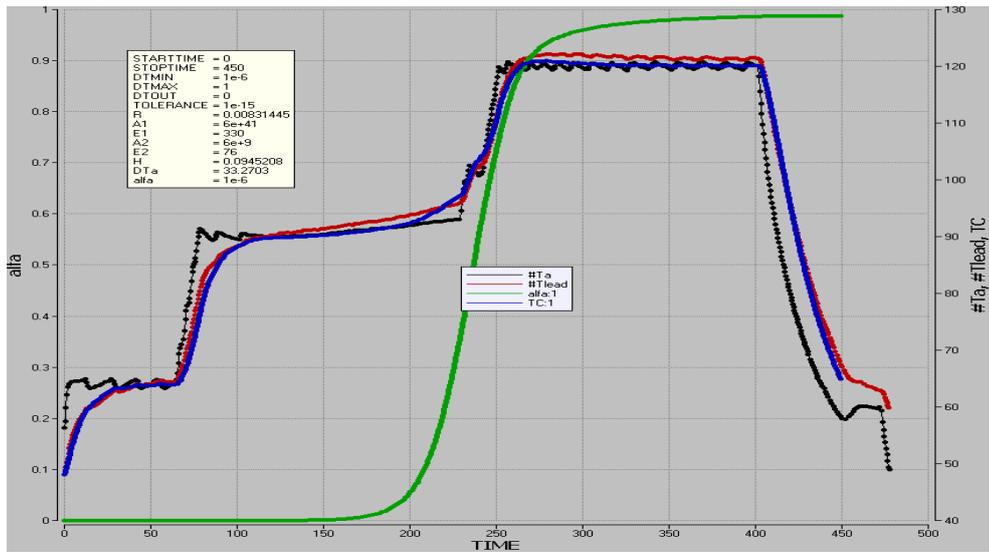


Figura 5.4.5.3 - Determinazione dei parametri H , Dta per la termocoppia lenta

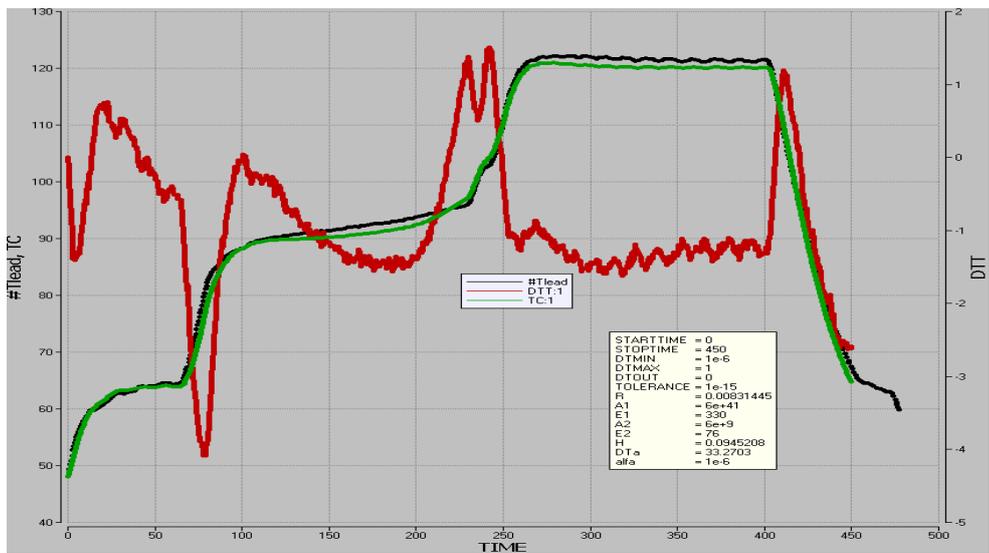


Figura 5.4.5.4 - Errore commesso dalla stima dei parametri per la posizione veloce

La tabella riporta i parametri stimati per le due posizioni:

<i>Tabella</i>	<i>H, l/min</i>	$\Delta T_a,$ <i>K</i>
<i>Lead</i>	0.095	33.3
<i>Lag</i>	0.027	25.1

5.5 PARAMETRI DI CONTROLLO PROCESSO DI PRODUZIONE

Gli alti livelli di automazione presenti nel settore automotive sono relativi alla necessità di standardizzare le caratteristiche del prodotto finito. L'introduzione di componenti in composito introduce nuovamente un elevato numero di operazioni manuali che possono introdurre variabilità non controllate nel processo.

Un parametro che può essere definito per valutare questo effetto nel ciclo di produzione può essere individuato semplicemente nel numero di ore necessarie di operazioni non automatizzate.

Nella seguente tabella vengono riportate i tempi di lavoro associati alle differenti tecnologie proposte.

<i>Man power (hrs)</i>	Preparazione Materiali	Allestimento Stampi	Incollaggi	Controlli qualità	Spostamenti
<i>Autoclave</i>	0.1	4.0	0.6	1.0	1.5
<i>RTM</i>	0.1	0.80	0.6	1.0	0.6
<i>Thermoforming</i>	0.1	0.2	0.6	1.0	0.2

Un ulteriore parametro da tenere in conto è la valutazione sulla possibilità di automatizzare le fasi in cui è coinvolto l'operatore e l'impatto economico che la sua implementazione avrebbe.

<i>Automation (k€)</i>	Preparazione Materiali	Allestimento Stampi	Incollaggi	Controlli qualità	Spostamenti
<i>Autoclave</i>	n.a.	50	150	50	50
<i>RTM</i>	n.a.	n.a.	150	50	10
<i>Thermoforming</i>	n.a.	n.a.	150	50	0

5.6 ESTETICA

La estetica del prodotto finale è un parametro di grande importanza nel settore automobilistico, per cui nella valutazione dei parametri caratterizzanti vengono introdotte considerazioni relative alle finiture del prodotto.

I parametri che vengono tenuti in conto sono la possibilità di raggiungere una finitura superficiale di classe A, la possibilità di descrivere geometrie con raggi di curvatura molto stretti ed i rischi connessi alle distorsioni dimensionali.

Per compositi basati su preforme a fibra di carbonio il raggiungimento di una finitura superficiale di classe è alquanto problematico in quanto sia nei processi di RTM che di consolidamento in autoclave a partire da prepreg per effetto delle curvature locali dei tessuti portano ad avere una rugosità superficiale marcata. La figura seguente riporta le misure di profilometria in funzione di due condizioni una a temperatura ambiente ed una ad alta temperatura. Infatti per effetto delle differenze nei coefficienti di espansione termica, forti escursioni termiche possono compromettere il livello di finitura raggiunto.

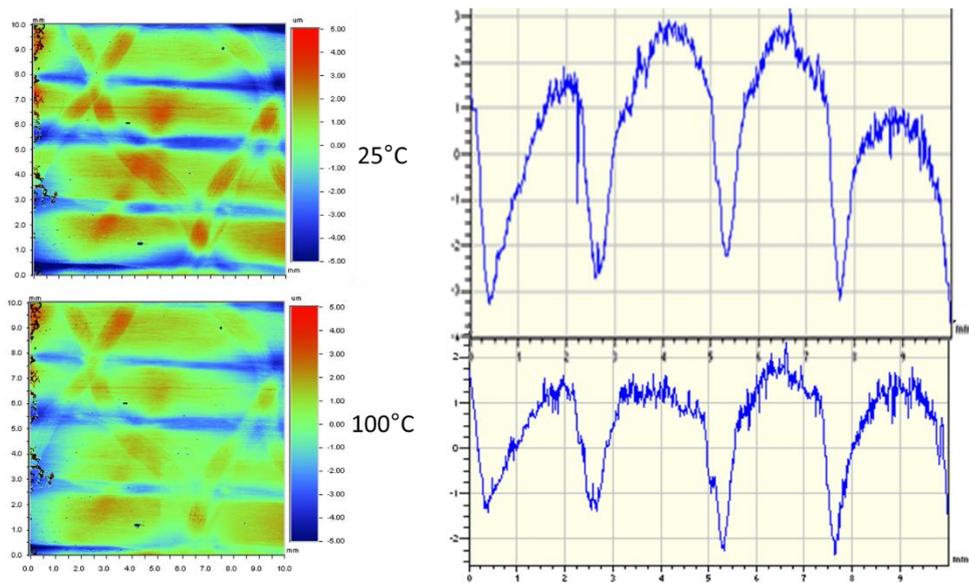


Figura 5.6.1 – profilometria su superficie di compositi prodotti mediante RTM

La figura seguente riporta le misure profilometriche su di una superficie trattata con un gelcoat.

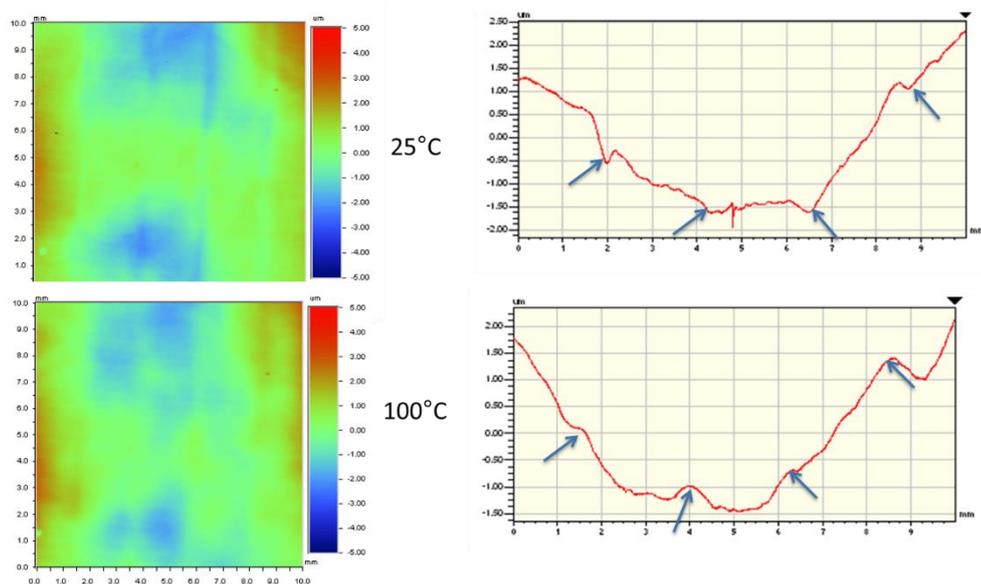
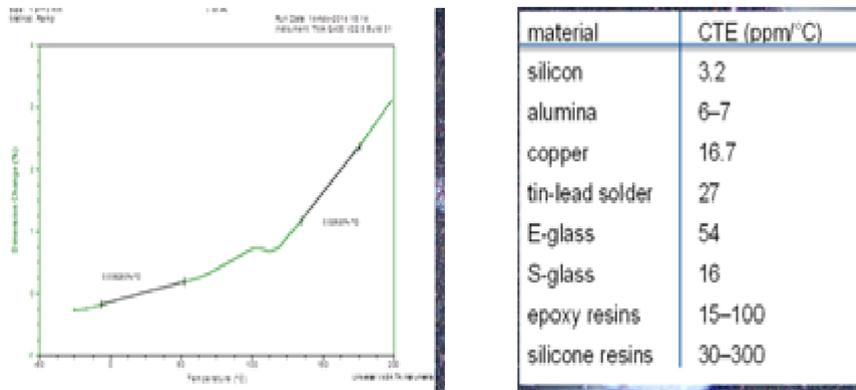


Figura 5.6.2 profilometria su composito realizzato su stampo trattato con gelcoat

Figura 5.6.3 – Effetto di escursione termica alla interfaccia fibra matrice



Un parametro che può essere allora considerato per la valutazione della finitura superficiale è la massima variazione misurata da un profilometro.

L'effetto di vari parametri di processo, come ciclo di cura, forma dell'utensile, raggio d'angolo, lunghezza delle flange, orientamento dei layer e sistema di resina, possono influire sulla qualità laminati di forma complessa, in termini di variazione di spessore e contenuto di vuoti.

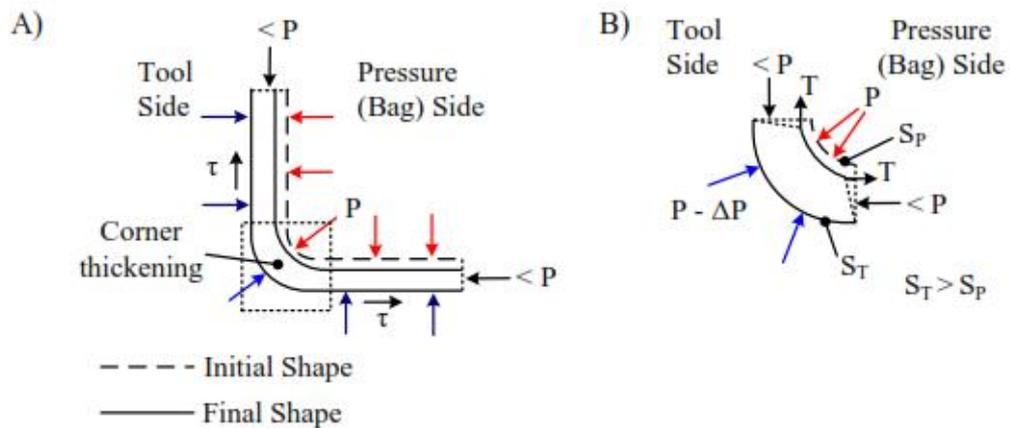


Figura 5.6.4 – difettosità legata alla presenza di curvature

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Courteau, Adams, *Composite Tube Testing for Crashworthiness Applications: A Review*, Journal of Advanced Materials, 43(2), pp. 13-34, 2011.

Courteau, *Investigating the Crashworthiness Characteristics of Carbon Fiber/Epoxy Tubes*, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Utah, 2011.

Garner, Adams, *Test Methods for Composites Crashworthiness: A Review*, Journal of Advanced Materials, 40(4), pp. 5-26, 2008.

Garner, *Crush Testing: Characterizing, and Modelling the Crashworthiness of Composite Laminates*, Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Utah, 2009.

Sarasini, Tirillò, Ferrante, Valente, Valente, Lampani, Gaudenzi, Cioffi, Iannace, Sorrentino, *Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites*, Composites Part B: Engineering, Volume 59, March 2014

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Nell'industria manifatturiera i criteri di scelta dell'utilizzo di una determinata tecnologia sono molteplici e la selezione per l'analisi comparativa tra i vari processi disponibili può assumere significato in termini di macro-distinzioni, essendo questo un settore in continua evoluzione in cui l'innovazione modifica a ritmi elevatissimi il panorama tecnologico di riferimento.

In relazione ai materiali compositi in fibra di carbonio la selezione della tecnologia di riferimento è strettamente vincolata a tale tipologia di materiali.

Il campo dei materiali compositi si caratterizza, infatti, per la peculiarità di non poter disgiungere la progettazione del materiale da quella della geometria della parte da realizzare e del relativo processo tecnologico da implementare ed in questo senso nella figura del progettista si vanno, quindi, a riassumere sinergicamente le competenze riguardanti i tre ambiti: materiale – prodotto – processo.

Il punto chiave dell'utilizzo dei materiali compositi è che essi possono essere progettati e preparati partendo da opportuni componenti in modo da ottenere le proprietà finali desiderate. Il concetto di progettazione è quindi di fondamentale importanza: la struttura non è più preparata dopo averne progettato la forma e calcolate le dimensioni, note le proprietà del materiale costituente, così come avviene nei materiali "convenzionali", ma la struttura può essere realizzata contemporaneamente al materiale che la costituisce e il materiale progettato e fabbricato avrà le proprietà desiderate in unione delle proprietà che si vogliono attribuire alla struttura. L'essere "progettabili" costituisce, quindi, l'impulso che spinge sempre più all'utilizzo di materiali compositi.

Nell'affrontare la progettazione di componenti strutturali in materiale composito il progettista meccanico ed il tecnologo si trovano, quindi, a dover collaborare sinergicamente nel design for manufacturing delle parti.

L'esigenza alla base del lavoro svolto è stata la necessità di colmare l'assenza di un modello decisionale adeguato che permetta di guidare il responsabile sviluppo di un nuovo prodotto nella valutazione dell'introduzione di quale tecnologia di produzione adottare per la realizzazione di componenti in composito a sostituzione delle configurazioni tradizionali. In particolare il lavoro è stato svolto ponendo accento sui modelli di sistemi della produzione per valutare le possibilità di trasferimento tecnologico tra quanto raggiunto nel

settore aeronautico - che da pioniere per la introduzione di compositi strutturali (CFRP) ha favorito processi di istituzionalizzazione delle scelte tecnologiche in grado di conseguire l'adozione diffusa di standard produttivi e modelli di progettazione - al settore dell'automotive.

Il tutto sulla base dei modelli offerti dalla letteratura relativamente alla caratterizzazione dei processi di innovazione e trasferimento tecnologico e ben consci delle differenze notevoli per quanto riguarda l'applicazione dei compositi in campo aeronautico rispetto all'industria automobilistica. In particolare, l'analisi tiene conto della differenza legata alle richieste produttive dei due settori: questi pur partendo da fabbisogni di mercato simili, rispondono ai propri fabbisogni tecnologici in modo differente. In aeronautica il progetto strutturale viene ottimizzato per raggiungere determinate prestazioni richieste e in base a questo viene selezionato il processo produttivo più adatto, ma spesso anche il più costoso in termini di tempo e risorse. Al contrario, l'industria automobilistica richiede una velocità di produzione maggiore in grado di fornire i componenti che rientrino in un determinato costo unitario. Quindi, per prima cosa, vengono selezionati i processi produttivi in base ai volumi richiesti e la progettazione del componente dovrà adattarsi al processo di fabbricazione individuato.

Pertanto, in base ai suddetti presupposti, è stato sviluppato un modello decisionale, che sulla base di un'analisi comparativa in grado di evidenziare in maniera « oggettiva » i limiti delle tecnologie per le produzioni basate sull'impiego dei materiali compositi in fibra di carbonio, consenta di discriminare quale processo tecnologico possa essere più opportuno per una serie di componenti a

Sono stati individuati degli indici di prestazioni che permettano di sviluppare un modello decisionale tale da associare al possibile prodotto in base ai suoi constraint (dimensione della serie, posizionamento commerciale, requisiti strutturali) in modo da poter individuare la configurazione ottimale tra componente e tecnologia produttiva.

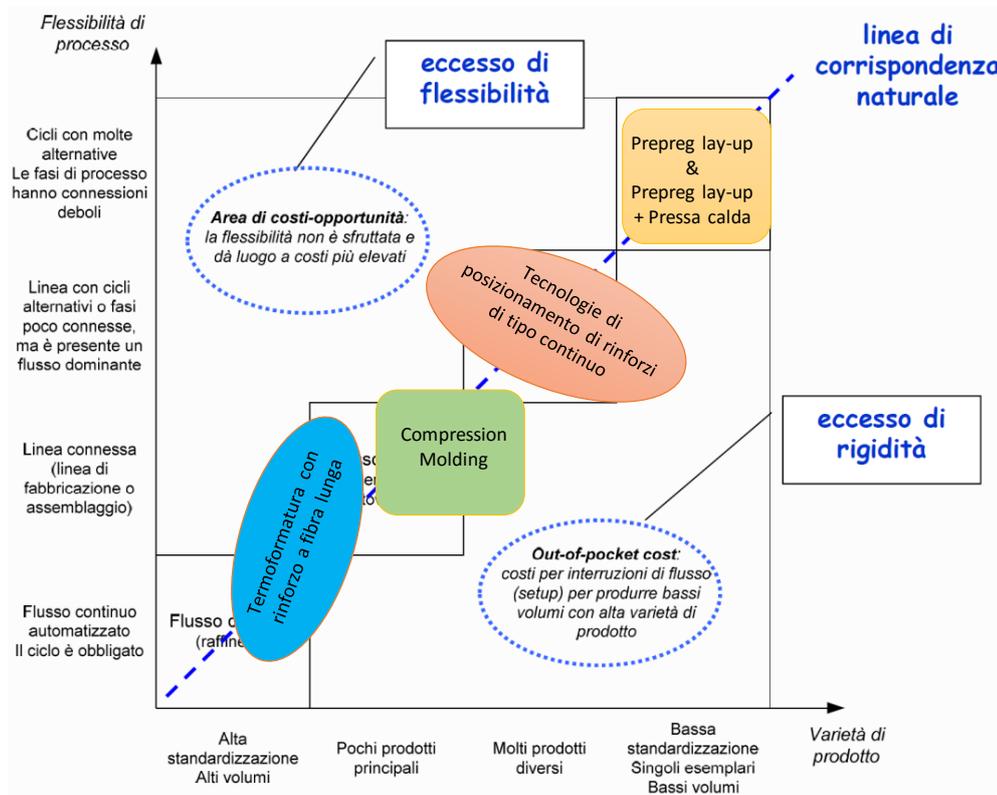
La seguente tabella riporta i parametri considerati per la valutazione delle singole tecnologie in funzione delle differenti aree tematiche associate al prodotto quali performance, crashworthiness, tempi ciclo, parametri di controllo del processo, requisiti estetici.

PERFORMANCE	Moduli Elastici	Resistenza planare	Resistenza Interlaminare	
CRASH	Energia assorbita in impatto	Spostamento massimo		
TEMPI CICLO	Posa fibre	Consolidamento	Assemblaggi	Rifinitura
PARAMETRI	Materiali	Stampi	Incollaggi	Qualità
CONTROLLO				
ESTETICA	Finitura superficiale	Curvature possibili		

Sotto l'aspetto macro, le tecnologie di lavorazione esaminate e caratterizzate sulla base del modello di calcolo possono essere posizionate nella matrice prodotto – processo, attraverso cui possono essere rappresentate le correlazioni esistenti tra caratteristiche del prodotto e le tipologie del processo di fabbricazione da impiegare.

Le condizioni ideali sono quelle corrispondenti ai punti della diagonale principale (area di coerenza). In tal senso un'azienda che lavora pezzi con caratteristiche assai variabili e ciascuno in serie pressoché uniche, è opportuno che impieghi un processo di lavorazione hand lay-up. Un'azienda la cui produzione è di tipo standard, limitata ad un numero non elevato di modelli, ciascuno però fabbricato in grandi quantità, fa ricorso ad un processo produttivo di tipo ripetitivo organizzato su linee di assemblaggio basate sulle tecnologie di termoformatura. La produzione di beni di largo consumo, o comunque richiesti in grandi quantità, dovrà necessariamente operare mediante processi di lavorazione continui.

Figura– Matrice varietà – flessibilità dei sistemi produttivi per la lavorazione di componenti in CFRP



Un punto al di sopra della diagonale indica che gli investimenti essi realizzati sono limitati, mentre un punto al di sotto della diagonale indica che gli investimenti fissi realizzati sono molto elevati in quanto sono stati installati impianti e macchinari \specialistici, costruiti su misura per lo specifico processo che si intende sviluppare.

Sulla base dei risultati ottenuti attraverso tale modello di calcolo in riferimento alle tecnologie di lavorazione ed ai processi attualmente utilizzati per l'industrializzazione in media-grande serie, si è infine proceduto attraverso un'analisi multiobiettivo all'individuazione della coppia tecnologia di lavorazione-componente automotive ottimale. I singoli parametri sono stati sperimentalmente ed empiricamente valutati in modo da poter effettuare una

valutazione complessiva dell'impatto di una variazione sui requisiti di progetto di un componente quali il numero di elementi previsti per la serie e/o un differente posizionamento di mercato del prodotto (prezzo al pubblico).

Sviluppi futuri

Stime per sostenibilità di passaggio dall'utilizzo di materiali termoplastici per numerosità elevate delle serie di produzione

Introduzione di parametri specifici per la valutazione della opportunità di spingere verso produzioni caratterizzate da elevata automatizzazione per completare il processo di recepimento e ottimizzazione alle specificità di settore

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare per primo il Prof. Luigi Carrino per avermi guidato nel mio percorso di ricerca con saggi consigli ed avermi seguito costantemente nella realizzazione della tesi di dottorato. Inoltre, esprimo la mia riconoscenza per avermi dato la straordinaria opportunità di acquisire conoscenza approfondita e di frontiera nel campo delle tecnologie di lavoro per i materiali compositi, entrare a contatto con la dimensione della ricerca internazionale e d'avanguardia in ambito aerospaziale presso il CIRS trasmettendomi, contemporaneamente, la sua esperienza professionale ed umana

Ringrazio l'Ing. T. Murino, ed in generale il dipartimento DICMAPIEM, che mi hanno accolto offrendomi la possibilità del confronto e dandomi preziosi suggerimenti per il miglioramento del presente lavoro di ricerca

Ringrazio poi l'Ing. Mauro Zarrelli della Seconda Università degli Studi di Napoli, che mi hanno sempre dimostrato disponibilità quando ne ho avuto bisogno.

Ringrazio infine il Prof. Michele Giordano, che mi ha gentilmente ospitato per un periodo di studio e ricerca presso l'IPCB del CNR e l'Ing. Alfonso Martone per avermi supportato nella fase delle prove e dell'analisi dei dati contribuendo all'esame di alcuni dei dati discussi in questa tesi.

Ringrazio infine tutti coloro che, pur non appartenendo al mio ambiente professionale, hanno compreso il mio lavoro e avuto la pazienza di starmi vicino nel corso del Dottorato di ricerca.