



# Domande Principali SPP

**Matteo Pizzicori**  
C.D.L. INGEGNERIA MECCANICA – VEICOLI STRADALI

# Sommario

<b>1 – INTRODUZIONE AL DFM.....</b>	<b>4</b>
CICLO DFM E PASSAGGI DA SEGUIRE.....	4
COSTI FISSI E VARIABILI .....	8
CALCOLARE GLI ATTIVATORI DI COSTO E COSTI GENERALI.....	9
METODO BLACK BOX .....	9
IL CALCOLO DEI COSTI MATERIALI, MANODOPERA E GENERALI (ESERCIZIO TIPO QUELLE DELLE SLIDE).....	9
<b>2 – PRINCIPI DI DFM .....</b>	<b>12</b>
COS'È LA DOPPIA OTTIMIZZAZIONE, QUALI SONO I PASSI? .....	12
CONCURRENT ENGINEERING, QUALI SONO I PASSI?.....	13
REGOLE PRINCIPALI PER IL DFM.....	14
DESIGN FOR QUALITY, TAGUCHI QUALITY ENGINEERING .....	16
AXIOMATIC DESIGN .....	16
<b>3 - DFA .....</b>	<b>19</b>
TIPOLOGIE DI ASSEMBLAGGIO:.....	19
DIFFERENZA TRA LINEE CON STAZIONI E SENZA STAZIONI.....	20
PER QUALI OPERAZIONI VENGONO UTILIZZATI I ROBOT: .....	20
GRANDEZZA DEI LOTTI ASSEMBLABILI CON I ROBOT E PERCHÉ:.....	20
ASSEMBLAGGIO SELETTIVO .....	20
ASSEMBLAGGIO SELETTIVO E VARI CASI CORRELATI CON LE CURVE E LE QUOTE DI A E B, QUANDO È CONVENIENTE UTILIZZARLO.....	21
DESIGN FOR ASSEMBLY.....	23
<b>4 - TOLLERANZE.....</b>	<b>26</b>
SINTESI DELLE TOLLERANZE: .....	26
COME OTTENERE LA CATENA DI TOLLERANZE NEL CASO MONODIMENSIONALE: .....	26
COME OTTENERE LA CATENA DI TOLLERANZE NEL CASO BIDIMENSIONALE O TRIDIMENSIONALE E FORMULA: .....	27
IL CALCOLO DELLE TOLLERANZE .....	27
SINTESI DELLE TOLLERANZE CON COSTI DI QUALITÀ E COME SI RICAVA CURVA ED IL CALCOLO DELLA PROBABILITÀ NEL CASO DEL TRENO	28
<b>6 – OTTIMIZZAZIONE DELLE LAVORAZIONI MECCANICHE .....</b>	<b>30</b>
COME RIDURRE IL COSTO DI UN COMPONENTE IN LAMIERA STAMPATA .....	30
OTTIMIZZAZIONE DELLE LAVORAZIONI PER DEFORMAZIONE PLASTICA .....	30
OTTIMIZZAZIONE DELLE LAVORAZIONI DI FONDERIA E METALLURGIA DELLE POLVERI.....	33
OTTIMIZZAZIONE DELLE LAVORAZIONI PER ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO.....	35
<b>7 – MATERIE PLASTICHE .....</b>	<b>38</b>
COS'È LA TERMOFORMATURA E SCHEMI/DISEGNI:.....	38
INIEZIONE DELLE MATERIE PLASTICHE E SCHEMA E SPIEGAZIONE .....	39
NATURA DELLE MATERIE PLASTICHE? .....	40
FORMA DELLA COCLEA PER I VARI MATERIALI .....	41

**TEMPERATURA MEDIA NEI TERMOPLASTICI ..... 42**

**CARATTERISTICA INTERESSANTE DEL PE E DEL PP ..... 42**

**SOFFIATURA (SIA CON ESTRUSIONE CHE CON INIEZIONE) ..... 42**

**COM'È FATTA LA VITE PER L'ESTRUSIONE DELLE PLASTICHE ..... 43**

**L'INIEZIONE DELLE PLASTICHE ..... 43**

**GLI INCOLLAGGI (VAGAMENTE) ..... 44**

**COLLANTI ..... 44**

**PROCESSO DI ESTRUSIONE ..... 45**

**LAVORAZIONE DEI TERMOINDURENTI ..... 45**

**8 – MATERIALI COMPOSITI ..... 46**

**MATERIALI COMPOSITI E CALCOLO DELLA RESISTENZA A TRAZIONE ..... 46**

**CONFRONTO TRA LE PRINCIPALI FIBRE ..... 46**

**MATERIALE PER LE MATRICI CHE SI USA ..... 48**

**POLTRUSIONE NEI MATERIALI COMPOSITI ..... 48**

**FASI DEL CICLO IN AUTOCLAVE DEI MATERIALI COMPOSITI E TEMPO CICLO ..... 48**

**9 – SALDATURA ..... 50**

**SALDATURA A FILO ..... 50**

**MODALITÀ DI TRASFERIMENTO DELLA MIG/MAG ..... 51**

**CMT (SALDATURA A FREDDO) ..... 52**

**GENERALITÀ SULLE SALDATURE ..... 52**

**SALDATURA SMAW – SHIELDED METAL ARC WELDING ..... 53**

**TIG – GTAW – TUNGSTEN INERT GAS – GAS TUNGSTEN ARC WELDING ..... 55**

**GAS DI ASSISTENZA NELLA SALDATURA GMAW ..... 55**

**10 – LAVORAZIONI NON CONVENZIONALI ..... 56**

**TAGLIO A GETTO D'ACQUA: ..... 56**

**DISEGNARE TRAMOGGIA CON OLIVINA E COME VIENE ASPIRATA PER EFFETTO VENTURI: ..... 56**

**LASER IN GENERALE ..... 56**

**TAGLIO LASER IN GENERALE ..... 58**

**DISEGNO DELLE FASI DEL TAGLIO CON OSSIGENO ..... 60**

**QUANDO SI SCEGLIE UNA SORGENTE SOLIDA E QUANDO UNA SORGENTE GASSOSA ..... 61**

**DIFFERENZA TRA EMISSIONE CONTINUA E PULSATA: ..... 61**

**PLASMA E SCHEMA ..... 62**

**CHE GAS SI USANO NEL TAGLIO AL PLASMA ..... 63**

**METODO HDP ..... 63**

**PROBLEMI PRESENTI IN UNA ZONA TERMICAMENTE ALTERATA ..... 64**

**COME CREARE SUPERFICI PERFETTAMENTE VERTICALI CON PLASMA ..... 64**

**COSA INFLUENZA LA PRESSIONE DEL GAS ..... 64**

**TAGLIO PLASMA: SVANTAGGI DEL SISTEMA ARIA-ARIA ..... 65**

**PARAMETRI CARATTERIZZANTI DELLA LUCE LASER ..... 65**

**ELETTROEROSIONE ..... 66**

**QUALI SONO LE DIFFERENZE FRA UNA SALDATURA LASER AD ALTA PENETRAZIONE ED UNA A BASSA PENETRAZIONE? ..... 68**

**FARE UNO SCHEMA E DESCRIVERE BREVEMENTE IL PROCESSO DI RESIN TRANSFER MOULDING PER PRODOTTI IN MATERIALE COMPOSITO. .... 68**

**QUALE EFFETTO HANNO I RAGGI UV SULLA PLASTICA? COME POSSONO ESSERE RIDOTTI QUESTI EFFETTI? ..... 69**

**11 – SIMULAZIONE PROVA SCRITTA (DOMANDE SLIDE)..... 70**

**QUALI SONO LE LINEE GUIDA PER L’OTTIMIZZAZIONE IN OTTICA DFM DI UN PROCESSO DI STAMPAGGIO LAMIERE?..... 70**

**QUALI SONO LE CRITICITÀ CONNESSE ALL’ASSEMBLAGGIO SOVRA-VINCOLATO? ..... 71**

**SU QUALI PRINCIPI SI BASA IL METODO BLACK-BOX E COME FUNZIONA? ..... 71**

**ESERCIZIO CALCOLO ATTIVATORI DI COSTO ..... 71**

**COSA IDENTIFICA L’INDICE DFA? COME SI CALCOLA?..... 72**

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

## 1 - Introduzione al DFM

### Ciclo DFM e passaggi da seguire

Il DFM è un approccio volto all'ottimizzazione di un prodotto con lo scopo di migliorarne la facilità produttiva. Con questo approccio nel corso degli anni è stato possibile ridurre il costo di molti prodotti, tramite la riduzione del numero di componenti, la scelta e l'introduzione di nuovi materiali e processi produttivi e la semplificazione dei processi di assemblaggio. I passi da seguire quando si esegue una ottimizzazione secondo il DFM sono essenzialmente 5:

1. **Stima dei costi di produzione:** il primo passo da fare è quello di analizzare il costo dei singoli componenti che fanno parte del prodotto, l'obiettivo è quello di vedere quali sono i componenti più costosi e perché lo sono, in modo da poterne ridurre il costo. Generalmente si suddividono i costi del prodotto secondo tre macro-categorie:

1. **Costo dei componenti:** il costo dei componenti si ottiene sia considerando il costo dei componenti che sono disponibili dal commercio (viti, motori ecc...) sia dei componenti detti "Custom" costruiti su misura per la specifica del progetto; il costo di questi componenti ovviamente si può ulteriormente suddividere nei vari costi della materia prima, del processo produttivo e degli utensili (o delle macchine se non sono riutilizzabili) impiegati per la produzione dei vari componenti.
2. **Costo dell'assemblaggio:** strettamente legato al numero di componenti del singolo prodotto e alla complessità che questi presentano nell'essere assemblati. Il discorso che deve essere fatto comprende sia i costi legati al tempo (quindi l'impiego di manodopera) sia la complessità delle operazioni (e quindi la specializzazione del singolo operatore) che si devono svolgere per l'assemblaggio del prodotto.
3. **Spese generali:** non direttamente collegate al singolo prodotto ma che devono comunque essergli in qualche modo correlate perché sostenute per svolgere l'attività produttiva. Rientrano in questa categoria tutti quei costi non direttamente connessi all'attività produttiva ma comunque necessari al fine del suo svolgimento, come ad esempio i costi di pulizia, della mensa e il canone di locazione dei fondi per l'attività produttiva. Rientrano in questa categoria anche i così detti costi di qualità (controllo qualità, controllo dimensionale, assistenza ai clienti). La tendenza odierna è quella di mettere in relazione i costi generali alle due categorie di costi discusse in precedenza utilizzando degli attivatori di costo, determinati secondo l'esperienza aziendale e variabili nel tempo con regolarità.

I costi possono anche essere suddivisi secondo la relazione tra la loro manifestazione e l'attività produttiva secondo la divisione in:

- **Costi fissi:** quelli non collegati al volume produttivo ma che si devono sostenere a prescindere che vengano prodotti pochi componenti o molti componenti, tra questi costi rientrano per esempio i costi degli stampi, del canone di locazione di un impianto produttivo o la riorganizzazione di una linea produttiva per l'assemblaggio di un nuovo prodotto. Generalmente sono i costi fissi che mandano in crisi le aziende nel momento di fermo-produzione.
- **Costi variabili:** i costi di questo tipo sono quelli che vengono sostenuti in maniera proporzionale al numero di prodotti che si vanno a realizzare. Alcuni esempi sono il costo della materia prima, il costo orario di una stazione produttiva o di un macchinario, il costo dei componenti di commercio e simili. Quando l'azienda non produce alcun componente questi costi non si manifestano. La tendenza odierna è quella di spingere a far diventare costi variabili anche dei costi che fino ad ora sono considerati fissi (come ad esempio il costo della manodopera).

- **Manodopera:** il costo della manodopera generalmente viene classificato a parte, in quanto è fortemente dipendente dal livello di specializzazione dell'azienda e dalla capacità che questa ha di riorganizzare la produzione e riallocare velocemente la manodopera. Per aziende fortemente specializzate in un settore dove la manodopera è fortemente specializzata questa viene classificata come costo fisso, in quanto indipendente dal volume di componenti prodotti; se l'azienda in analisi ha la capacità di ridistribuire velocemente la forza lavoro in modo da ridistribuirla tra le varie linee la si può definire un costo variabile della produzione.

2. **Riduzione del costo dei componenti:** generalmente i componenti custom hanno un costo elevato perché vengono progettati da parte di ingegneri che non hanno la competenza per stabilire se e come quel componente sarà realizzabile e soprattutto a quale prezzo. A questo scopo è necessario introdurre a livello aziendale delle linee guida che consentano la progettazione dei componenti in modo da ridurre o quantomeno ottimizzare il numero delle lavorazioni al fine di garantire un ridotto costo di processo del componente. Talvolta le regole possono essere espresse sia in termini di materiali che di processi produttivi (saldatura, asportazione di truciolo ecc...). La tendenza è quella di ridurre il costo dei componenti andando a lavorare sulla combinazione di costi del materiale e di costi del processo, le lavorazioni meccaniche che si effettuano sono generalmente di due categorie:

1. **Lavorazioni primarie:** che sono volte a dare la forma iniziale al componente e danno generalmente luogo al semilavorato; tra questi processi rientrano sicuramente le lavorazioni per deformazione plastica, le lavorazioni di fonderia e quelle per le materie plastiche come iniezione e formatura. Si cerca di migrare verso processi produttivi Net Shape o Near-Net Shape i quali sono caratterizzati dalla capacità di fornire con una sola lavorazione il prodotto finito con già rispettate le tolleranze dimensionali e le caratteristiche superficiali richieste.
2. **Lavorazioni secondarie:** sono tutte quelle lavorazioni che vanno a rifinire la superficie del componente per raggiungere tolleranze dimensionali e geometriche o per ottenere finiture superficiali e caratteristiche meccaniche non ottenibili con i processi primari, alcune delle più importanti lavorazioni secondarie sono tutte le lavorazioni per asportazione di truciolo, i trattamenti superficiali di verniciatura, cromatura oppure i trattamenti termici di indurimento superficiale.

La riduzione del numero delle operazioni necessarie alla costruzione del prodotto si deve effettuare partendo dal processo produttivo e chiedendosi se ne esista uno che consente di ottenere un prodotto con funzionalità uguali o migliori che però possa avere un costo inferiore, come per esempio i collettori di aspirazione delle automobili che venivano prodotti in ghisa e per fonderia e che a seguito di una riprogettazione venivano prodotti in termoplastico, mediante un processo più veloce e meno costoso (iniezione, processo net shape) e che ha anche migliorato le caratteristiche del prodotto (il componente lavora a temperatura più bassa, consentendo l'aspirazione di aria a temperatura più bassa, quindi di aspirarne di più) senza inficiare sull'affidabilità complessiva del sistema. Un altro approccio è quello di adottare, quando possibile, componenti standard senza farne customizzazioni, questo perché i componenti standard hanno un costo sicuramente inferiore e determinato dal mercato. L'ultima tecnica è quella di delegare la produzione di alcuni componenti ad aziende specializzate nel settore che possono vantare volumi produttivi maggiori e quindi costi di processo sostanzialmente inferiori, l'approccio in questione viene definito "Black Box" e consiste nella delegazione ad aziende esterne della produzione dei componenti fornendo il minor numero possibile di vincoli produttivi senza voler entrare nel

processo produttivo dell'azienda, in generale anche se considerati custom, questi componenti hanno un costo inferiore degli analoghi che produrrei in casa.

3. **Riduzione del costo di assemblaggio:** la riduzione del costo di assemblaggio di un prodotto si compone di due passaggi fondamentali, volti alla riduzione del numero di componenti da assemblare e alla semplificazione del processo di assemblaggio. L'applicazione di questo procedimento ha effetti benefici su tutto il ciclo produttivo, in quanto riduce il costo dei componenti (essendocene meno) e riduce il costo che la gestione, sia sulla catena produttiva che in magazzino, richiede di sostenere.

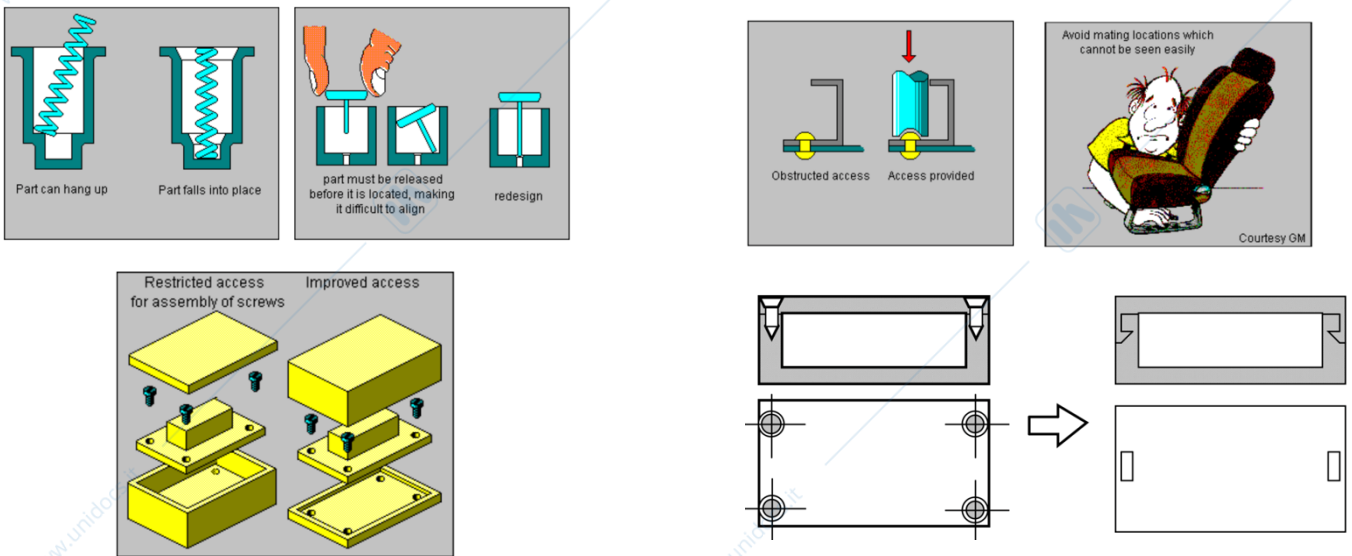
1. **Riduzione del numero di componenti:** il processo di riduzione del numero di componenti è volto da una parte ad eliminare i componenti ritenuti superflui e all'accorpate più componenti in uno unico, quando possibile. L'input per l'operazione di raggruppamento dei componenti arriva dall'applicazione dei processi produttivi net-shape, per alcuni dei quali la lavorazione ed in particolare gli stampi sono complexity-for-free (ovvero che una complicazione dello stampo non ha un costo significativo sul prodotto della lavorazione). Il processo da seguire per l'integrazione dei componenti richiede al progettista di porsi tre domande:

- i. La parte deve avere movimenti relativi rispetto all'assemblato? Se sì, possono essere ottenuti mediante lievi deformazioni del componente (ovvero tramite le elasticità concentrate caratteristiche di alcuni materiali, in particolare le plastiche)
- ii. La parte deve essere realizzata in materiale diverso? Esempio delle guarnizioni, può avere senso rimuovere una guarnizione o fare un intero componente nel materiale della guarnizione per sopperire alla funzione di questa?
- iii. La parte richiede di essere separabile o sostituibile rispetto al resto dell'assemblato? Nel senso che la parte potrebbe essere un componente di usura o un fusibile meccanico, in tal caso deve essere separabile dal resto del prodotto in modo da garantirne una sostituzione agevole.

2. **Semplificazione del ciclo di assemblaggio:** generalmente si adottano diversi criteri per semplificare il ciclo di assemblaggio dei prodotti:

- i. Si deve prediligere l'impiego di componenti simmetrici e che quindi richiedono poche manipolazioni per la loro inserzione.
- ii. Prevedere l'inserzione dall'alto dei vari componenti, in modo che questi siano sia assemblabili mediante robot (SCARA in particolare) o che comunque non richiedano l'attenzione da parte dell'operatore dopo la messa in posa per il loro corretto fissaggio. Realizzare inoltre i collegamenti in zone accessibili e dotate di buona visibilità in modo che il componente sia assemblabile e fissabile in maniera rapida.
- iii. Abbandono (dove possibile) dei sistemi di collegamento tradizionali (giunzioni filettate, saldature, chiodature) in favore di processi che consentono il bloccaggio dei componenti già durante la fase di inserzione (snapfit) che funzionano sfruttando le caratteristiche di elasticità e deformabilità di alcuni materiali per realizzare i collegamenti meccanici.
- iv. Prevedere per l'assemblaggio che i componenti siano auto-allineanti e che mettano a disposizione dell'operatore delle guide per disporre altri componenti su di essi (come i fori svasati per le viti o gli alloggiamenti con le pareti coniche per le molle) in modo anche da rendere possibile l'inserimento per gravità.
- v. Evitare di realizzare componenti molto pesanti e che generano per l'operatore difficoltà di manipolazione e di accesso.

- vi. Evitare di utilizzare collegamenti che richiedono l'assemblaggio mediante appositi utensili, in questo caso oltre al tempo di realizzazione del collegamento è anche necessario del tempo per la manipolazione dello strumento di assemblaggio.



L'analisi della facilità di assemblaggio di un prodotto viene affidata a un indice, detto indice DFA (design for assembly) tramite il quale si va a valutare il tempo realmente necessario per l'assemblaggio e il tempo che richiederebbe uno stesso prodotto sottoposto ad un processo di ottimizzazione secondo il DFM. L'indice DFA si calcola con la formula:

$$DFA = \frac{\text{Numero min. componenti} * 3 \text{ secondi}}{\text{Tempo di assemblaggio}}$$

4. **Riduzione dei costi di supporto alla produzione:** come precedentemente detto i costi di supporto alla produzione sono indirettamente legati all'attività produttiva e quindi una loro riduzione passa sicuramente dall'ottimizzazione effettuata sul costo dei componenti e sul ciclo di assemblaggio: l'ottimizzazione del numero di componenti come già detto ha effetti benefici dal punto di vista della gestione del magazzino e della linea produttiva, ridurre i componenti però consente anche di ridurre la possibilità di errore andando a creare benefici sia dal punto di vista della riduzione degli scarti di produzione sia per la riduzione del numero di controlli che è necessario svolgere sui componenti (essendocene meno sostanzialmente).
5. **Valutazione degli effetti** che il DFM ha sugli altri aspetti del prodotto (affidabilità, funzionalità, manutenibilità...). È necessario alla fine del ciclo di DFM andare a vedere come le innovazioni introdotte impattano sugli aspetti importanti del prodotto e del suo ciclo vita:
  1. **Tempi di Sviluppo:** devo arrivare sul mercato in tempi ragionevoli, soprattutto nei settori dove la concorrenza corre veloce.
  2. **Costi di sviluppo:** non ha senso fare il DFM se poi vado a sostenere costi spropositati per la progettazione e lo sviluppo del nuovo prodotto, magari a causa di alcune tecnologie innovative
  3. **Qualità del prodotto:** che non dovrà essere ridotta, per non incorrere in perdite di valore o costi secondari di gestione
  4. **Riutilizzo del componente:** se uno stesso prodotto o una sua parte possono essere impiegati anche per la produzione di altri prodotti simili (pulsantiera alza-vetri elettrici FIAT)
  5. **Costo di smaltimento:** se l'introduzione di nuovi materiali rende il prodotto più difficilmente riciclabile devo andare a considerare l'impatto che i futuri costi di smaltimento avranno sull'azienda o sull'acquirente.

## Costi fissi e variabili

La prima fase di un ciclo DFM è quella di fare una stima quanto più accurata possibile dei costi dei componenti, tra le varie suddivisioni che si possono fare dei costi dei componenti, quella che ci interessa per la scelta del processo produttivo e per la scelta del layout aziendale è quella tra costi fissi e costi variabili. In generale potremo dare una definizione più o meno rigorosa di questi costi:

- **Costo fisso:** sono tutti quei costi che non sono connessi in alcun modo con il volume produttivo che vado a realizzare e si manifestano sia che io debba produrre un solo pezzo o che ne debba produrre un lotto molto ampio. Tra queste tipologie di costo rientrano senz'altro i costi per la produzione e progettazione degli stampi, i costi di stesura di un programma CNC per il comando delle macchine, la realizzazione di un cartellino di lavorazione o il canone di locazione di un magazzino per l'attività produttiva. I costi fissi sono quelli che generalmente mandano in crisi le aziende nei periodi di bassa produzione.
- **Costo variabile:** i costi variabili invece crescono con il numero di unità prodotte di ogni singolo componente. In genere questi costi non sono critici per l'azienda perché se si manifesta un blocco della produzione questi non si presentano. Rientrano nella categoria dei costi variabili il costo della materia prima, il costo degli utensili (esempio per le lavorazioni ad asportazione di truciolo) i costi energetici delle macchine o i costi di smaltimento degli scarti di lavorazione.
- **Costi classificabili non univocamente:** all'interno di questa categoria si possono mettere una serie di costi che non possono essere definiti univocamente come fissi o variabili ma dipendono molto dalla dimensione che l'azienda ha sul mercato e dalla variabilità di prodotti che questa realizza. Molto di questa definizione dipende anche dalla specificità di una data attrezzatura che viene impiegata per la produzione:
  - **Costo della manodopera:** il costo della manodopera può essere considerato fisso o variabile secondo la capacità che ha l'azienda di riallocare velocemente la manodopera disponibile quando si presenta un calo produttivo in una determinata linea di produzione. Quando le aziende sono di piccole dimensioni e producono piccola variabilità di componenti la manodopera si considera un costo fisso mentre per le grandi aziende che hanno la possibilità di spostare velocemente la manodopera su diversi prodotti e linee produttive questa si considera un costo variabile. Generalmente anche nelle piccole aziende si cerca di rendere variabile il costo della manodopera assumendo poche persone a contratto fisso assorbendo i picchi di carico mediante contratti a progetto, soluzione però che va ad inficiare sulla qualità del prodotto dato che non creo mai una memoria storica aziendale.
  - **Costo delle macchine:** le macchine possono essere sia general purpose che special purpose. Quando una macchina può essere utilizzata per la produzione di tanti pezzi diversi la si classifica come costo variabile andando a stabilire, secondo la quota di ammortamento industriale, il costo che questa ha in funzione del tempo di impiego (generalmente si definisce un costo orario della macchina), rientrano in questa categoria le macchine utensili come centri di tornitura o centri di lavorazione, le presse per lamiera o le presse per la pressofusione. Quando la macchina viene invece acquistata o costruita ad hoc per la produzione di un singolo prodotto e non si può utilizzare per altri prodotti diviene un costo fisso, un esempio di questa categoria sono le stazioni di assemblaggio automatiche, realizzate su misura per velocizzare l'assemblaggio di un singolo prodotto.

## Calcolare gli attivatori di costo e costi generali

I costi generali sono una categoria di costi che non sono direttamente collegati con l'attività produttiva e comprendono tutti quei costi che l'azienda deve sostenere al fine di svolgere la propria attività. I costi generali possono essere per esempio quelli connessi con il servizio mensa, la pulizia dei locali dove si svolge l'attività produttiva, i costi di stoccaggio e distribuzione all'interno dell'azienda delle materie prime e dei prodotti finiti. In generale questo tipo di costi è da valutare con estrema importanza e gli deve essere dedicata una attenzione rilevante perché ci consente di progettare correttamente la "Dimensione dell'Azienda".

In generale la parte più delicata è l'attribuzione di un costo generale a un determinato prodotto o ad una classe di prodotti, a questo scopo si utilizza il metodo degli **Attivatori di Costo**, che prevede il calcolo di un coefficiente che consenta di maggiorare il costo di ogni singola voce sul costo del componente per andare a considerare l'incidenza del costo generale. La determinazione di questi coefficienti è molto importante e generalmente si basa sulla memoria storica aziendale, si va cioè a vedere nel corso del tempo come le varie voci di costo hanno impattato sui prodotti e come la presenza di determinati fattori all'interno dell'azienda abbia contribuito a generare spese. Gli attivatori possono essere per esempio sulla manodopera (es. +50%) quando vanno a considerare la presenza del servizio mensa, il servizio di pulizia dei locali della struttura e la presenza di svaghi per i dipendenti, mentre si può inserire un altro attivatore sui materiali (es. +30%) in quanto i materiali in ingresso devono essere sottoposti a controllo qualità (prove tecnologiche) e devono essere stoccati in magazzino e distribuiti alle varie stazioni produttive. Ovviamente l'attribuzione secondo coefficienti percentuali è un artificio che deve essere costantemente mantenuto sotto controllo, non è detto che tutti i costi si mantengano proporzionali con la crescita del costo di produzione a cui sono associati.

## Metodo black box

Il metodo black box si impiega quando l'azienda decide di acquistare dei componenti del proprio prodotto da aziende esterne le quali producono sulle specifiche richieste dall'azienda. L'approccio black box richiede, all'azienda acquirente, di fornire al produttore le specifiche tecniche del prodotto in numero il più possibile ridotto e non intervenire in alcun modo all'interno del processo produttivo o nel processo di sviluppo così che l'azienda che produce può realizzare il componente seguendo la propria esperienza aziendale consentendo di ridurre il costo del singolo componente senza l'introduzione di "forzanti esterne" che andrebbero ad aumentare inutilmente il costo del componente mantenendone invariate le caratteristiche tecniche ed estetiche. Il principale motivo per cui si sceglie di produrre utilizzando l'approccio black box è che così si riesce a ridurre il carico sugli impianti e si mantiene all'interno dell'azienda solo la parte di valore del prodotto.

## Il calcolo dei costi materiali, manodopera e generali (esercizio tipo quelle delle slide)

Il costo di un componente custom può essere talvolta di difficile computazione in quanto si deve tenere di conto di molti aspetti importanti per farne una valutazione corretta, in particolare dovremo tenere di conto del materiale che è necessario per produrlo (materiale del prodotto finito + sfridi di lavorazione), costo orario della macchina con cui viene realizzato e numero di pezzi che si realizzano in un'ora, costo della manodopera necessaria alla realizzazione del componente, costo degli attrezzaggi o degli utensili con cui questo viene lavorato e costi generali non connessi direttamente con la produzione ma ad essa riconducibili mediante degli attivatori di costo (come il costo del controllo qualità). Successivamente per il prodotto realizzato a partire dai componenti custom e assemblato con altri componenti che possono essere standard (dei quali si va a considerare il costo unitario) e componenti prodotti fuori dalla mia azienda (dei quali come per gli standard posso definire un costo unitario). In definitiva si sommano a tutti i costi unitari dei vari componenti il costo di ogni singola operazione di assemblaggio e sommando tutto

si ottiene il costo del singolo prodotto. La stima che si fa ovviamente è imprecisa e sotto molti aspetti presenta una forte dipendenza dalla dimensione e dall'organizzazione dell'azienda che realizza il mio prodotto.

### Esercizio:

All'interno di una attività produttiva si identificano costi:

- 10000 € costi generali;
- 30000 € costo dei materiali;
- 7000 € costo della manodopera;

Dei costi generali si ritiene che il 70% sia imputabile alla manodopera (in termini di assenteismo per malattia, premi produzione, mensa e gestione del personale) mentre il restante 30% si ritiene causato dai materiali (ufficio approvvigionamenti, gestione del magazzino).

La definizione degli attivatori di costo per i vari componenti si esegue quindi:

$$ATT_{manodopera} = \frac{C_{Gen_{manod}}}{C_{manod}} = \frac{7000€}{7000€} = 100\%$$

$$ATT_{materiali} = \frac{C_{Gen_{materiali}}}{C_{materiali}} = \frac{3000€}{30000€} = 10\%$$

### Altro esercizio:

L'azienda realizza 4 prodotti, per i quali si identificano i costi di:

Voce di costo	Prodotto A	Prodotto B	Prodotto C	Prodotto D
Manodopera	200000 €	250000 €	150000 €	100000 €
Materiali	200000 €	100000 €	50000€	250000 €
Costo generale	200000 €			

Dovrò successivamente determinare in qualche modo quali sono i costi generali per la manodopera e quali per i materiali. Da un'analisi osservo che 140000 € sono connessi con la presenza di manodopera e 60000 € sono connessi ai materiali. La determinazione degli attivatori di costo si effettua quindi considerando il costo complessivo della manodopera e dei materiali:

$$C_{materiali} = 200000€ + 250000€ + 50000€ + 100000€ = 600000€$$

$$C_{manodopera} = 200000€ + 250000€ + 150000€ + 100000€ = 700000€$$

$$ATT_{materiali} = \frac{60000€}{600000€} = 10\%$$

$$ATT_{manodopera} = \frac{140000€}{700000€} = 20\%$$

Il costo reale delle varie voci si ottiene con il costo iniziale più il relativo attivatore:

Voce di costo	Prodotto A	Prodotto B	Prodotto C	Prodotto D
Manodopera	240000 €	300000 €	180000 €	120000 €

<b>Materiali</b>	210000 €	110000 €	55000 €	275000 €
<b>Totale</b>	450000 €	410000 €	235000 €	395000 €

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

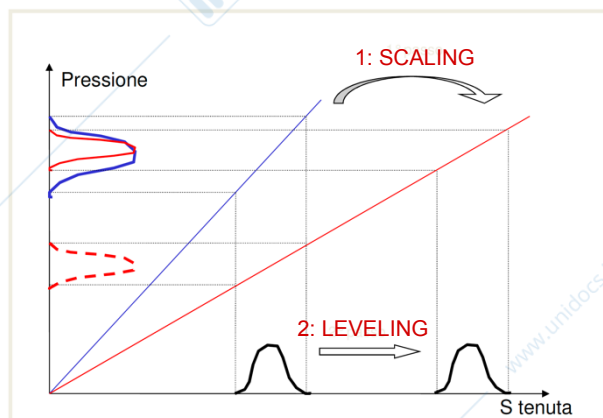
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

## 2 - Principi di DFM

### Cos'è la doppia ottimizzazione, quali sono i passi?

Uno degli approcci impiegati per seguire un corretto approccio Design for Quality di un determinato prodotto è quello suggerito da Taguchi. L'ottimizzazione delle caratteristiche di qualità di un prodotto passa da tre fasi fondamentali:

- Concept design: il concept design è la fase preliminare, tramite la quale si definisce l'architettura del sistema del quale vogliamo andare ad incrementare la qualità, riducendo tra le altre cose l'influenza che i fenomeni esterni di disturbo (Noise Factors) hanno sulla qualità del prodotto o del processo in analisi. → **PROGETTAZIONE ROBUSTA**
- Parameter design: Dopo aver analizzato e deciso l'architettura del progetto si passa alla definizione dei parametri attorno al quale il nostro progetto dovrà funzionare. In base alle caratteristiche del nostro sistema dovremo andare a definire dei parametri di controllo (caratterizzati dal loro valore medio e la loro dispersione) che consentiranno di andare a regolare il funzionamento del nostro processo. L'ottimizzazione di questi parametri ci porta quindi a definire diverse strategie di ottimizzazione:
  - Leveling: attraverso il quale si va a centrare la specifica del nostro sistema rispetto alla specifica attesa per il suo corretto funzionamento.
  - Scaling: con la regolazione del parametro in ingresso si va a fare una scalatura sul valore in uscita, spostando il nostro parametro di controllo in un punto della curva di funzionamento dove la varianza dell'input genera una bassa variazione dell'output.
  - **Doppia ottimizzazione:** la strategia della doppia ottimizzazione si ottiene con una azione combinata sulla curva di funzionamento del sistema in esame e sul valor medio della grandezza in ingresso al nostro processo, in questa fase si va ad agire sia sulla pendenza della ~~retta~~ <sup>CURVA</sup> di funzionamento del nostro sistema tramite una azione di scaling sia sulla posizione del segnale in ingresso con un leveling, così da andare in una zona della curva di funzionamento meno sensibile. L'esempio che si riporta è quello della guarnizione di un forno. Il progetto originale prevedeva una guarnizione di piccolo spessore ed elevata rigidità, la quale richiedeva delle tolleranze dimensionali e di accoppiamento dello sportello e del forno molto strette (difficilmente ottenibili con processi di lavorazione delle lamiere e loro assemblaggio). Quello che si è fatto quindi è stato agire in scaling, scegliendo una guarnizione in materiale meno rigido, in modo da ridurre la pendenza della curva di funzionamento del sistema complessivo e successivamente si è fatto un leveling della grandezza in ingresso (che in questo caso è proprio lo spessore della guarnizione), in questo modo siamo andati (tramite la nuova curva di funzionamento) a lavorare in una zona in cui la tenuta complessiva del sistema risulta maggiore e meno sensibile alla variazione delle tolleranze di accoppiamento di sportello e corpo del forno.



- Influenza sulla deviazione standard: andando a regolare la pendenza della curva di funzionamento del sistema, mantenendo l'input costante possiamo variare la deviazione standard del segnale in uscita, migliorandone dunque la qualità.
- Fattori che non influenzano né media né varianza sono impiegati semplicemente per spostare l'attenzione su un punto diverso dei segnali di input ed output.
- Tolerance design: se nei due precedenti passaggi non si ottengono i risultati voluti o li si raggiungono in parte è necessario passare alla terza fase, ovvero l'ottimizzazione delle tolleranze sui processi. Andando a fare questa operazione si incrementano i costi connessi con la produzione.

## Concurrent engineering, quali sono i passi?

Il processo di DFM generalmente si applica come correzione ai progetti di prodotti già presenti sul mercato. Il risparmio economico e le facilitazioni al processo produttivo sono limitate dalle scelte progettuali iniziali che non possono essere radicalmente modificate. Quando si intende effettuare direttamente la progettazione di un prodotto, seguendo i principi del DFM si impiega la tecnica del Concurrent Engineering, la quale integra il DFM all'interno del processo di sviluppo. Il gruppo di progettisti dovrà conoscere a fondo l'azienda in modo da sapere cosa ha a disposizione e quali sono i processi produttivi più convenienti da seguire. In questo approccio progettazione del componente e del processo produttivo vanno di pari passo. Il punto principale da cui deve partire la progettazione di un prodotto è l'esigenza del cliente: le analisi di mercato devono essere comunicate al progettista sotto una forma analitica così che la soddisfazione del cliente diventi il primo indicatore di qualità del componente. Le regole principali su cui si basa l'approccio CE sono:

1. **Capire il cliente:** si utilizzano strumenti di analisi del mercato per oggettivare le richieste del cliente ed identificare una serie di indicatori utili per la determinazione delle specifiche del progetto. Il marketing all'interno dell'azienda è la parte ormai più importante per la riuscita di un prodotto.
2. **Usare il Team di sviluppo del prodotto:** il team per lo sviluppo deve essere multidisciplinare e capace di analizzare il prodotto in maniera bilanciata osservando i vari aspetti della progettazione così da ridurre le iterazioni del progetto ed al contempo rendere il progetto più robusto.
3. **Integrare il processo di sviluppo del prodotto:** l'integrazione con il DFM-A consente la stesura di linee guida utili a riportare su carta l'esperienza di progettazione degli ingegneri allo scopo di rendere effettiva l'esperienza aziendale. Seguire queste linee guida ci consente così di ottenere un prodotto che ha già il minimo costo produttivo per le capacità della mia azienda. Lo sviluppo delle linee guida consente da una parte di capire la reale capacità produttiva dell'azienda e dall'altra consente di utilizzare al meglio gli investimenti fatti (che generano nuove opportunità). La stesura di queste linee guida richiede di interpellare ingegneri e tecnologi ed è specifica di ogni azienda (ognuno deve avere la sua, non posso affidarmi a valori standard/tabellati). I nuovi elementi inseriti nella realtà produttiva devono prima affrontare un processo di formazione, così da comprendere le sinergie ed acquisire le informazioni relativamente ai processi in essere tra marketing-progettazione-produzione.
4. **Coinvolgimento degli esterni:** dalle prime fasi di lavoro è conveniente coinvolgere i fornitori, esperti dei processi produttivi con cui producono i loro prodotti, rendendo disponibile la conoscenza dei punti di forza del processo produttivo. I fornitori possono essere considerati come reparti virtuali dell'azienda, dei quali si devono conoscere le massime capacità produttive e si devono comprendere le strategie di sviluppo. Il coinvolgimento si effettua solitamente nella fase di progettazione (che viene svolta in sinergia) e nella fase di analisi della producibilità di un prodotto. Si fanno solitamente delle stime più o meno approfondite dei costi di produzione prima di passare alla fase di produzione vera e propria.

5. **Utilizzo dei modelli digitali:** la digitalizzazione dell'azienda consente di condividere le informazioni in maniera più rapida ed efficiente, limitando i tempi di attesa e velocizzando lo scambio di informazioni.
6. **Integrazione di CAD, CAM, CAE:** i moduli CAD, CAM e CAE consentono di velocizzare il processo di sviluppo e rendere il flusso di informazioni ininterrotto dal progettista al produttore, il vero punto di forza di questi sistemi risiede nella possibilità di applicare le modifiche al progetto e distribuirle in tempo reale a tutte le parti dell'azienda.
7. **Simulazione:** la simulazione con programmi FEM, calcolatori di tolleranze e simili sono i sistemi che consentono in maniera più efficiente di produrre prototipi virtuali del prodotto finito, solitamente questi ci consentono di predire (in linea di massima) il comportamento del prodotto, in modo da scongiurare errori grossolani di progettazione.
8. **Qualità ed Affidabilità:** sono da considerare già in fase di progettazione, impiegando tecniche FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) e FMECA (Failure Mode and Effect and Criticalities Analysis) per l'indagine e la localizzazione delle modalità di guasto (approccio introdotto dalla marina americana per individuare le cause di guasto e le possibili conseguenze). Devo far tesoro delle così dette "lessons learnt" che consentono di creare la memoria aziendale, utile all'eliminazione progressiva degli errori.
9. **Approccio sviluppo efficiente:** creare pochi gruppi di sviluppo e renderli più autonomi, fornendo sia conoscenza che capacità di agire eliminando tutti i vincoli burocratici.
10. **Miglioramento continuo:** chiedersi continuamente perché le cose sono fatte e se possono essere fatte meglio. La qualità del prodotto deve essere la discriminante per le scelte; questa confronta continuamente le prestazioni con quelle della concorrenza con l'obiettivo di migliorarle (approccio Red Ocean).

## Regole principali per il DFM

L'approccio di Design for Manufacturing richiede un'analisi critica del prodotto con l'obiettivo di ridurre i costi di produzione e al contempo migliorarne la facilità e ridurre la complessità. Le regole che funzionano da cardine per il DFM sono generalmente:

- **Semplicità:** a parità di tutto il resto, un prodotto con meno componenti, forma più semplice e ciclo di lavorazione più facile sarà la soluzione economicamente migliore dal punto di vista della produzione, dell'affidabilità e della manutenibilità. La riduzione del numero di parti in questo senso è il primo passo: meno cose ho meno cose si romperanno e meno cose sbaglierò a produrre. Riducendo il numero di componenti ovviamente si semplificano tutte le attività accessorie alla produzione come il trasporto all'interno dell'azienda, la gestione del magazzino e del controllo qualità. L'approccio KISS (Keep It Super Simple) è un po' alla base del DFM ed è una regola empirica che solitamente funziona.
- **Materiali e componenti standard:** l'impiego di materiali e componenti standard permette di ottenere benefici soprattutto nella produzione di massa, l'impiego di tali risorse riduce il costo del singolo prodotto che quando lo si va a moltiplicare per il numero di pezzi da origine a risparmi enormi. La gestione del magazzino e dell'ufficio acquisti risulta più facile ed immediata in quanto i componenti standard sono sempre disponibili. L'impiego di componenti standard inoltre risparmia all'azienda l'investimento per l'acquisto e l'utilizzo di macchinari dedicati alla produzione. La formazione degli operatori diviene più facile.
- **Progettazione Standard:** progettare componenti dalle caratteristiche simili, facendo uso degli stessi materiali e degli stessi processi produttivi facilita da un lato l'incremento dei lotti di produzione (fornendo maggiori possibilità di ammortare i costi) e dall'altra facilita l'inserimento

di nuove figure professionali all'interno del ciclo di progettazione. Riduco in maniera significativa i costi di start up per la progettazione di un componente, in quanto non è necessario più studiare le attività disponibili in azienda per fare la progettazione del componente. (ES. pulsantiere alzacvetri elettrici FIAT; i modelli fiat della stessa fascia hanno tutti gli stessi pulsanti per gli alzacvetri elettrici, questo accorgimento consente di ridurre la variabilità dei componenti ed ottimizzare in maniera massiccia il costo di produzione degli stampi e l'ammortamento dei macchinari dedicati alla produzione).

- **Ampliare le tolleranze:** in generale c'è molta ignoranza sulle tolleranze. Solitamente le aziende impongono, per cautelarsi, delle tolleranze inutilmente strette sui componenti, che fanno lievitare i costi di produzione e complicano la gestione del magazzino. I tempi di produzione si allungano, al pari di come si allungano i tempi di analisi ed ispezione ed incrementano i costi orari delle macchine e il consumo di utensili. L'ampliamento delle tolleranze di fabbricazione ha consentito l'introduzione di processi produttivi Net-Shape, accettando il compromesso di allargare un po' le tolleranze sui componenti siamo arrivati ad ottenere questi con una forma già definita dopo il primo processo e rimuovere la necessità di ulteriori lavorazioni di affinamento.
- **Materiali facilmente lavorabili:** la selezione dei materiali non deve essere fatta solo in base al costo al kg della materia prima ma richiede di analizzare l'intero ciclo produttivo e valutare anche il costo delle singole lavorazioni. Materiali come l'alluminio, le plastiche o gli acciai al piombo hanno costi di materia prima più elevati ma abbattano drasticamente i costi di processo rispetto agli acciai o le ghise tradizionali.
- **Riduzione seconde operazioni:** le operazioni di finitura superficiale, i trattamenti termici, le verniciature e le manipolazioni secondarie vanno evitate, per quanto possibile, in quanto sono molto costose, necessitano l'attenta progettazione di punti di appoggio per gli afferraggi al fine di dover progettare linee di manipolazione specializzate. L'approccio mistake-proof consente di localizzare subito eventuali errori di produzione per i componenti in modo da evitare di farci delle seconde lavorazioni che dopo risulteranno risorse sprecate.
- **Integrazione CAE:** il processo di sviluppo deve essere seguito in modo che si possano sfruttare le potenzialità offerte da questi sistemi in modo da quantificare correttamente e anzitempo le quantità di materiale impiegate, le sollecitazioni a cui saranno sottoposti i vari componenti e soprattutto la possibilità di assemblare il prodotto.
- **Adeguatezza del lotto produttivo:** quando si sceglie come produrre un componente si deve sempre tenere conto del numero di componenti che vogliamo realizzare, sarà assurdo pensare ad una produzione per stampaggio di pochi componenti o una fusione in sabbia per un lotto molto numeroso.
- **Sfruttare le caratteristiche dei processi:** sfruttare al massimo tutte le caratteristiche fornite da un processo produttivo a ciascun prodotto, in particolare dovremo sfruttare le feature aggiuntive che magari non sono direttamente parte della specifica del prodotto come può essere per esempio la porosità dei componenti realizzati per sinterizzazione, i quali possono consentire l'inclusione di lubrificanti e rendere per esempio le bronzine autolubrificanti, risparmiando in alcune applicazioni l'impiego di dispositivi di lubrificazione separata.
- **Evitare vincoli produttivi:** generalmente si applica per i componenti che si prendono dalle aziende esterne, l'idea è quella di fornire al produttore solo le specifiche essenziali per il funzionamento del prodotto, lasciando le specifiche produttive a chi ha conoscenza profonda del processo produttivo migliore da impiegare. Questo è il classico approccio definito Black Box.

## Design for Quality, Taguchi Quality Engineering

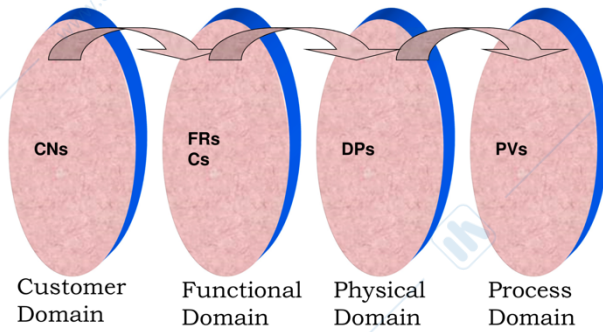
La progettazione secondo il criterio di Taguchi prevede di andare a lavorare sulla qualità di un prodotto andando a ridurre l'influenza che i fattori di disturbo esterno possono avere sul Sistema stesso e come questi possono andare a ridurre le caratteristiche funzionali dello stesso, in altre parole, vado a vedere come le caratteristiche ambientali riducono la qualità e l'affidabilità del mio prodotto. L'analisi secondo Taguchi richiede una attenta analisi del processo in modo da conoscere quali sono i fattori che riesco a controllare e quali sono quelli che invece generano rumore. Aggiustando i parametri di controllo otterrò il prodotto migliore (secondo Taguchi), quello cioè che ad una variazione dei parametri di rumore, correla una minima variazione delle prestazioni dell'oggetto. Per impostare i fattori di controllo in modo che questi siano influenzabili al minimo dai *noise factors* dobbiamo seguire tre fasi:

- **Concept design:** andare a progettare le caratteristiche del prodotto in modo che il suo principio di funzionamento sia difficilmente influenzabile dalle caratteristiche ambientali che lo circondano. È la parte che richiede una maggiore inventiva al progettista: questo deve studiare le soluzioni disponibili e analizzare in maniera approfondita la matrice di correlazione tra le prestazioni e i fenomeni esterni.
- **Parameter design:** si determinano i valori ottimali dei parametri di controllo cercando di rendere il sistema sensibile il minimo possibile rispetto ai fattori di rumore. La necessità del progettista è quella di conoscere come i fattori influenzano la risposta del sistema e i campi di variazione di questa risposta. Quando le relazioni tra i valori in ingresso e il comportamento in uscita del sistema non sono noti, si ricorre ad analisi sperimentali, successivamente si traccia la curva di sensibilità del sistema e si va a posizionare l'input in modo che un suo disturbo non causi una variazione eccessiva. L'individuazione dei parametri di controllo richiede una loro successiva ottimizzazione, seguendo alcune tecniche volte a migliorare la risposta globale del sistema agli input esterni:
  - **Leveling:** modifico la posizione della risposta andando a fornire un input sostanzialmente diverso, in modo da centrare la mia caratteristica di funzionamento intorno alla specifica di progetto richiesta.
  - **Scaling:** lo scaling si fa andando a modificare contemporaneamente sia il valore medio del segnale in uscita, sia la deviazione standard che questi subiscono una variazione. Si può agire nella zona lineare della curva di funzionamento ottenendo una influenza proporzionale oppure se si agisce nella zona non lineare otteniamo una caratteristica in uscita più robusta.
  - **Influenza sul valore medio.**
  - **Influenza sul valore della dispersione**
  - **Nessuna influenza:** in questo caso si vanno solo a spostare l'input, producendo però lo stesso output: Questo comportamento si manifesta quando la curva di risposta del sistema è una linea orizzontale.
- **Tolerance design:** in questo caso vado a lavorare efficientemente sulle tolleranze di funzionamento. È l'ultimo step di ottimizzazione del prodotto e devo investirci solo quando con le precedenti tecniche non sono arrivato alla specifica necessaria. In generale abbassare le tolleranze ha un costo considerevole e porterebbe ad un innalzamento del costo del prodotto.

## Axiomatic Design

La progettazione secondo l'axiomatic design richiede di scindere ogni problema secondo quattro domini indipendenti e successivamente andare a creare delle matrici che mi consentano di mettere in relazione gli elementi di due domini adiacenti. In generale l'aspetto critico sarà il passaggio da

parametri di progetto a parametri funzionali e viceversa. I quattro domini all'interno dei quali ci muoviamo sono: Cliente, Funzionale, Fisico, Processo.



I vari domini presentano delle criticità che vanno analizzate al fine di risolvere il problema di progettazione:

- **FRs**: Functional Requirements, è il minimo set di requisiti indipendenti per caratterizzare le richieste funzionali del progetto. Sono in altre parole le caratteristiche che consentono al mio prodotto di svolgere correttamente il suo lavoro.
- **DPs**: Design Parameters, sono le variabili fisiche del problema, il nostro prodotto dovrà rispettare alcuni vincoli oltre i quali potrebbe andare a perdere l'appetibilità nei confronti dell'acquirente.
- **Cs**: Constrains, sono i vincoli ai quali il mio sistema è sottoposto, generalmente i vincoli vengono imposti dalle soluzioni progettuali o dalle soluzioni tecniche o ancora dalle esigenze di marketing (identificate tramite le richieste del cliente). Un esempio è il vincolo imposto in Ferrari per la produzione di automobili con il telaio in alluminio, per questioni puramente di Marketing.
- **PVs**: Process Variables, sono le variabili di processo, introdotte dalle caratteristiche del processo produttivo, sia per la realizzazione dei componenti sia per il loro assemblaggio.
- **CNs**: Customer Needs, sono le richieste che il cliente fa in termini di funzionalità al mio prodotto.

La necessità di oggettivare le richieste del cliente nasce per fare il modo che la progettazione possa restituire un risultato indipendente (o almeno in minima parte) dalle interpretazioni del progettista. A questo scopo si introducono le matrici di correlazione che si definiscono per il passaggio da un DPs a una FRs:  $\{FRs\} = [A]\{DPs\}$  con la matrice  $A$  definita come la dipendenza delle varie FR dai DP:  $A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j}$

L'assioma di indipendenza in questo senso ci fornisce il criterio per stabilire quale soluzione progettuale è conveniente impiegare per risolvere il problema: Le FRs del sistema siano soddisfatte in maniera indipendente (in termini di design parameters, ma non indipendentemente dalle parti fisiche). La soluzione progettuale da definire come preferibile è quella che presenta un minor grado di accoppiamento tra le variabili del problema utili al soddisfacimento delle FRs. In ogni caso potremo avere due casi:

- **Coupled Design**:  $\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$  in questo caso la matrice  $A$  presenta una correlazione tra i vari DP per ottenere i vari FR (la matrice non è diagonale) di conseguenza il problema presenta elevato grado di accoppiamento tra i DP.
- **Uncoupled Design**:  $\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$  in questo caso la matrice  $A$  è diagonale e il problema risulta disaccoppiato, la soluzione alle FRs risulta tale per cui ogni DP risponde a una determinata FR.

L'analisi assiomatica si fa generalmente riconducendosi a due strumenti che ci permettono da una parte di analizzare il problema a fondo scindendolo in tutte le sue richieste di funzionamento, seguendo uno schema logico (ovvero andando verso un livello di dettaglio crescente) e successivamente tramite una operazione di zig-zagging tra i vari domini si passa dai livelli top della scomposizione verso i livelli inferiori andando poi a definire nuove FR che quindi si porteranno dietro altri DP fino a raggiungere la

soluzione ottimale del problema. La comunicazione mediante zig-zagging tra i vari domini consente di collegarli in maniera logica ed immediata, permettendo un continuo scambio di informazioni.

L'**assioma di informazione** afferma che il miglior progetto è quello che ha la maggior probabilità di soddisfare le specifiche, in altre parole è quello che richiede il minor contenuto di informazione. In contenuto di informazione è quello che misura la probabilità che una o più FRs soddisfino la specifica di progetto:  $I = \log_2 \left( \frac{1}{p} \right)$

### 3 - DFA

#### Tipologie di assemblaggio:

L'assemblaggio è, generalmente, la parte che maggiormente incide sul costo di un prodotto ed anche la fase maggiormente critica del processo produttivo, infatti la maggior parte dei guasti si manifesta a causa di un errato assemblaggio del nostro prodotto. In base alla difficoltà di assemblaggio, alle dimensioni delle parti che compongono il prodotto e alla qualità dei pezzi che arrivano alla catena di montaggio si possono impiegare diverse tecniche:

1. **Assemblaggio manuale:** l'assemblaggio manuale viene svolto da operatori più o meno specializzati e consente di assemblare componenti caratterizzati da media e alta complessità. La manodopera è capace di effettuare assemblaggi difficili e talvolta di risolvere, in sede di assemblaggio, eventuali errori di produzione/progettazione del componente. In definitiva l'assemblaggio manuale è il più versatile e anche il più costoso, raccomandabile quando si devono assemblare componenti che possono presentare delle imprecisioni o si devono fare assemblaggi complessi. La manodopera inoltre è un elemento flessibile dell'azienda, quando si deve cambiare velocemente tipo di prodotto da assemblare la manodopera è velocemente disponibile.
2. **Assemblaggio con stazioni automatiche:** quando si devono assemblare lotti numerosi di prodotti piccoli e in composti da un esiguo numero di parti si può ricorrere all'assemblaggio con stazioni automatiche ad alta specializzazione. I vari componenti vengono messi in posizione da dei feeder che hanno il compito di orientare nel verso giusto il componente da assemblare. La tecnica non ha flessibilità e conviene impiegarla quando si hanno lotti molto numerosi di componenti.
3. **Assemblaggio con linee automatiche:** la differenza con le stazioni automatiche sta nel numero di componenti che vanno a concorrere all'assemblaggio del nostro prodotto, queste sfruttano la stessa tecnologia delle precedenti ma i componenti sono in numero maggiore. Allo stesso modo il lotto produttivo deve essere ampio in modo da garantire l'ammortamento di questi sistemi molto rigidi e costosi.
4. **Sistemi robotizzati flessibili:** i sistemi di questo genere basano il loro funzionamento su dei robot (generalmente SCARA) che assemblano un ridotto numero di componenti provenienti da feeder disposti intorno alla macchina. La flessibilità di questa tecnica è maggiore delle stazioni automatiche ma al contempo presenta tempi ciclo leggermente più lunghi. Il vantaggio connesso con l'impiego del robot è che mantengono una certa flessibilità (caratteristica dell'assemblaggio manuale) ma al contempo continuo ad avere la ripetibilità dell'assemblaggio automatico (il robot non si stanca), inoltre il robot può essere utilizzato dove le operazioni da effettuare sono pericolose o dannose (verniciatura, saldatura), semplici ma ripetitive e laddove viene richiesta una elevata precisione (saldatura laser e schede elettroniche).
5. **Sistemi multi-robot:** per assemblaggio di prodotti contenenti più componenti si può pensare di impiegare sistemi multi-robot, anche questi mantengono una buona flessibilità e richiedono di suddividere le operazioni da svolgere in modo da avere un tempo-ciclo comparabile ed evitare "colli di bottiglia".
6. **Sistemi multistazione:** sono sistemi ibridi, che combinano la presenza di stazioni robotizzate e di stazioni con operatori. La necessità deriva dal fatto che alcune operazioni, su particolari piccoli e molto precisi, sono svolte con ottima efficienza e ripetibilità dal robot mentre applicazioni di oggetti a geometria complessa o che potrebbero essere affetti da errori geometrici o dimensionali richiedono l'assemblaggio da parte di un operatore, infatti quando c'è bisogno anche di un minimo di adattamento del componente il robot non è capace di pensare ad una soluzione alternativa e va in crisi (restituisce un errore e blocca la catena produttiva), mentre l'operatore cerca

di adattare il componente e lo monta. Impiego di robot collaborativi, non hanno bisogno di barriere in quanto hanno la capacità di fermarsi quando incontrano degli ostacoli (persone).

### Differenza tra linee con stazioni e senza stazioni

Le linee produttive hanno la caratteristica che il prodotto, in fase di assemblaggio, percorre in maniera continua la linea (ad una certa velocità costante) e viene assemblato. In una linea di assemblaggio invece i prodotti si fermano in una stazione ed alcune azioni e viene assemblata una serie di componenti, poi si passa alla stazione di assemblaggio successiva.

### Per quali operazioni vengono utilizzati i robot:

I robot sono generalmente impiegati per le azioni di assemblaggio di componenti molto piccoli e sostituiscono la manodopera in quanto consentono, nelle azioni ripetitive, una precisione sempre costante dovuta al fatto che il robot non risente della stanchezza (a differenza dell'uomo). Un altro settore in cui la fa da padrone il robot è quando l'operazione da svolgere è pericolosa per la salute del lavoratore, come nelle stazioni di saldatura per il campo automotive e per le stazioni di verniciatura.

Tutte le considerazioni comunque devono sempre essere relazionate ai due aspetti fondamentali: la numerosità del lotto produttivo che si deve andare a realizzare e la variabilità nel tempo delle caratteristiche di tale lotto, il robot infatti ha la capacità di svolgere le operazioni con precisione pressoché costante per lungo tempo ma richiede tempi e costi di programmazione non trascurabili che possono essere motivati da una certa quantità di elementi assemblati. L'esempio classico che si fa dell'assemblaggio automatico è quello di componenti elettrici, dotati di ottima precisione (e quindi intercambiabilità completa) e caratterizzati da piccole dimensioni, che renderebbero l'assemblaggio manuale lento e difficoltoso.

### Grandezza dei lotti assemblabili con i robot e perché:

Data la specificità caratteristica di un robot e gli elevati costi di acquisto e programmazione, il robot viene impiegato nell'assemblaggio di lotti abbastanza numerosi di prodotti. Conviene passare all'assemblaggio robotizzato quando i componenti (o sottogruppi) da assemblare sono circa 7 e il lotto produttivo non supera le 2500 migliaia di unità annue. Ovviamente tutto questo ragionamento è anche correlato al così detto "payback period" ovvero il tempo nel quale si vuol ottenere un rendimento economico dalla produzione: in caso di payback period più lunghi (6 o 8 anni, anche se scarsamente impiegati) si vanno ad utilizzare robot anche per assieme di più di 15 componenti prodotti in una numerosità annua minore.

### Assemblaggio selettivo

Ogni prodotto è soggetto ad una certa variabilità dimensionale insita nel processo produttivo con cui questo viene realizzato; al fine di contenere l'effetto che questa variabilità ha sui componenti si vanno ad introdurre delle tolleranze dimensionali, le quali ci assicurano il rispetto delle Key Characteristics del componente. In generale si possono adottare due strade per ottenere il pieno rispetto delle KC di un prodotto assemblato:

- Riduzione delle tolleranze dimensionali
- Selezione dei componenti e assemblaggio selettivo

La seconda tecnica è quella che ci consente, quando non si è in grado di ottenere la tolleranza di accoppiamento richiesta sul singolo componente, di raggiungerla sfruttando la variabilità dimensionale e sfruttando la misurazione completa dei campioni a disposizione. Operativamente si va a suddividere il lotto di componenti in varie classi dimensionali determinate in funzione della capacità dei processi con cui si realizzano i componenti e delle tolleranze che si vogliono ottenere sui componenti. Si possono manifestare diversi casi interessanti da studiare per comprendere il funzionamento della tecnica di assemblaggio selettivo:

- **Capacità di processo uguale:** il processo produttivo con cui si ottengono i due componenti da assemblare è in grado di garantire la stessa tolleranza per i due pezzi, in questo modo si vanno a suddividere i componenti in un numero uguale di gruppi in modo che la distanza tra i valori delle dimensioni sia appunto la tolleranza di accoppiamento. C'è da dire che questo primo caso non trova frequentemente applicazione, in quanto i processi produttivi di maschi e femmine nell'accoppiamento sono generalmente diversi.
- **Capacità di processo diversa con una uguale alla tolleranza sul componente:** in questo caso uno dei due processi produttivi mi consente la realizzazione del componente con la tolleranza richiesta mentre l'altro processo non mi consente di arrivare a soddisfare la tolleranza generale. In questo caso si esegue tutta la produzione con il processo a qualità inferiore e si misurano i pezzi ottenuti suddividendoli nelle varie cassettoni (come nel caso precedente) successivamente, in funzione dei risultati ottenuti si vanno a produrre i pezzi da accoppiare con il processo produttivo preciso. Il principale vantaggio di questa tecnica è che mi consente di ottenere una tolleranza funzionale più stretta per la lavorazione meno precisa e al contempo sono in grado di annullare gli sprechi di materiale e le rimanenze a magazzino in quanto ho la certezza che il 100% dei pezzi si accoppia con successo. Di fatto vado a produrre su misura
- **Capacità di processo diversa ed entrambe sono peggiori della tolleranza:** in questo caso la tolleranza non viene rispettata da nessuno dei due processi, l'operazione che si va a fare è quindi quella di produrre a diverse tolleranze per i due processi andando a sovrapporre i lotti e cercando di coprire tutte le zone critiche. In generale è il processo che peggio consente di ottenere una corretta tolleranza di accoppiamento e quello che dà luogo al maggior numero di scarti.

Tutte le casistiche di assemblaggio selettivo ovviamente sono attuabili solo quando la numerosità dei componenti realizzati è molto ampia, per piccoli lotti di pezzi la distribuzione gaussiana non è garantita e non siamo in grado di garantire l'accoppiamento dei componenti.

Per l'assemblaggio selettivo si possono anche seguire due approcci simili, che richiedono però la presenza di un operatore qualificato o comunque dotato di una certa esperienza che consenta di eseguire l'assemblaggio anche quando i componenti non rispettano la tolleranza:

- **Assemblaggio per selezione diretta:** in questo caso si lascia all'operatore il compito di scegliere dal cassone i due componenti da assemblare e se questi non si assemblano sta sempre all'operatore sceglierne un altro, in genere si fanno fino a tre tentativi e dopo si tende a scartare il componente che non si accoppia classificandolo come errore produttivo.
- **Assemblaggio con compensazione:** in questo caso si vanno a realizzare degli assemblaggi con tolleranza leggermente più larga che si va a correggere quando i componenti sono tutti uniti. In questo modo si possono inserire elementi di compensazione (come spessori sfogliabili, rondelle o boccole) che mi consentono l'aggiustamento della tolleranza funzionale. Gli elementi che consentono l'assemblaggio sono quindi personalizzati.

Tutti questi processi sono impiegati quando l'intercambiabilità tra i componenti è limitata, a causa delle tolleranze di lavorazione più ristrette rispetto alla tolleranza ottenibile realmente. L'approccio ad intercambiabilità limitata può essere meno costoso dal punto di vista produttivo (esaspero meno le macchine) ma al contempo risulta più costoso in termini di gestione del magazzino e in termini di produzione di scarti.

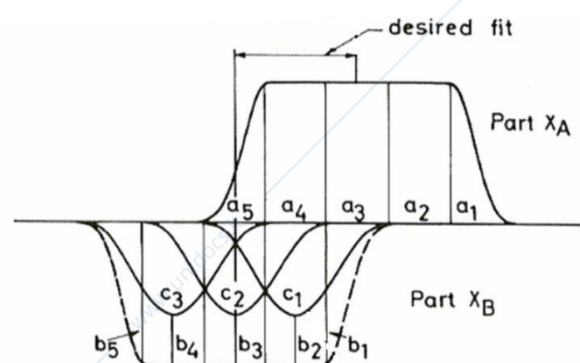
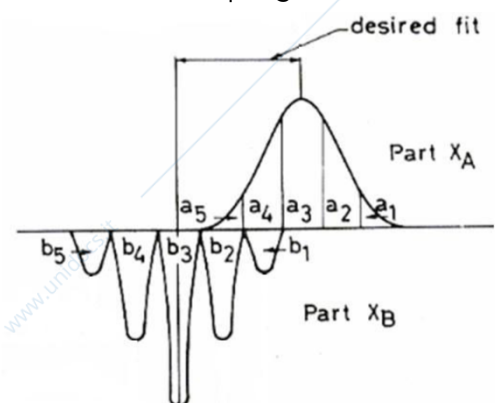
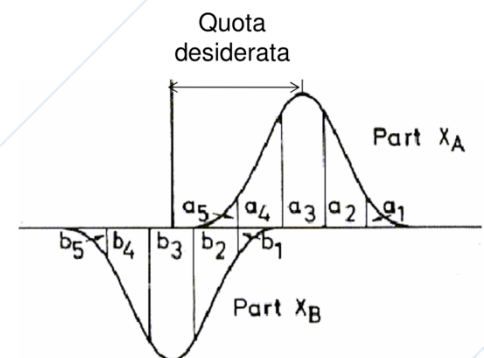
## Assemblaggio selettivo e vari casi correlati con le curve e le quote di A e B, quando è conveniente utilizzarlo

L'assemblaggio selettivo è una tecnica di gestione delle tolleranze di processo che si effettua quando in generale ho bisogno di una tolleranza di accoppiamento che non sono in grado di raggiungere con il mio processo produttivo (es. il mio processo ha una capacità di 40 micron e la mia tolleranza di accoppiamento è di 5 micron), in questo caso allora, se fosse troppo costoso abbassare la tolleranza di processo potrei pensare di produrre i miei pezzi con la dimensione obiettivo e successivamente

misurarli tutti e suddividerli per classi dimensionali (coincidenti con la tolleranza di accoppiamento), in questo modo c'è la concreta possibilità che i componenti della stessa classe dimensionale si accoppino realizzando la mia tolleranza funzionale, senza il bisogno di effettuare successivamente dei controlli di qualità (li ho già fatti a monte dell'assemblaggio). Questa tecnica di assemblaggio ovviamente funziona solo quando produco pezzi in lotti molto numerosi per cui funzionerà la distribuzione standard (di Gauss).

All'interno dell'assemblaggio selettivo possono manifestarsi principalmente tre comportamenti differenti che mi portano a comportarmi in maniera differente nei confronti della scelta delle classi di produzione:

- **Capacità di processo uguale:** è il caso più semplice, i due processi produttivi hanno la stessa capacità di realizzare una determinata tolleranza (che non sarà quella di processo). Con questo approccio quindi vado a realizzare le mie produzioni secondo la tolleranza originaria e successivamente misuro i pezzi e li suddivido in cassetine. Avremo la quasi totale sicurezza che i componenti di classi affini si assembleranno tra di loro correttamente e potremo realizzare la tolleranza di accoppiamento richiesta. Questo caso è poco realistico e per questo poco rilevante.
- **Capacità di processo diversa, una delle due coincide con la tolleranza:** in questo caso uno dei due processi produttivi ha la caratteristica di rispettare la tolleranza di progetto mentre l'altro non ha questa "dote". Per seguire questo approccio quindi si producono tutti i componenti con il processo meno preciso e si vanno a misurare e suddividere in cassetine. Successivamente si producono con il processo più preciso il giusto numero di componenti necessari ad un completo accoppiamento con gli elementi delle varie classi dimensionali individuate. Di fatto quindi andiamo a realizzare una produzione su misura che mi garantisce il 100% di pezzi accoppiati.
- **Capacità di processo diversa, ciascuna peggiore della tolleranza:** questo caso è quello più difficile da trattare, nessuno dei due processi ha la capacità di rispettare la tolleranza richiesta e per di più sono diversi. L'unica soluzione per procedere con l'assemblaggio selettivo è quella di produrre più lotti di componenti con dimensioni diverse in modo che le cumulate delle distribuzioni forniscano un risultato che consente l'accoppiamento dei vari componenti. In questa situazione si producono fino al 30% di scarti, sotto forma di componenti che non si assemblano. La parte difficile è andare a calibrare correttamente le distribuzioni di produzione dei pezzi in modo che il risultato dei lotti produttivi generi una campana almeno paragonabile per i due pezzi. Una volta prodotto il primo dei due



componenti vado a definire le dimensioni e la distribuzione del lotto del secondo pezzo che partecipa all'assemblaggio in modo da riprodurre al meglio la campana del primo pezzo. Come già detto quest'ultima fase è difficile da realizzare e solitamente questo metodo funziona male.

## Design for Assembly

Il costo di un prodotto è fortemente influenzato dal suo assemblaggio in quanto questo consente di ottenere il prodotto finito unendo i suoi vari componenti. Il processo di assemblaggio è quello in definitiva che fornisce il valore vero e proprio all'oggetto che sto realizzando.

L'approccio di Design for Assembly prevede di progettare il componente focalizzando la propria attenzione sul ciclo di assemblaggio del componente, in maniera da semplificarlo il più possibile al fine di ridurre la componente di costo connessa appunto con l'assemblaggio del prodotto. Il DFA segue alcune regole fondamentali attorno alle quali ruota poi tutta la progettazione del componente:

1. **Ridurre al minimo indispensabile il numero di parti:** il numero di parti ha un impatto molto importante sul costo di assemblaggio del componente in quanto ogni fase dell'assemblaggio richiede tempo da parte di un operatore o di una catena di assemblaggio. Il secondo aspetto da considerare è che il numero di componenti determina anche l'affidabilità del prodotto, un prodotto con poche parti avrà una affidabilità migliore di uno con molti componenti.
2. **Scegliere la corretta strategia di assemblaggio** in funzione delle caratteristiche del mio componente e in base alle sue dimensioni e in funzione del lotto che ho intenzione di realizzare. La tecnica di assemblaggio prevede la presa in considerazione di molteplici aspetti come la qualità dei componenti che arrivano alla fase di assemblaggio, la difficoltà dell'operazione che si deve svolgere, la possibilità di dover fare degli aggiustamenti... le principali tecniche di assemblaggio sono manuale, robotizzato e con stazioni automatizzate:
  - a. La prima tecnica è sicuramente la più versatile e quella per altro capace di assorbire eventuali errori di produzione andando ad aggiustare i componenti in fase di assemblaggio, è indicata ogni qualvolta sia necessaria un minimo di intelligenza per effettuare l'operazione o quando la numerosità del lotto non giustifica l'impiego di una macchina dedicata. La manodopera presenta un livello di flessibilità alto, in quanto l'operaio montatore può imparare velocemente nuove tecniche di assemblaggio e può essere agevolmente ricollocato su una nuova linea quando necessario.
  - b. La tecnica dell'assemblaggio robotizzato è impiegata solo quando i componenti presentano un'intercambiabilità al 100% tra i vari componenti. I robot eseguono in maniera precisa e ripetibile tante operazioni elementari che l'operatore umano impiegherebbe più tempo a svolgere e non farebbe allo stesso modo a causa dell'affaticamento. L'assemblaggio con i robot si sceglie anche quando i componenti sono molto piccoli o le operazioni sono pericolose per la salute dell'operatore (saldatura, verniciatura...). I robot in generale presentano una certa flessibilità che però richiede la programmazione attenta da parte di un operatore esperto che deve essere capace di spiegare (in termini numerici) quali operazioni deve svolgere, questo ci porta ad osservare che si avranno dei tempi di fermo in cui il robot deve essere riprogrammato.
  - c. L'assemblaggio con stazioni automatiche invece si impiega quando il lotto presenta una numerosità molto elevata e i componenti da assemblare sono piccoli. In questo caso si vanno a realizzare delle stazioni ad Hoc per l'assemblaggio di un singolo prodotto. Il vantaggio connesso con questa tecnica è l'assenza di errori d'assemblaggio, in quanto i componenti devono essere intercambiabili al 100% e i vari feeder disposti sulla macchina azzerano la presenza di componenti sbagliati o mal posizionati. Queste stazioni sono caratterizzate inoltre da una produttività assai più elevata di quella robotizzata e possono funzionare a ciclo continuo anche senza la presenza dell'operatore a supervisionare i lavori di assemblaggio. (esempio orologio al quarzo 41 componenti con tempo ciclo di

pochi secondi, 4 per l'esattezza). La tecnica di assemblaggio per stazioni però è molto rigida e impossibile da adattare a nuovi prodotti.

3. **Analisi delle Key Characteristics**, che sono le funzioni chiave del sistema. Queste devono essere tenute bene in considerazione in quanto determinano la funzionalità del sistema, sulla base di questi elementi si va a determinare la sequenza di assemblaggio del prodotto in maniera da assicurarsi il corretto funzionamento una volta conclusa l'operazione. La corretta realizzazione di una KC richiede spesso anche la realizzazione di una certa catena di tolleranze.
4. **Devono essere considerati anche i vincoli di assemblaggio**: di fatto quando si va ad assemblare un prodotto andiamo a vincolare tra di sé alcuni componenti con l'obiettivo di renderli solidali, talvolta questa operazione però va mettere in conflitto alcuni elementi di fissaggio rendendo sovra vincolato il sistema, può capitare a volte che il prodotto non si riesca a montare. Un esempio è il sedile dell'automobile che viene bloccato con 4 viti, le prime due formano l'allineamento e già la terza se il sistema non rispetta tolleranze piuttosto strette diventa difficile assemblarlo, generalmente l'assemblaggio riesce perché ci sono delle parti con elasticità concentrata che si deformano per completare l'assemblaggio. Andando a lavorare sulla forma e la dimensione di alcuni componenti o di alcune delle loro caratteristiche possiamo garantire l'assemblaggio di questi senza sovra vincolare il sistema.  
Talvolta la sono le funzionalità del componente a richiedere un sovra vincolamento, come nel caso dei cuscinetti montati ad "O" o ad "X". Un altro caso di presenza di eccessivo numero di vichi è rappresentato da un riduttore epicicloidale con tre satelliti, in questo caso di hanno molti punti di contatto i quali ovviamente non possono rispettare tutti la stessa tolleranza di accoppiamento, su qualche ruota si scaricherà una coppia di lavoro maggiore e su altre inferiore, quello che succede è che il sistema va ad adattarsi da solo (compiendo l'operazione di rodaggio) andrà quindi a regolare alcune delle sue dimensioni per garantire l'assemblaggio.  
In presenza di elementi deformabili dell'assemblaggio è importante anche considerare la catena di tolleranze, gli elementi deformabili assumono forme difficilmente prevedibili che potrebbero precludere il corretto assemblaggio del componente o la corretta funzionalità dello stesso.
5. **È importante che i componenti da assemblare siano tutti disposti in zone facilmente accessibili** all'operatore. In generale la scarsa visibilità sia per l'assemblaggio manuale che per l'assemblaggio con utensili va ad inficiare sul tempo totale di assemblaggio. In presenza di scarsa visibilità talvolta può essere indicabile prevedere delle apposite distanze tra le superfici dell'oggetto che possano guidare l'utensile e facilitare l'assemblaggio. La determinazione dei tempi e della facilità di assemblaggio è affidata a dei sistemi basati sull'esperienza di molti anni. I principali metodi sono:
  - a. Metodo Boothroyd: le tabelle Boothroyd sono realizzate in funzione delle simmetrie del componente e forniscono ad esso un punteggio da 00 a 42 secondo la difficoltà di assemblaggio. In genere si vanno a considerare due angoli di simmetria  $\alpha$  che indica la rotazione che si deve compiere rispetto ad un asse perpendicolare a quello di inserzione (per consentire l'allineamento dei componenti) e l'angolo  $\beta$  che indica la rotazione da compiere secondo l'asse di inserzione.
  - b. Metodo Hitachi: fornisce ad ogni operazione un punteggio da 0 a 100 secondo la complessità della stessa. La somma dei vari punteggi ci da informazione riguardo la complessità dell'assemblaggio.
  - c. Metodo Westinghouse: sostanzialmente il metodo Westinghouse ha un funzionamento simile a quello Boothroyd con la differenza che si usano dei dischi riportanti le varie operazioni e i relativi tempi di esecuzione.
6. **Individuazione della sequenza ottimale di assemblaggio**, la quale consente di assemblare il prodotto nel minor tempo possibile e consente di evitare soprattutto l'insorgere di difficoltà di assemblaggio come punti ciechi o zone difficili da assemblare. La determinazione della sequenza ottimale di assemblaggio può essere affidata ad un software che in base alle operazioni da

seguire e a tutte le combinazioni possibili determina la sequenza che consente di ottenere un tempo di assemblaggio inferiore. La determinazione del tempo di assemblaggio viene sempre fatta seguendo uno dei metodi descritti in precedenza, solitamente si assegnano i punteggi Boothroyd.

7. **Adeguarsi alla variazione dimensionale dei pezzi** che vengono prodotti, non tutti i pezzi rispetteranno perfettamente le dimensioni nominali stabilite a progetto. La variabilità dimensionale è responsabile diretta della possibilità o meno di realizzare correttamente l'assemblaggio e di rispettare i KC del prodotto. Si possono adottare strategie diverse in base alla convenienza economica che andiamo a cercare: In particolare per processi poco precisi potremo andare a decidere di stringere le tolleranze sul componente oppure, quando i processi sono già ad un buon livello di precisione posso decidere di misurare tutti i componenti e fare una classificazione di questi secondo la loro dimensione, vado così a realizzare l'assemblaggio selettivo, seleziono cioè i componenti che assemblerò; in questo modo posso stringere la tolleranza e lavorare con una tolleranza inferiore alla capacità del mio processo senza andare ad incrementare significativamente i costi di produzione.

## 4 - Tolleranze

### Sintesi delle tolleranze:

La determinazione delle tolleranze dimensionali su un prodotto o una serie di componenti è uno degli elementi più critici all'interno dell'analisi DFM e nella progettazione del componente. Le tolleranze dimensionali sono la caratteristica che influisce maggiormente sul costo e sulla capacità di assemblare gli elementi tra di sé. Generalmente i problemi principali che si manifestano sono legati alle tolleranze eccessivamente ristrette, che si consentono di rispettare le specifiche di funzionamento richiesto.

In sede di progetto per garantire il rispetto di una certa tolleranza dimensionale si possono utilizzare due tecniche differenti: l'approccio di analisi e quello di sintesi; L'obiettivo dell'approccio di sintesi per la determinazione delle tolleranze sui singoli componenti è di definire, una volta nota la tolleranza funzionale di mio interesse, le varie tolleranze presenti sui vari elementi della mia catena in modo da imporre una tolleranza che consenta di rilassare le macchine ed accelerare i processi produttivi, diminuendo quindi il costo di ogni lavorazione sul singolo componente. Il processo di sintesi può essere fatto seguendo due processi differenti: quello dell'ottimizzazione *semplice* andando ad abbassare solo il costo di produzione del singolo componente o l'ottimizzazione *doppia* che consiste nell'ottimizzazione contemporanea del costo e della qualità del componente in analisi.

1. Nel primo caso è necessario per ogni lavorazione andare a definire la catena di tolleranze e conoscere le curve di costo della singola lavorazione in funzione della tolleranza che ci consente di ottenere. Successivamente si procede in maniera iterativa impiegando la formulazione di Chase  $C = A + \frac{B}{t^k}$  in cui A, B e k sono parametri caratteristici della macchina di cui dispongo e della sua storia aziendale. Facendo una analisi di regressione quindi posso andare a scegliere la tolleranza che minimizza il costo della singola lavorazione per ottenere la tolleranza funzionale. Ovviamente dovremo porre il vincolo che ciascuna tolleranza scelta sia superiore al limite tecnologico della lavorazione impiegata.
2. Nel secondo caso invece dobbiamo tenere in considerazione oltre alle curve costo-tolleranza anche le curve di costo connesse al non funzionamento dell'oggetto che sto andando ad ottimizzare. Le curve costo-tolleranza vengono inserite in questo sistema sotto forma già di sequenze di punti di ottimo, per realizzare quindi delle curve continue di costo-tolleranza. In questo approccio devo andare a definire i *modi di non funzionamento* e devo definire come questi modi di non funzionamento vanno ad incidere sui costi di qualità. La quantificazione del costo di non funzionamento è affidata alla relazione di Taguchi:  $Q(\text{quality loss}) = K(y - m)^2$  in particolare si deve tenere di conto sia del costo connesso ad un certo non funzionamento sia alla probabilità che questo costo si presenti. Sommando poi le curve di costo qualità con quelle di costo lavorazione si ottiene il campo di specifica che ci consente di ridurre il costo generale del componente.

### Come ottenere la catena di tolleranze nel caso monodimensionale:

Il processo di ottimizzazione delle tolleranze è molto complesso a causa di vari aspetti: la scelta del metodo di ottimizzazione più importante, la scelta delle tolleranze di lavorazione sui singoli componenti e soprattutto la determinazione della catena di tolleranze che concorrono alla realizzazione della tolleranza funzionale richiesta. Solitamente la tolleranza funzionale non si ottiene con una determinata lavorazione ma è frutto della combinazione di determinate caratteristiche dimensionali e geometriche del componente frutto di lavorazioni meccaniche diverse. A questo proposito devo andare a determinare una catena di tolleranze ottenibili mediante i comuni processi produttivi e così definire quella che è la mia tolleranza funzionale.

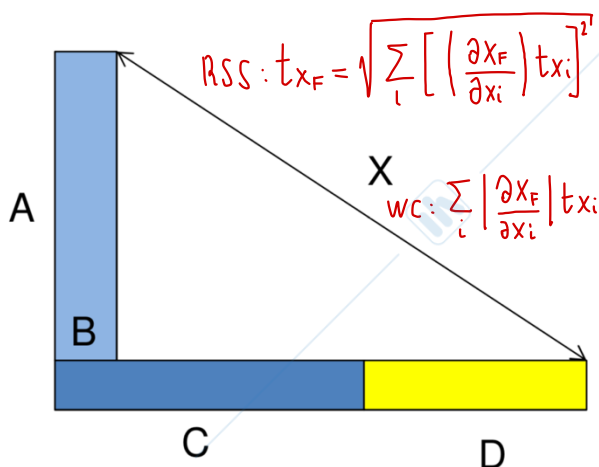
L'approccio maggiormente impiegato, nonché quello in assoluto più semplice e costoso è il così detto "Worst Case": l'applicazione di questo principio prevede che tutte le tolleranze di interesse si trovino contemporaneamente nella condizione peggiore e di fatto si vanno a sommare tutte le tolleranze sui singoli componenti:

$$T_f = T_{x_1} + T_{x_2} + T_{x_3} + T_{x_4}$$

Un approccio più complicato dal punto di vista analitico e concettuale, ma che consente di allargare un po' le tolleranze di fabbricazione è il così detto metodo RSS (Root Square Statistical). Questo procedimento fa affidamento all'approccio probabilistico alle tolleranze di lavorazione, in particolare vado a considerare il fatto che la distribuzione fisica delle tolleranze non sarà univoca ma statistica, vado quindi a considerare la deviazione standard delle singole tolleranze e poi le combino in modo da ottenere poi la tolleranza funzionale:  $\sigma_{ASM} = \sqrt{\sum \left(\frac{T_i}{3}\right)^2}$

### Come ottenere la catena di tolleranze nel caso bidimensionale o tridimensionale e formula:

La determinazione delle tolleranze funzionali in casi più complessi di quello lineare richiede l'introduzione di un ulteriore parametro che influisce sulle tolleranze: nel caso 2D e 3D alcune tolleranze hanno una influenza maggiore sul risultato finale e questa si determina con la funzione sensitività.



Nel caso rappresentato avremo:

$$x_f = \sqrt{A^2 + (C + D - B)^2}$$

Mentre per la tolleranza scriveremo:

$$t_{x_f} = \sqrt{\left(\frac{\partial x_f}{\partial A}\right)^2 t_A^2 + \frac{\partial x_f^2}{\partial B} t_B^2 + \frac{\partial x_f}{\partial C} t_c^2 + \frac{\partial x_f}{\partial D} t_d^2}$$

Così da ottenere in definitiva la tolleranza complessiva.

L'ottimizzazione di queste catene di tolleranze segue

poi il procedimento analogo al caso monodimensionale.

### Il calcolo delle tolleranze

La tolleranza su un componente è generalmente un valore numerico che si va a determinare per alcune delle dimensioni del componente dalle quali può dipendere il funzionamento del componente o qualcuna delle sue qualità più importanti, la tolleranza esprime un range entro cui la dimensione o la caratteristica del componente viene ritenuta accettabile per il funzionamento dell'insieme di componenti (non ha infatti alcun significato definire delle tolleranze per componenti che non devono accoppiarsi ad altri). La determinazione delle tolleranze sui componenti è di fondamentale importanza in quanto da esse dipende fortemente il prezzo dei singoli prodotti, in particolare più saranno strette e più costose saranno le lavorazioni che dobbiamo effettuare per raggiungere tale livello di precisione. Generalmente per determinare una certa quota funzionale abbiamo bisogno di definire in maniera intelligente una catena di quote che ci consenta di ricondurre ciascuna tolleranza intermedia ad una lavorazione meccanica su un singolo componente per poi andare a definire la tolleranza funzionale sul prodotto. Quando abbiamo definito la nostra catena di quote si possono applicare due principi per andare a calcolare il valore risultante della catena di tolleranze:

- **Approccio Worst-Case:** secondo l'approccio worst case, tutte le tolleranze dimensionali vengono prese nella condizione limite in cui il componente perde la sua funzionalità e le si

sommano tutte assieme. In questo modo, poco realistico per la rappresentazione delle condizioni reali di produzione, ci si va a mettere in condizione cautelativa proteggendosi il più possibile dagli errori. Ovviamente questa tecnica mi impone delle tolleranze sui componenti molto strette e che talvolta risultano inutilmente strette ed eccessivamente costose.

- **Approccio RSS:** l'approccio Root Square Statistical fa ricorso alla natura casuale dei processi produttivi, andando a fare una media quadratica delle singole tolleranze sui componenti in modo da consentire una rappresentazione più realistica del processo produttivo e consentire un leggero allargamento delle tolleranze rispetto all'approccio sopra detto.

In entrambi i casi una volta determinata la catena di tolleranze e la tolleranza funzionale si deve calcolare la tolleranza di ciascuna quota che contribuisce alla quota funzionale. Per fare questa operazione si possono seguire due approcci differenti:

- **Metodo di Analisi:** il metodo di analisi consiste nell'analizzare le tolleranze ottenibili con le singole lavorazioni, e quindi andando a determinare la tolleranza finale, nel caso in cui questa non venisse rispettata si vanno a stringere alcune di queste tolleranze in modo da ottenere il risultato richiesto. Questo processo solitamente porta alla realizzazione di pezzi costosi con tolleranze strette e difficilmente raggiungibili. Generalmente l'approccio di analisi viene fatto a posteriori per determinare se le caratteristiche richieste vengono rispettate in sede di produzione.
- **Metodo di sintesi:** in questo metodo si va in primo luogo a determinare la tolleranza obiettivo e successivamente si vanno a determinare le tolleranze sui singoli componenti in modo da stressare al minimo le lavorazioni così da ridurre i costi e andare più veloce con le macchine. Attualmente seguono questo principio solo il 20% delle aziende.

La determinazione delle tolleranze con il processo di sintesi può avvenire secondo la tecnica della sintesi semplice o con la tecnica della sintesi con costo di qualità. Nel primo caso si vanno a determinare le curve di costo delle singole lavorazioni per ognuna delle tolleranze richieste, facendo riferimento alla formulazione di Chase per il processo che sto analizzando ed andare a cercare tra le varie combinazioni che mi forniscono la qualità richiesta quelle che minimizzano i costi di produzione. Nel caso invece dell'ottimizzazione con costo di qualità, si vanno a costruire le curve di costo per quanto riguarda la produzione e le curve di costo determinate da una perdita di qualità del componente (rotture, incompatibilità, difetti di funzionamento). La sovrapposizione di queste due curve, che sono già curve realizzate con punti di ottimo mi forniscono il range all'interno del quale conviene economicamente produrre.

## Sintesi delle tolleranze con costi di qualità e come si ricava curva ed il calcolo della probabilità nel caso del treno

L'approccio di sintesi per la determinazione delle tolleranze su un determinato componente si utilizza per determinare, nota la tolleranza funzionale che di cui devo disporre, le tolleranze sul singolo componente che realizza tale catena. Il vantaggio principale connesso con questa tecnica è che mi consente di realizzare la mia tolleranza funzionale rilassando al massimo tutti i processi produttivi, consentendo una produzione più veloce. La sintesi può essere fatta tenendo in considerazione il solo costo di produzione del componente oppure andando a considerare anche il costo di qualità dello stesso: per costo di qualità si intende il costo che si ripercuote sul prodotto nel caso in cui si manifesti un modo di non-funzionamento dello stesso. La relazione che lega i costi di lavorazione del componente e i costi di qualità sarà per forza di cose inversamente proporzionale, infatti i costi di qualità si riducono quanto più andiamo ad imporre tolleranze strette al nostro pezzo.

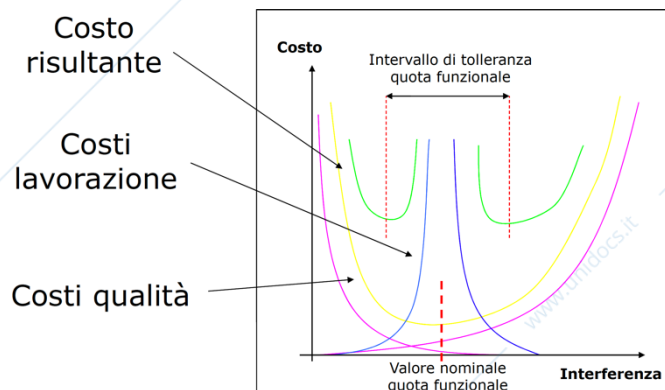
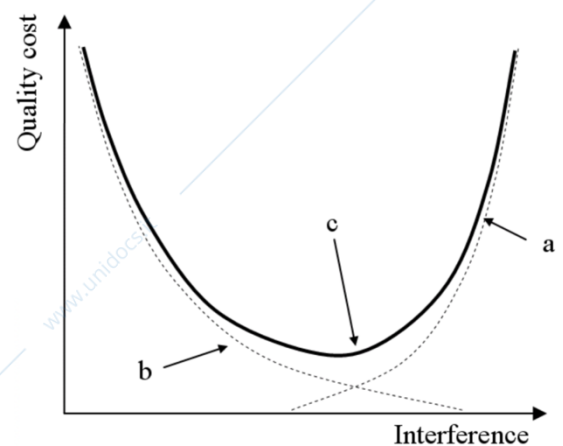
Nel secondo tipo di approccio, ovvero quello con la considerazione dei costi di qualità, si devono andare a determinare delle curve di costo per i due aspetti che mi concorrono al costo del prodotto:

- Costo di produzione:** direttamente correlato alla tolleranza che impongo sul mio componente. Questo costo si determina con la funzione esponenziale di Chase, la quale mette in relazione il costo di lavorazione con alcuni parametri determinati sperimentalmente e validi per il mio processo produttivo e per la mia azienda. La formula di Chase in particolare dice che:  $C = A + \frac{B}{t^k}$  dove i coefficienti A, B e k sono determinati come detto in funzione del mio processo produttivo. Dopo aver determinato il costo del singolo processo produttivo dovrò calcolare il costo per l'ottenimento di ogni singola tolleranza e tramite una ottimizzazione (secondo una regressione) andrò a trovare dei punti di ottimo che minimizzano il costo della tolleranza funzionale andando a variare i costi delle tolleranze che la compongono, dall'ottenimento di questi punti di ottimo nascerà così una curva che combineremo con quella relativa al costo della qualità.
- Costo della qualità:** si impiega generalmente la funzione di Taguchi. È compito del progettista andare ad individuare i modi di non funzionamento di un accoppiamento e il costo di questi; in funzione poi della probabilità con cui questi potranno verificarsi costruiamo la relativa curva impiegando la funzione quadratica di Taguchi:  $L = K(y - m)^2$ 

In altre parole, dobbiamo seguire alcuni passaggi importanti:

- Definizione** delle modalità di guasto o rottura per diversi valori della tolleranza funzionale.
- Definizione** del singolo costo per ogni guasto o rottura.
- Valutazione** della probabilità che ciascun guasto si verifichi, in funzione di ciascuna tolleranza funzionale realizzabile.
- Valutazione** del costo di qualità con la relazione di Taguchi (considerando cioè il costo dell'evento e la probabilità che si manifesti).
- Somma** delle curve di costo per la non qualità e per la produzione.

**Nel caso della ruota ferroviaria** i guasti che si possono causare sono lo scalettamento della ruota per troppa poca interferenza o l'esplosione meccanica in caso di una interferenza eccessiva, in ognuno dei due casi i costi connessi con il guasto (che porta al deragliamento del treno) sono molto ingenti. La discriminante ultima che dobbiamo considerare è quindi la probabilità che l'evento si verifichi: questa si determina andando a valutare la distribuzione di tensione sul disco al variare dell'interferenza e la tensione ammissibile di disco e assile. La sovrapposizione quindi dei costi di non funzionamento dovuti allo scalettamento (a) e all'esplosione del disco (b) mi danno origine alla curva di costo della qualità. L'ultimo passaggio è quello di sovrapporre le curve di costo di qualità e di costo di produzione, per vedere dove è conveniente mantenere la mia tolleranza funzionale.



## 6 - Ottimizzazione delle lavorazioni meccaniche

### Come ridurre il costo di un componente in lamiera stampata

Si definisce lamiera un foglio di materiale metallico che ha uno spessore di massimo 12 mm e dal quale si possono ottenere forme da molto semplici a molto complesse. Lo stampaggio delle lamiere generalmente può essere considerato un processo net-shape e consente, tramite l'impiego di stampi costruiti ad hoc, di ottenere ottime finiture superficiali e un buon rispetto delle tolleranze dimensionali. Le principali lavorazioni che si possono fare su una lamiera sono: Tranciatura, Punzonatura, Imbutitura, Curvatura, Piegatura e Calandratura. La principale voce di costo nelle lavorazioni delle lamiere risiede proprio nella materia prima con la quale si intende eseguire la lavorazione, infatti i fogli laminati a misura presentano un costo molto elevato in quanto sono costituiti da materiale pregiato (caratteristiche chimiche e di composizione piuttosto costanti) che ha già subito una serie di processi tecnologici molto costosi, a tal proposito la principale operazione che si deve fare è quella di ridurre al minimo gli sfridi prodotti, per fare questo in generale si cerca di ottimizzare la forma del singolo componente in modo che sia facile ricoprire con le sagome l'intero spazio disponibile sulla lamiera mediante il processo così detto di "impacchettamento". Quando risulta invece difficoltoso impacchettare prodotti uguali, a causa della complessità o delle feature geometriche, si può pensare di introdurre nella zona di taglio o profilare il punzone in modo che realizzi un altro pezzo insieme al nostro prodotto. Sempre in ottica di riduzione degli sfridi, si cerca di fare quello che prende il nome di presetting della lamiera, il coil di lamiera che solitamente ha una larghezza ben precisa, viene tagliato alla larghezza richiesta per produrre il mio componente e acquistato già a misura. Sempre in ottica di riduzione degli scarti di lavorazione è opportuno che i pezzi abbiano le caratteristiche dimensionali almeno 2-3 volte il loro spessore, così da evitare di avere eccessive sollecitazioni sullo stampo e distorsioni dei pezzi in lavorazione. I costi di lavorazione in generale incidono in maniera marginale, la lavorazione infatti è molto veloce e il tempo di battuta è in media di qualche secondo, questo processo ha quindi una produzione oraria molto elevata grazie alla quale si riesce a ridurre in maniera significativa il costo dei singoli componenti.

### Ottimizzazione delle lavorazioni per deformazione plastica

#### Estrusione

Nelle lavorazioni di estrusione il materiale maggiormente impiegato è l'alluminio, ma si possono utilizzare anche materiali diversi come acciaio, ottone, rame, magnesio e altri. Il funzionamento della lavorazione consiste nello spingere il materiale metallico e costringerlo a passare da una matrice con una forma ben definita. Il principale vantaggio di questo processo è che risulta economicamente vantaggioso anche per piccoli lotti produttivi (100 kg di Al e 1000 kg di acciaio) mentre per lotti produttivi molto ampi diventa vantaggiosa la laminazione. La qualità dei componenti che si realizzano è molto elevata, le tolleranze dimensionali e geometriche che si realizzano consentono di definire la lavorazione Net Shape. Un altro vantaggio di questa lavorazione è l'ampia disponibilità di profili estrusi disponibili da commercio che rende i semilavorati di questo processo economici e sempre disponibili. Per definire se una particolare geometria è facilmente estrudibile si ricorre al parametro CCD: Circumscribing Circle Diameter che indica la dimensione della circonferenza circoscritta al profilo che voglio realizzare. Per diversi materiali abbiamo diversi valori del CCD:

- **Alluminio:** per estrusi in alluminio si può avere CCD compreso tra 6 mm e 1 m, generalmente però a causa della difficoltà di manipolazione di sezioni molto grandi si impone un limite di 250 mm.

- **Acciaio:** data la difficoltà di ottenere buone superfici e la maggior pastosità del materiale, si possono realizzare profili con CCD fino a 150 mm. Oltre questo limite le forze in gioco diventano eccessive.

La lunghezza dei prodotti realizzati può andare teoricamente fino ad alcune decine di metri, ma si preferisce mantenerla contenuta per limitare gli ingombri e facilitare la movimentazione degli estrusi.

Quando si progetta una sagoma per un prodotto estruso, si devono tenere di conto dei limiti meccanici dello stampo e le deformazioni causate dalle asimmetrie del profilo possono presentarsi distorsioni sulla barra. Gli accorgimenti da utilizzare riguardano:

- **Presenza di angoli acuti:** gli angoli acuti e le parti a spigolo vivo generano all'interno dello stampo delle pressioni molto elevate e delle concentrazioni delle tensioni, che riducono la vita dell'utensile, causano rotture e scarse caratteristiche meccaniche del componente. Si preferisce inserire raggi di raccordo da 1 a 3 mm secondo il materiale in lavorazione.
- **Bilanciamento dei profili:** è importante considerare il bilanciamento del profilo, garantendo la limitazione delle velocità di scorrimento così da evitare incurvatures sul profilo che danneggerebbero il prodotto finito. In funzione del materiale si deve comunque controllare la geometria in modo che oltre alla variazione di spessore si controlla anche la variabilità dimensionale dei componenti, in particolare si farà attenzione al rapporto larghezza/altezza.
- **Simmetria della Sagoma:** è importante andare ad analizzare la simmetria delle sagome, sempre per la questione del bilanciamento, in caso in cui si abbiano profili fortemente asimmetrici si potrebbe pensare di estrarre due profili accoppiati e successivamente dividerli così da ottenere simmetria.

### Stampaggio Lamiera

La lavorazione delle lamiere (si definisce lamiera un elemento metallico dello spessore massimo di 12 mm) è solitamente conveniente sia che si debbano produrre lotti di pezzi molto numerosi sia che la numerosità sia ridotta, il costo degli stampi generalmente è basso (a meno che non si vogliano avere stampi molto grandi e con deformazioni elevate dei pezzi) e le macchine (presse) che movimentano lo stampo sono molto versatili e facilmente riutilizzabili. In generale le tolleranze dimensionali che si possono ottenere sono buone così come le caratteristiche meccaniche del prodotto finito. La numerosità del lotto in generale influenza solo la tipologia dello stampo:

- **Stampo a singolo effetto:** impiegato in generale per produzioni più piccole, induce deformazioni maggiori nella lamiera e genera tolleranze dimensionali leggermente più scadenti. La produttività è un po' più bassa ma lo stampo è sensibilmente più economico e meno complesso.
- **Stampo multi-effetto:** gli stampi multi-effetto sono caratterizzati dal fatto che in un solo movimento eseguono più operazioni su parti diverse della lamiera e generalmente sono progressivi, hanno il vantaggio di avere una produttività molto più elevata ed ogni battuta producono un pezzo finito, il principale svantaggio di questi stampi è il costo che ne giustifica l'impiego solo per lotti di componenti molto numerosi.

Il vantaggio connesso con lo stampaggio delle lamiere è che si possono realizzare prodotti con una variabilità dimensionale e complessità pressoché infinite, l'unico limite risiede nel materiale che deve presentare una bassa fragilità ad impatto ed una elevata deformabilità a freddo. Il principale costo della lavorazione della lamiera risiede proprio nella materia prima stessa: questa è un foglio di materiale metallico pregiato con una composizione uniforme e che ha subito processi tecnologici di laminazione

con lo scopo di ridurre lo spessore a quello della lamiera. Dovremo quindi adottare una serie di accorgimenti utili alla riduzione degli sfridi di lavorazione, in quanto è vero che la lamiera può essere rifiuta e riciclata ma il prezzo a cui si vendono gli sfridi non è nemmeno paragonabile con quello di acquisto della materia prima. Gli accorgimenti da seguire sono:

- **Impacchettamento:** impacchettare i profili è una tecnica che mira ad aggiustare le dimensioni dei componenti ottenuti da stampaggio delle lamiere in modo che questi sfruttino al massimo la lamiera a disposizione.
- **Slitting:** le lamiere generalmente sono distribuite in "coil" che sono rotoli di lamiera molto lunghi e a larghezza prefissata. Quando non è necessario realizzare prodotti molto grandi spesso conviene acquistare lamiere già tagliate alla larghezza del pezzo da realizzare così da evitare di buttare via tutta la parte non lavorata.
- **Unione di pezzi diversi:** quando per questioni geometriche non è possibile impacchettare i pezzi, si può pensare di introdurre più pezzi diversi all'interno dello stesso stampo, in modo da ottimizzare il consumo di lamiera.
- **Spessori:** le dimensioni delle varie parti dell'oggetto che vogliamo realizzare devono essere almeno 2-3 volte lo spessore della lamiera da cui si vogliono ricavare; dimensioni troppo piccole infatti vanno a realizzare una forte concentrazione delle tensioni la quale si traduce in una rapida usura dello stampo e in una forte possibilità di produrre scarti.

## Laminazione

Il processo di laminazione consiste in una deformazione progressiva del profilo che si vuol realizzare costringendolo a passare nella luce lasciata libera da dei rulli (che prendono il nome di calibri) realizzati con la forma del profilo che si vuole ottenere. La laminazione è una operazione progressiva proprio perché la forma che si vuole ottenere richiede una grande deformazione del semilavorato di partenza, che non si può ottenere lavorando in una sola passata. I principali limiti nella laminazione sono due:

- **Ottenimento di spigoli vivi:** l'ottenimento di spigoli vivi risulta difficoltoso in quanto si avrebbe una concentrazione di materiale nell'angolo, causando delle rotture e delle cricche
- **Ottenimento di piccoli spessori ed elevate lunghezze:** quando si vogliono ottenere pezzi molto lunghi si potrebbe incorrere in inflessioni, per ovviare a questo problema solitamente si ricorre all'inserimento di alcune pieghe che irrigidiscono la struttura.

## Forgiatura

La forgiatura è un processo di deformazione massiva, consente di lavorare pezzi da piccole dimensioni a pezzi di grandi dimensioni. Il principale vantaggio della forgiatura è che si possono ottenere anche grandi deformazioni sui pezzi dei materiali più vari. Il processo consiste (per la forgiatura a caldo) in un riscaldamento a temperatura di plasticizzazione del materiale e ad un successivo inserimento in uno stampo, che può essere aperto o chiuso, tramite il quale si applica la forza necessaria alla deformazione. Il processo di forgiatura può essere impiegato oltre che per lavorazioni massive anche per lavorazioni di finitura come la coniazione. Il principale vantaggio dei pezzi forgiati risiede nella conformazione delle fibre del materiale, la deformazione plastica a differenza della fusione e dell'asportazione di truciolo orienta in maniera precisa le fibre di materiale esistenti causando anche il fenomeno dell'incrudimento, tramite il quale le caratteristiche superficiali del pezzo migliorano sensibilmente, soprattutto nella direzione dell'accrescimento dei grani. Le caratteristiche positivamente influenzate sono la tenacità, resistenza a trazione e duttilità. Generalmente, per non stressare troppo il materiale si tende a fare una forgiatura progressiva, la deformazione (specialmente per pezzi di grandi dimensioni) si ottiene in maniera progressiva e si possono impiegare, secondo la produttività di cui si necessita, presse

meccaniche (a vite, ad eccentrico) oppure oleodinamiche.

Un altro dei parametri da tenere sotto controllo quando si vuole fare una lavorazione per forgiatura è la velocità di deformazione, maggiore sarà quest'ultima e migliori saranno le caratteristiche che si possono ottenere: spesso le deformazioni molto veloci si realizzano con presse ad eccentrico o presse a maglio.

L'impiego del processo tecnologico diventa vantaggioso quando il lotto produttivo supera le 5000 unità per pezzi di 100 grammi e diminuisce con pezzi più grossi. Per lavorazioni di pochi pezzi si possono impiegare i così detti stampi general purpose, che hanno la caratteristica di avere forme generiche che possono essere applicate per la realizzazione del pezzo finito.

La scelta del materiale è sostanzialmente correlata alle caratteristiche di deformabilità, duttilità e alla plasticità che il materiale riesce ad assumere quando portato ad elevate temperature. Per alcuni materiali, per evitare l'ossidazione, potrebbe essere necessario lavorare in atmosfera protetta.

La scelta della forma dello stampo e della conformazione del piano di divisione deve essere fatta in modo che il materiale scorra quanto più possibile in direzione parallela allo stesso, si deve fare anche attenzione a come si dispone la sagoma in modo da fare attenzione a dove si posizionano le bave (in quanto in esse si hanno le deformazioni massime e quindi si ha la possibilità di innescarvi una cricca) e vanno posizionate le sagome in modo da considerare correttamente gli angoli di sformo: per profili quadrati per esempio è una buona idea appoggiarli su uno spigolo in modo che l'angolo di 90° tra i due lati sia anche di sformo per la sagoma.

## Ottimizzazione delle lavorazioni di fonderia e metallurgia delle polveri

### Sinterizzazione

Il processo di sinterizzazione prevede che la realizzazione di un componente avvenga tramite la compattazione ed il successivo riscaldamento ad alta temperatura di una miscela di polveri metalliche altofondenti, in modo da ottenere un prodotto dotato di ottime caratteristiche meccaniche (date dai materiali altoresistenziali ed altofondenti) e dall'altra dotato di ottime finiture superficiali (in quanto il processo di sinterizzazione può essere considerato net-shape) ed uniformità delle caratteristiche meccaniche. Un vantaggio che questo processo inserisce all'interno del pezzo è una elevata porosità che può essere sfruttata per l'inserimento di lubrificanti e rendere per esempio i cuscinetti autolubrificanti.

Tra gli accorgimenti progettuali che bisogna osservare per la realizzazione di prodotti con questa tecnica si ha sicuramente la necessità di prevedere degli angoli di sformo (seppur minimi) che consentano l'agevole estrazione del prodotto dallo stampo e si richiede di evitare per quanto possibile la formazione di raccordi ad ampio raggio, prediligendo gli spigoli vivi, risulta infatti difficoltoso realizzare una corretta compressione delle polveri in zone con curvature ad ampio raggio.

### Fusione

Il processo di fusione consiste nell'immissione di materiale fuso in uno stampo con la forma in negativo dell'oggetto che vogliamo realizzare. Lo stampo può essere sia a perdere che permanente e la differenza principale (oltre al materiale con cui è realizzato) risiede nella possibilità di realizzare particolari sagome e considerare o meno la possibilità di estrarre il pezzo solidificato dallo stampo. Nelle fusioni con stampo a perdere questo solitamente è realizzato in sabbia (detta da fonderia).

Il processo di fusione è molto vantaggioso in quanto consente di ottenere la forma finale dei componenti con un solo passaggio che possono essere anche già con tolleranze dimensionali e geometriche utili al successivo accoppiamento del pezzo (caso della pressofusione) o che richiedono

delle lavorazioni secondarie successive (caso della fusione in sabbia). Il processo di fusione può essere definito *complexity for free*, in quanto l'inserimento all'interno di uno stampo già complesso di una ulteriore feature ha un costo irrisorio; questo processo è quindi tra i più indicati quando si intende realizzare l'integrazione di più componenti metallici.

I processi principali di fonderia si suddividono in:

- **Fusione in sabbia al verde:** questa si applica per la produzione di piccoli lotti e prevede la realizzazione di uno stampo in sabbia compattata manualmente su un modello (generalmente in materiale povero) e sulla successiva chiusura dello stampo. Questo tipo di stampo generalmente non viene ricotto in forno e viene subito utilizzato per la produzione dei componenti. Lo stampo successivamente viene distrutto e la sabbia può essere riciclata (almeno in parte).
- **Fusione in sabbia asciutta:** simile al processo in sabbia al verde ma in questo caso dopo la realizzazione dello stampo in sabbia questo viene cotto in forno ed asciugato. Si possono inserire anche dei leganti termoindurenti che vanno a migliorare le caratteristiche meccaniche dello stampo (soprattutto quando le dimensioni del fuso sono considerevoli).
- **Fusione in conchiglia:** in questo caso il modello del pezzo è in materiale metallico e la sabbia viene deposta per gravità sullo stesso che poi viene portato in temperatura e la sabbia solidifica su di questo creando una conchiglia rigida in cui successivamente verrà accolto il materiale fuso. Visto la natura del processo, questo è più facilmente automatizzabile e ci consente di realizzare lotti produttivi più numerosi in maniera più veloce.
- **Pressofusione:** in questo caso il materiale viene iniettato nello stampo ad alta pressione e per questo deve essere in materiale metallico (così da resistere alle pressioni che si generano). La pressofusione è raccomandata quando si vogliono realizzare lotti di prodotti ad elevata precisione che non necessitano di rilavorazioni successive, a causa dell'elevato costo degli stampi per questo processo si devono prevedere lotti molto numerosi.

La pressofusione può avvenire con due differenti metodi:

- **Camera calda:** il materiale viene mantenuto continuamente allo stato fuso ed in contatto con il pistone che lo inietta nella camera dello stampo. Questo processo consente di lavorare il materiale a temperature inferiori e consente di ottenere una produttività più elevata proprio per i minori tempi di raffreddamento e per la più rapida iniezione
- **Camera fredda:** in questo caso il metallo fuso deve essere portato ad una temperatura maggiore e portato al pistone di iniezione in maniera intermittente. La lavorazione presenta una produttività inferiore a causa dei tempi di raffreddamento maggiori.

Il principale limite della pressofusione sta nei materiali, che devono avere una temperatura di fusione inferiore a quella con cui viene realizzato lo stampo (che solitamente è in acciaio) così da evitare la fusione dello stesso.

Gli accorgimenti di progettazione riguardano sostanzialmente la necessità di ottenere determinate caratteristiche meccaniche e la necessità di controllare la solidificazione delle varie parti (che dovrà avvenire in modo uniforme) così da non formare cavità, cricche ed infragilimenti che inficerebbero sulle caratteristiche. A questo proposito si deve considerare di realizzare un pezzo con spessori il più possibile uniformi ed evitare l'incrocio di più rinforzi o zone di materiale, limitandoli al minimo possibile. Alcune considerazioni vanno fatte anche per gli spigoli: in fonderia non è possibile realizzare degli spigoli vivi con precisione in quanto si manifestano, in corrispondenza di tali punti, delle zone di accumulo di materiale (punti caldi) che vanno a creare delle soffiature nel pezzo. Quando si vogliono realizzare degli spigoli è opportuno progettare dei raggi di raccordo, in modo da mantenere uniforme lo spessore del materiale e quindi per evitare la formazione di punti caldi. Si devono considerare anche

gli spessori delle pareti interne dei pezzi, che generalmente devono essere del 20% circa più sottili, in quanto il raffreddamento delle zone interne avviene più velocemente di quanto non si ha per le zone esterne, le variazioni di spessore devono essere realizzate in maniera graduale così da evitare al massimo gli sbalzi termici e la formazione di zone a ritiro differenziale. Il raffreddamento del materiale comporta la formazione di fumi e vapori ai quali deve essere data la possibilità di evacuare correttamente per non generare delle zone di pressione nel pezzo, per questo vanno previsti dei fori per lo sfiato.

## Ottimizzazione delle lavorazioni per asportazione di truciolo

Le lavorazioni per asportazione di truciolo sono generalmente impiegate in tutti i processi produttivi, solitamente come operazione finale per la rifinitura di alcune zone di accoppiamento. È conveniente la produzione per asportazione di truciolo quando si hanno lotti molto piccoli di prodotti, in quanto sono caratterizzate da costi fissi generalmente bassi e costi variabili più considerevoli. Le parti realizzabili per asportazione di truciolo sono delle dimensioni più disparate e sono caratterizzate dalla possibilità di essere ottenute in una ampia variabilità di materiali. Il processo per asportazione di truciolo richiede di andare a seguire una serie di criteri progettuali, tramite i quali si può ridurre anche considerevolmente il costo di queste lavorazioni:

- **Evitare:** quando possibile, preferire processi net-shape o near net-shape come forgiatura o fusione.
- **Rilassare al massimo le tolleranze:** la capacità di realizzare delle tolleranze dimensionali con le macchine per asportazione di truciolo è inversamente proporzionale alla velocità di produzione, per questo quando si vogliono ottenere tolleranze strette si deve andare piano con la macchina. Questo allunga sensibilmente i costi della lavorazione.
- **Progettare le superfici per gli staffaggi:** la necessità che si riscontra maggiormente quando si lavora per asportazione è quella di bloccare i pezzi sulle macchine per contrastare l'effetto delle elevate forze di taglio. Quando nella geometria del pezzo si introducono delle parti che consentono anche lo staffaggio dello stesso diventa possibile bloccarlo agevolmente e al contempo diventa più facile ottenere buone finiture superficiali. L'assenza di punti di ancoraggio richiede la progettazione e costruzione di attrezzature di bloccaggio molto costose che vanno ad incrementare il costo della singola lavorazione.
- **Evitare angoli acuti e retti:** gli angoli retti e in generale quelli minori di  $90^\circ$  creano delle zone in cui è difficile far lavorare l'utensile che scarica male il truciolo e data l'elevata fragilità degli utensili (visto che sono molto duri) questi tendono a scheggiarsi sul tagliente principale.
- **Evitare le lavorazioni a taglio interrotto:** per aumentare la vita degli utensili è bene che questi lavorino con continuità e che non siano soggetti ad urti che li porterebbero a scheggiarsi. La lavorazione a taglio interrotto rende anche impossibili da usare gli utensili con tagliente in materiale ceramico, proprio per la sua altissima fragilità.
- **Progettare la parte in modo da evitare inflessioni:** la progettazione del componente deve essere fatta in modo che gli spessori siano tali da evitare inflessioni del pezzo o dell'utensile. L'inflessione provoca da una parte un aumento significativo delle vibrazioni e dall'altra un errore nella geometria da realizzare. Quando abbiamo a che fare con pezzi flessibili siamo costretti a ridurre la velocità di lavoro, aumentando i costi complessivi per la lavorazione.
- **Utilizzare, quando possibile, componenti simili a quelli che si realizzerebbero per asportazione, purché siano standard.**
- **Quando possibile, scegliere superfici piane:** la realizzazione di superfici ampie e piane consente di impiegare utensili di dimensioni maggiori e più robusti.

- **Evitare sotto-tagli:** il taglio di sottosquadri o profili particolari richiede l'impiego di utensili appositi e generalmente custom made, che hanno alto costo e consentono di raggiungere velocità di lavorazione piuttosto basse.
- **Ricorrere allo stampaggio:** la realizzazione di determinate geometrie ottenibili con processi di stampaggio (esempio profili esagonali) è generalmente molto costosa se realizzata con processi di asportazione di truciolo.
- **Limitare l'uso di metalli duri:** la lavorazione di metalli particolarmente prestazionali dal punto di vista della durezza risulta complicata in quanto gli utensili raggiungono i loro limiti e devono essere adottate velocità di taglio sostanzialmente inferiori.
- **Considerare il sovrametallo:** i semilavorati che devono essere finiti con le lavorazioni per asportazione devono prevedere una certa quantità di sovrametallo in modo da rendere possibile la lavorazione ed il contemporaneo raggiungimento delle tolleranze imposte a progetto.
- **Lavorare superfici legate da tolleranze geometriche nello stesso piazzamento:** la realizzazione di tolleranze geometriche che legano più superfici, soprattutto concentricità, perpendicolarità e parallelismo sono da realizzarsi senza che avvenga la movimentazione del pezzo sull'afferraggio, altrimenti non sarebbe possibile assicurarne il rispetto durante la lavorazione.
- **Utilizzare utensili standard:** per le geometrie più comuni di particolari feature geometriche (come gole di scarico, cave per linguette e filettature) sono disponibili utensili da commercio, quando possibile deve preferire la realizzazione di queste caratteristiche con utensili standard e non prevedere l'impiego di utensili custom.

Le diverse macchine richiedono poi alcuni accorgimenti particolari che vediamo nel dettaglio:

- **Tornitura:** Esistono varie tipologie di tornio che differiscono principalmente per la capacità di realizzare caratteristiche dimensionali, per la possibilità di essere attrezzati con più utensili diversi o per la caratteristica di funzionare senza la necessità di un operatore costantemente impegnato. La capacità produttiva di queste macchine va da bassa (lotti di piccolissima numerosità) ad altissima per le stazioni di tornitura bi-mandrino. Gli accorgimenti da seguire per realizzare correttamente un pezzo di tornitura richiedono di progettare pezzi tozzi in modo da limitare l'inflessione e non richiedere l'impiego di lunette e contropunte. Si richiede quanto più possibile di evitare di lavorare a taglio interrotto e si richiede di prevedere superfici con angoli di sforno abbastanza pronunciati, in modo da consentire un facile accesso.
- **Foratura:** L'operazione di foratura prevalentemente si esegue come operazione di aggiustaggio, anche se può essere svolta anche in maniera ripetitiva su un buon numero di pezzi. La lavorazione richiede, data la sua esecuzione, la presenza di superfici ortogonali, e quando queste non sono presenti si possono utilizzare delle guide per la punta in modo da evitarne inflessioni che porterebbero alla rottura, si devono evitare le operazioni che comportano il taglio interrotto o limitarle a una zona piuttosto piccola del pezzo. Si deve prevedere quando possibile l'esecuzione di fori passanti, che meglio si sposano con le caratteristiche degli utensili. Le caratteristiche geometriche dei fori devono prevedere che siano di diametro maggiore di 3 mm per problemi di punte, devono essere lunghi al massimo 3 volte il diametro altrimenti diventerebbe difficoltoso scaricare agevolmente i trucioli e si devono preferire fori con terminazione a punta piuttosto che piana (sono più economici da produrre).
- **Alesatura:** con l'alesatura si vanno solitamente a rifinire dei fori eseguiti in precedenza tramite un processo di foratura o tornitura interna. L'alesatore è uno strumento molto preciso e che asporta una piccola quantità di materiale, per questo non deve essere impiegato per la correzione di errori di posizione del foro, deve essere evitata l'intersezione tra fori normali ed alesati, per

limitare la possibilità di rompere l'utensile con la bava e si deve lasciare (per fori ciechi) lo spazio necessario allo scarico del truciolo, senza mandare l'alesatore fino in fondo al foro.

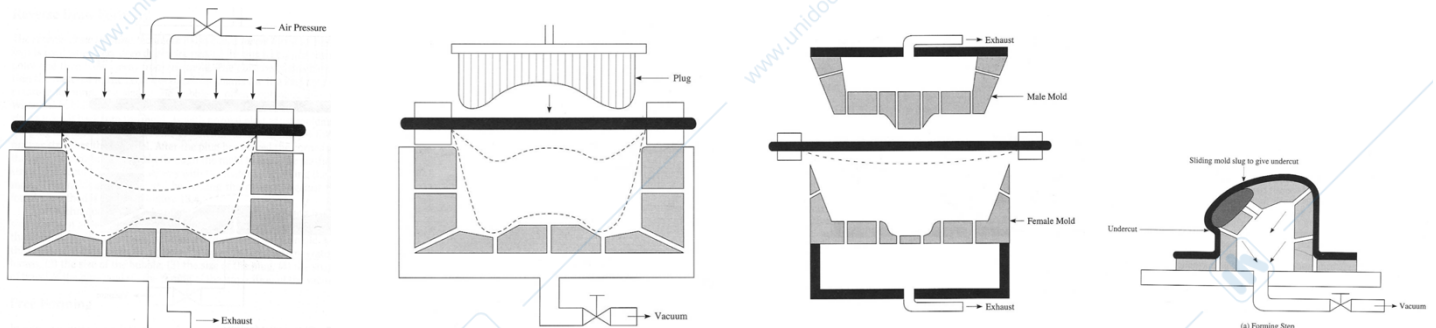
- **Fresatura:** è il processo di asportazione di truciolo più versatile e che consente di ottenere lavorazioni dalle forme più disparate. Gli utensili come sempre devono essere preferiti con ampio raggio di raccordo sul tagliente e devono essere scelte le feature geometriche in modo che siano impiegati utensili il più possibile con geometria standard. Quando si devono spianare solo piccole zone di accoppiamento è preferibile fare dei risalti e si preferisce utilizzare piccole frese a candela piuttosto che le grandi frese frontali. Si deve considerare il gioco presente tra gli organi mobili della macchina quando si va a lavorare vicino agli spigoli per evitare urti e la conseguente rottura degli utensili, in fresatura è più facile ottenere uno smusso che un raccordo. Per la creazione di cave per linguetta è opportuno ricorrere a geometrie standard e stondate. Se si devono fresare pezzi piccoli ed uguali si può prevederne un impacchettamento così da utilizzare un utensile più grande, il quale consente di avere velocità di lavorazione maggiori e un maggior tasso di asportazione. La fresatura delle bave (sia di altre lavorazioni che di asportazione di truciolo) riduce sensibilmente la vita dell'utensile e deve essere evitata (quando possibile).

## 7 - Materie Plastiche

### Cos'è la termoformatura e schemi/disegni:

La termoformatura è un processo di lavorazione dei materiali termoplastici, effettuata a partire da una lamiera di materiale portato alla temperatura di transizione (o rammollimento) e successivamente fatto aderire ad uno stampo in materiale (che può anche essere povero, in quanto non va in temperatura) mediante l'azione del vuoto o della pressione oppure tramite azioni combinate come per esempio il vuoto e una contropressione oppure il vuoto e la spinta di una matrice di forma opportuna per limitare il rischio della rottura della lamiera di plastica. Il processo consente di ottenere un buon controllo degli spessori eccezion fatta per le pareti verticali che tendono ad assottigliarsi un po'.

La caratteristica importante di questo processo è che sulle pareti a contatto con lo stampo siamo in grado di controllare bene anche le tolleranze dimensionali dell'oggetto che andiamo a realizzare, di contro sulla superficie libera non siamo in grado di ottenere le stesse caratteristiche dimensionali e geometriche. Il processo in questione è veloce e non richiede attrezzature particolarmente costose. Il processo parte però da una materia prima molto raffinata e costosa e produce una significativa quantità di scarti.



Le immagini sotto rappresentano le varie tecniche di termoformatura:

A sinistra termoformatura a vuoto con stampo, centro-sinistra termoformatura con punzone, centro-destra termoformatura a vuoto con matrice. L'ultima immagine è un esempio di termoformatura con presenza di inserti per realizzazione di sottosquadri nella sagoma del pezzo.

- **Termoformatura sottovuoto:** La termoformatura a vuoto utilizza delle pressioni per la deformazione del materiale piuttosto basse (max. 1 atm), questo garantisce una migliore uniformità del processo rispetto ad altre tecniche ma per contro ha delle velocità di processo inferiori. Il pezzo prima di essere estratto deve essere raffreddato e deve avere preso la forma dello stampo. Si hanno degli assottigliamenti sulle pareti verticali vicine agli afferraggi.

- **Termoformatura a pressione:** La termoformatura a pressione utilizza aria compressa (fino a 20 atm), in questo caso si hanno velocità di processo molto alte e un costo di produzione ridotto. Se il film è sottile è presente il rischio di rottura del film, il materiale di partenza (lamiera) è costoso perché deve essere pura e uniforme altrimenti si incorre nel rischio di rottura del film.

### - Formare dei fori tronco conici con la termoformatura è facile?

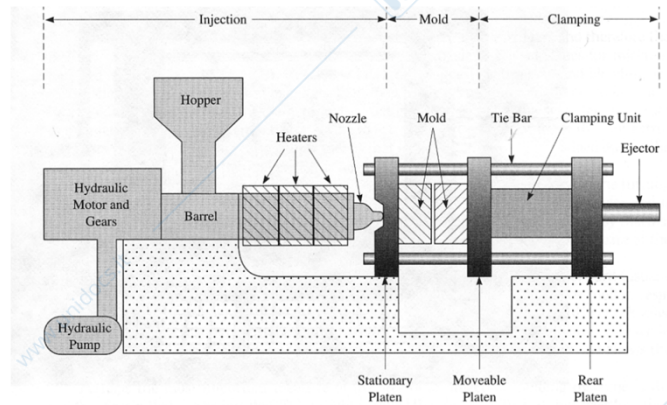
La termoformatura non prevede la realizzazione di fori in quanto essa è effettuata grazie alla pressione o al sottovuoto con o senza stampo, se ci fosse un foro nella lamiera ovviamente tale procedimento non sarebbe possibile.

Invece se si intende di produrre un oggetto di forma tronco conica (vaso di fiori) la sua realizzazione è piuttosto semplice con l'ausilio di uno stampo.

## Iniezione delle materie plastiche e schema e spiegazione

L'iniezione delle materie plastiche è uno dei processi produttivi maggiormente impiegati per i termoplastici: consiste nella fusione e successiva immissione a pressione della materia termoplastica fusa in uno stampo della forma dell'oggetto che vogliamo realizzare. È un processo che consente di ottenere pezzi con buone finiture superficiali e geometriche e consente anche di rispettare le tolleranze di fabbricazione. Il principio di funzionamento si basa sull'utilizzo di un "gruppo di plastificazione" ed uno stampo scomponibile in materiale metallico refrigerato (il quale ha la forma in negativo degli oggetti che vogliamo andare a formare).

Il gruppo di plastificazione è composto da una tramoggia, una coclea e dei riscaldatori i quali hanno il compito di raccogliere i granuli (o più raramente i flocculi) di termoplastico, fonderli ed omogeneizzarli all'interno della precamera di iniezione, dove poi si raccoglie la materia plastica e la si invia allo stampo mediante una traslazione longitudinale della coclea. La fusione e miscelazione della plastica avviene grazie alla combinazione di due fattori: da una parte l'azione meccanica conferita dalla rotazione della coclea e dall'altra il contributo termico dei riscaldatori che portano a fusione il materiale da iniettare. Analizzando i componenti del gruppo di plastificazione abbiamo:



- Tramoggia: la tramoggia ha il compito di raccogliere e convogliare la materia termoplastica alla bocca di alimentazione situata nella parte iniziale della coclea, la zona di alimentazione prende il nome di "Barrel".
- Motore e pompa idraulici: la coclea viene messa in rotazione da un motore idraulico collegato ad un riduttore ad ingranaggi che consente la regolazione della velocità della coclea, andando quindi a definire l'entità dell'azione meccanica applicata al materiale plastico.
- Coclea: la coclea è l'elemento di maggiore importanza all'interno del gruppo plastificazione, questa sostanzialmente è una vite a profilo rettangolare con il nocciolo a sezione crescente nella direzione di avanzamento del materiale, questo perché i granuli solidi occupano a parità di massa un volume maggiore di quando si trova allo stato fuso. Ogni materiale dovrebbe avere la sua coclea, in quanto non tutti hanno lo stesso comportamento e la stessa adesività sul metallo della vite, per esempio sul PVC si può utilizzare una azione meccanica più pronunciata in quanto non tende ad aderire sulla coclea mentre il nylon deve essere riscaldato a temperatura maggiore e deve subire una azione meccanica più lieve, infatti anche le coclee per i due materiali sono diverse.
- Riscaldatori: sono comandati elettricamente dalla macchina per l'iniezione e hanno il compito di fornire il giusto apporto termico al materiale per consentire la completa fusione.
- Ugello di iniezione: è la parte terminale del gruppo di plastificazione ed ha il compito di iniettare la materia plastica nello stampo, con la velocità e la pressione sufficienti per riempire correttamente tutto lo stampo.

La seconda parte fondamentale per l'iniezione è lo stampo, questo ha la forma in negativo del prodotto che si intende realizzare ed è costruito in modo da garantire una corretta chiusura e una corretta distribuzione del termoplastico. Solitamente lo stampo è composto da varie parti:

- Matrice fissa: è la parte dello stampo che rimane ferma quando lo stampo si apre e solitamente è la parte più vicina all'ugello di iniezione.

- **Matrice mobile:** la matrice mobile è la parte che ha il compito di allontanarsi dallo stampo in modo da aprirlo e far uscire i componenti una volta solidificati e raffreddati. Questo componente può avere una forma semplice o scomponibile e può accogliere anche dei dispositivi di espulsione che consentono una rimozione automatica dei componenti sfruttando le elasticità concentrate del componente.
- **Le matrici,** in funzione delle dimensioni e delle caratteristiche dei componenti che si vogliono realizzare possono riportare più figure dello stesso componente unite da dei canali di distribuzione del termoplastico. In caso di figure complesse, in virtù del completo e corretto riempimento possono essere predisposti punti di iniezione multipli ma si deve assicurarsi che la plastica non si raffreddi troppo così da causare saldature a freddo che andrebbero ad infragilire il componente.
- **Dispositivi di chiusura:** la chiusura dello stampo, secondo le pressioni a cui viene iniettata la plastica, può richiedere una forza più o meno elevata per il serraggio. Nel caso in cui si abbiano pressioni relativamente basse si possono impiegare dispositivi meccanici per la chiusura, dette presse a ginocchiera, le quali hanno la capacità di chiudere efficientemente lo stampo e con elevata velocità, sfruttando l'allineamento di due aste comandate dall'elemento mobile della pressa azionato da un motore elettrico. In caso in cui la pressione di lavoro raggiunga valori più elevati è necessario garantire pressioni di contatto più elevate, garantite tramite pistoni oleodinamici che però chiudono lo stampo più lentamente, allungando i tempi di battuta e quindi i tempi di processo.

## Natura delle materie plastiche?

### Elenco di polimeri [ [modifica](#) | [modifica wikitestò](#) ]

In base alle normative [DIN 7728](#) e [16780](#) (nonché la [ISO 1043/1<sup>\[13\]</sup>](#)), ad ogni materia plastica è associata una sigla, che la identifica univocamente.

- |  |   |   |
|--|---|---|
| • CA – <b>Acetato di cellulosa</b>         | • PEK – <b>Polieterchetone</b>                                | • PS – <b>Polistirene</b>                       |
| • CAB – <b>Acetobutirato di cellulosa</b>  | • PEEK – <b>Polietereterchetone</b>                           | • PSU – <b>Polisolfone</b>                      |
| • CN – <b>Nitrato di cellulosa</b>         | • PES – <b>Polietersolfoni</b>                                | • PT – <b>Politifene</b>                        |
| • CP – <b>Propionato di cellulosa</b>      | • PET – <b>Polietilentereftalato</b>                          | • PTFE – <b>Politetrafluoroetilene (Teflon)</b> |
| • EP – <b>Epossidi</b>                     | • PF – <b>Fenolformaldeide</b>                                | • PUR – <b>Poliuretano</b>                      |
| • MF – <b>Melamina-formaldeide</b>         | • PI – <b>Poliimmide</b>                                      | • PVB – <b>Polivinilbutirrale</b>               |
| • PA – <b>Poliammidi</b>                   | • PIB – <b>Poliisobutilene</b>                                | • PVC – <b>Polivinilcloruro</b>                 |
| • PAI – <b>Poliammidiimmide</b>            | • PMI – <b>Polimetacrilimmide</b>                             | • PVC-C – <b>Polivinilcloruro clorurato</b>     |
| • PAN – <b>Poliacrilonitrile</b>           | • PMMA – <b>Polimetilmetacrilato</b>                          | • PVDC – <b>Polivinildencloruro</b>             |
| • PB – <b>Polibutene-1</b>                 | • PMP – <b>Poli-4-metilpentene-1</b>                          | • PVDF – <b>Polivinildenfluoruro</b>            |
| • PBT – <b>Polibutilentereftalato</b>      | • POM – <b>Poliossimetilene, Poliformaldeide, Poliacetale</b> | • PVF – <b>Polivinilfluoruro</b>                |
| • PC – <b>Policarbonato</b>                | • PP – <b>Polipropilene</b>                                   | • RC – <b>Cellulosa rigenerata</b>              |
| • PCTFE – <b>Policlorotrifluoroetilene</b> | • PPE – <b>Polifeniletero</b>                                 | • SI – <b>Siliconi</b>                          |
| • PDAP – <b>Polidiallitalato</b>           | • PPO – <b>Polifenilenoossido</b>                             | • UF – <b>Urea-formaldeide</b>                  |
| • PE – <b>Polietilene</b>                  | • PPS – <b>Polifenilenoossido</b>                             | • UP – <b>Poliestere insaturo</b>               |
| • PE-C – <b>Polietilene clorurato</b>      |   | • PDMS – <b>Polidimetilsilossano</b>            |
| • PEI – <b>Polieterimmide</b>              |   |   |

Le materie plastiche sono dei materiali costituiti da lunghe catene di monomeri, che diventano così catene polimeriche.

Le materie plastiche sono ottenute in grandi stabilimenti costruiti secondo tecnologie mono-processo, applicando determinati processi chimici al petrolio greggio oppure possono essere ottenute dalla lavorazione di cellulose o fibre naturali.

La classificazione che comunemente si fa delle materie plastiche è quella secondo le caratteristiche del processo con cui sono prodotte o secondo le loro caratteristiche meccaniche; in generale si fanno due classificazioni:

- **Termoplastici:** le materie termoplastiche hanno la caratteristica di rammollire quando vengono esposte ad una sorgente termica. I granuli di termoplastico sono resi disponibili già come plastica polimerizzata e le successive lavorazioni non vanno a modificare la struttura della catena polimerica. Le caratteristiche meccaniche di questa classe di materiali sono più basse di quelli termoindurenti ed hanno anche una resistenza alle temperature inferiori. Data la loro capacità di rammollire in temperatura sono riciclabili, anche se non infinite volte in quanto i cicli termici vanno comunque a degradare la plastica che perde quindi le sue caratteristiche meccaniche.
- **Termoindurenti:** quando prodotti la reazione di polimerizzazione viene interrotta per poi essere conclusa in sede di formatura, quando si modella il componente finale. Quando vanno in temperatura non rammolliscono ma carbonizzano perdendo le loro caratteristiche meccaniche.

Un'altra classificazione che si può fare delle materie plastiche è quella in funzione delle caratteristiche meccaniche, in particolare si può fare una suddivisione tra:

- **Plastiche:** che sono quelle che hanno una certa rigidezza e sono caratterizzate da un allungamento a rottura massimo del 100%, queste possono presentare buone caratteristiche meccaniche e termiche e si suddividono principalmente in:
  - **Termoplastici comuni:** come Polietilene (HDPE, LDPE, LLPE), Polipropilene, Polistirene, Polivinili (PVC), mescole (ABS)
  - **Termoplastici ingegneristici:** come Poliammidi (Nylon), Polimetili, Poliesteri (PET, PBT), Policarbonati (PC), Resine Acriliche, Fluoropolimeri (PTFE, FEP, PFA), Polieninile (PPE, PPO), Celluloidici.
  - **Termoindurenti:** Resine Epossidiche, Poliuretano, Poliesteri termoindurenti, Fenolici e Amino Plastiche
- **Elastomeri:** gli elastomeri invece fanno parte delle materie plastiche che sono caratterizzate da un allungamento a rottura superiore al 100% (in alcuni casi si può arrivare anche al 1000%) e presentano una rigidezza inferiore, oltre ad una pessima resistenza alla temperatura e ai raggi UV. Gli elastomeri si possono dividere a loro volta in:
  - **Elastomeri termoplastici**
  - **Elastomeri termoindurenti:** fluoro elastomeri e siliconi

## Forma della Coclea per i vari materiali

Le lavorazioni di estrusione ed iniezione delle materie plastiche sono rese possibili da un gruppo di plastificazione composto da una coclea rotante in una camera di fusione e da dei riscaldatori. La combinazione di calore e sollecitazioni meccaniche sulla plastica vanno a formare e mescolare la plastica fusa in modo da realizzare poi la lavorazione. In funzione del comportamento visco accelerante di ciascun materiale e dell'adesività che questo presenta nei confronti del materiale della coclea, si deve andare a profilare quest'ultima in maniera oculata per ottimizzare la velocità del processo e ridurre al minimo i tempi in cui il materiale sta in temperatura:

- Nel caso del PVC la parte conica della coclea è più lunga e la parte finale, con diametro di nocciolo maggiore è più lunga
- Nel caso del Nylon, dato che questo è maggiormente adesivo, si dovrà andare ad avere una coclea della forma opportuna e che fornisca una ridotta azione meccanica, in favore di una azione termica di entità superiore.

Material	$T_m$ (°C)
Nylon 6,6	265
Polycarbonate	265
Polyester	265
Polyethylene	
High density	137
Low density	115
Polymethylmethacrylate	—
Polypropylene	176
Polystyrene	239
Polytetrafluoroethylene	327
Polyvinyl chloride	212
Rubber	—

## Temperatura media nei termoplastici

Si parla di materiali termoplastici quando ci si riferisce a quella classe di materie plastiche che, quando riscaldate, tendono a rammollire e a tornare lavorabili.

Questa loro caratteristica ci consente di effettuare su di esse molte lavorazioni diverse per ottenere la formatura dell'oggetto, per questo sono largamente impiegate e molto versatili. A tutti questi vantaggi si contrappone però il degrado che le catene polimeriche subiscono quando rimangono esposte a temperature vicine a quelle di rammollimento per tempi lunghi.

Generalmente i termoplastici vengono lavorati ad una temperatura compresa tra i 150°C e i 250°C e

mantengono questa temperatura per il tempo strettamente necessario alla lavorazione.

## Caratteristica interessante del PE e del PP

Il PE (polietilene) e il PP (polipropilene) sono due materiali termoplastici comuni, molto interessanti dal punto di vista della produzione per le loro caratteristiche meccaniche e tecnologiche. Il polietilene è il materiale termoplastico più semplice disponibile sul mercato, questo è realizzato di soli atomi di carbonio ed idrogeno e può presentare delle caratteristiche diverse in base al processo con cui viene realizzato, in generale ha buone caratteristiche termiche ed è un buon isolante elettrico:

- LDPE: il polietilene a bassa densità viene prodotto nel reattore ad alte temperature e pressioni, presenta una struttura interna formata da catene polimeriche molto ramificate, che gli conferiscono basse caratteristiche meccaniche e bassa densità. L'LDPE ha ottima elasticità e resistenza ad urti, il che lo rende ideale per la realizzazione di componenti come paraurti per automobili.
- HDPE: il polietilene ad alta densità invece viene prodotto nel reattore a pressioni e temperature inferiori presenta una densità molto maggiore, data dalla presenza di catene polimeriche molto lunghe e con poche ramificazioni, che gli conferiscono una resistenza meccanica e un allungamento a rottura interessanti dal punto di vista ingegneristico. Questo presenta buona capacità isolante e buona resistenza agli agenti chimici.
- UHMWPE: questo termoplastico ha caratteristiche meccaniche molto elevate ma presenta notevoli difficoltà di lavorazione allo stato fuso, è per questo che viene lavorato generalmente per sinterizzazione.

Il Polipropilene è sostanzialmente simile al polietilene ma ha caratteristiche meccaniche migliori del precedente ed è capace di lavorare a temperature maggiori. Questo ci suggerisce il suo utilizzo per componenti che devono essere comunque leggeri ma che hanno bisogno di caratteristiche meccaniche di rigidità e resistenza alla deformazione più pronunciate del precedente. Questa plastica, se necessario, può essere rinforzata con fibre di vetro o di altra tipologia per incrementarne le prestazioni meccaniche.

## Soffiatura (sia con estrusione che con iniezione)

La soffiatura nei materiali termoplastici è un processo di lavorazione che consiste nel formare cavità facendo uso di aria in pressione come mezzo per far aderire allo stampo la materia plastica. L'iniezione

di aria può essere fatta sia dopo una estrusione sia con un semilavorato proveniente da una lavorazione di iniezione:

- Per un semilavorato prodotto per estrusione si realizza la soffiatura quando si vogliono realizzare film a bassissimo spessore o quando si ha intenzione di realizzare tubolari (sempre a basso spessore); al termine del ciclo di estrusione si fa passare il termoplastico tra due rulli che lo riscaldano leggermente e un ugello vi inietta aria a bassa pressione che "gonfia" il materiale conferendogli grosse dimensioni e bassissimo spessore.
- La soffiatura su un semilavorato per iniezione invece consente la realizzazione di oggetti cavi con forma anche complessa mediante l'utilizzo di uno stampo chiuso: il semilavorato per iniezione, che prende il nome di precursore. Generalmente i prodotti realizzati con questa tecnica non hanno spessori costanti né in senso radiale né longitudinalmente, infatti hanno uno spessore maggiore sul fondo (sia per effetti dovuti alla fluidodinamica della plastica, sia a causa della gravità, che porta il materiale a concentrarsi sul fondo). Generalmente l'operazione si effettua su macchine a giostra in cui si hanno a disposizione più stampi, in quanto la fase di soffiatura è abbastanza veloce mentre è richiesto un po' più di tempo per il completo raffreddamento della plastica. Qualora si dovessero fare delle soffiature di oggetti con elevato sviluppo longitudinale partendo da un precursore di piccole dimensioni si può utilizzare anche un apposito perno che spinge verso il fondo il termoplastico andando a favorire una distribuzione omogenea dello stesso nello stampo.

In generale il processo di soffiatura è semplice e veloce, gli stampi hanno un costo sostanzialmente ridotto e consentono l'impiego di un buon numero di termoplastici diversi, di contro si producono molti scarti e non si ha un controllo efficiente degli spessori e delle tolleranze dimensionali e geometriche nel lato non a contatto con gli stampi. Generalmente i componenti realizzati con questa tecnica hanno caratteristiche meccaniche piuttosto scadenti.

### Com'è fatta la vite per l'estrusione delle plastiche

La vite (o coclea) per l'estrusione delle materie plastiche ha il compito di spingere la plastica in avanti nella camera di fusione e contestualmente rimescolarla ed amalgamarla, dal momento che all'inizio è sotto forma di granuli o flocculi. La coclea è sostanzialmente una vite con sezione di nocciolo crescente in maniera più o meno ripida, questa conformazione è dovuta principalmente al fatto che i granuli di termoplastico inizialmente allo stato solido occupano un volume maggiore rispetto a quello che occupa la materia plastica una volta portata a fusione. Nella parte terminale della vite questa presenta una conicità di uscita per favorire l'immissione nell'ugello di estrusione. Ogni materiale plastico generalmente prevede una coclea con una forma ben definita in quanto non tutti hanno lo stesso comportamento quando soggetti ad azioni meccaniche, alcuni tendono ad essere molto fluidi (come per esempio il PVC) mentre altri tendono ad appiccicarsi alla vite (Nylon) e per questi è necessario ridurre l'azione meccanica fornita dalla vite ed incrementare l'azione termica dei riscaldatori. L'impiego di coclee special puprose consente in questo senso di incrementare la produttività del processo, andando ad aumentare le velocità di lavoro, in quanto la forma della coclea è ottimizzata per le caratteristiche di adesività e le caratteristiche visco acceleranti del materiale plastico. In caso di materiali plastici molto sensibili all'esposizione alle alte temperature, si prevede una azione di pompaggio meccanico molto elevata mediante l'utilizzo di due viti controrotanti o rotanti nello stesso verso.

### L'iniezione delle plastiche

Il processo di iniezione delle plastiche si effettua per materiali termoplastici e consiste sostanzialmente nell'iniezione in pressione della materia plastica fusa in uno stampo recante le cavità della forma

dell'oggetto che si intende realizzare. Le criticità di questo processo sono sostanzialmente legate alla capacità di riempire completamente lo stampo di materiale plastico prevenendone la solidificazione prima del completo riempimento, per stampi grandi si possono prevedere più punti di iniezione dai quali immettere la materia plastica, in questo caso ci si deve assicurare che la plastica, quando entra in contatto nelle varie zone si trovi ancora allo stato fuso e che non si realizzino saldature a freddo che andrebbero ad infragilire la zona di unione. In funzione della pressione con cui si vuol realizzare l'iniezione (e quindi in correlazione con la complessità dello stampo) si possono prevedere diverse tecniche di chiusura che possono essere meccaniche (in caso di bassa pressione nello stampo) oppure con pistone oleodinamico (in caso di alta pressione). La chiusura meccanica dello stampo consente una operazione più veloce ma garantisce meno tenuta, il discorso inverso vale per la chiusura oleodinamica, più lenta ma più affidabile. Sempre in funzione della pressione alla quale avviene l'iniezione può avere un diverso sistema di funzionamento della coclea, nel caso di iniezioni a bassa pressione si ricorre alla classica coclea a vite traslante mentre quando si ha intenzione di iniettare la plastica ad alta pressione si ricorre ad un pistone che inietta la plastica nello stampo, in questo caso il mescolamento è affidato ad uno spargitore, in questo caso il processo risulta maggiormente critico in quanto il materiale rimane in pressione per un tempo maggiore, contribuendo alla sua degradazione.

### Gli incollaggi (vagamente)

Per unire insieme i pezzi prodotti in materiale plastico si possono utilizzare diverse tecniche di giunzione le quali sfruttano vari principi di funzionamento. Tra le tecniche di unione più impiegate nei materiali polimerici si hanno sicuramente gli incollaggi, i quali consistono nell'applicazione di una resina (generalmente termoindurente) che una volta polimerizzata genera una giunzione stabile che va ad interagire anche con la struttura chimica della materia plastica. La giunzione ottenuta con questa tecnica ha un'ottima resistenza alle sollecitazioni di taglio e di compressione ma molto scadente a trazione (e quindi a flessione): è per questo motivo che una particolare attenzione deve essere rivolta alla progettazione dei lembi di incollaggio in modo che questi sfruttino le sollecitazioni di taglio per garantire l'integrità del collegamento.

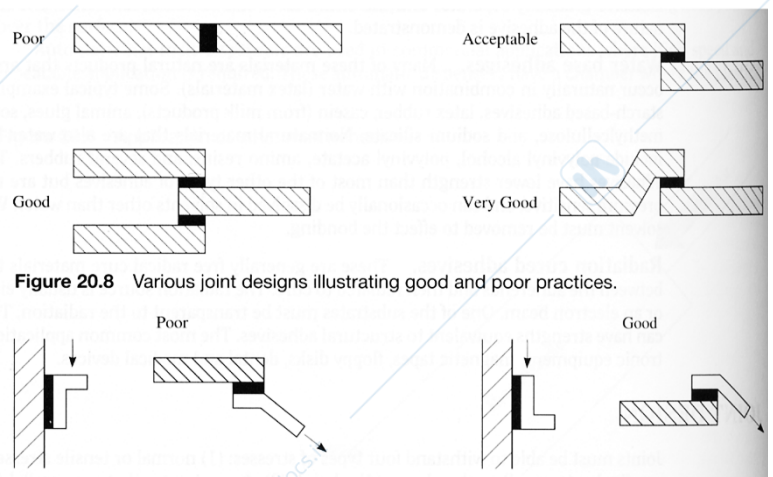


Figure 20.8 Various joint designs illustrating good and poor practices.

### Collanti

I collanti maggiormente impiegati per la giunzione dei materiali plastici sono:

- **Resine Epossidiche:** caratterizzate da una elevata adesività ed elevata resistenza meccanica.
- **Resine Poliuretatiche:** buona flessibilità dei lembi incollati ma bassa resistenza alle temperature.
- **Resine Acriliche:** ottime caratteristiche meccaniche ma tempi di polimerizzazione molto lunghi. Questi incollanti sono generalmente delle colle bicomponente.
- **Colle Cianoacriliche:** generalmente garantiscono buona resistenza meccanica dell'incollaggio ma al contempo sono fragili e molto costose, l'agente che innesca la polimerizzazione è l'umidità dell'aria e per questo richiedono attenzione quando vengono manipolate, per evitare polimerizzazioni non richieste. Hanno un forte potere incollante anche sulla pelle.
- **Collanti Fenolici:** di colorazione nera, hanno la caratteristica di essere molto resistenti ma altrettanto fragili.

- **Siliconi:** ottima resistenza alla temperatura e buona elasticità ma minori caratteristiche meccaniche del giunto incollato.

## Processo di Estrusione

Il processo di estrusione delle materie termoplastiche utilizza un gruppo di plastificazione simile a quello del processo di iniezione, con la differenza che in questo caso la coclea ha solo il compito di ruotare e il materiale viene prodotto a ciclo continuo. La forma viene conferita tramite una sagoma ricavata in una matrice (che è soggetta a bassa usura e può essere anche in materiale povero) da cui il materiale passa. La caratteristica limitante di questo processo risiede (come per l'estrusione dei metalli) nel fatto che le sagome sono piuttosto semplici e non hanno alcuno sviluppo longitudinale. Il materiale dopo essere passato dall'estrusore viene raffreddato immediatamente con l'ausilio di acqua o aria, in modo da solidificarlo e consentire da un lato il mantenimento della forma mentre dall'altro si riduce lo stress termico a cui è sottoposto il materiale, migliorandone la durata. La fase più critica del processo di estrusione è l'uscita dallo stampo, in questa fase quando si hanno spigoli vivi o variazioni elevate di sezione si incorre in vorticosità che vanno a degradare la qualità del prodotto. Un altro parametro che deve essere sempre tenuto sotto controllo è la viscosità del materiale, per far questo si devono controllare sia la temperatura sia l'azione meccanica.

## Lavorazione dei termoindurenti

I processi di lavorazione dei termoindurenti sono più complessi e richiedono tempi ciclo più lunghi in quanto prevedono la polimerizzazione del materiale all'interno dello stampo. Gli stampi sono leggermente più complessi rispetto a quelli per le lavorazioni dei termoplastici in quanto devono essere messi in temperatura per consentire l'avvio della reazione di polimerizzazione e dall'altra parte devono prevedere anche delle vie di fuga per i gas che si sprigionano durante il processo di polimerizzazione del termoindurente. I principali processi sono due:

- **Compression molding:** un foglio di resina termoindurente viene inserito in uno stampo che può essere costruito in modo da prevedere lo scarico delle bave (stampo semi positivo) oppure richiedere la corretta quantità di resina, sufficiente a realizzare la sagoma senza produrre scarti (stampo positivo). Le complessità che si riesce ad ottenere sono basse a causa della bassa fluidità della lamiera di resina termoindurente ed il ciclo può durare anche un minuto nel complesso.
- **Transfer molding:** La resina viene immessa in una camera di trasferimento (viene preventivamente macinata per favorirne la successiva immissione nello stampo) e riscaldata fino alla temperatura di polimerizzazione, il processo si svolge poi in maniera simile alla pressofusione o all'iniezione delle plastiche, con la resina che viene spinta in pressione all'interno dello stampo ed ulteriormente riscaldata per concludere il processo di polimerizzazione. Questo processo viene maggiormente impiegato per la qualità dei pezzi ottenuti e per la loro maggiore complessità ottenibile. Un altro vantaggio di questo processo è la capacità di iniettare la plastica su alcuni componenti aggiuntivi in modo da introdurre caratteristiche aggiuntive nel componente.

## 8 - Materiali compositi

### Materiali compositi e calcolo della resistenza a trazione

I materiali compositi sono dei materiali ottenuti dall'unione di due elementi distinti che rimangono tali anche dopo la conclusione del processo di formatura (differentemente da ciò che avviene per le leghe metalliche), i due componenti che formano il composito prendono il nome di matrice e fibra.

Generalmente possiamo dire che:

- **La matrice:** è l'elemento del materiale che ha il compito di mantenere unite le fibre e dar loro la forma corretta dell'oggetto che vogliamo andare a realizzare. Generalmente hanno caratteristiche meccaniche scadenti o comunque hanno caratteristiche inferiori rispetto a quelle delle fibre. Generalmente le matrici possono essere realizzate in materiale termoindurente come resine epossidiche o fenoliche, ma si stanno sviluppando anche dei compositi a matrice ceramica e metallica. Nell'ultimo periodo si stanno impiegando anche matrici di natura termoplastica così da rendere possibile il recupero della fibra e della matrice per realizzare un nuovo composito.
- **La fibra:** è generalmente il componente del materiale composito che ha il compito di fornire la resistenza meccanica alle sollecitazioni per le quali il materiale viene realizzato. Tra le fibre di maggior impiego abbiamo la fibra di vetro, quella di carbonio e la fibra di kevlar. Ciascuna di esse ha delle caratteristiche differenti che le rendono preferibili in diversi campi dell'industria.

Un esempio di materiale composito tra i più antichi è il calcestruzzo armato, in questo caso la matrice composta di calcestruzzo fornisce alla struttura una elevata resistenza alla compressione e riesce a mantenere bene la forma quando caricata, le fibre invece composte da tondini di acciaio dolce forniscono al materiale composito la necessaria resistenza a trazione per resistere alle oscillazioni dell'edificio, di cui il calcestruzzo non è dotato.

Il calcolo delle caratteristiche meccaniche di un materiale composito si effettua prendendo in considerazione alcuni aspetti importanti, riguardanti soprattutto come questo è composto:

- **Concentrazione** delle fibre presenti all'interno della matrice. Generalmente si riesce a raggiungere un rapporto tra matrice e fibre del 50% al massimo, successivamente diventa difficile impregnare correttamente il materiale.
- **Proprietà** meccaniche delle fibre
- **Proprietà** meccaniche della matrice
- **Orientazione** delle fibre: il vantaggio grosso connesso con l'impiego di materiali compositi è proprio la possibilità di "programmare" il comportamento del materiale, direzionando le fibre e quindi concentrando la resistenza meccanica del materiale dove effettivamente si ha bisogno di resistenza meccanica elevata.

In generale i vantaggi connessi con l'impiego di materiali compositi si identificano in una maggiore resistenza specifica del materiale, ovvero riesce a fornire caratteristiche meccaniche comparabili se non addirittura superiori ad alcuni materiali metallici riducendo però drasticamente il peso del componente. Il principale svantaggio dei materiali compositi risiede proprio nella natura termoindurente delle principali matrici impiegate che le rende non riciclabili.

### Confronto tra le principali fibre

Le fibre impiegate nei materiali compositi possono essere di varia natura ed hanno tutte lo scopo di fornire la resistenza ad una certa azione meccanica, generalmente in un composito alla fibra viene dato il compito di fornire la resistenza a trazione del componente.

Le principali fibre impiegate nei compositi di impiego industriale sono tre:

LA USO DOVE HO BISOGNO DI ELEVATISSIMA RIGIDENZA

- Fibre di carbonio:** la fibra di carbonio si ottiene a partire da diversi precursori i quali subiscono trattamenti di degradazione termica in ambiente ad atmosfera modificata, con cui si vanno a realizzare le fibre, questi processi sono molto costosi ed energivori, il grosso del costo delle fibre di carbonio è composto proprio dalla lavorazione, i precursori di per sé costano poco. I principali precursori della fibra di carbonio sono:
  - Rayon:** il quale è composto da fibre celluloidiche riscaldate in ambiente controllato in modo da farle degradare in composti carboniosi che poi vengono cotti alla temperatura di 2800°C e sottoposti a trazione per ottenere la fibra.
  - PAN:** questo viene ottenuto a partire da un materiale plastico a base di gruppi nitrili (N-C) e successivamente ossidato a temperatura controllata.
  - Pitch:** ottenuto dall'ossidazione della pece o del catrame a temperature di circa 2500°C.

Le fibre ottenute da diversi precursori presentano caratteristiche meccaniche leggermente diverse, principalmente dovute alla differente disposizione delle catene di atomi di carbonio all'interno della struttura del precursore. Il processo di trasformazione del precursore prevede diverse fasi, tra cui la filatura, l'ossidazione a una temperatura di 200-300°C al massimo in cui si vanno a far evaporare eventuali composti volatili, le ultime operazioni sono la carbonizzazione in cui si riscalda a 1500°C per favorire la formazione di celle esagonali di grafite e la successiva grafitizzazione a 2500°C con la quale si stirano le fibre con l'obiettivo di creare uno strato di ossido che ne migliori l'adesività. In funzione del precursore e della qualità del processo con cui sono realizzate possono avere una resistenza a trazione compresa tra i 1100 MPa e i 5000 MPa con moduli di elasticità fino a tre volte quello dell'acciaio.
- Fibre di Vetro:** i filamenti di vetro sono ottenuti con un processo di trafilatura a partire da delle biglie portate a fusione. La carica vetrosa così ottenuta viene trafilata con un apposito stampo e avvolta su un rotolo. La forza di tiro, insieme alla dimensione della matrice, determinano la sezione della fibra finale. Il processo di produzione e la materia prima la rendono veramente vantaggiosa anche se di contro si hanno delle caratteristiche meccaniche di rigidità e soprattutto resistenza agli urti molto basse. La resistenza a trazione della fibra invece, in funzione del tipo di vetro può andare dai 2400 MPa a oltre 4500 MPa.
- Fibre di Kevlar:** le fibre di Kevlar sono ottenute a partire dal PPTA ad alto peso molecolare e successivamente trattate con acido solforico. Generalmente subiscono un trattamento superficiale per migliorarne l'adesività. Hanno caratteristiche meccaniche di picco generalmente più basse della fibra di carbonio, attestandosi attorno ai 2700 MPa come valore massimo mentre il loro modulo elastico è circa la metà di quello dell'acciaio. In termini di costo si hanno dei prezzi più bassi rispetto alla fibra di carbonio soprattutto per il costo leggermente inferiore del processo anche se siamo ben lontani dal basso costo della fibra di vetro.

IL KEVLAR E IL VETRO HANNO BENE O MALE LE STESSE CARATTERISTICHE MECCANICHE, PERÒ IL VETRO COSTA MOLTO MENO.  
 KEVLAR → OTTIMA RESILIENZA  
 VETRO → MOLTO FRAGILE

Materiale delle fibre	Resistenza a trazione $\sigma_r$ (MPa)	Modulo elastico $E$ (MPa)	Densità $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Resistenza specifica $\sigma_r/\rho$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	Modulo specifico $E/\rho$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
Vetro E	3000	72 400-76 000	2,54	1,18	28,5
Vetro S	4600	84 000-88 000	2,48	1,85	35,5
Boro con anima in tungsteno	3500	410 000	2,60	1,35	158,0
Boro con anima in grafite	3200	365 000	2,10	1,56	174,0
Aramidiche	3600	130 000	1,48	2,43	87,0
Allumina policristallina	1400	380 000	3,70	0,373	103,0
Grafite PAN, HS, alta resistenza	3500	228 000	1,78	1,96	128,0
Grafite, modulo intermedio	2500	250 000	1,78	1,39	140,0
Grafite alto modulo	2100	390 000	1,90	1,10	205,0
Grafite modulo estrem. alto	1700	517 000	1,86	0,92	278,0
Grafite da precursore Pitch (Pece)	1500	345 000	2,02	0,85	171,0
Tungsteno	4200	414 000	19,30	0,22	21,0
Berillio	1300	241 000	1,83	0,71	132,0

## Materiale per le matrici che si usa

Nei materiali compositi generalmente si impiegano due componenti che svolgono funzioni differenti. La fibra ha il compito di fornire la resistenza meccanica di trazione mentre la matrice ha il compito fondamentale di mantenere insieme i vari elementi della fibra, di dare la forma all'oggetto finito e di fornire una certa resistenza a compressione. Le matrici possono essere di tre tipologie differenti, secondo le necessità di impiego:

- **Matrice termoindurente:** la matrice termoindurente è quella generalmente più diffusa nei materiali compositi ed è quella che fornisce le migliori caratteristiche per le fibre composite di uso comune. Le principali resine termoindurenti che si utilizzano per fare le matrici sono resine Epossidiche e resine Fenoliche, si impiegano anche matrici in Poliestere per la loro ottima adesività.
- **Matrice termoplastica:** sta prendendo piede anche l'impiego di matrici termoplastiche, il loro vantaggio principale risiede nella possibilità di recuperarle e di recuperare anche la fibra, andando di fatto a lavorare sul principale tallone di Achille dei materiali compositi, ovvero la non riciclabilità. Le matrici termoplastiche hanno di contro caratteristiche meccaniche e adesive inferiori a quelle che si possono ottenere con i termoindurenti.
- **Matrice ceramica:** i compositi di nuova generazione sono realizzati con una matrice ceramica che di per sé ha una massa volumica maggiore ma ha una resistenza meccanica molto più alta delle normali resine termoindurenti o delle matrici termoplastiche. Di contro queste matrici presentano un costo molto elevato.

## Poltrusione nei materiali compositi

Il processo di poltrusione per i materiali compositi ha dei punti in comune con la trafilatura: in generale la fibra (che generalmente è di carbonio o kevlar) viene alimentata da una serie di bobine su cui è arrotolata, tramite una serie di rinvii viene inviata ad una vasca in cui la si impregna nella matrice e si fa iniziare il processo di polimerizzazione. Mentre il processo di polimerizzazione avanza si fa passare il materiale tramite una matrice e lo si stira, in modo da calibrare le dimensioni e concludere il processo di formatura, successivamente si taglia il materiale alle dimensioni volute.

## Fasi del ciclo in autoclave dei materiali compositi e tempo ciclo

La lavorazione in autoclave è un particolare processo produttivo impiegato per la realizzazione di componenti in materiale composito. L'autoclave è un forno che ha la capacità di funzionare applicando una certa pressione sul materiale che viene preventivamente inserito in una sacca e posto sottovuoto. Il ciclo secondo cui si svolge la lavorazione prevede diverse fasi ed in generale è molto lungo, può richiedere fino a 12 ore per carica del forno:

1. Il materiale viene inserito nel sacco sulla sagoma, intorno alla quale sono disposti dei bleeder assorbenti, che hanno il compito di raccogliere la resina in eccesso che si va ad accumulare sui bordi.
2. Si fa il vuoto all'interno del sacco ad una pressione di 15 kPa così da distribuire la resina in tutto lo stampo in maniera uniforme.
3. A questo punto si inserisce tutto in autoclave e si porta la temperatura a 250 °C mantenendola per circa mezz'ora, con lo scopo rendere più fluida la resina.
4. Si innalza la pressione fino a 15 bar e si porta la temperatura a 315-340 °C per iniziare il ciclo di polimerizzazione e si mantengono queste condizioni di funzionamento per tre ore.
5. Si raffredda il forno fino a 65 °C mantenendo la pressione costante.
6. Si apre il forno e lo si lascia raffreddare con il pezzo al suo interno, in modo da completare il processo.

Generalmente la resina termoindurente si conserva in una cella frigorifera alla temperatura di circa -15/-25 °C per evitare la polimerizzazione precoce. Il processo in autoclave è molto energivoro e costoso a causa dei lunghi tempi ciclo. I principali vantaggi connessi con l'utilizzo di questa tecnica risiedono nell'elevata qualità del laminato, in termini di tolleranze dimensionali, di ridotto scorrimento tra le lamine e di bassa porosità del laminato, grazie alle elevate pressioni di lavoro.

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

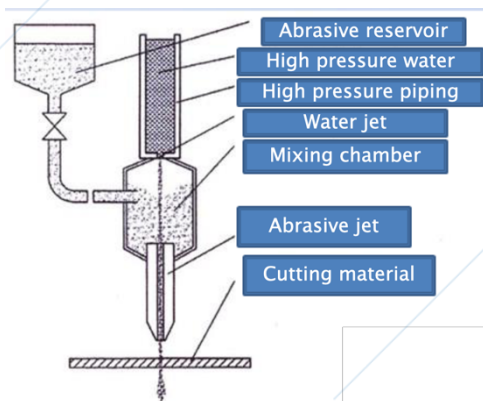
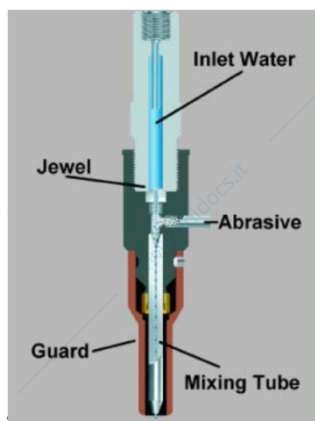
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

## 10 - Lavorazioni non Convenzionali

### Taglio a getto d'acqua:

Il taglio con getto d'acqua o Water Jet è una tecnica di lavorazione non convenzionale che basa il suo principio di funzionamento sull'azione meccanica svolta da un getto d'acqua ad alta pressione (generalmente 4000 bar ma fino a 8000 bar) ed alta velocità (fino a 900 m/s) per tagliare i materiali. La macchina che consente di utilizzare questa tecnica è essenzialmente composta da un gruppo pompa di alta pressione che ha il compito di generare la pressione nel fluido, un sistema di distribuzione dell'acqua in pressione e una testa motorizzata e controllata con un CNC bidimensionale che ha il compito di effettuare il taglio sul materiale. Uno dei vantaggi connessi con l'impiego di questa tecnologia risiede proprio nel fluido di lavoro, che essendo acqua deionizzata è biocompatibile e quindi può anche essere impiegata nel campo alimentare e medico. Il primo limite di questo processo è connesso al mezzo tagliente, infatti data la pericolosità del getto d'acqua e soprattutto dalla sua capacità di tagliare anche a metri di distanza, non si impiega (o lo si fa molto raramente) per tagli di geometrie complesse ma solo per tagli bidimensionali. Le geometrie che si possono realizzare con questa tecnica comprendono comunque anche geometrie molto piccole e caratterizzate dalla presenza di spigoli vivi (che vengono riprodotti anche molto fedelmente). I materiali che si possono tagliare con questo processo sono tutti quelli che hanno una durezza inferiore a quella dell'acqua o della miscela di acqua e abrasivo (solitamente Garnet, sabbia di olivina o di silice e il carburo di silicio) quindi tutte le materie plastiche, tutti i metalli di impiego comune, vetro, lapidei, legno e compositi. C'è da sottolineare che questa tecnica consente di tagliare i metalli ma ha una velocità di taglio inferiore rispetto al laser ma ha di vantaggio che non va a generare nessun input termico e non degrada la composizione chimica o la struttura chimica del materiale. Le tolleranze dimensionali e la rugosità superficiale che si ottiene sui bordi di taglio sono ottime. Gli unici svantaggi che si registrano sono connessi all'elevata manutenzione dell'intero impianto e alla limitatezza delle geometrie che si possono ottenere.

### Disegnare tramoggia con olivina e come viene aspirata per effetto Venturi:



La tecnica AWJ (Abrasive Water Jet) impiega insieme all'acqua in pressione un apporto di sabbia (generalmente Garnet, Olivina o carburo di silicio) contenuta in una tramoggia e richiamata dall'acqua in pressione che scorre ad alta velocità nel condotto (fino a 900 m/s) per effetto venturi all'interno dell'ugello di taglio. La granulometria della polvere nell'AWJ di circa 60-120 mesh (diametro di 0,250-0,125

mm), dove mesh è un'unità di misura che fa riferimento alla misura della griglia di selezione delle polveri. L'ugello focalizzatore (di diametro di pochi decimi di millimetro) è in generalmente in carburo di tungsteno o materiali simili in modo da resistere per un tempo ragionevole alle sollecitazioni generate dal fluido di lavoro. In media le teste in zaffiro sintetico vengono sostituite tra le 30 e le 200 ore di lavoro e l'ugello focalizzatore tra le 80 e le 120 ore e solitamente si realizza in carburo di tungsteno.

### Laser in generale

Le lavorazioni con il LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sono una classe di lavorazioni non convenzionali che sfruttano l'azione termica di una sorgente luminosa per tagliare, saldare, incidere o temprare i materiali metallici e non.

La luce laser come ci suggerisce il significato dell'acronimo è una ottenuta con un particolare

meccanismo e presenta alcune caratteristiche che la rendono capace (anche con ridotte potenze) di tagliare o saldare i materiali. Le caratteristiche che gli consentono di tagliare sono legate al tipo di luce che emette:

- **Monocromaticità:** la luce emessa dalla sorgente è caratterizzata da una lunghezza d'onda ben precisa (solitamente nell'infrarosso, anche se si possono avere laser nel visibile o nell'UV), tutti i fotoni hanno la stessa lunghezza d'onda e questo contribuisce ad incrementare il livello di potenza disponibile
- **Monodirezionalità:** il moto di ciascun fotone è nella stessa identica direzione, questo consente di concentrare la disponibilità di energia in un punto preciso
- **Coerenza:** tutti i fotoni sono emessi con la stessa fase, infatti se fossero emessi con fasature diverse tenderebbero a neutralizzarsi reciprocamente andando a ridurre la potenza disponibile.
- **La combinazione di questi tre fattori spiega il motivo per cui una sorgente laser da 100W è in grado di tagliare piccoli lamierini metallici e una lampadina ad incandescenza della stessa potenza no.**

La produzione del fascio laser avviene mediante l'emissione stimolata di un fotone (detto di pompaggio) che innesca una reazione a catena tramite la quale gli elettroni vengono stimolati e fatti rimbalzare in una camera composta da uno specchio perfettamente riflettente ed uno semiriflettente, il quale consente solo agli elettroni che hanno raggiunto una energia sufficiente di uscire e contribuire al raggio laser.

La generazione del fascio laser può essere affidata a diverse sorgenti, la scelta di una di queste definisce principalmente la lunghezza d'onda (e quindi il colore) della luce prodotta. Le principali sorgenti di LASER possono essere:

- **Solida:** generalmente le sorgenti solide sfruttano una combinazione di Nd-Yag e sono caratterizzate da una potenza piuttosto bassa, fornita con un rendimento piuttosto alto per le sorgenti laser comuni (12% Nd-Yag contro 1-2% delle altre sorgenti) e per questo lo rendono utile soprattutto per alcune applicazioni in cui le caratteristiche del materiale lo rendono difficile da tagliare con questa tecnica. Il laser ottenuto con questa sorgente avviene con una emissione stimolata (Einstein) e successivamente si fa risonare nella camera di generazione.
- **Liquida:** le potenze ottenute con questa sorgente sono generalmente basse e non sono industrialmente rilevanti
- **Gassosa:** i laser ottenuti con una sorgente gassosa sono quelli maggiormente impiegati, anche se hanno un rendimento inferiore a quelli Nd-Yag. L'emissione della luce LASER tramite queste sorgenti avviene invece mediante una scarica elettrica che eccita il mezzo attivo, generando quindi la luce, il principio è quello dell'inversione di popolazione.
  - He-Ne: generalmente sono impiegati per applicazioni a bassa potenza, generalmente per metrologia
  - Kr o Ar: anche questi sono caratterizzati da basse potenze e sono impiegati generalmente per dispositivi medicali
  - CO<sub>2</sub>: sono i laser maggiormente impiegati in ambito industriale in quanto consentono di raggiungere potenze fino a 100 kW anche se sono caratterizzati da un rendimento piuttosto scadente ed hanno caratteristiche ottiche che non consentono di lavorare alcuni tipi di materiali.

Quando si va a progettare un componente e si sceglie di utilizzare il LASER come processo produttivo si devono fare delle scelte, focalizzando la propria attenzione sulle caratteristiche ottiche e fisiche del materiale, questo deve presentare una scarsa riflettività alla lunghezza d'onda della sorgente, deve presentare bassa conducibilità termica per concentrare il calore nella zona di lavoro e si devono considerare bene le geometrie in modo da limitare gli spigoli vivi e gli spessori elevati al fine di garantire una corretta riproduzione della geometria. Una osservazione importante, che rende preferibile per alcuni aspetti la lavorazione laser, è che questa non è influenzata in alcun modo dalle caratteristiche

meccaniche del materiale che andiamo a lavorare ma le uniche caratteristiche del materiale che dobbiamo considerare sono il calore latente di fusione e vaporizzazione.

Per il taglio di materiali caratterizzati da una elevata conducibilità termica o un elevato calore latente di fusione e vaporizzazione, si possono impiegare tecniche di emissione laser ad impulsi, le quali hanno la caratteristica di emettere in maniera intermittente raggi ad elevato contenuto energetico creando delle microforature sul bordo di taglio e per concludere l'operazione di separazione per frattura fragile del componente.

## Taglio laser in generale

L'applicazione maggiormente diffusa per cui si impiega il LASER è il taglio dei materiali. Le caratteristiche che rendono questa tecnica così impiegata sono legate strettamente alla qualità della lavorazione che si ottiene, infatti si hanno ottime qualità delle superfici di taglio, ottenute con buona ripetibilità ed elevata velocità. Generalmente si possono effettuare tagli sia su lamiere piane (per le quali si riesce a distribuire in maniera agevole il laser) sia per il taglio di geometrie 3D anche molto complesse per cui si hanno delle difficoltà nella distribuzione della luce ottenuta con le sorgenti a CO<sub>2</sub> e per le quali si preferiscono le sorgenti Nd-Yag che possono essere distribuite su fibra ottica.

L'attrezzatura per il taglio laser è sostanzialmente un pantografo (per le lamiere) su cui è installata la testa di taglio composta da:

- **Sorgente Laser**
- **Lente di Focalizzazione**
- **Ugello per il gas di assistenza**
- **Condotto del gas di assistenza**

Il taglio può avvenire, secondo il tipo di materiale che stiamo lavorando, con gas inerte o con gas attivo. Nel primo caso si ottiene un taglio più preciso e pulito, caratterizzato da ottime finiture superficiali e precisioni anche se il processo è un po' più lento e costoso a causa dell'elevato costo del gas. In questa applicazione il gas ha il compito sia di proteggere il lembo di materiale tagliato sia di asportare i vapori metallici che andrebbero a danneggiare la lente. Il taglio con gas attivo invece prevede l'impiego di ossigeno o aria per il taglio del materiale, il taglio in questo caso non viene fatto direttamente dal laser ma l'energia fornita da questo serve solo come innesco per il processo: il metallo viene portato ad una temperatura alla quale si innesca la combustione tra l'ossigeno e il carbonio dell'acciaio producendo una reazione esotermica che va a vaporizzare il materiale, successivamente il flusso di gas di assistenza asporta il materiale vaporizzato o fuso. Questo processo di combustione non avviene in modo continuo, infatti il laser ha una velocità di avanzamento inferiore a quella del fronte di combustione che si allontana dalla sorgente e si esaurisce, dopo un certo periodo successivamente il laser incontrerà nuovamente il materiale ed il processo di taglio continuerà. La tecnica con gas attivo è nel complesso più veloce e richiede potenze del fascio inferiori a parità di spessore del materiale ma fornisce bordi di taglio irregolari e con tolleranze scadenti che richiedono rilavorazioni successive. I materiali che generalmente si tagliano con gas attivo sono gli acciai, ad eccezione di quelli inossidabili che perderebbero le loro caratteristiche vicino al bordo di taglio, materiali come il titanio, magnesio o alluminio hanno la caratteristica di generare reazioni fortemente esotermiche ed esplosioni, per i quali si preferisce impiegare direttamente l'aria come gas di assistenza.

In funzione delle caratteristiche di calore latente di fusione e vaporizzazione del materiale si possono preferire soluzioni ad emissione continua o emissione impulsata:

- **Emissione continua:** il laser ad emissione continua, durante le operazioni di taglio, emette continuamente luce ed il taglio avviene per fusione o vaporizzazione del materiale, in questo caso si ottiene una superficie di taglio più continua e regolare e la rottura avviene sostanzialmente per fusione del materiale
- **Emissione impulsata:** all'interno della camera di risonanza si ostacola l'uscita della luce tramite opportuni sistemi e si comanda l'uscita del laser per alcuni femtosecondi, andando a formare una serie di microfori sul bordo di taglio per infine ottenere un taglio per frattura

fragile. La qualità del bordo di taglio in questo caso è meno elevata proprio a causa della non-continuità del taglio. Con questa tecnica si possono raggiungere potenze di picco molto più elevate della potenza media che è in grado di fornire un laser continuo ed è per questo che si preferisce questa tecnica quando si devono tagliare materiali fragili (come vetro e ceramici) che hanno altissimi punti di fusione e vaporizzazione con calori latenti importanti. Nel caso dell'emissione pulsata con i metodi più recenti si può arrivare anche ad un'energia di picco di 20 volte l'energia media del fascio.

- **Emissione Q-Switched:** in questo caso ho uno specchio rotante che scandisce meccanicamente il duty cycle di emissione, creando picchi energetici molto elevati. Questa tecnica prende il nome dal fattore Q, che esprime la capacità di ottenere impulsi ad una certa frequenza (generalmente  $10^{-9}$  s) tra una emissione e la successiva, mantenendo aperto lo spot per un tempo molto ridotto.

C'è da considerare alcuni aspetti importanti della lavorazione di taglio laser, che sono direttamente collegati alla natura del fenomeno; il raggio luminoso deve essere focalizzato in un punto ben preciso e ad una altezza ben precisa rispetto alla superficie su cui vogliamo effettuare il taglio e la dimensione e la forma dello spot hanno una influenza significativa sulla qualità e sull'effettiva riuscita della lavorazione finale:

- **Divergenza del Fascio:** la divergenza è strettamente connessa con il TEM, questa rappresenta l'apertura del cono luminoso rispetto allo spot, essa è strettamente correlata al diametro dello spot e al valore k, che dipende dal tipo di TEM che si utilizza (k è minimo per una sorgente gaussiana, che è quella con TEM<sub>00</sub>). La relazione che lega k e l'angolo di divergenza è:  $\theta \cdot d_0 = k \cdot \lambda$  con  $\theta$  angolo di divergenza,  $d_0$  diametro dello spot, k è la divergenza e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda.
- **Fuoco:** la posizione del fuoco rispetto alla superficie del materiale che stiamo tagliando è fondamentale, infatti questa ci consente di determinare il punto di massima energia del fascio, che, a secondo degli altri parametri di funzionamento e del tipo di gas di assistenza regola la buona riuscita dell'operazione di taglio. Nel caso in cui il taglio avvenga con gas attivo, dovremo avere la massima potenza sulla superficie in modo da innescare in maniera efficiente la combustione, mentre se tagliassi con un gas inerte, non potendo sfruttare il calore della reazione esotermica dovrei avere disponibile su tutto lo spessore l'energia messa a disposizione dal laser, da questo si deduce che con taglio a gas inerte sarà preferibile avere quello che si chiama fuoco negativo, cioè la concentrazione della luce a circa metà dello spessore (o comunque in una posizione sottostante alla superficie del materiale)
- **TEM:** Transverse Electromagnetic Modes. Questo parametro identifica la distribuzione spaziale dell'energia prodotta dalla sorgente LASER, in particolare questo parametro ci consente di stabilire i punti in cui avremo la massima potenza disponibile dalla sorgente. La determinazione del TEM può seguire tre standard:
  - **Gaussiana:** in questo caso si considera una distribuzione dell'energia bidimensionale e caratterizzata da un andamento a campana di gauss. I due pedici che si inseriscono identificano il numero di Minimi di Energia disponibile che si manifestano lungo gli assi X e Y dell'ideale sistema di coordinate centrato nel centro dell'ugello da cui viene proiettato il fascio laser. TEM<sub>XY</sub> individua in altre parole dove le gaussiane si trovano nell'intorno del punto di uscita della luce: TEM<sub>11</sub> per esempio indica la presenza di un minimo sull'asse X e uno sull'asse Y
  - **Hermite-Gauss:** Questa formulazione prevede la suddivisione del fascio in sezioni lineari e a scacchiera, questa tecnica di determinazione della qualità del fascio si impiega soprattutto per i laser a sorgente gassosa. In questo caso la formulazione TEM<sub>11</sub> significa che il raggio laser è idealmente suddiviso secondo un piano verticale ed un piano orizzontale. In questo caso la sorgente è soggetta a delle rifrazioni che danno luogo alla distribuzione spaziale descritta.

- **Laguerre-Gauss:** questo metodo di classificazione impiegato per i laser a sorgente solida identifica una *distribuzione a ciambella* del fascio, in particolare si va a rappresentare il diametro della ciambella principale ed un certo numero di ciambelle concentriche a quella principale. In questo caso per esempio la designazione TEM<sub>11</sub> identifica che la ciambella principale ha raggio 1 e che questa ha una ciambella concentrica alla principale. La caratterizzazione a ciambelle deriva dal fatto che il laser solido presenta delle increspature diametrali che vanno a distribuire in maniera non perfetta la potenza messa a disposizione.

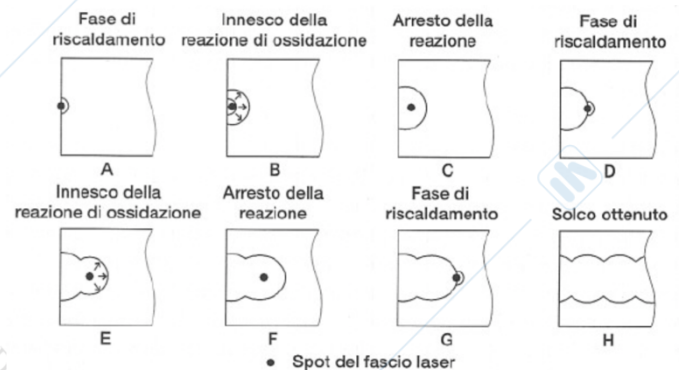
Il valore del TEM è strettamente collegato quindi alla qualità del fascio laser, minori saranno i valori e migliore sarà la qualità del laser prodotto, di conseguenza sarà maggiore l'energia disponibile per il taglio. Per questioni economiche solitamente si utilizzano fasci laser con TEM<sub>10</sub> o TEM<sub>11</sub> nelle comuni applicazioni di taglio. Per identificare la bontà del fascio laser, si utilizza il parametro M<sup>2</sup>, ottenuto come il rapporto tra il diametro del fascio in questione e il diametro del fascio di eguale potenza con distribuzione gaussiana (che è la migliore ottenibile). Il parametro M<sup>2</sup> sarà per forza di cose maggiore di 1.

I materiali che meglio si prestano al taglio laser sono:

1. **Acciaio:** generalmente tagliato a CO<sub>2</sub> con ossigeno.
2. **Alluminio:** ha basso coefficiente di assorbimento, si taglia a CO<sub>2</sub> con ossigeno diluito.
3. **Titanio:** data l'elevata reattività si taglia con gas inerte e sorgente CO<sub>2</sub>.
4. **Nichel:** generalmente si taglia a CO<sub>2</sub> sia con gas attivi che inerti.
5. **Rame:** ha basso assorbimento ed elevata conducibilità, difficile da tagliare.
6. **Ottone:** la presenza di nichel favorisce la possibilità di tagliare agevolmente il materiale.
7. **Termoplastici:** si tagliano bene per vaporizzazione.
8. **Termoindurenti:** si tagliano per degrado chimico locale della catena polimerica, generalmente con UV.
9. **Legno:** si taglia per degradazione chimica del carbonio con aria come gas di assistenza.
10. **Vetro e ceramica:** si tagliano molto bene con laser impulsati, la separazione dei lembi avviene per frattura fragile del componente.
11. **Compositi:** si tagliano bene quando la matrice e la fibra hanno coefficienti termici simili.

## Disegno delle fasi del taglio con ossigeno

Il taglio laser con ossigeno come gas di assistenza sfrutta l'azione termica del laser combinata a quella prodotta dalla combustione del carbonio presente nell'acciaio. La reazione di combustione viene innescata dal calore prodotto dal laser ed è più veloce dell'avanzamento di quest'ultimo, quando la reazione si allontana dalla zona di lavoro del laser si arresta, quando il laser incontra nuovo materiale il processo si ripete:



1. Fase di riscaldamento: il laser incontra il metallo solido e lo riscalda
2. Innesco della combustione: l'ossigeno inizia a reagire con il carbonio presente nell'acciaio
3. Arresto della reazione: quando la zona di combustione si allontana troppo dalla sorgente del laser e dall'ugello dell'ossigeno non sussistono più le condizioni per una corretta combustione e questa si arresta

4. Inizia così una nuova fase di riscaldamento del materiale ed il processo continua fino all'ottenimento di un solco completo.

## Quando si sceglie una sorgente solida e quando una sorgente gassosa

Le caratteristiche di funzionamento delle sorgenti di laser e i parametri prestazionali ci consentono di scegliere quale sorgente utilizzare per realizzare le nostre lavorazioni. I parametri che influenzano la possibilità di utilizzare una o l'altra sorgente sono generalmente:

- **Lunghezza d'onda:** si deve scegliere una sorgente con una lunghezza d'onda della radiazione tale da essere compatibile con l'assorbimento del materiale a quella lunghezza d'onda; alcuni materiali a determinate frequenze infatti presentano una riflessività molto elevata mentre per altre molto meno, è il caso dell'alluminio che per le sorgenti a CO<sub>2</sub> che hanno  $\lambda=10,6$  micron presentano elevata riflessività che non si manifesta con la sorgente solida Nd-Yag con  $\lambda=1,06$
- **Potenza:** le sorgenti laser hanno una caratteristica e un range di potenza diverse secondo il loro principio di funzionamento. Per le sorgenti gassose si hanno potenze medie dai 100 W ai 100 kW mentre per le sorgenti solide si hanno potenze nell'ordine dei 100 W - 3 kW che però possono essere utilizzati anche in forma impulsata per raggiungere picchi di 60kW. La stessa sorgente, usata in forma Q-Switched può arrivare a potenze di 100 MW.
- **Rendimento:** le sorgenti di Laser allo stato gassoso, con i moderni sistemi arrivano ad efficienze energetiche del 20% mentre i laser solidi arrivano al 10%, anche se nei primi impieghi raggiungevano efficienza del 2%.
- **Efficienza del trasporto:** la lunghezza d'onda caratteristica della sorgente influenza anche un altro parametro importante quale l'efficienza della distribuzione della luce; il laser da sorgente solida può essere distribuito facilmente su fibra ottica e così facendo si può facilmente modificare l'orientazione della testa che eroga il fascio laser, facilitando la formazione di geometrie complesse senza compromettere la qualità. Il laser da sorgente solida non può essere distribuito su fibra ottica in quanto questa ha un elevato assorbimento nel campo della lunghezza d'onda corrispondente, per questo è necessario un complicato sistema di specchi che degrada la qualità del laser e rende la sua distribuzione più difficoltosa.

Il Laser a sorgente gassosa a CO<sub>2</sub> è stato il primo a fare la comparsa sul mercato ed è anche quello che garantisce la potenza maggiore ma sta lentamente lasciando il posto ai laser a sorgente solida, vista la versatilità che può offrire combinata ad un rendimento energetico di queste che sta via via diventando comparabile con le comuni sorgenti gassose.

## Differenza tra emissione continua e pulsata:

Il Laser può essere erogato sotto forma di fascio continuo oppure può essere emesso ad impulsi della durata anche di alcuni femtosecondi. La differenza sostanziale sta proprio nel contenuto energetico di picco del fascio e nella frequenza con cui questo viene distribuito:

- L'emissione continua prevede l'erogazione continua del fascio luminoso, lavorando continuamente sul bordo di taglio e generando superfici regolari
- L'emissione impulsata invece prevede l'emissione di fasci ad una certa intermittenza. Per ottenere questo comportamento si possono utilizzare diverse tecniche tra cui l'interruzione del fascio tramite l'interposizione di un deviatore oppure (soluzione ottimale) chiudere lo specchio semiriflettente del tubo di risonanza ed accumulare l'energia al suo interno andando a rilasciarla solo quando necessario. Questa seconda soluzione consente di raggiungere potenze di picco molto elevate e mantenerle per poco tempo in modo da tagliare materiali con alto calore latente

di fusione e vaporizzazione. All'interno dei laser pulsati si possono andare a definire, in funzione della frequenza di erogazione del fascio diverse categorie:

- Modulato a bassa frequenza
- Modulato a media frequenza (faster modulation)
- Superpulse: in questo caso la pulsazione è ad altissima frequenza

In ogni caso ciascuna modulazione viene fatta in modo da mantenere la potenza media allo stesso livello, fissando un duty cycle adeguato alle necessità di potenza.

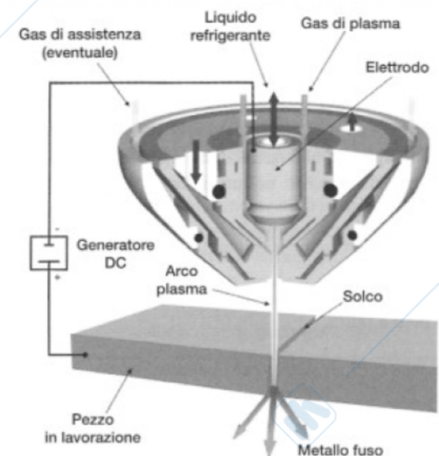
## Plasma e schema

Il plasma è il quarto stato della materia, questo è costituito da gas ionizzato ad alta temperatura (anche 20000°C) che viene impiegato per tagliare o saldare i materiali. La generazione del plasma si affida ad una coppia di elettrodi tra i quali scocca un arco elettrico tramite il quale si riesce a ionizzare il gas, producendo così il plasma.

Secondo la tipologia di materiale possiamo avere plasma ad arco trasferito (quando i materiali che tagliamo sono conduttori di corrente) o ad arco non trasferito (nel caso di materiali non conduttori).

La macchina per il taglio al plasma è sostanzialmente semplice ed è composta dai seguenti elementi:

- **Trasformatore:** è il dispositivo che trasforma la tensione di linea disponibile in azienda in un'alta tensione necessaria per generare l'arco elettrico, generalmente si lavora con tensioni che vanno dai 100 ai 400 V con correnti molto elevate che possono raggiungere anche i 200 A.
- **Torcia elettrodo:** uno dei due elettrodi è sempre costituito dalla torcia per il taglio a plasma. Solitamente è composta da almeno due canali concentrici in rame refrigerati ad acqua. All'interno del primo canale concentrico si ha l'erogazione del gas di lavoro (che generalmente è aria) e per l'erogazione del gas di assistenza per il taglio (che può essere sia ossigeno che gas inerte).
- **Alimentazione del Gas:** dalla bombola di gas di lavoro si hanno dei condotti che distribuiscono il gas di lavoro ed assistenza inviandoli alla torcia.



Il taglio del materiale è quindi affidato alla corrente di gas ad altissima velocità e temperatura che vaporizza il materiale metallico e allontana dalla zona di taglio i vapori metallici. Con questa tecnica possono essere tagliati materiali di spessore fino a 230 mm con però scarsa precisione e con una forte presenza di bave.

Per svolgere la lavorazione si deve creare un primo foro di sfondamento e successivamente si può svolgere il taglio, è quindi opportuno prevedere delle zone della lamiera da tagliare "sacrificali" dove cioè si può lavorare senza perdere qualità del componente o danneggiarlo. Le lavorazioni con plasma vengono svolte generalmente con il pezzo in acqua per il concorrere di due fenomeni: in primo luogo l'elevata rumorosità del processo che in acqua viene ridotta e in secondo luogo abbiamo una migliore dissipazione del calore, ottenuta appunto dall'acqua. La dissipazione del calore è utile per limitare le estensioni delle HAZ (heat affected zone) che vanno ad indebolire localmente il materiale.

Abbiamo detto che il taglio plasma è molto impreciso, sia perché si ha uno scarso controllo della temperatura sia a causa della natura turbolenta del plasma e il suo andamento conico, che rende le superfici di taglio inclinate. Per ovviare a questi difetti si può andare ad inclinare la torcia di un certo

angolo in modo da ottenere la parete del mio pezzo tagliato perfettamente verticale oppure si può sfruttare la caratteristica magnetica del plasma di subire l'influenza dei campi magnetici. Quest'ultima tecnologia prende il nome di HDP (High Definition Plasma) tramite il quale il gas plasmogeno una volta ionizzato viene guidato da degli elettromagneti e gli viene indotta una vorticosità che genera una certa rotazione, diminuendo la dispersione del flusso di gas e migliorando la superficie finale.

## Che gas si usano nel taglio al plasma

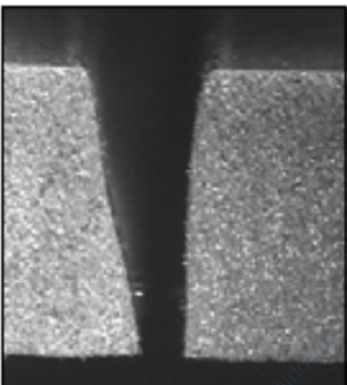
Nel taglio plasma si possono impiegare sia gas plasmogeni, impiegati per generare il plasma necessario al taglio e gas di assistenza che hanno il compito di proteggere la zona di lavoro dagli agenti esterni. In funzione del materiale che vogliamo tagliare possiamo impiegare diversi gas, che possono essere attivi o inerti:

- **Acciaio:** per il taglio dell'acciaio generalmente si usa ossigeno, per combinare oltre al taglio per effetto termico anche il taglio per effetto della combustione dell'ossigeno con il carbonio contenuto nell'acciaio.
- **Acciaio INOX:** si taglia riducendo la presenza di ossigeno al minimo in modo da evitare la decromazione e quindi la perdita di inossidabilità.
- **Alluminio:** generalmente si taglia con azoto o aria, in modo da limitare le reazioni fortemente esotermiche tra ossigeno e alluminio, che produrrebbero bordi di taglio fortemente irregolari.
- **Titanio:** il taglio si effettua spesso con aria o azoto.

In generale si impiega una moltitudine di gas di assistenza, ciascuno dei quali ha delle caratteristiche tali da favorire alcuni aspetti del taglio a scapito di altri:

- Ar: Genera facilmente un arco molto stabile ed è chimicamente inerte, non reagisce in alcun modo con il materiale che sto tagliando.
- He: Date le ottime caratteristiche elettriche ha la capacità di formare un fascio ad alta concentrazione energetica a parità di tensione e corrente con altri gas.
- H<sub>2</sub>: è altamente infiammabile e fortemente reattivo, ha la caratteristica. È molto leggero e reattivo
- N<sub>2</sub>: Diventa reattivo alle alte temperature e non è consigliabile impiegarlo con acciaio e inox per non degradarlo
- O<sub>2</sub>: si combina con tutti i gas ad eccezione degli inerti, genera reazioni ossidanti e fortemente esotermiche
- Aria: si impiega come sostituto dell'azoto, in quanto ne è composta per oltre il 70% e si può impiegare sia come gas plasmogeno che come gas di assistenza.

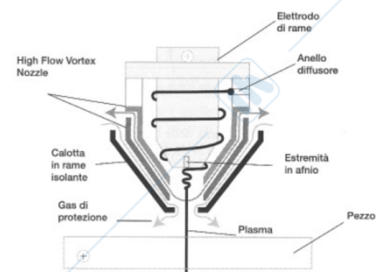
## Metodo HDP



A causa dell'elevata divergenza e della scarsa precisione del flusso di plasma, generalmente i bordi di taglio vengono molto irregolari e presentano molte striature. Per limitare la scarsa qualità delle superfici di taglio si sfrutta la natura del plasma, il quale essendo un gas ionizzato è anche possibile guidarlo con

l'ausilio di campi magnetici generati da un avvolgimento all'interno della torcia. Il problema fondamentale di questo metodo è che il taglio presenta un bordo fortemente conico, è per questo che solitamente si cerca di

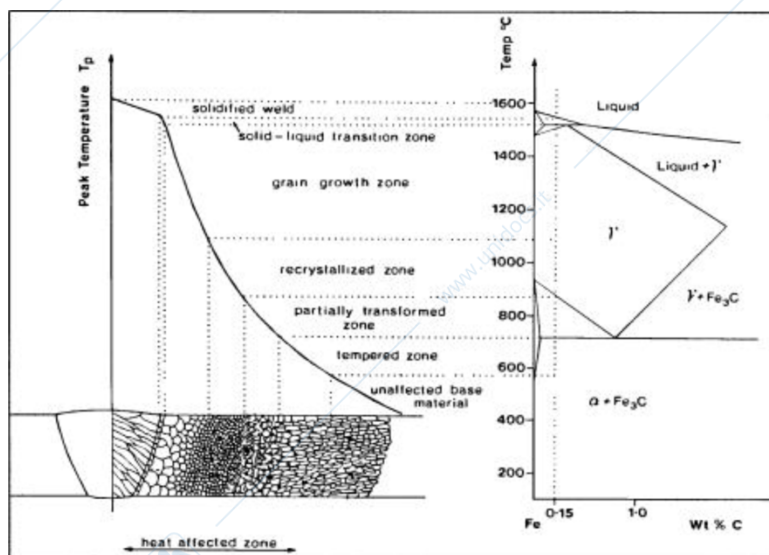
inclinare la torcia in modo da ottenere un bordo verticale sul pezzo finito e molto inclinata invece sul pezzo che si andrà a scartare.



## Problemi presenti in una zona termicamente alterata

Si parla di zona termicamente alterata in un materiale metallico sottoposto ad un processo di lavorazione (taglio o saldatura) il quale per il suo funzionamento richiede l'impiego di una sorgente di calore. I lembi o le zone di materiale lavorato subiscono un ciclo termico di riscaldamento e raffreddamento in una zona più o meno ampia e distante dal bordo. La distanza fino alla quale si estende la zona termicamente alterata è funzione ovviamente della temperatura alla quale la lavorazione avviene ed è funzione delle proprietà termiche del materiale quali conducibilità termica e calore latente di fusione e vaporizzazione.

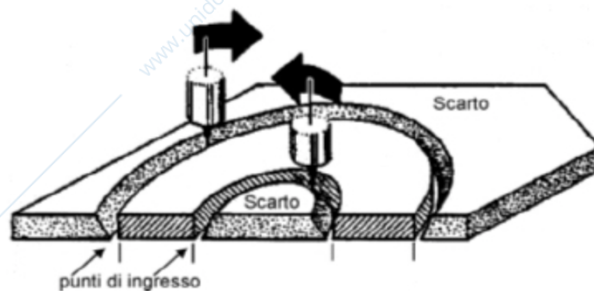
Nella zona termicamente alterata si manifesta generalmente un indebolimento del materiale dovuto



all'accrescimento dei grani nella sua struttura cristallina.

## Come creare superfici perfettamente verticali con plasma

Date le caratteristiche del taglio plasma e soprattutto data la natura molto "confusionaria" del processo, le superfici di taglio ottenute con tecniche plasma presentano spesso irregolarità e soprattutto conicità piuttosto accentuate con bordi di taglio irregolari e frastagliati. Per ovviare al problema del difficile ottenimento di superfici perfettamente verticali si tende ad inclinare la torcia, così da ottenere il bordo di taglio perpendicolare: di contro sono si può utilizzare la parte di materiale da cui si ottiene il pezzo perché presenta conicità elevata (doppia rispetto al caso in cui la torcia sia perfettamente verticale) che quindi comporta uno scarto del primo bordo di taglio.



## Cosa influenza la pressione del gas

I gas di assistenza sono generalmente impiegati nei processi di lavorazione non convenzionale che sfruttano l'azione termica per svolgere il proprio compito. Le lavorazioni non convenzionali a principio termico di maggior rilievo sono il taglio plasma e il taglio laser.

- **LASER:** il taglio con raggio laser sfrutta l'energia termica prodotta da una sorgente luminosa concentrata in un punto per fondere localmente il materiale, in funzione del tipo di materiale da tagliare si utilizzano gas diversi che possono essere inerti (Argon, Elio, Azoto) o gas attivi

(Ossigeno, Aria). I primi hanno il compito di proteggere dall'atmosfera circostante la zona di taglio, in modo da non perdere eventuali composizioni chimiche (come per esempio nel taglio dell'INOX voglio prevenire la decromazione del metallo), i secondi invece partecipano attivamente al processo di generazione del calore, andando a reagire chimicamente con il carbonio presente nell'acciaio e causando una reazione esotermica che incrementa il calore prodotto. La seconda funzione del gas di assistenza, indipendentemente da quale esso sia, è quella di allontanare dalla zona di taglio i vapori metallici prodotti in modo da separare i due lembi di taglio e al contempo proteggere la sorgente Laser. In questo frangente diventa importante controllare la pressione alla quale viene erogato il gas di assistenza: all'aumentare dello spessore del materiale deve essere maggiormente accentuata la velocità con cui il gas arriva in contatto perché questo deve asportare una quantità maggiore di materiale metallico. Ovviamente all'aumentare della pressione del gas di assistenza incrementano anche i consumi dello stesso e quindi i costi connessi con la sua produzione.

- **Lavorazioni con plasma:** nelle lavorazioni con il plasma invece ho l'utilizzo di due gas diversi i quali hanno due compiti, il primo gas che si impiega (e senza il quale la lavorazione non può avvenire) è quello plasmogeno; questo viene ionizzato dalla scarica elettrica e proiettato ad alta velocità sul pezzo che vogliamo tagliare, il secondo gas è invece quello di assistenza, che come nel caso del taglio laser serve o a proteggere la zona di fusione (in caso questo sia inerte) o a favorire la produzione di energia termica (in caso questo sia attivo). In questo caso la pressione dei due gas ricopre un ruolo importante in quanto è proprio la velocità di uscita del gas plasmogeno a garantire la buona riuscita del taglio, ovviamente per le pressioni valgono le stesse dipendenze che abbiamo visto in precedenza. In questo caso, visto il maggiore input termico, si possono arrivare a tagliare spessori di materiale fino a 30 mm.
- **(Saldatura:** A voler essere pignoli anche nei processi di saldatura vengono impiegati dei gas di assistenza ma in questo caso non è importante il controllo della pressione degli stessi in quanto hanno il compito di proteggere il bagno di saldatura o di alimentarlo, secondo la reattività che il gas presenta).

### Taglio Plasma: Svantaggi del sistema aria-aria

Il taglio plasma per funzionare necessita di due gas: il primo è il gas plasmogeno che, una volta ionizzato, genera il calore necessario al taglio del pezzo; il secondo gas è quello di assistenza che serve per proteggere la zona in cui avviene il taglio e a migliorare la qualità delle superfici. Nella molteplicità di combinazioni disponibili, per le macchine portatili più economiche si considera la possibilità di utilizzare sia come gas plasmogeno che come gas di assistenza l'aria atmosferica. L'impiego di quest'ultima presenta il principale vantaggio di essere sempre disponibile e quindi si può togliere l'ingombro della bombola ma presenta molti svantaggi:

- **Qualità dei lembi di taglio:** l'impiego del sistema aria-aria genera dei bordi di taglio veramente scadenti che richiedono per forza una successiva rilavorazione per consentire il rispetto delle minime tolleranze dimensionali che si possono accettare
- **Temperatura di taglio:** il sistema aria-aria consente di raggiungere temperature di lavoro più basse di quelle raggiungibili con altri processi, il che causa rallentamenti nella lavorazione e perdita di qualità complessiva del prodotto ottenuto. Anche il rendimento del processo è inferiore, infatti si devono usare tensioni e correnti piuttosto elevate per ottenere gli stessi tagli di altre tecniche.

### Parametri caratterizzanti della luce Laser

IRRADIANZA: intensità di potenza sulla superficie dello spot del Laser:  $I = \frac{P}{S_{spot}} = q_0''$

FLUSSO TERMICO AERICO: è il flusso termico realmente assorbito dal materiale che viene lavorato:  $q'' = q_0'' \cdot A$  con  $A$  che è la percentuale di assorbimento

$$\text{BRILLANZA: } B = \frac{P}{\pi \cdot d_0 \cdot \pi \cdot \theta}$$

EFFICIENZA QUANTICA: è indipendente dall'efficienza del pompaggio, definita come il rapporto tra l'energia del fascio luminoso e l'energia fornita in fase di pompaggio:  $\eta = en \cdot \frac{\text{fascio}}{\text{en.pompaggio}} = \frac{E_2 - E_0}{E_3 - E_0}$

EFFICIENZA GLOBALE: rappresenta l'efficienza globale della macchina, considerato sia l'efficienza del trasformatore elettrico sia l'efficienza quantica:  $\eta = en \cdot \frac{\text{fascio}}{\text{en.elettrica}_{IN}}$

## Elettroerosione

Il processo di elettroerosione consente il taglio (oppure lo scavo nel materiale metallico) mediante una serie di scariche elettriche che si formano tra elettrodo e pezzo (che dovrà quindi essere per forza in materiale conduttore). Il principale vantaggio che si ricava dall'impiego di questa tecnologia è che si possono tagliare materiali metallici con qualunque durezza e caratteristiche meccaniche di qualunque tipologia, visto che queste non influenzano in nessun modo il processo di lavorazione. Un altro dei vantaggi importantissimi di questo processo sono le strettissime finiture superficiali che si possono ottenere, questo è infatti il processo net-shape per eccellenza; si può arrivare anche a rugosità di  $0,3 \mu\text{m}$  nell'unica passata con cui avviene la lavorazione. Il processo di EDM (Electron Discharge Method) si presenta in due varianti:

- **WEDM:** o elettroerosione a filo, la quale sfrutta un filo in materiale conduttore (generalmente in ottone o rame) che viene guidato lungo il percorso sul quale si vuole realizzare il taglio del materiale tramite il CNC dedicato alla lavorazione.
- **EDM:** o elettroerosione a tuffo, in cui l'elettrodo è un negativo (realizzato anche questo in rame, ottone o grafite) della sagoma che si vuole ricavare nel pezzo in lavorazione.

In entrambi i casi la lavorazione si effettua in una vasca in immersione con un liquido dielettrico che ha il compito di fungere da isolante tra elettrodo e pezzo fin quando non si raggiunge la temperatura alla quale scocca l'arco e si produce l'asportazione del materiale, il dielettrico ha anche il compito di asportare il materiale metallico vaporizzato dalla zona di taglio così da evitare che questo si solidifichi di nuovo in prossimità della superficie lavorata. I tassi di asportazione di questo processo sono molto bassi e la lavorazione è generalmente molto lenta. Per lavorazioni EDM generalmente si utilizza come dielettrico Cherosene, Petrolio bianco o Gasolio, mentre per la WEDM si impiega solitamente acqua deionizzata.

Il processo di asportazione come già detto è sostanzialmente indipendente, in termini di velocità, dalle caratteristiche meccaniche del pezzo che si va a lavorare. La velocità della lavorazione comunque non viene controllata dall'operatore ma direttamente dal CNC della macchina il quale, mediante un controllo in retroazione della corrente e della tensione a cui avvengono le scariche, regola la velocità dell'utensile in modo da mantenere la distanza ottimale a far scoccare correttamente l'arco elettrico.

Vantaggi della lavorazione EDM:

- Possibilità di realizzare fori profondi, con elevato rapporto L/D
- Totale assenza di bave
- Totale assenza di forze di taglio (quindi assenza di vibrazioni e pieno rispetto delle tolleranze dimensionali)

- Possibilità di realizzare cave a geometria complessa e possibilità di realizzare fori quadrati (non ottenibili con asportazione di truciolo)
- Indipendenza dalle caratteristiche meccaniche del materiale che si sta lavorando.

#### Svantaggi della lavorazione EDM:

- Impiegabile con soli materiali conduttori.
- Velocità di lavorazione estremamente bassa.
- L'utensile subisce un'usura, seppur molto bassa, che deve essere costantemente tenuta sotto controllo per il completo rispetto delle tolleranze.
- Si possono verificare danneggiamenti microstrutturali.

#### Vantaggi della lavorazione WEDM:

- Assenza totale di forze di taglio, assenza quindi di necessità di staffaggi e assenza di vibrazioni e deformazioni del materiale
- Assenza totale di bave
- Le geometrie delle cave possono essere realizzate anche quando molto complesse
- Nessuna dipendenza dalle caratteristiche meccaniche del prodotto
- L'utensile si consuma (nel senso che il filo si rinnova continuamente ma non perde la geometria)

#### Svantaggi della lavorazione WEDM:

- Si applica solo a materiali conduttori di corrente
- Il tasso di asportazione di materiale è molto basso
- Le superfici lavorate possono presentare danneggiamenti microstrutturali

## Quali sono le differenze fra una saldatura laser ad alta penetrazione ed una a bassa penetrazione?

Il limite tra i due processi viene definito secondo un aspetto fondamentale: quando la profondità del cordone è al massimo uguale alla sua larghezza allora si parla di saldatura laser a bassa penetrazione, altrimenti si parla di saldatura ad alta penetrazione.

La differenza tra una saldatura Laser a bassa ed alta penetrazione risiede principalmente nelle caratteristiche di performance ottenibili dal cordone:

- Un cordone di saldatura a bassa penetrazione non ha caratteristiche meccaniche molto elevate e non viene impiegato per elementi strutturali o altamente sollecitate. La realizzazione di questo tipo di saldatura non prevede la vaporizzazione del metallo base ma solamente una sua fusione utile alla generazione del giunto. Solitamente questo tipo di saldatura si impiega per componentistica elettronica.
- Un cordone di saldatura ad alta penetrazione invece la vaporizzazione del materiale e tramite la corrente di gas di assistenza si ottiene la successiva solidificazione dei vapori metallici per creare il giunto. La saldatura ottenuta con questo processo è di eccellente qualità e viene impiegata anche per realizzare giunzioni tra parti strutturali.

In entrambi i processi il gas di assistenza viene erogato in direzione opposta al moto di avanzamento del laser, così da mantenere i vapori metallici nella zona del bagno di saldatura, in questo caso infatti il gas viene erogato non in direzione concentrica rispetto al laser ma viene erogato in direzione tangenziale.

## Fare uno schema e descrivere brevemente il processo di Resin Transfer Moulding per prodotti in materiale composito.

Il processo Resin Transfer Molding (RTM) è quello che consente di ottenere manufatti in composito di buona qualità e con tempi di processo ragionevoli da giustificare una produzione in piccola serie.

Questo processo mi consente di realizzare componenti partendo da una preforma di materiale pre-impregnato (prepreg) che viene inserito successivamente in un insieme di stampo e controstampo per la successiva immissione della resina e polimerizzazione. Il processo segue diverse fasi fondamentali:

1. Pulizia dello stampo
2. Applicazione dell'agente distaccante
3. Posizionamento della fibra → **NON È PREPREG MA LE VIENE DATA FORMA CON VAPORE**
4. Chiusura dello stampo
5. Immissione della resina e polimerizzazione
6. Apertura ed estrazione
7. Operazioni di finitura

Il processo, per certi aspetti simile ad un transfer molding per i materiali plastici, consente anche di realizzare componenti in composito multi-materiale e consente di impregnare efficientemente dal 10 al 50% di fibre, realizzando componenti dalle ottime caratteristiche meccaniche e dalla bassa porosità. Il principale aspetto da tenere sotto controllo è l'affinità elettrochimica tra i materiali, se questi fossero nella condizione di reagire potremo avere la corrosione di alcuni di questi componenti (fibra di carbonio/kevlar con parti di alluminio).

Un altro vantaggio connesso con questo processo è che le pressioni raggiunte in fase di trasferimento della resina superano raramente i 7 bar, rendendo possibile l'impiego di stampi economici in materiale

povero come vetroresina o materie plastiche, abbassando ancora di più i costi del componente ma incrementando i tempi di produzione. Per il trasferimento si possono impiegare anche processi di compression molding, che portano la pressione fino a 100 bar ottenendo una produttività nell'ordine dei 45/50 fogli l'ora.

I principali limiti di questo processo risiedono nello spessore massimo (50mm) con cui si possono ottenere i manufatti e nei raggi di raccordo (che non possono andare sotto 1,5mm anche se sarebbe meglio limitarli a 2,5mm) che creano difficoltà di impregnazione della resina.

## Quale effetto hanno i raggi UV sulla plastica? Come possono essere ridotti questi effetti?

L'esposizione delle materie plastiche alle radiazioni ultraviolette comporta una graduale dissoluzione delle catene polimeriche che le compongono andando a degradare la qualità del prodotto in plastica e causandone una drastica riduzione delle caratteristiche meccaniche.

I materiali plastici maggiormente sensibili a questo effetto sono gli elastomeri, per i quali una esposizione anche di pochi giorni ai raggi UV ne comporta una completa degradazione delle caratteristiche, irrigidendoli e portandoli a screpolarsi. Per limitare l'effetto dell'esposizione ai raggi UV negli anni si sono sviluppate diverse tecniche, alcune delle quali sono studiate appositamente per gli elastomeri mentre altre sono applicate a tutti i manufatti in plastica:

- Aggiunta di nero-carbone: questo additivo viene inserito nelle materie plastiche in percentuali anche basse che comportano un sensibile miglioramento al comportamento in termini di resistenza all'esposizione da raggi UV
- Aggiunta di additivi: altre tipologie di additivi che possono essere aggiunti per migliorare la resistenza all'esposizione UV sono i Sali di Piombo o stearati di Zinco, Cadmio e Bario, questi elementi anche in piccole quantità donano alla plastica un'ottima resistenza all'esposizione ai raggi solari.

Per testare la resistenza all'esposizione UV delle plastiche in generale si fanno delle prove sperimentali nelle quali la materia in esame viene esposta alle radiazioni UV in apposite camere ad elevata densità di potenza (simili a quelle impiegate nei centri estetici) per accelerare il processo di degradazione.

Un altro elemento di assoluto interesse è la resistenza dei coloranti comunemente impiegati in campo industriale; le vernici comunemente impiegate in industria sono a base polimerica e per questo risentono delle radiazioni solari, in particolar modo le vernici tendono a perdere tonalità e a virare verso il bianco. La tonalità in questi termini maggiormente influenzata è il rosso che vira velocemente al rosa fino poi ad assumere una colorazione completamente bianca.

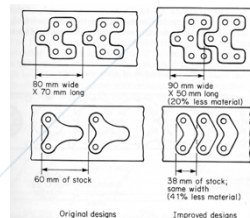
La sensibilità ai raggi UV è quasi sempre da imputarsi come un effetto negativo nelle plastiche ma questa loro caratteristica viene sfruttata positivamente quando si vuol effettuare sulle stesse un taglio di tipo non convenzionale con tecnologia laser, in questo caso si impiega una sorgente che emette nel campo dell'ultravioletto (a differenza delle sorgenti comuni che emettono nell'infrarosso) e si utilizzano per fare un taglio per degradazione chimica della plastica (contrariamente a quanto avviene per il taglio tradizionale che avviene per fusione).

## 11 - SIMULAZIONE PROVA SCRITTA (DOMANDE SLIDE)

Quali sono le linee guida per l'ottimizzazione in ottica DFM di un processo di stampaggio lamiera?

I processi di stampaggio delle lamiere possono essere considerati a tutti gli effetti delle lavorazioni Net-Shape (ovvero che consentono di produrre componenti già con tolleranze dimensionali e geometriche eccellenti e pronte per gli accoppiamenti) e per questo è di per sé un processo molto adatto quando si vuole eseguire un'ottimizzazione secondo il DFM. L'analisi del processo produttivo delle lamiere però ci suggerisce che nel caso in cui non si vada a progettare correttamente lo stampo e la sagoma da realizzare, si può incorrere in criticità e in aumenti di costi che possono rendere la lavorazione assolutamente sconveniente:

- **Riduzione degli sfridi di produzione:** l'operazione di stampaggio delle lamiere richiede di estrarre la sagoma in realizzazione da un foglio di dimensioni maggiori. L'attenta progettazione della sagoma impone di impacchettare al massimo le sagome in modo da ottimizzare al massimo il consumo di lamiera: per far questo si deve andare ad ottimizzare alcune caratteristiche dimensionali del prodotto così da massimizzare l'utilizzo di lamiera e ridurre al minimo gli sfridi:



un esempio si questo processo è riportato nella figura sotto.

Dove per questioni progettuali non è possibile impacchettare i profili si può ricorrere allo stampaggio di due profili differenti all'interno dello stesso foglio di lamiera, così ancora una volta da ottimizzare la produzione.

Un'altra operazione che si può fare per ridurre lo sfrido di materiale è quello del così detto presetting della lamiera, mediante un taglio per slitting alla larghezza sufficiente alla produzione dei componenti, in questo modo la lamiera arriva a dimensione nella fase di stampaggio e l'operazione successiva necessita solo di separare tra loro i profili, senza asportare materiale nella parte longitudinale.

- **Attenzione alle caratteristiche dimensionali:** per essere sicuri che il nostro processo rispetti le tolleranze dimensionali e geometriche imposte (e quindi ridurre il numero di scarti) è fondamentale andare a progettare le caratteristiche dimensionali in modo che i raggi di raccordo della geometria siano almeno paragonabili con lo spessore del foglio di lamiera e allo stesso modo ci si deve assicurare che la dimensione minima della feature geometrica che si vuole realizzare abbia dimensione almeno 2/3 volte superiore a quella della lamiera, così da scongiurare deformazioni o irregolarità nel taglio.

La necessità di ottimizzare sotto il punto di vista del consumo della materia prima si manifesta in quanto questa è molto pregiata e si richiede che abbia un elevato grado di purezza per evitare che le operazioni di deformazione causino rotture nella stessa, più in generale le lamiere sono comunque semilavorati che prima di raggiungere la fase finale di formatura subiscono un costoso processo di laminazione che la rende molto pregiata: è altresì vero che in questo caso si ottiene un vantaggio economico anche notevole dal riciclaggio degli scarti ma questo non è comunque minimamente paragonabile al costo della materia prima che si impiega per la lavorazione.

## Quali sono le criticità connesse all'assemblaggio sovra-vincolato?

L'operazione di assemblaggio è quella che genera il valore nel prodotto che si sta considerando. L'assemblaggio dei componenti può essere, secondo il numero di vincoli che andiamo ad inserire:

- Sotto-vincolato, quando si lasciano (volontariamente o meno) dei gradi di libertà di moto relativo ai componenti.
- Correttamente vincolato, quando si assegna il corretto numero di vincoli ai vari componenti dell'insieme.
- Sovra-vincolato, quando il numero complessivo di vincoli assegnati è maggiore di quello necessario a consentire il bloccaggio di tutti i componenti.

Il sovra-vincolamento di un insieme può essere una operazione voluta oppure un errore di progettazione dei componenti, in entrambi i casi porta delle criticità che possono pregiudicare la possibilità di assemblare i componenti, ridurre la vita utile dell'insieme realizzato o causare malfunzionamenti dello stesso. L'assemblaggio sovra-vincolato induce nel componente delle deformazioni non sempre prevedibili che possono portare anche all'assunzione di comportamenti anomali che possono portare alla rottura delle parti. In caso di assemblaggio sovra-vincolato è opportuno domandarsi se è veramente necessario questo tipo di bloccaggio e successivamente è opportuno effettuare delle simulazioni con programmi agli elementi finiti per prevedere il comportamento dell'elemento o del componente sovra-vincolato.

## Su quali principi si basa il metodo black-box e come funziona?

All'interno del processo di ottimizzazione DFM di un prodotto, uno dei passi che si deve seguire è quello di acquistare all'esterno dell'azienda alcuni componenti non standard di cui però si conoscono aziende specializzate nella produzione, per le quali gli elevati volumi produttivi (di quella categoria di prodotto) consentono di ridurre il prezzo complessivo. L'approccio black box prevede, per i componenti acquistati fuori, di imporre al produttore il numero di vincoli strettamente necessario al soddisfacimento delle specifiche tecniche di cui si ha bisogno, senza "entrare" nel processo produttivo del fornitore così da lasciare campo libero al produttore che potrà adottare tutte le tecnologie disponibili in azienda e consentire il più basso prezzo possibile per il componente scelto. L'errore che si è fatto comunemente negli anni addietro è stato quello di imporre al produttore determinati vincoli inutili alla funzionalità del prodotto andando ad incrementare il costo del componente.

## Esercizio calcolo attivatori di costo

Il metodo degli attivatori di costo viene utilizzato in fase di stima dei costi di produzione quando si vuole andare a mettere in relazione i costi indiretti che l'azienda sostiene con i costi diretti a cui in un modo o nell'altro si possono ricondurre.

ESERCIZIO: Data la produzione di 4 componenti si osservano costi diretti e indiretti

Voci di costo	Prodotto A	Prodotto B	Prodotto C	Prodotto D
Manodopera	180000	120000	150000	50000
Materiali	20000	35000	15000	30000

I costi di magazzino e distribuzione ammontano a 75000€ e i costi di riscaldamento e pulizia degli ambienti lavorativi ammontano a 55000€. Calcolare gli attivatori di costo e il costo complessivo di ogni singolo prodotto.

Per il calcolo degli attivatori di costo manodopera si considera il costo totale della stessa e il costo generale che in qualche modo è relazionabile con quest'ultima: si ottiene quindi

$$A_{manodopera} = \frac{55000}{180000 + 120000 + 150000 + 50000} = 0,11$$

$$A_{materiali} = \frac{75000}{20000 + 35000 + 15000 + 30000} = 0,75$$

Avremo quindi

Voci di Costo	Prodotto A	Prodotto B	Prodotto C	Prodotto D
Manodopera	180000	120000	150000	50000
Manodopera ind.	19800	13200	16500	5500
Materiali	20000	35000	15000	30000
Materiali ind.	15000	26250	11250	22500
Totale	234800	194450	192750	108000

### Cosa identifica l'indice DFA? Come si calcola?

L'indice DFA è un indicatore di performance di assemblaggio, questo identifica le performance di assemblaggio di un prodotto rispetto all'assemblaggio dello stesso in condizioni ideali. In altre parole, questo coefficiente ci fornisce una stima (soggettiva) dell'efficienza di assemblaggio del componente. Questo indicatore si calcola con la relazione:

$$DFA [\%] = \frac{\text{Numero minimo teorico di parti} \cdot 3 \text{ secondi}}{\text{Tempo totale di assemblaggio}} \cdot 100$$

In cui il numero minimo teorico di parti è il numero di parti che l'assieme dovrebbe avere per funzionare correttamente, e solitamente lo si sceglie in virtù della presenza di alcune parti che si ritengono "inutili" o che si ritiene possibile integrare per renderle un unico componente.

Da quest'ultima considerazione si osserva come il calcolo dell'indice DFA richieda, almeno per una sua prima stima, di pensare brevemente alla riprogettazione del prodotto in modo da stabilire un numero minimo teorico di parti, in generale questo non è molto affidabile perché dipende anche dalla sensibilità dell'analista. L'indice DFA in definitiva serve a capire quali sono le parti critiche dell'assemblaggio.

## 9 - Saldatura

### Saldatura a filo

I processi di saldatura a filo utilizzano come elettrodo un filo di materiale d'apporto che durante il processo di saldatura viene alimentato automaticamente dalla macchina, la quale in questo caso ha diversi compiti e per forza di cose sarà più complessa di quella impiegata per la saldatura ad elettrodo fusibile; la saldatrice dovrà provvedere a trasformare la tensione e corrente di linea in quelle utili alla generazione dell'arco elettrico, dovrà alimentare il filo in modo da rendere più o meno costante la lunghezza dell'arco elettrico e dovrà anche fornire il gas di assistenza alla pistola della saldatrice.

Le principali tecniche utilizzate per la saldatura a filo sono:

- **MIG (o GMAW):** La saldatura con processo Metal Inert Gas (o Gas Metal Arc Welding) prevede l'utilizzo di un filo metallico fusibile come elettrodo e richiede l'erogazione di un gas di assistenza inerte che solitamente è Argon, ma potrebbe essere anche Elio: l'impiego di un gas inerte migliora la qualità del giunto e lo protegge dall'inclusione di scorie ed ossidi che andrebbero a danneggiare la saldatura.
- **MAG (o GMAW):** La saldatura con processo Metal Active Gas (sempre Gas Metal Arc Welding) prevede l'utilizzo dello stesso filo come elettrodo; la differenza risiede nel diverso gas di assistenza che in questo caso può essere ossigeno o aria atmosferica oppure CO<sub>2</sub>. Il compito affidato a questo gas è quello di contribuire alla generazione del calore mediante la reazione esotermica di combustione che avviene quando vanno a reagire l'ossigeno e il metallo base (o il carbonio in esso contenuto). Il cordone presenta una qualità leggermente inferiore ma a parità di potenza posso ottenere penetrazioni maggiori.
- **Metal Cored (FCAW): Flux-Core Arc Welding** La terza alternativa nel campo della saldatura a filo è quella di impiegare dei così detti fili animati; in questo caso il filo presenta un'anima di materiale protettivo simile a quella dell'elettrodo ricoperto che si fonde insieme al metallo base e genera una scoria protettiva sulla superficie del cordone. Data però la difficoltà di separare efficientemente il metallo dalla scoria si possono formare inclusioni che andrebbero a degradare la qualità del cordone.

Il punto più importante quando si va ad impiegare una saldatura a filo è la scelta del metodo di deposizione del materiale d'apporto: si possono impiegare diverse tecniche le quali hanno, come sempre i loro pro e contro:

1. **Metodo Short Circuit:** in questo caso il filo viene alimentato in modo che non abbia il tempo di fondersi completamente così che questo arrivi a toccare il pezzo ed interrompere l'arco, provocando una fusione per effetto joule, consentendo la deposizione di circa 20-200 gocce di materiale. Il principale vantaggio connesso con questa tecnica è la possibilità di saldare in qualsiasi posizione, anche se diviene difficile garantire una corretta penetrazione del materiale d'apporto nel metallo base.
2. **Metodo Spray Arc:** in questo caso si utilizzano tensioni elettriche più elevate, si depositano gocce più piccole con un tasso di deposizione più elevato e una miglior penetrazione. L'elevata velocità di produzione e di deposizione sono garantite dall'elevata corrente che proietta con un soffio elettromagnetico le gocce di materiale sul pezzo.
3. **Metodo Pulsed Arc:** In questo caso si utilizza un processo misto tra i primi due, la corrente viene alimentata con metodo impulsato permettendo il distacco di gocce di materiale ad elevata

velocità. I due metodi visti in precedenza sono i più utilizzati in quanto consentono una buona produttività e una buona penetrazione.

4. **Metodo Globular:** questa tecnica consente di realizzare la deposizione di grosse gocce di materiale, è un processo da evitare in quanto instabile e genera grosse quantità di spatter.

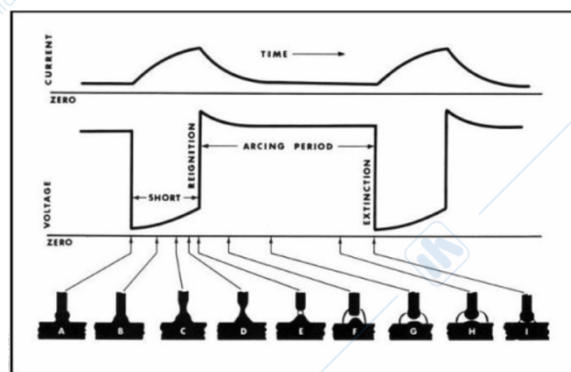
Le saldatrici impiegate per questo processo sono caratterizzate da una curva caratteristica con andamento piuttosto costante della tensione in funzione della corrente, questo perché a differenza del processo SMAW ho il controllo automatico da parte della macchina della lunghezza dello stick-out e non ho quindi bisogno di adattare il funzionamento della macchina a diverse lunghezze dell'arco.

Un altro vantaggio connesso con questo processo è quello di poter automatizzare tramite robot lo svolgimento dell'operazione, in quanto il filo viene alimentato in continuo e non c'è bisogno di rimuovere delle scorie.

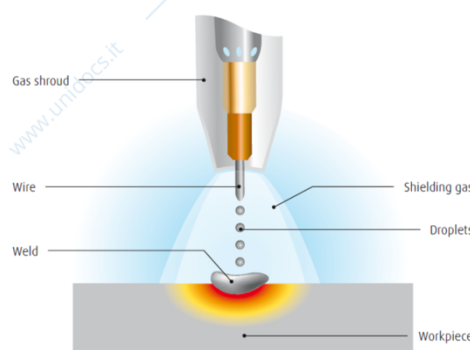
## Modalità di trasferimento della MIG/MAG

La saldatura a filo, in funzione della velocità di deposizione e della profondità di penetrazione che si vuole ottenere, si utilizzano metodi di deposizione differenti:

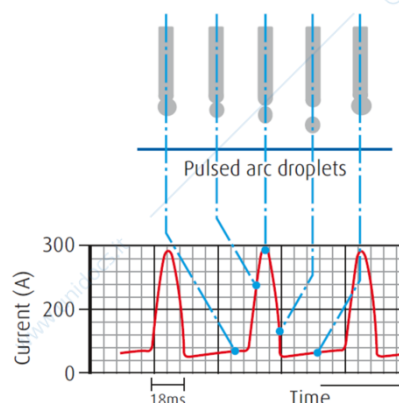
1. **Metodo short circuit:** In questo caso si dà al filo una velocità di alimentazione maggiore di quella alla quale lo stesso si fonde, arrivando ad un certo punto in cui si forma il corto circuito, ovvero il filo tocca il materiale metallico e si fonde per effetto joule, consentendo la deposizione anche in condizioni difficili (es. saldatura in verticale). Come si osserva dal grafico, si hanno alte tensioni quando l'arco scocca e basse quando si forma il corto circuito, la corrente invece segue l'andamento contrario, quando il corto circuito si forma, si ha un elevato passaggio di corrente e un conseguente riscaldamento per effetto joule.



2. **Metodo Spray Arc:** Il metodo spray arc consente la generazione di gocce di materiale che data l'alta corrente di funzionamento vengono proiettate sul pezzo. L'elevata corrente consente sia di avere una buona produttività sia una buona penetrazione all'interno del materiale di contro si fornisce un elevato thermal input che per alcuni materiali non è indicato. In questi casi si preferisce utilizzare il metodo short circuit. L'azione di deposizione è data dal soffio elettromagnetico generato dall'elevata corrente di lavoro.

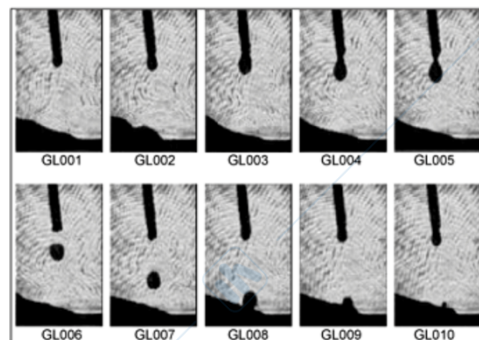


3. **Metodo Pulsed Arc:** questo metodo consiste nella deposizione di gocce di materiale utilizzando una corrente pulsata che le proietta ad elevata velocità sul materiale. In questo caso l'azione di deposizione è prevalentemente gravitazionale e le gocce sono di dimensione leggermente più grande rispetto a quelle depositate con il metodo spray arc, che funziona con un soffio elettromagnetico. Come si osserva dal grafico, tensione e corrente crescono quando viene scoccato l'arco e quando si forma una goccia di materiale di



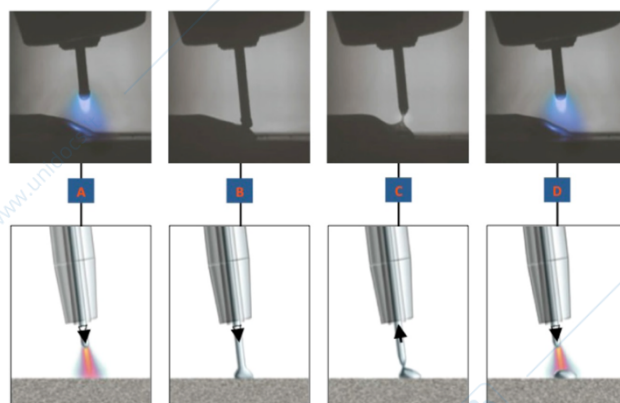
dimensioni soddisfacenti si interrompe il flusso di corrente per andare a depositare la goccia nel bagno di saldatura.

4. **Metodo Globular:** in questo caso si vanno a formare delle gocce di grande dimensione, per questo è un processo poco stabile e da evitare. La goccia di grosse dimensioni viene trattenuta dalle forze elettromagnetiche e successivamente si stacca per effetto gravitazionale generando spatter ed irregolarità nel cordone che con questa tecnica risulta poco continuo.



## CMT (saldatura a freddo)

Il processo di saldatura CMT (Cold Metal Transfer) consiste nello sfruttamento del controllo del moto del filo per distaccare le gocce di materiale in modo da ridurre l'input termico sul pezzo e contemporaneamente di realizzare il cordone di saldatura in maniera efficiente. In pratica il sistema è molto simile alla saldatura per cortocircuito: il filo viene fatto avanzare verso il bagno di saldatura facendo scoccare l'arco elettrico, il quale però non riesce a fondere completamente il materiale che arriva a



toccare così il bagno, interrompendo l'arco elettrico e facendo salire velocemente la corrente. Quando si manifesta questo fenomeno, il motore che controlla l'avanzamento del filo lo ritrae interrompendo il cortocircuito e depositando la goccia di materiale sul cordone. Il processo riprende quindi con lo scoccare di un nuovo arco elettrico. I principali vantaggi connessi con l'utilizzo di questa tecnica sono rilevabili nell'ottima qualità e continuità del cordone realizzato, nel basso thermal input fornito al pezzo che di conseguenza presenta una zona termicamente alterata più piccola e distorsioni dovute ai ritiri termici quasi nulle, il cordone non presenta spatter in quanto la corrente durante la generazione dell'arco è bassa.

## Generalità sulle saldature

Il processo di saldatura è una tecnica di unione non smontabile che consente di realizzare giunzioni permanenti tra componenti tramite la fusione di un metallo d'apporto e del metallo di base dei due pezzi che si vuole andare ad unire. Questa tecnica presenta dei vantaggi significativi dal punto di vista della tenuta della giunzione e dal punto di vista economico, in quanto sono più veloci e facili da realizzare rispetto alle giunzioni filettate, inoltre le saldature possono essere realizzate in cantiere. Il principale svantaggio risiede nella natura del processo: essendo un processo termico, il riscaldamento alla temperatura di fusione del materiale causa la formazione di zone fuse e zone termicamente alterate, nelle quali si verifica un accrescimento dei grani del materiale, il quale comporta una riduzione delle caratteristiche meccaniche del materiale in tali zone. Un altro aspetto che non deve essere sottovalutato è che il pezzo ottenuto (se la saldatura è realizzata correttamente) è monolitico, cioè abbiamo continuità fisica tra i materiali dei due pezzi: questa caratteristica comporta il fatto che le eventuali cricche che si formano in uno dei due pezzi (sia per azioni meccaniche esterne sia a causa delle tensioni residue causate dal ritiro termico in fase di raffreddamento) si propagano anche nell'altro pezzo portandolo più velocemente alla rottura (differentemente da quanto avviene con le giunzioni filettate o con le chiodature). Tutte queste caratteristiche dei giunti saldati richiedono particolare attenzione alla realizzazione di

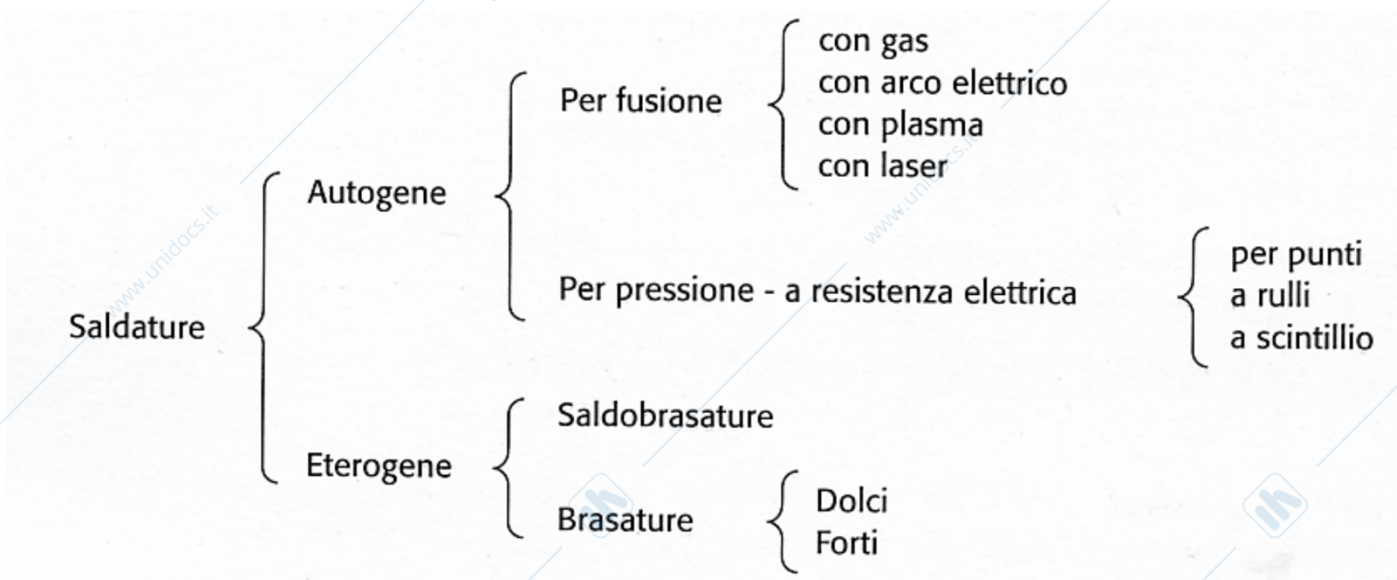
questi quando sono effettuati su parti strutturali, per questo nel corso degli anni diversi enti (tra cui la AWS - American Welding Society) si sono impegnati a stilare delle linee guida per la realizzazione delle saldature e sono stati imposti anche dei certificati che devono accompagnare le saldature strutturali (i così detti WPS - Welding Procedures Specifications).

I processi di saldatura possono essere definiti in diverso modo, secondo la natura con cui si realizza il giunto, secondo il tipo di sorgente termica impiegata e secondo il metodo di deposizione del materiale d'apporto. La principale distinzione è quella tra saldature:

- **Autogene:** in cui il metallo di base partecipa attivamente al giunto, questo tipo di saldature è molto performante e presenta caratteristiche meccaniche di rilievo. Solitamente questo tipo di giunzione viene utilizzata per le parti strutturali.
- **Eterogene:** in questo caso il metallo base non partecipa alla formazione della giunzione ma si ricorre semplicemente alla tenuta del materiale d'apporto, quest'ultima caratteristica fa sì che sia possibile unire con questa tecnica anche materiali di differenti caratteristiche e temperature di fusione (visto che per la realizzazione del giunto si impiegano leghe basso-fondenti di Argento o Stagno)

La seconda classificazione che si fa delle saldature è quella in base alla natura della sorgente termica, si possono avere:

- **Saldature elettriche:** quando il thermal input è ottenuto tramite un arco elettrico che scocca tra torcia di saldatura e pezzo.
- **Saldature chimiche:** quando il calore fornito alla saldatura è ottenuto tramite una combustione di un gas.
- **Saldature per pressione:** quando la giunzione è ottenuta per azioni meccaniche o di contatto (con l'ausilio del passaggio di corrente elettrica).



### Saldatura SMAW - Shielded Metal Arc Welding

In questo tipo di saldatura il materiale d'apporto viene fornito mediante delle bacchette rivestite di materiale basso-fondente e a densità inferiore del metallo d'apporto stesso in modo da fondersi e galleggiare sulla pozza di metallo fuso. La solidificazione del metallo d'apporto e della scoria protettiva genera un cordone ricoperto da una crosta di materiale fragile che deve essere asportata con azioni meccaniche, questo comporta che il processo risulterà difficilmente automatizzabile. Un aspetto critico di questo processo è il fatto che l'elettrodo (bacchetta di materiale) si consuma durante l'operazione di saldatura, questo genera una variazione della lunghezza dell'arco elettrico, alla quale si deve rispondere

progettando la curva caratteristica tensione-corrente ( $V - i$ ) della saldatrice, in modo che alla variazione della tensione dell'arco elettrico (ovvero della sua lunghezza) si abbia una corrente circa costante (questo comporta un thermal input costante e una penetrazione del cordone uniforme: aspetto fondamentale per la buona qualità del giunto). La natura del processo consente di scegliere dove posizionare i poli dell'arco elettrico e a questo proposito si possono avere due scelte:

- **Arco elettrico a polarità diretta:** in questo caso la pinza dell'elettrodo viene collegata al polo negativo mentre la pinza della massa viene collegata al polo positivo della sorgente di saldatura. In questo modo il flusso di elettroni avviene dall'elettrodo in direzione del pezzo e viceversa avviene per gli ioni. Questo comporta una maggior concentrazione di calore sul pezzo e una penetrazione sostanzialmente molto elevata, a scapito della produttività e delle dimensioni del cordone (che risulterà più piccolo).
- **Arco elettrico a polarità inversa:** contrariamente al caso precedente la pinza dell'elettrodo viene collegata al polo positivo mentre la pinza della massa si collega al polo negativo della sorgente di saldatura, in questo caso i moti di elettroni e ioni si invertono e la concentrazione di calore si ha sull'elettrodo. Il vantaggio connesso con questa tecnica (che è infatti la più utilizzata) è quello di accelerare la produttività e ridurre l'input termico sul pezzo (andando però a ridurre la penetrazione).

Il rivestimento degli elettrodi può avere diversa natura, in funzione delle caratteristiche del materiale che stiamo andando a saldare e in funzione della qualità che vogliamo ottenere dal giunto in questione. I principali rivestimenti impiegati sono di natura differente:

- **Ossidante:** si impiegano ossidi di ferro, manganese o silicio; le caratteristiche meccaniche del giunto non sono ottimali in quanto si ha una bassa penetrazione, il cordone però grazie alle qualità della scoria risulta ben protetto. In generale si impiega per saldature in orizzontale.
- **Acido:** composti di ossidi metallici e leghe ferrose; la qualità del cordone è buona a patto che il metallo non contenga zolfo o fosforo, in tal caso le reazioni che si avrebbero tra scoria e metallo base andrebbero a degradarne eccessivamente la composizione e le caratteristiche meccaniche. Consente di ottenere archi elettrici stabili sia con sorgenti a corrente continua che a corrente alternata. C'è la possibilità che si formino delle cricche
- **Basico:** il rivestimento di questo tipo è composto principalmente da carbonato di calcio e fluorite, si hanno effetti desolforanti e defosfatanti. La fluorite facilita notevolmente la fusione del materiale e questo può essere un problema, si ha distacco di grosse gocce di materiale che causano cortocircuiti. Un altro vantaggio è che la saldatura si può realizzare in tutte le posizioni senza particolari problemi.
- **Cellulosico:** in questo caso il rivestimento è a base di sostanze naturali, la scoria che si produce ha piccolo spessore ed è facile da rimuovere, molta della scoria si ha come fumo e questo consente di realizzare saldature in tutte le posizioni, soprattutto le verticali discendenti che non potrebbero essere realizzate in altro modo. La qualità del giunto è molto elevata.
- **Al Rutilio:** il Rutilio è composto al 95% da ossido di titanio, il quale rende il bagno di saldatura molto fluido ed un arco elettrico molto stabile il quale consente di realizzare saldature belle esteticamente anche se non molto resistenti e soggette a cricche, a causa della scarsa capacità di pulire il bagno di cui i composti al Rutilio sono dotati.

## TIG - GTAW - Tungsten Inert Gas - Gas Tungsten Arc Welding

La saldatura di questo tipo utilizza un elettrodo infusibile in tungsteno mentre il metallo d'apporto viene fornito tramite delle apposite bacchette alimentate manualmente dall'operatore. La protezione dell'arco elettrico viene affidata ad una corrente di gas inerti (Generalmente argon) erogati direttamente dalla torcia di saldatura. Questo processo è quello che mi consente di realizzare cordoni con la più alta qualità in assoluto grazie soprattutto all'assenza di inclusioni di materiali esterni a quelli della saldatura ed è quello che mi consente anche di realizzare saldature completamente autogene (senza alcun apporto di materiale). Il processo TIG è molto impiegato in industria in quanto consente (grazie alle elevate temperature raggiunte) di saldare efficientemente materiali come Alluminio, Acciaio INOX, rame, ottone e leghe di Magnesio che non sono saldabili con i processi tradizionali. In generale si impiega corrente continua quando si vogliono saldare materiali "Tradizionali" come acciaio, nichel o rame mentre si impiega corrente alternata quando si saldano alluminio, magnesio e ottone che hanno la caratteristica di formare velocemente un piccolo strato di ossido non conduttivo che interromperebbe l'arco, la corrente alternata invece ha la forza di rompere continuamente lo strato di ossido e realizzare così un cordone continuo e di qualità. In generale questo processo è molto costoso e richiede personale molto esperto per la sua corretta esecuzione, è per questo che quando possibile gli si preferiscono processi come Arco Sommerso o processi GMAW (MIG/MAG).

### Gas di Assistenza nella saldatura GMAW

La saldatura di tipo GMAW può essere eseguita sia con gas di assistenza inerti (e allora si parla di saldatura MIG) oppure con gas di assistenza attivi (quindi si parla di saldatura MAG). Le differenze connesse con questa scelta risiedono nella qualità del cordone, nella presenza o meno di ossidi inclusi nel cordone stesso, la presenza di scorie o cricche nel cordone e la profondità di penetrazione dello stesso. I diversi gas di assistenza forniscono risultati di lavorazione profondamente diversi:

- Protezione con Gas Inerte: la nuvola di gas inerte protegge il cordone di saldatura e previene la formazione di ossidi. I diversi gas influenzano diversamente la forma del cordone e la sua profondità. In caso si utilizzi Argon per esempio il cordone risulterà piccolo e profondo, mentre nel caso della  $CO_2$  il cordone è più spesso e caratterizzato da buona profondità.
- Impiego di Gas reattivi: quando si effettuano saldature con gas attivi la principale caratteristica che si ricerca è lo sviluppo di calore tramite reazioni esotermiche di combustione (ossidazione del metallo base) che favoriscono l'apporto termico e la profondità di penetrazione a parità di temperatura. L'azione protettiva in questo caso è svolta proprio dall'ossido metallico che si forma in superficie. I cordoni ottenuti con questa tecnica hanno la possibilità di includere scorie e soffiature che potrebbero innescare cricche nel componente.

