

# Studio del Prodotto e del Processo

## 1) DFM

Il DFM ha l'obiettivo di ridurre il più possibile i costi di produzione. Si articola in 3 fasi principali: Stima dei costi di produzione; riduzione costi componenti, costo assemblaggio e costi di supporto; valutazione azioni DFM.

- a) La stima dei costi avviene in primis realizzando la distinta base dei componenti. Per un componente standard (acquistato da un'altra azienda produttrice) la stima è semplice, avendo un costo fissato pari al prezzo di vendita più eventuali spese di gestione del componente. Per i componenti custom dobbiamo fare una valutazione più articolata, in quanto dobbiamo valutare il costo dei materiali (compreso lo scarto) e il costo dei processi produttivi (compresi costi impianto). La divisione principale fra i costi è: Fissi e Variabili.

**Macchine:** Sono costo fisso se comprate appositamente per fare un'unica lavorazione su un unico tipo di pezzi; altrimenti sono costo variabile poiché verrà usata per realizzare più prodotti.

**Manodopera:** Se la posso riallocare viene considerata costo variabile; altrimenti, se ho personale in grado di svolgere solo un compito lo dovrò valutare come costo fisso.

**Assemblaggio:** Ottenuto mediante le ore di lavorazione \* costo orario manodopera

**Generali:** Sono le spese che non riguardano direttamente la produzione ma ciò che sorregge la produzione stessa (affitti, trasporti ecc.)

- b) Riduzione dei costi che dobbiamo fare per i componenti custom, per l'assemblaggio e per i generali.
- **Componenti:** per ridurre questi costi la linea da seguire è quella di arrivare a prodotto finito con numero minimo di operazioni; l'obiettivo è quindi di tendere verso lavorazioni "net shape" che danno sia la forma che una finitura adeguata all'oggetto. Oppure l'utilizzo di componenti standard invece che custom riduce il costo. O ancora si usa il metodo "black box" in cui si danno solo le specifiche necessarie alla ditta produttrice lasciandogli libertà sul come realizzare tale componente.
  - **Assemblaggio:** 1° modo di riduzione si basa sul diminuire il n° di componenti, per farlo si ricorre all'integrazione, la quale è possibile se le due parti sono in stesso materiale, non c'è moto relativo tra loro e non sono fusibili meccanici. 2° modo è di semplificare le modalità di assemblaggio (metterci minor tempo), le regole principali sono: montaggio dall'alto (aiuto della gravità), pezzi autoallineanti, parti montabili con una mano, e montabili senza utensili. Efficienza di assemblaggio valutata con  $DFA = \frac{n^\circ \text{ min teorico parti} * 3}{\text{tempo tot assemblaggio}}$ . 3 è tempo min teorico di manipolazione della parte.
  - **Generali:** Sono quelli di cui ci occupiamo meno perché esulano dalla produzione.

- c) La valutazione del DFM analizza se le prestazioni, il tempo e il costo per effettuare le modifiche saranno convenienti o meno, per capire se il beneficio è reale o se i vantaggi in termine produttivo sono compromessi dalle modifiche da attuare.

Ultima parentesi sui processi produttivi. Per capire che processo conviene bisogna chiedersi sempre quante unità dobbiamo produrre. Infatti per numeri piccoli converranno processi con bassi costi fissi ma alti costi variabili (es. macchine utensili) mentre per numeri grandi converrà usare processi con costi fissi elevati ma costi variabili più bassi e quindi meglio ammortizzabili su un gran numero di pezzi (es. stampaggio).

## 2) CE e principi DFM

Il Concurrent Engineering è un insieme di metodi e tecniche che permette l'implementazione del DFM nel processo produttivo anziché solo in ambito correttivo. L'idea su cui si basa è che il progettista debba essere a conoscenza di quali siano le esigenze dei clienti; così viene effettuato un miglioramento continuo. Le linee guida principali sono le seguenti:

1. Semplicità del progetto (pochi componenti, assemblaggi veloci e affidabili)
2. Usare componenti standard
3. Gestire bene le tolleranze (se troppo stringenti costano troppo, se troppo larghe può durare poco il pezzo)
4. Utilizzare materiali facilmente lavorabili per ridurre i costi di produzione
5. Usare più possibile processi Net-Shape così da ridurre le lavorazioni successive

Quindi vi sono 3 fasi principali dello sviluppo prodotto: analisi esigenze cliente, sviluppo del prodotto e sviluppo del processo.

Il **DFQ** è un metodo per ridurre scarti e rendere un prodotto più stabile. È articolato in 3 fasi:

- 1) **Benchmarking**: confronto con la concorrenza in cui ricerca processi degli altri
- 2) **QFD**: approccio strutturato per tradurre i requisiti del cliente in requisiti di prodotto, caratteristiche critiche e caratteristiche di controllo qualità.
- 3) **TAGUCHI**: fa esperimenti per capire la relazione tra parametri di progetto e performance al fine di avere un progetto robusto. Per Taguchi, il progetto migliore è quello che minimizza l'effetto dei fattori di rumore sulla prestazione del prodotto.

**TAGUCHI** definisce 3 fasi:

- **Concept design** bisogna partire con un progetto il più insensibile possibile ai parametri in ingresso

- **Parameter design** In questa fase si cerca di ridurre la dispersione in uscita andando a modificare i parametri in gioco per rendere meno sensibile dagli input. Si hanno più metodi di approccio e altrettanti fattori:
  - a) **Leveling**: vado a variare solo i parametri in modo che gli output centrino l'obiettivo. Qui io agisco solo sulla media  $\mu$  (es. guarnizione più spessa)
  - b) **Scaling**: vado ad agire sia su  $\mu$  che sulla deviazione standard  $\sigma$  (guarniz. Sia più spessa che più rigida)
  - c) Influenzano solo la deviazione  $\sigma$  (es. guarnizione più rigida)
  - d) Non influenzano né  $\mu$  né  $\sigma$
- **Tolerance design** come ultima spiaggia si ricorre all' utilizzo di tolleranze più stringenti per ridurre la  $\sigma$  in ingresso. Ha dei costi enormi. Per questo si usa solo quando tramite altre procedure non si riesce a ridurre la varianza in output

In linea generale si procede in primis con processo di scaling per ridurre deviazione e successivamente riportare il componente a specifica in output con leveling.

**AXIOMATIC DESIGN** è altro metodo per sviluppare un prodotto, vuole cercare di sistematizzare il processo di progettazione. Si basa su due assiomi. Si basa sulla divisione della progettazione in 4 domini:

- 1) Del Cliente: i bisogni del cliente vengono evidenziati
- 2) Funzionale: specifiche funzionali e vincoli progetto (FRs)
- 3) Fisico: caratteristiche fisiche e di progettazione (DPs)
- 4) Del Processo: parametri di produzione del componente

Si possono avere 3 casi a seconda dei rapporti fra i vari domini:

- **Uncoupled** = qui i funzionali sono indipendenti dal resto e non si tiene conto di cose tipo il processo produttivo
- **Decoupled** = sono quei casi in cui i requisiti funzionali sono dipendenti da altri fattori ma non tutti
- **Coupled** = quando tutto è dipendente da tutto

I due assiomi su cui si basa sono:

- 1) **Indipendenza** = In un progetto ideale ciascun FR e ciascun DP sono completamente indipendenti; è bene che tutti gli FR siano indipendenti in modo che al variare di un DP non si verifichino variazioni di FR non collegati a quel DP modificato.
- 2) **Informazione** = Dobbiamo massimizzare la probabilità che un certo FR sia soddisfatto. Non posso metterne 300 sennò diventa troppo articolato, deve essere semplice. Il progetto migliore è quello che minimizza il contenuto dell' informazione.

Gli FR e i DP di primo livello sono scomposti in FR e DP di secondo livello e così via fino a che non si arrivano ad avere solo foglie ovvero requisiti funzionali o parametri non più scomponibili. Gli FR di primo livello influenzano i DP di primo livello che influenzano gli FR di secondo livello e così via.

### 3) DFA design for assembly

L'assemblaggio è il processo che dà valore ai componenti, se sbaglio assemblaggio posso buttare via il prodotto anche se le parti erano perfette. Il 50% degli errori che condizionano il funzionamento del prodotto dipende dall'assemblaggio. Le principali strategie di assemblaggio sono:

- 1) **Manuale:** Molto flessibile, usato per prodotti di qualsiasi complessità. Quello che conta è l'organizzazione: reperire pezzi velocemente e non commettere errori. Può essere riallocata.
- 2) **Linea:** Layout di assemblaggio per grandi n° di lotti. Molto produttiva e può integrare dei feeder per orientare componenti. Hanno problemi logistici perché non sono attraversabili e suscettibili a blocchi in caso di inceppo.
- 3) **Giostra:** Layout di assemblaggio per piccoli n° di lotti. Presenta poche stazioni però è molto compatta e si chiude su se stessa.
- 4) **Robot:** Una via di mezzo. Sono poco usati poiché sono costosi e poco flessibili, possono eseguire solo operazioni semplici e ripetibili. Usati per applicazioni ad alta precisione (saldature) e per applicazioni pericolose. Occorre pianificare bene l'assemblaggio poiché non si inceppi il processo. Diffusi sono gli SCARA (3gdl dall'alto).

In sostanza l'obiettivo è rientrare nel minor tempo possibile nel PBP. Se vogliamo avere Pay Back Period veloci per stare al passo con l'evoluzione del prodotto dobbiamo considerare che l'assemblaggio manuale ha costi fissi molto bassi rispetto alle celle o alla linea. Se si hanno pochi prodotti ma con varietà si usa l'assemblaggio manuale anche se questi sono semplici assemblaggi. Con elevate produzioni e poca varietà è vantaggioso l'utilizzo di automazione rigida. Con elevate produzioni ed elevata varietà si ricorre a una linea automatica.

L'assemblaggio è responsabile del soddisfacimento delle **Key-Characteristics** ovvero i punti chiave (vincoli geometrici fondamentali al funzionamento). Tipi di malvincolo: Sottovincolata (abbiamo un cinematismo); Sovravincolata (il componente si deforma pur di rispettare l'eccessiva imposizione dei vincoli).

La Mobilità di un sistema è calcolata come:

$$M = 6 * (n - g - 1) + \sum f_i$$

Con n = n° componenti; g = n° giunti; f<sub>i</sub> = gdl liberi per ogni vincolo

Il problema delle tolleranze può essere superato andando a riprogettare le parti che presentano problemi.

**BOOTHROYD** = metodo che permette di prevedere i tempi di assemblaggio attraverso l'utilizzo di tabelle specifiche per ogni tipo di operazione. Il codice parte da 00 a 42 e identifica quanto tempo occorre per l'assemblaggio di quel componente.

**HITACHI** = metodo che ragiona sulla complessità delle operazioni rappresentate da un punteggio; tale punteggio va da 0 a 100 e più è complessa più il punteggio dell'operazione sarà alto.

**WESTINGHOUSE** = metodo multifattore in cui girando delle tabelle circolari si ottiene il tempo di assemblaggio.

Tutti i componenti hanno una variabilità dimensionale. In alcuni casi le tolleranze possono far sì che il nostro pezzo non si assembli o che non si raggiunga i KC voluti. Abbiamo due strategie:

**1)** Cercare di rendere minime le variabilità dimensionali per ottenere i KC voluti **2)** Misurare i componenti e creare degli accoppiamenti ottimali (maggiori costi di controllo ma assenza costi per riduzione variabilità).

**Sequenza di assemblaggio:** Spesso ci sono dei software che calcolano l'ordine di montaggio. Un importante fattore qui è l'intercambiabilità che può essere: 100% (Completa), <100% (Limitata), 0% (Nulla).

- a) Completa in cui: come **vantaggi** ho semplice gestione dei ricambi, possibilità di linee di assemblaggio e possibili assemblaggi automatici; mentre come **svantaggi** ho elevati costi di produzione, tolleranze ristrette e capacità di processo ancora più stretta.
- b) Limitata in cui non tutte le combinazioni possono raggiungere l'obiettivo della produzione; per questo qui è preferibile la manodopera umana. Vi sono più approcci a cui si può ricorrere:
  - **Selez. Diretta:** è l'operatore che sceglie direttamente i componenti che possono essere assemblati basandosi sulle caratteristiche del montaggio
  - **Assemblaggio selettivo:** quando si usa tolleranza più stretta della capacità di processo si devono creare delle classi di prodotto con le quali si ottiene quella precisione. Il vantaggio è che si arriva a tolleranze molto strette ma i costi di classificazione sono molto alti. Si hanno tre casi in cui si rappresenta le capacità di processo come delle gaussiane:
    - 1) Con Capacità di Proc. Uguale ho due gaussiane uguali ed ho quindi stessa dispersione delle misure. Nelle gaussiane sono definite delle classi di componenti che possono essere assemblati con precisione voluta. Numero delle classi determinato con:
 
$$n = \frac{C.\text{proc}(A) + C.\text{proc}(B)}{Toll(A) + Toll(B)}$$
 quindi con combinazione di classi ottengo toll più ristrette di quelle date da processo.
    - 2) Con Capacità di Proc. Diverse divido in classi il componente con C.proc peggiore e successivamente procedo con una produzione su misura del secondo componente con C.proc maggiore.
    - 3) Con Capacità di Proc. Inferiori alla tolleranza di assemblaggio produco lotti molto vasti ricreandomi delle gaussiane uguali che ricalcano quelle di un processo peggiore. Si hanno molti scarti, si fanno più lanci produttivi, realizzo pezzi con 3 gaussiane sommate.
  - **Compensazione:** usate per piccole serie poiché costoso. Consiste nel rendere adattabile dei componenti ad altri. Si produce il 1° e poi il 2° in modo che fitti perfettamente. Registro il prodotto durante il normale funzionamento.

## 4) DFA Tolleranze

Intanto le tolleranze si dividono in: Dimensionali, Geometriche e di Posizione. Inoltre le quote presentano due classi principali: Funzionali (impatto su funzionalità del componente) e di Lavorazione (servono a capire con cosa ho realizzato un componente).

Metodo del caso peggiore: per passare dalle quote alle tolleranze si sommano le tolleranze nel caso peggiore o caso limite di specifica (sono cautelativo).

La scelta delle tolleranze è di due tipi:

- **Analisi**: Avviene una volta che abbiamo tutti i pezzi in mano, si misurano le tolleranze dei pezzi e si sommano per arrivare a quella totale e vedere se il pezzo può funzionare
- **Sintesi**: Si parte dalla tolleranza funzionale che dovrò avere sul prodotto e le altre sono incognite o fisse, via via assegno quelle dei pezzi. A sua volta il processo di sintesi è diviso in due approcci:

### 1) Ottimizzazione dei costi

Viene usata l'equazione di Chase che descrive la curva tra costo e tolleranza (iperbole): con  $A$ =costo fisso,  $B$  e  $k$  parametri tipici di processo,  $t$ =tolleranza

$$C = A + \frac{B}{t^k}$$

L'asintoto vert. è limite fisico di tolleranze piccole che non si possono oltrepassare, asintoto orizz. si ha comunque un costo minimo per tolleranze molto grandi.

Tolleranze più strette fatte con processi più economici. Quando si arriva al limite tecnologico del processo quasi sicuro che ce n'è un altro per cui si ottiene stesse tolleranze ma a costi minori (due grafici p. 27-28).

Il metodo ai minimi quadrati serve per fittare il valore della mia curva ad una serie di dati reali.

### 2) Ottimizzazione costi qualità

Una volta trovati i modi di non funzionamento si calcola la probabilità del guasto e il costo associato in funzione del valore di tolleranza. Si usa l'equazione di Taguchi:  $m$ = centro di specifica ovvero condiz. cercata

$$L = K(y - m)^2$$

Incremento quadratico dei costi allontanandosi da  $m$ . Metodo probabilistico, dall'intersezione delle campane di Gauss ricaviamo la curva **sx** limite inferiore sotto quale non riusciamo a ridurre l'interferenza e la curva **dx** limite superiore legata alla rottura per interferenza. Ottengo curva con range in cui produrre.

Se voglio controllare sia i costi che la funzionalità combino i due metodi in un grafico unico mostrando due minimi **T<sub>a</sub>** e **T<sub>b</sub>** in cui è ottimale produrre il componente. La tolleranza del processo è data da:

$$\sigma_{ASM} = \sqrt{\sum \left(\frac{T_i}{3}\right)^2} \quad T_{ASM} = \sigma_{ASM} * 3$$

Con tolleranze 2D e 3D non si possono usare le catene di tolleranze. Es. se tolleranza funzionale è  $\phi$  ma le quote a, c, e influenzano in maniera non lineare la nostra tolleranza. Per cui sfruttando le relazioni ottengo l'equazione che mi consente di ricavare  $\phi$ . Poi si ricava la sensibilità S come derivata parziale di  $\phi$  nelle nostre quote.

**Metodi Semplificati:** In cui sappiamo per certo che monteremo il pezzo ma non sappiamo se questa è un'ottimizzazione economica. Numerosi metodi:

- 1) Scalatura Proporzionale in cui le toll. dei pezzi standard sono fisse mentre le altre sono variabili; poniamo un obiettivo diverso dalle standard scegliendo con relazione proporzionale le tolleranze finali. Fattore proporzionale è circa  $\frac{1}{2}$ .
- 2) Scalatura con Peso(WC) con cui si riesce a tener conto della difficoltà di realizzazione, ottenendo una rudimentale ottimizzazione anche dei costi (poco accurata). Fatto da più passi: 1° attribuisco fattori di peso in base alla difficoltà di realizzazione; 2° usiamo la formula per trovare  $T_f = \sum T_{fisse} + P \sum W_i T_{nofix}$ ; 3° ricaviamo P che ci permette di calcolare le varie tolleranze per ogni processo.
- 3) Scalatura Proporzionale pura(WC) identica alla precedente ma con tutti pesi unitari
- 4) Scalatura Proporzionale pre (RSS) pesi ancora unitari ma la formula di Tf diventa di secondo grado:  $T_f = \sqrt{\sum T_{fisse}^2 + P^2 \sum (W_i T_{nofix})^2}$
- 5) Scalatura con Peso (RSS) uguale alla precedente solo che vengono attribuiti i pesi come nel secondo caso ma con formula del quarto.
- 6) Metodo Vector Loop descritto nella risoluzione di tolleranze 2D e 3D, basato sulla concatenazione di più vettori.

**NB:** Worst Case usato quando si vuole essere cautelativi rispetto allo statistico, però non permette di allargare molto le tolleranze, dando quindi poco margine di manovra.

## 5) Scelta Materiali

Materiale scelto in modo che siano garantite determinate caratteristiche funzionali al minimo costo possibile. Alcune regole sono:

- utilizzo di formati commerciali
- utilizzo composizioni standard, commerciali
- utilizzo materiali almeno near net shape, che non vogliono lavoraz. secondarie
- materiali a Freddo hanno toll. e resist. migliori ma quelli a Caldo sono più economici e permettono forme più variabili.

## 6) Lavorazioni Meccaniche

### Primarie

- **Estrusione**

Materiale forzato in una matrice che gli conferisce una determinata forma; può essere sia a caldo (acciaio) che a freddo (alluminio). I vantaggi riguardano il fatto che è Near Net Shape, ha quindi finiture buone, non presenta scarti di materiale. Tra gli svantaggi si ha che i costi fissi sono abbastanza elevati, limiti geometrici dovuti alla quantità di carica nella matrice. Si preferiscono profili simmetrici anche per ovviare alla torsione del pezzo su se stesso (Twisting).

- **Stampaggio Lamiera**

Stampo che taglia e piega la lamiera nelle più svariate forme. I vantaggi sono che è molto veloce e ha costi tutto sommato ridotti poiché lavorano lamiere non troppo dure e resistenti. Gli svantaggi sono i Costi fissi alti ma posso ridurli usando lo stampo anche per la punzonatura; Costi variabili più alti poiché la lamiera costa il 50% in più del materiale grezzo a causa delle prec. lavorazioni.

- **Laminazione**

Concepito per grandi lotti di produzione. Molto simile all' estruso, però la laminazione può sfruttare dei rulli che lavorano molto velocemente. Vantaggi di velocità e moli produttive enormi. Svantaggi in costi fissi enormi, poi ho il vincolo di non poter fare spigoli vivi in quanto potrei causare zone di intaglio. Pezzi potrebbero flettersi quindi conviene irrigidire l' oggetto.

- **Sinterizzazione**

Rientra nella metallurgia delle polveri al fine di creare un oggetto solido. Fra i Vantaggi abbiamo i costi fissi bassi (poiché lo stampo lavora a basse T), inoltre utile con metalli altofondenti, la porosità viene sfruttata a favore in molte applicazioni. Svantaggi nel costo delle polveri se queste molto fini e nel fatto che servono per forza angoli di sforno per l' estrazione del pezzo.

- **Forgiatura**

Scaldo il metallo a  $2/3$  della T di fusione e poi deformato plasticamente l' oggetto. Fra i Vantaggi troviamo il fatto che è Near Net Shape, poi è ideale per grandi produzioni poiché ha costi variabili molto bassi, i tempi di produzione sono bassissimi. Fra gli Svantaggi abbiamo i grandi costi fissi, devo tener conto di angoli di sforno piano di divisione e larghezza delle cave.

La Fucinatura è una forgiatura senza stampo, riduco i costi fissi poiché senza stampo rendo variabile il processo.

- **Fusione**

Fusione in sabbia per piccoli/medi lotti. Con quella in conchiglia salgo coi numeri. A cera persa utile per piccoli componenti (NS). Materiali più usati alluminio (alta colabilità ottenendo Near NS), ghisa e magnesio. In ordine di produttività stampi in cera, in sabbia, shell molding e pressofusione (max produttività). Vantaggi come "complexity for free", per aumentare la rigidità posso fare nervature. Svantaggi quali evitare camere chiuse, non fare angoli acuti e non raccordati che influenzano il raffreddamento, limiti inoltre di peso dovuti al ritiro elastico che causa adesione sullo stampo.

## Secondarie

Parliamo adesso di Asportazioni di truciolo, che consentono tolleranze più elevate ma caratterizzate da costi fissi più bassi e costi variabili molto alti. Se posso evitarle con processi NetShape li evito. Il costo dipende molto dalle tolleranze che voglio ottenere. Le parti devono avere un minimo di spessore per non flettersi/vibrare, poi è buono evitare angoli acuti e retti e sottotagli. Per ridurre tempi di lavorazione importante usare pezzi grezzi standard vicini al lavorato finito.

- **Tornitura**

È versatile, spesso manuale e va bene per piccole produzioni e tirature limitate. Spesso è usato nelle officine per piccole modifiche o manutenzioni.

- **Foratura**

Molto semplice che richiede posizionamento. Accortezza di mettere foro su una superficie di accesso piana per evitare flessione punta. In alcuni casi penso a un preforo. Per fori più profondi ( $L > 3D$ ) si usano punte a Cannone (costi alti). **Alesatura** è più precisa ma più lenta della foratura, obbligatorio preforo.

- **Fresatura**

Principalmente si ottengono geometrie semplici. È bene rialzare i fori dove si hanno collegamenti, fresando meno superficie. Per le linguette sono usate larghezze standard per fare la larghezza in una sola passata. Evitare fresatura delle bave.

## 7) Materie Plastiche

| Vantaggi                               | Svantaggi                            |
|--|--------------------------------------|
| Ridotto costo e peso                   | Molto inquinanti                     |
| Costi lavorazione più bassi            | Non sono rinnovabili                 |
| Rigidezza specifica elevata            | Sono infiammabili                    |
| Permette molti processi NetShape       | Hanno bassa resistenza               |
| Sono isolanti e resistono chimicamente | Basse T di esercizio                 |
| Notevoli proprietà elastiche           | Usure da strisciamento molto elevate |

Plastiche sono catene polimeriche con base di atomi di carbonio. Il monomero da le caratteristiche chimiche mentre le caratteristiche fisiche sono date dal modo in cui i monomeri formano il polimero. Parti cristallizzate comportamento ottico, quelle amorfe del comportamento meccanico.

Plastiche non seguono la legge di Hooke, comportamento non lineare (prima si deformano zone amorfe e poi cristalline). Inoltre sono fluido non newtoniano, comport. **viscoelastico**: Più deformato la plastica e più diventa fluida, questo comporta vantaggi nei processi che deformano velocemente.

Plastiche mai pure ma additivate con componenti: **di rinforzo** (migliorano resistenza), **di riempimento** (per abbassare i costi in impieghi di massa), **di resilienza** (interposti fra catene polimeriche agiscono da lubrificanti e facilitano lo scorrimento delle catene stesse).

Problemi con la **temperatura!** Sottoposta a temperatura la plastica si deteriora molto e ciò la rende poco riciclabile, poiché peggiora molto le caratt. meccaniche.

Problemi con raggi **UV!** Si può aggiungere del nero fumo per migliorare.

Non totalmente impermeabili, necessitano additivi per diventarlo.

Vi sono due macrocategorie di plastiche: **TERMOPLASTICHE** che all' aumentare di T diminuiscono la viscosità fino ad arrivare al limite di T di transizione vetrosa.

**TERMOINDURENTI** che all' aumentare di T aumentano la loro viscosità diventando più rigidi fino al limite di carbonizzazione dove perdono del tutto le caratt. meccaniche. Difficili da lavorare.

Vengono inoltre divisi in **4** gruppi:

1) **TERMOPLASTICI COMUNI** basso costo e caratt. meccaniche medie

- **Polietilene (PE)**

Il più semplice dei polimeri, quello a bassa densità è molto flessibile e resistente agli urti ma ha poca resist. meccanica; quello a alta densità ha buona impermeabilità e discreta resistenza meccanica, inoltre è l' unica plastica che può essere saldata.

- **Polipropilene (PP)**

Caratteristiche migliori del PE. Meno flessibile del primo ma è migliore per funzioni strutturali. Può essere rinforzato con fibre.

- **Polivinilcloride (PVC)**

Si aggiunge al propilene un atomo di Cl. Questo lo rende reattivo e instabile con T alta. Problemi di smaltimento dovuti al Cl i cui fumi sono dannosi. Costa poco e si può fare colorato e trasparente, aumenta la rigidità esposto agli UV; ha costi bassissimi, elevata impermeabilità e incollabilità.

- **Polistirene**

Più comune per imballaggi. Basse caratt. meccaniche e elevata deform. a rottura. Bassa conducibilità termica, bassa densità, facilmente mescolabile con altri polimeri per ricavare nuovi materiali (es. ABS = gomma+polistirene).

2) **TERMOPLASTICI INGEGNERISTICI** costo elevato ma caratt. migliori

- **Poliammidi**

Nylon e aramidici. I primi hanno buone caratt. meccaniche e a usura ma sono igroscopici e peggiorano le proprie caratteristiche in acqua; i secondi hanno rigidità e proprietà meccaniche elevatissime, il nome commerciale è KEVLAR.

- **Polimetili (POM)** Caratt. simili a Nylon ma senza igroscopicità (usati in valvole).

- **ABS** Per componenti sottoposti a urti ripetuti nel tempo.

- **Celluloidici** Fatti da sorgenti rinnovabili, utili dove componente a contatto con la pelle.

- **Fluorocarbonati (teflon)**

Raggiungono T elevate, buone caratt. meccaniche, soprattutto durezza, sono autolubrificanti.

- **Policarbonati (lexan)**

Molto versatili, elevata resistenza a impatto e ad agenti chimici.

### 3) **TERMOINDURENTI**

Partono solidi, diventa leggermente deformabile ma innalzando ancora T tende ad aumentare la propria rigidità. Vengono lavorati nella zona di rammollimento.

- **Fenolici**

In ambito industriale poiché basso costo, rigidità alta e resist. a alte temperature. Usate anche come rivestimento per stampi a fusione.

- **Amino Plastiche** Estremamente dure e hanno elevata resistenza e isolamento elettrico.

- **PE termoindurente**

Buone capacità meccaniche, termiche e chimiche. Usato per oggetti grandi come paraurti auto o fascioni navali

- **Epossidiche**

Alla base delle matrici dei materiali compositi, serve polimerizzazione in loco e non sono riciclabili in alcun modo; recuperati solo per pirolisi.

- **Poliuretano**

Molto flessibile e posso polimerizzarlo sottoforma di schiuma quando va a contatto con aria. Usato come isolante e fonoassorbente.

### 4) **GOMME**

Elevato allungamento a rottura superiore al 100%. Bassa rigidità, molto sensibile alla T e ai raggi UV. Per migliorare la resistenza a UV posso aggiungere del nerofumo. Per migliorare resist. a T e UV posso vulcanizzare, ovvero cuocere con zolfo.

3 grandi famiglie di gomme: **Alifatiche** hanno caratt. peggiori a T elevate ma ottima impermeabilità a gas e liquidi; **Fluoroelastomeri** meglio a elevate T, sempre buona elasticità; **Siliconi** range alto di T di utilizzo ma caratt. meccaniche scadenti, quelli trasparenti resistono a UV.

Unico polimero che consente l' utilizzo di processi di immersione per realizzarli.

Adesso andiamo a vedere i **Processi Produttivi** per le plastiche:

- **Estrusione**

Scaldo materiale e lo forzo a passare in una matrice. Prima di arrivare in matrice la plastica viene gradualmente scaldata con una vite di estrusione con diametro variabile per aumentare via via l' attrito. Devo limitare il tempo in temperatura per ridurre degrado. Appena estruso viene raffreddato in un bagno. Il processo dura circa 10s. Per grandi e medi lotti avviene a velocità elevata per sfruttare proprietà viscoelastiche. La coclea è il componente più costoso e varia a seconda della plastica da estrarre.

Per materiali sensibili a T possiamo usare doppia vite, alzando il contributo di pressione per il rammollimento. Invece quando materiale aderisce alla vite si alza il carico di T.

Dobbiamo tener conto del ritiro di raffreddamento quando progettiamo la matrice.

Tetrapack viene fatto per laminazione su rulli a seguito di estrusione.

- **Iniezione**

Per creazione di componenti complessi. Molte analogie con l' estrusione ma il materiale va in uno stampo da cui viene poi estratto. Per conciliare stampo (intermittente) e coclea (continua) si mobilita questa in senso assiale; accumula materiale e lo inietta una volta caricata. Il suo moto è forzato da pistone idraulico all' andata, al ritorno è mossa dall' accumulato stesso di materiale davanti a se. Durata ciclo dagli 8s ai 30s.

Non posso fare grandi componenti poiché il materiale dovrebbe rimanere in temperatura troppo; posso usare più punti di iniezione ma devo stare attento alle saldature a freddo date dai flussi che si incontrano nello stampo.

Dopo iniezione si hanno dei ritiri caratterizzati da forte anisotropia.

- **Soffiatura**

Materiale soffiato verso le superfici dello stampo, in modo da ottenere superfici sottili, però lo spessore non è uniforme, in genere sul fondo si hanno spessori maggiori a causa della gravità. Il processo si presta bene all' automazione e a matching con l' estrusione quando si deve avere buona accuratezza dimensionale. Limite dimensionale poiché per oggetti grandi avremmo bisogno di pressioni troppo elevate.

- **Termoformatura**

Si riscalda la lamiera fino a rammollimento e poi la si adagia su uno stampo. Con questo si cerca di superare limiti dimensionali dell' iniezione. Spessori non uniformi, infatti le pareti verticali sono più sottili. Buona finitura solo in pareti a contatto con lo stampo. Per evitare rottura del film si può usare un punzone che accompagna il film.

C' è anche Reverse Draw Forming dove lo stampo soffia sulla lamiera che si gonfia, poi la pressa accompagna la lamiera sullo stampo dove dei fori aspirano l' aria (usato per oggetti molto profondi in cui la parete verticale si forerebbe). Si può fare anche con stampi maschi. Formatura a 2 stampi se voglio buone tolleranze su entrambe le facce. Componenti con sottosquadro necessitano stampi più complessi in cui una parte è estraibile.

Servirebbero fori grandi per ridurre perdite viscosse ma creerebbe problemi di finitura del pezzo, perciò faccio fori piccoli che poi si allargano.

Automatizzabile se rotolo di lamiera inserito in una giostra di termoformatura.

- **Formatura rotativa**

Oggetti prodotti tramite rotazione dello stampo in più direzioni. Scaldo lo stampo in cui fonde la resina, poi spengo il riscaldamento e porto in rotazione.

Buona finitura solo a contatto con lo stampo, all' interno no. Difficoltà nel limitare ispessimento sul lato corto della mia geometria. Fatto con macchine rotative semplici.

Pezzi di dimensioni elevate anche con spessori importanti, unico limite è che il pezzo deve essere chiuso. Posso produrre anche oggetti in doppia parete.

- **Fusione**

Poco usata per il problema ad alte T della plastica. Si usa di solito per ricoprire alcuni componenti critici dove è necessario impermeabilizzare.

- **Foaming**

Esclusivo delle materie plastiche. Vi è un reagente schiumante (CO<sub>2</sub>) che gonfia la plastica fino a riempire tutto lo stampo. Pezzi con densità molto variabile, provoca variazioni grandi in caratt. meccaniche, per questo non troppo sviluppo in altezza del pezzo. Densità del pezzo stabilita con rapporto tra volume stampo e volume plastica immessa.

Posso fare schiume con rigidità alta e peso basso, però ho costi elevatissimi.

- **Compression molding**

Per termoindurenti posso usarlo. Resina posata sulla pressa tenuta in temperatura per far avvenire la polimerizzazione. Tempi di lavorazione di circa 5-10 min. Questo comporta sia elevato costo di macchinario sia elevato costo di lavorazione.

Stampi positivi (con bava) devo valutare bene la q. di materiale; Semipositivi senza bava.

- **Transfer molding**

Porto resina in T di rammollimento e grazie a un pistone viene trasferita in uno stampo dove rimane chiuso fino a fine polimerizzazione. Devo essere molto veloce a iniettare il materiale in modo da avere buona fluidità e riempire tutto lo stampo.

- **Giunzione Plastiche**

## 8) Materiali Compositi

Dati dal mix di altri materiali con caratteristiche programmabili, tarando la composizione riesco a gestire le proprietà. Composti da matrice e fibre. La prima di solito formata da materiali collanti come resine epossidiche e poliestere; Le seconde sono quelle che danno caratt. meccan. al pezzo.

### Fibre di carbonio:

Hanno moduli elastici molto elevati. Hanno vari precursori: 1) Si parte da fibra di cellulosa e con due riscaldamenti si isola il carbonio e lo si allunga (Rayon); 2) Fibra lineare che viene ossidata e quindi grafitizzata (Pan); 3) Parte dal residuo catramoso del petrolio da cui tiro fuori carbonio raffinato (Pitch). Le operazioni per produrre fibra di carbonio sono:

- **Filatura:** Polimero precursore di solito Ryon o Pan trasformato in filamento, riscaldando per favorire l'ossidazione.
- **Carbonizzazione:** Riscaldamento in ambiente inerte per arrivare a formare cristalli esagonali di carbonio.
- **Grafitizzazione:** Riscaldamento ad alta T, stiro le fibre e rendo adesiva la superficie

Se vogliamo resistenza a trazione ancora più alta servono **Fibre aramidiche** come il Kelvar; Sono molto utili con urti, avendo elevata resilienza.

### Tecnologie Produttive con Termoindurenti:

- **Manuali:** Necessito di stampo su cui poso distaccante, poi aggiungo la resina e attivo la polimerizzazione con il catalizzatore e faccio indurire a stampo chiuso. Questo sistema ha basse finiture e caratteristiche meccaniche buone.
- **Autoclave:** Materiale messo sottopressione, se ne migliora la compattazione e finitura superficiale. Bleeder ha elevata capillarità per assorbire la resina in eccesso. Pressione dell'autoclave fa penetrare meglio la resina che comporta miglioramento delle caratteristiche meccaniche. Prima di entrare in autoclave componente messo in dei sacchi al vuoto; poi si ha fase a T elevata e sottopressione; in seguito sempre in sottopressione ma a T più basse; infine abbiamo un raffreddamento. Tempo processo circa 8 ore (tantissimo).
- **RTM:** (Resine Transfer Molding) garantisce maggior regime produttivo; fogli di composito preformati e inseriti nello stampo; problema è canalizzare la resina epossidica, molto viscosa, in modo che raggiunga tutti i punti dello stampo; a questo punto sfrutto rammollimento dei termoindurenti per iniettare, poi scaldo e termino il processo. Spessore minimo è 1mm, inoltre si evita spigoli vivi. Tempi lavoraz. di 10-20 min. Lavoro a 7 bar.
- **Compression Molding:** creo semilavorato di resina e fibra che viene rullato e poi stivato a T sottozero per evitare polimerizzazione. Quando serve prendo questi fogli, li inserisco nella pressa calda per 2-3 min, poi lo estraggo e lo faccio raffreddare. Creo componenti poco complessi e molto grandi. Grandissime capacità produttive. Lavoro a 70-100 bar.
- **Metodo per Infusione:** Per far fronte a limiti di dimensione sull' RTM. Fibra (in genere di vetro) viene adagiata sullo stampo; sulla fibra è steso un foglio di polietilene a bassa densità con valvole per il vuoto; foglio sigillato ai bordi e successivamente la resina si diffonde in tutto lo stampo; infine avviata la polimerizzazione. Molto lento e si usa solo per componenti enormi come scafi delle navi. Polimerizzazione viene fatta con T o chimicamente.
- **FW:** (per avvolgimento) Usata per fare elementi tubulari chiusi partendo da filo preriscaldato; questo passa in un bagno di resina, dentro un forno (350°) e poi avvolto su una matrice. A seconda dello stato tensionale si fanno avvolgimenti diversi.
- **Poltrusione:** Filamenti avvolti passano nella resina e poi in un dosatore; a questo punto arrivano in zona stampo e stazione di riscaldamento, che polimerizza il materiale. Infine materiale polimerizzato (molto duro) è pronto al taglio.

### Tecnologie per Termoplastici:

- **Film Stacking:** Spezzo fibra di vetro dentro fogli di polietilene, poi segue un treno di laminazione da cui segue un rotolo di vetroresina.
- **Iniezione:** Processo analogo a quello per termoindurente, differenza che resina iniettata è termoplastica e non necessita di stare in temperatura per rammollire.
- **Idroformatura:** Come formatura in pressa calda, solo che ad agire sul pezzo è direttamente l' acqua.

**Compositi ceramici:** Si basano su fibre ceramiche, hanno durezza e rigidità elevatissime ma costi estremamente alti. Per ora applicazioni solo aerospaziali. Le fibre vengono messe in bagno ceramico. Sono la scommessa per il futuro con fibra metallica e matrice ceramica.

**Caratteristiche compositi:** Dipendono dalla percentuale in volume della quantità di fibre e matrice. La tensione di snervamento è data dalla somma pesata delle tensioni di snervamento dei materiali di matrice e fibra, con pesi la percentuale di volume di matrice e fibra.

$$\sigma_{sn}^{MC} = \sigma_{sn}^{MAT} V_{MAT} + \sigma_{sn}^{FIB} V_{FIB}$$

$$E^{MC} = E^{MAT} V_{MAT} + E^{FIB} V_{FIB}$$

$$V_{FIB} + V_{MAT} = 1$$

## 9) Lavorazioni non Convenzionali

Sono lavorazioni diverse dalle classiche, poiché riescono a lavorare in condizioni proibitive per le altre; usate per materiali molto duri, molto fragili o molto flessibili; usati anche quando si vogliono ottenere finiture migliori ecc.

### Laser

È un raggio di fotoni focalizzati in un punto. Composto da sorgente di luce, sistema di trasporto della luce e gruppo ottico che focalizza il raggio. Vi sono più tipi di sorgenti:

- **Solida** Niodimio-Yag; uso industriale
- **Liquida** uso non rilevante
- **Gassosa** HeNe, KrAr, CO<sub>2</sub>; solo CO<sub>2</sub> per applicazioni industriali

Industrialmente quelli a CO<sub>2</sub> hanno più potenza ma trasmettono solo per rifrazione con specchi, nel Niodimio-Yag invece pur avendo potenze più basse si hanno laser più flessibili avendo trasmissione tramite fibra ottica.

Caratteristiche del materiale che influenzano molto le prestazioni sono:

- **Riflettività:** Più il materiale riflette e peggio si taglia col laser (vedi Al)
- **Cond. Termica:** Materiale che non conduce rende più efficiente il taglio poiché non disperde calore durante il processo
- **Calore latente fus:** Se disperdono molto calore nella transizione di fase sono molto difficili da tagliare con il laser

Caratteristiche energetiche importanti per il processo (sottolineati i più importanti) sono:

- **Irradianza:** densità di corrente trasmessa per irraggiamento (P/Sspot)
- **Brillanza:** potenza termica emessa per angolo solido unitario
- **Profilo Spaziale:** raggio laser può avere profilo spaziale vario (a gaussiana); detto **TEM**
- **Profilo Temporale:** raggio laser di natura impulsiva oppure continua
- **Polarizzazione:** orientamento di raggio laser
- **Rendimento energetico:** vanno dal 2% al 20%

## TEM

Identifica la distribuzione spaziale del fascio laser nell' area di focalizzazione. Presenta due numeri di seguito che rappresentano i minimi di energia che si hanno lungo x e lungo y. TEM00 è la gaussiana perfetta. TEM10 che c'è minimo di energia lungo x. TEM11 che c'è un min di energia lungo x e uno lungo y.

Un altro parametro caratteristico dei laser è il **parametro M** che serve a stabilire la qualità del fascio. È uguale al rapporto fra diametro del fascio e diametro di un fascio di pari potenza ma con distribuzione gaussiana.

$$d_0 = d_{0g} * M^2$$

I laser possono avere emissione continua oppure emissione pulsata. In genere quelli a stato gassoso hanno assorbimento e emissione continua, viceversa quelli a stato solido hanno assorbimento continuo ma emissione pulsata. **Continuo** permette di ottenere taglio regolare (si usano per materiali convenzionali); **Pulsato** tende a generare dei microfori (scarica più energia, usato per materiali molto duri o con alta riflettività oppure con alta conduttività).

Altri due parametri fondamentali per stabilire la qualità del fascio sono: la **Divergenza**, ovvero quanto il fascio luminoso diverge dal punto di emissione; la **Profondità di campo**, che è l' altezza per la quale il d dello spot rimane entro un certo range.

L' **efficienza** del laser dipende dalla % di assorbimento e di riflessione delle superfici. I vari tipi di laser lavorano a lunghezze d' onda diverse ( $\lambda$ ); ma al variare di  $\lambda$  cambia anche l' assorbimento dei materiali. Perciò per alcuni saranno meglio laser a CO2 e per altri Nd-Y.

L' **efficienza** dipende anche dallo stato di aggregazione del materiale: per Solidi assorbimento è basso, a stato Liquido aumenta velocemente.

## • Taglio Laser

La lente focalizza fascio che fonde il materiale; flusso di gas allontana materiale fuso; gas **inerte** oppure **attivo**, dove il gas contribuisce al taglio (con ossigeno taglio più in fretta aiutati dall' ossidazione ma finiture peggiori e si forma il kerf: intaccature regolari all' inizio e poi striature poiché diminuisce la p del gas). A seconda del gas usato posso avere velocità di fuoco diverse.

**Punto di fuoco:** varia da procedura a procedura

- In Ossidazione fondo superficialmente e poi attacco con ossidante, p. di fuoco sta proprio sulla superficie del pezzo
- In Gas Inerte il fuoco è posizionato a metà della lamiera in modo da consentire il taglio di tutto lo spessore, altrimenti rischio di non andare in fondo al taglio.

I flussi di gas devono essere concentrici per evitare formaz. di **bave** in direz. preferenziali. La bava si forma sul bordo d' uscita del raggio, molto dura, costa rimuoverla dato che devo farlo col gas.

**HAZ** è zona prossima al lembo di taglio che si è alterata strutturalmente a causa del ciclo termico; maggiore è la velocità di taglio minore sarà l' estensione della zona. Laser pulsati hanno HAZ <

|               | <b>Vantaggi</b>   | <b>Svantaggi</b>  |
|---------------|---|---|
| <b>CO2</b>    | Elevate potenze quindi grandi spessori  | Utilizzo solo in piano; trasm. limitata poco flessibili   |
| <b>Nd-Yag</b> | Flessibili, permettono anche taglio 3D; pulsati (<HAZ) posso tagliare anche materiali molto riflettenti | Meno potenti e con rendimenti molto peggiori; più costosi |

### • Saldatura

In genere questa saldatura laser è priva di materiale d'apporto, il quale viene di solito usato solo in additive manufacturing; vi è presenza di gas con lo scopo sia di proteggere la zona di fusione sia di raffreddare il materiale (poiché il laser può vaporizzarlo). Il gas è tangenziale e opposto all'avanzamento.

Materiale vaporizza durante il processo; i vapori del metallo tentano di uscire ma a causa del gas inerte rimangono nel materiale; quando arriviamo a sfondare la lamiera questi vapori entrano a contatto con l'aria fredda e condensando generano il cordone. Vi sono due tipi di saldature:

- **Bassa Penetrazione:** Dove si fonde solo lo strato superficiale con laser molto delocalizzato e a bassa potenza (usato per saldature a basse prestazioni)
- **Alta Penetrazione:** Dove si ha penetrazione maggiore del bagno fuso e la zona fusa attraversa tutta la lamiera da saldare (spot molto concentrato e HAZ grandi)

Più il pezzo è profondo e maggiore sarà la zona alterata, perché il laser dovrà rimanere più a lungo sul pezzo. Si usano quindi potenze limitate per effettuare le saldature.

### • Tempra laser

Qui il materiale viene solo scaldato e non fuso. Per cui si lavora a potenze minori e con fasci delocalizzati, con grandi spot. La tempra può essere fatta anche localizzata sul pezzo, indurendo solo le parti maggiormente sollecitate. Raffreddamento per conduzione, non mi servono quindi fasi successive, riduco quindi il tempo di lavoro.

## Taglio Plasma

Plasma è il 4° stato di aggregazione della materia dove elettroni condivisi e dove si raggiungono T enormi (20000 C°). Molto produttivo e economico ma paga in precisione a causa della grande quantità di calore somministrata.

Si deve creare una ddp tra elettrodo e componente, è perciò necessario che il componente sia conduttore. Se non lo è si deve porre sopra al materiale uno strato di conduttore. Per questo si dividono in:

- **Arco trasferito:** Quando il materiale è un conduttore.
- **Arco non trasferito:** Materiale non conduttore, ho bisogno dello strato aggiuntivo.

Funzionando con gas ho un kerf scadente a causa di turbolenze. Per risolvere posso usare HDP (high definition plasma) che aumenta sottigliezza del fascio e quindi la qualità. Ho formazione di bave marcate (devo rifinire il pezzo). Bordi con **conicità** molto **marcata**. Dobbiamo usare alte I e alte V. Usato per pezzi con alto spessore che col laser non potrei tagliare.

## Waterjet Cut

Taglio meccanico a freddo eseguito con acqua eiettata ad altissima velocità. Usa pressione di quasi 8000 bar; le pompe che permettono questa  $p$  e la necessità di avere acqua superfiltrata rendono costoso il processo.

Usato per materiali in cui non si vogliono zone termicamente alterate. Esempio è il materiale di elezione per i compositi.

Di norma non può tagliare grandi spessori, per farlo dobbiamo aggiungere all' acqua dei granelli di **olivina** per fare abrasione. Questa a ogni ciclo va depurata perché gli si attacca materiale abraso. È richiamata nell' ugello grazie all' effetto venturi.

Ugello dura dalle 30 alle 200 ore, focalizzatore circa 80-120 ore, uso uno spillo per creare canale convergente-divergente. Fluido non incomprimibile a questa  $p$ , è difficile prevedere il processo.

Per ottimizzare posso impilare più lamiere di materiale, comporta che l' ultimo abbia delle bave importanti, accumulate da quelli prima, dovendo essere rilavorato.

Parametro importante è la **Stand off distance** tra pezzo e ugello, allontanando questi due si perde la profondità di taglio (grafici pagina 115).

## EDM (elettroerosione)

Sfrutta come asportazione la creazione di archi elettrici. Ha tolleranze di un ordine di grandezza superiore e rugosità di due ordini di grandezza rispetto a lavorazioni convenzionali. Pecca in fatto di tempo, poiché può richiedere anche settimane per essere ultimato. Vi è di due tipi principali:

- **A filo:** per tagli dritti
- **A tuffo:** per geometrie complesse

Utensili di materiale poco conduttore (evito degrado utensile), posso usare grafite o cupro-grafite (aggiungo rame) dato che la grafite pura è difficile da lavorare. Per ridurre l' usura del punzone e del filo nei due processi si cerca di flussare al meglio l' arco elettrico.

In quella a filo si può usare filo rotante sulle bobine in modo da cambiare sempre la zona in cui si sviluppano gli archi.

È una tecnologia che **costa poco** ma ha tempi di lavorazione molto lunghi (**poco produttiva**).

## 10) Saldatura

Collegamento non smontabile che rende i componenti continui. Prima del processo i due lembi devono essere cianfrinati per uniformare le superfici. Posso avere o non avere materiale di apporto.

Nel cordone vi sono 3 zone:

- **Zona fusa**
- **HAZ (termicamente alterata):** è la zona critica (problemi a fatica)
- **Zona non alterata**

Intanto definiamo le **Proprietà Principali** delle saldature:

- **Diluizione:** rapporto tra i metalli che coinvolgono il processo  $D = \frac{B}{A+B}$  in cui  
A=materiale apportato e B=materiale base
- **Penetrazione d**
- **Larghezza W**
- **Input termico:** rapporto tra calore somministrato e vel. saldatura  $H = \frac{Q}{v}$

Adesso facciamo una **Classificazione** dei tipi di saldatura:

- **Autogene:** metallo d'apporto non presente o T dei due metalli (A+B) è quasi la stessa
  - a) Per fusione
  - b) Per pressione
- **Eterogene:** dove metallo di apporto fonde prima e penetra nel giunto di metallo base.
  - c) Saldobrasature
  - d) Brasature

## A1. Saldatura Ossiacetilenica (gas)

I materiali sono fusi grazie alla combustione dei gas. La difficoltà sta nella miscelazione dei gas, in quanto diverse miscele mi danno diverse fiamme. Si hanno tagli scadenti (bordi poco netti), però si arriva a tagliare spessori elevati (50cm).

A seconda della miscelazione si può avere fiamme **ossidanti**, in cui il contributo di taglio è dato anche dall'ossidazione, oppure fiamme **riducenti**.

## A2. Saldatura ad arco elettrico

Composto da un generatore e due poli, uno positivo e l'altro negativo. Al polo negativo si ha l'emissione di elettroni mentre al positivo si ha l'immissione di elettroni. Ci sono due tipi di polarità a seconda di come sono assegnati i poli che determinano dov'è la concentrazione di calore:

- **Polarità normale (torcia + ; pezzo -)**  
Il punto di maggior calore che è da dove vengono emessi gli elettroni è sul Materiale di Apporto che quindi scioglie più velocemente, dando vantaggio di produttività.
- **Polarità invertita (pezzo + ; torcia -)**  
Emissione di elettroni è sul materiale di base, per cui il punto di maggior calore è sul pezzo; questo comporta una miglior penetrazione del bagno fuso, garantendo miglior qualità del giunto.

**NB** La corrente continua è quella più usata per la saldatura poiché permette di tenere sempre alta la T del bagno fuso; quella alternata serve quando abbiamo metalli con problemi di ossidazione ad alta T, così limitiamo l'innalzamento della temperatura.

Nelle macchine a elettrodo il parametro che vado a controllare è l'intensità di corrente e la tensione. Noi agiamo però sulla corrente elettrica e poi il generatore di tensione si adatterà di conseguenza. Possiamo quindi dire:

- **Corrente:** Maggiore è  $I$  e maggiore sarà la penetrazione del giunto e viceversa (non bisogna esagerare, sennò si rischia di forare il giunto); maggiore è  $I$  le dimensioni della goccia saranno sempre più piccole e cadranno con più frequenza.
- **Tensione:** Maggiore è  $V$  e maggiore sarà la dimensione dell'arco.

I processi principali ad arco sono 2: **TIG** e **SMAW**

### 1) **SMAW (a elettrodo fusibile)**

Classica saldatura a elettrodo, più diffusa perché ha costi bassi. Abbiamo un generatore, una pinza da applicare al pezzo e una torcia su cui metto l'elettrodo. Questo è rivestito da una "scoria" che galleggia sul bagno fuso e ha la funzione di proteggere il metallo fuso dall'ossidazione. L'ossidazione è esotermica e può vaporizzare il metallo.

### 2) **TIG**

Schema simile a SMAW, però la torcia è con elettrodo infondibile (tungsteno), per materiale di apporto usiamo delle bacchette e per proteggere il bagno fuso da ossidazione utilizziamo del gas inerte.

Avere alimentazione elettrica disaccoppiata da apporto di materiale permette di avere un arco più stabile, un cordone più omogeneo e una riduzione delle HAZ.

Se elettrodo in contatto col bagno fuso si possono avere inclusioni di tungsteno nel materiale che causano zone di intaglio e possibili cricche.

Prediletto per la fusione dell'alluminio, però con corrente alternata con alternanza fra polarità invertita e non.

Difetti dovuti alla necessità di personale skillato e di non avere elevata produttività.

Nei processi automatizzati materiale immesso tramite bobina di filo.

## A3. Saldatura al Plasma

Il flusso di plasma impatta sul materiale e lo scalda, poi all'interno della torcia si hanno due ugelli concentrici, uno per gas plasmogeno e uno per gas di protezione. Il plasma riduce la zona del bagno di saldatura in quanto concentra il flusso ad alta  $T$  in zona molto ristretta.

### 3) **MIG/MAG**

Prende spunto dai due sopra. L'elettrodo è consumabile come nell'**1**) però la fusione avviene in atmosfera protetta come in **2**).

La torcia ha un grilletto da cui esce il filo e il gas di assistenza. AUTOMATIZZABILE.

Velocità del filo è importante perché è legata dalla quantità di calore che va fornita per fondere quel filo. Quindi se aumenta  $v$  deve aumentare anche  $I$ .

**Qui si regola la  $V$**  regolando l'altezza della punta del filo dal pezzo ( $la$ ). Se aumento  $la$  mi diminuisce  $I$ , viceversa se diminuisco  $la$  mi aumenta  $I$ .

A seconda del voltaggio a cui lavoro mi cambia il metodo di trasferimento del metallo d'apporto:

- **Cortocircuito (V e I basse)**

La  $v$  avanzamento è  $>$  di quella di scioglimento e l'elettrodo va in corto, poiché il filo tocca il pezzo generando una **ddp**. L'arco elettrico si accende e spegne e il materiale si scioglie durante il corto tutto insieme. Infatti ho gocce grosse e problemi di spattern, che dovrò rimuovere. HAZ ridotte

- **Pulsata (I pulsata)**

La corrente pulsata mi comanda il distacco delle gocce. Qui la **ddp** è data dalla variazione di  $I$  in alimentazione. Con inverter introduco corrente alternata che mi permette di avere una certa frequenza di distacco delle gocce.

- **Globulare (alte V basse I)**

Sfrutta repulsione e.m. della goccia che rimane in sospensione grazie a queste forze; le gocce crescono e quando sono troppo grandi cadono. Formano cordoni troppo grandi.

- **Spray (alte V alte I)**

Il filo si fonde subito appena raggiunge altezza per scoccare l'arco. Crea goccioline che vanno a creare il cordone. La più produttiva ma spattern esterni al cordone. HAZ grandi.

Pulsed-Spray è una variante ma con meno carico termico. Qui aum. la frequenza di  $I$  possiamo aumentare la frequenza di disposizione. Si scalda anche meno il pezzo.

4) **Arco Sommerso**

Deriva dal TIG solo che materiale di apporto è dato da delle bacchette invece che da filo. Usato infatti per grandi saldature. Materiale protettivo sommerge elettrodo. Input termici estremamente elevati, si arriva anche a  $2000^{\circ}$ . Recipienti in pressione e ambito navale.

## A4. Saldatura Laser

Ha un'estrema spendibilità quando saldiamo lamiere sottili, infatti ha piccoli HAZ. Risulta invece molto costosa rispetto alle saldature ad arco.

## B1. Saldatura a Punti

Elettrodi pressano due lamiere. Passa corrente fra queste, si scaldano unendosi. Migliore in mondo automotive, è veloce, economica e facile da controllare.

## B2. Saldatura a Rulli

Variante di quella a punti e viene usata per ottenere dei componenti a tenuta stagna.

**Flash Welding:** Saldatura per accostamento, circuito si chiude per contatto dei due pezzi. Funziona solo per piccoli oggetti (oreficeria). **Explosion Welding:** processo solo meccanico, una carica fa entrare un pezzo dentro l'altro, usata per materiali poco affini all'unione.

## D1-2. Brasatura

Nella brasatura fondo il materiale terzo, è una specie di incollaggio. Due materiali, ci metto un filler nel mezzo e porto a temperatura alla quale fonde il filler e non i materiali. Prestazioni molto minori della saldatura ma posso fare tutte le forme.