



centroappunti.it

CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2500A

ANNO: 2020

A P P U N T I

STUDENTE: Pieretto Letizia

MATERIA: Sistemi di Produzione - Prof. Mastrogiacomo

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

TECNOLOGIA DI PRODUZIONE

LA PRODUZIONE

- **processo produttivo industriale** → insieme delle attività tecnologiche e organizzative necessarie per trasformare materiali in prodotti o beni economici

Il prodotto finito è caratterizzato da un valore aggiunto rispetto alla materia prima iniziale che consente all'azienda manifatturiera di realizzare utili

- **ciclo di produzione**



- ① **aspetto della trasformazione**: considerare tutti gli aspetti legati al diverso processo di trasformazione dei materiali in entrata fino allo stoccaggio dei prodotti finiti
- ② **aspetto strutturale**: relativo alla trasformazione, riguarda i componenti statici del sistema produttivo
- ③ **aspetto procedurale**: riguarda la gestione operativa del processo produttivo

Tipologia (ASSE MERCATO)

- **su commessa**: produrre beni specificamente richiesti dal cliente
(settori del lusso, settore aeronautico e aerospaziale)
- **a magazzino**: produrre beni sulla base di analisi di mercato e previsioni di vendite
(settore elettronico)

• Tipologie fondamentali di processo

dimensione dei lotti elevato

orientato al prodotto
(è molto meno flessibile)

orientato al processo

CONTINUO

↓
produzione di un solo o di pochi codici di prodotto. Impianti altamente automatizzati che non possono essere modificati se il processo cambia. Elevate produttività, elevato tasso di utilizzazione

BATCH

↓
orientato alla funzione, tipicamente a stoccaggio di grandi quantità di pezzi identici (produzione per lotti)

dimensione dei lotti bassa

LINEA

↓
il flusso dei materiali è ben strutturato. Persone e macchinari sono raggruppati in accordo con le sequenze dell'elaborazione

JOB SHOP

↓
orientato alla funzione, il flusso dei materiali non è strutturato, ma discontinuo e dipende dalla natura del prodotto

CICLO DI VITA DEL PRODOTTO

• fasi di vita

① commessa del cliente

② avanzoprogetto: idea del prodotto che dovrà essere realizzato. È uno schema, un disegno

③ studi fattibilità: preparazione dei disegni dei componenti e del processo produttivo. Si decide quali parti realizzare e quali acquisire

FABBRICA AUTOMATICA

• automazione

- sistema che integra diverse operazioni produttive per migliorare qualità e uniformità della produzione
- agevola il controllo e la programmazione della produzione
- riduce la possibilità di errori umani
- riduce l'eventualità di infortuni
- permette una disposizione più efficiente degli impianti

CATEGORIE DI AUTOMAZIONE

- **rigido** :
 - grandi volumi di produzione
 - macchine a trasterzo
 - elevati investimenti negli impianti
- **flessibile** :
 - è possibile modificare il programma delle macchine in modo da eseguire prodotti diversi
 - usate per produrre geometrie complesse

• C.I.M (Computer Integrated Manufacturing)

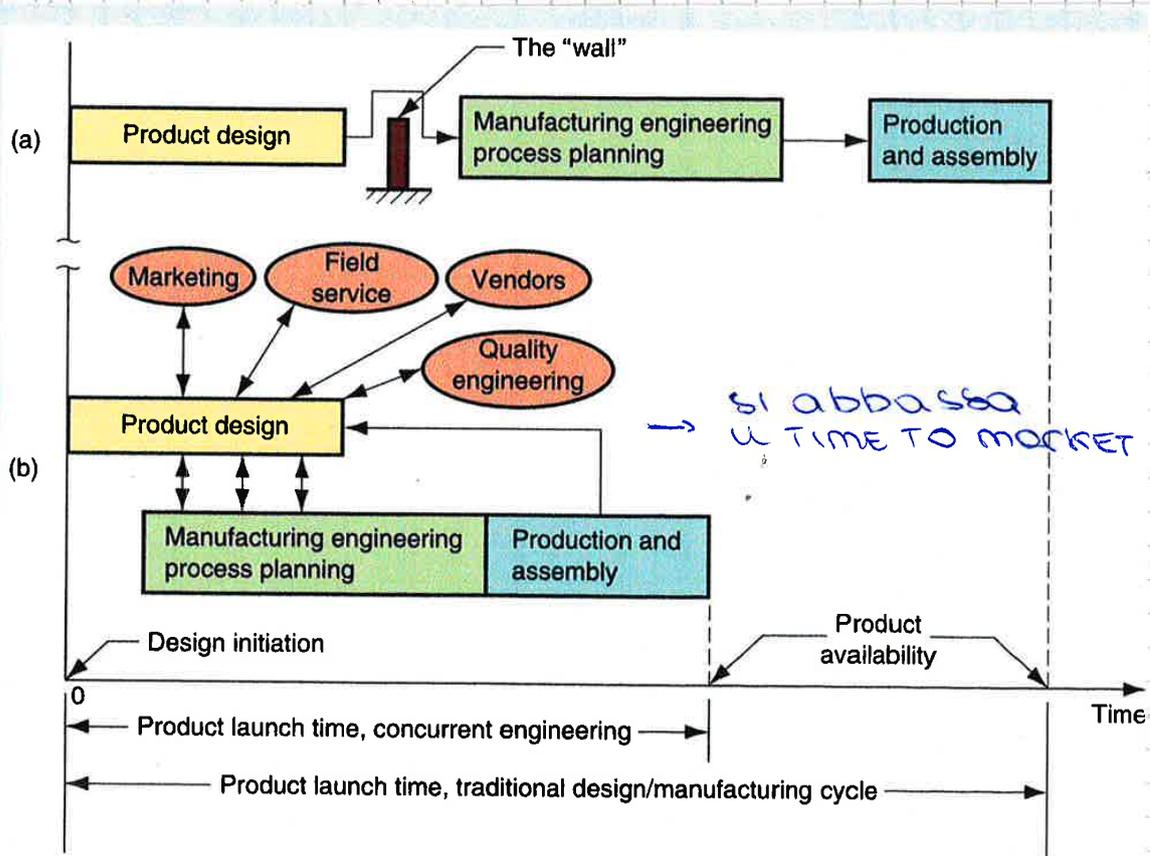
- obiettivo finale per completare il processo di automazione della fabbrica
- integrazione tramite computer di tutti gli aspetti connessi alla produzione
- vantaggi :
 - gestione prodotti a breve life cycle
 - adattabilità variazione delle domande
 - migliore qualità del prodotto
 - ottimizzazione dell'impiego del materiale e delle manodopere con riduzione del costo di produzione

architetture di sistemi appropriate
 conoscenze multidisciplinari applicate
 alla gestione dei progetti e al total
 quality management

• fase progettazione

- ① progetto preliminare (avanzprogetto)
- ② progetto esecutivo
- ③ validazione progetto
- ④ ingegnerizzazione

→ = feedback che intervengono nelle modi-
 fica di fase precedenti



a) processo produttivo tradizionale

b) concurrent engineering → elimina il muro, paral-
 lelizza le fase di pro-
 gettazione del prodotto
 e quella di progettazio-
 ne del processo produttivo

• quotatura

→ di definizione

- quote funzionali: indicazioni che determinano la funzionalità di un elemento o di un sottogruppo di elementi
- quote qualitative: relative alle forme geometriche e alle dimensioni di parti di un elemento che rimangono grezze in lavorazione

↳ di fabbricazione

- su disegni del grezzo: la quota viene derivata dalle quotature di definizione aggiungendo il valore del sovrametalli
- su disegni di lavorazione: quote derivate dalle trasformazioni necessarie per la fabbricazione delle quote funzionali e qualitative

TOLLERANZE DIMENSIONALI

- Tolleranza → ampiezza dell'intervallo entro la quale può variare la dimensione effettiva senza che questa variazione possa pregiudicare le caratteristiche di funzionalità

D = dimensione nominale

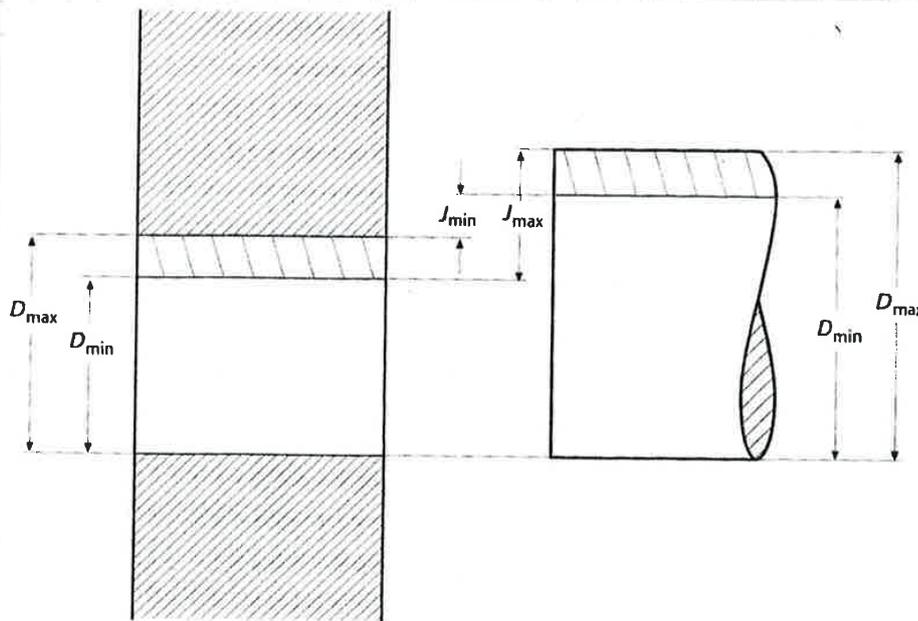
D_e = dimensione effettiva, è il risultato di un processo produttivo quindi differisce da quella nominale

D_{max} = dimensione limite superiore } identificano intervallo di tolleranza
D_{min} = dimensione limite inferiore

t = tolleranza, ampiezza intervallo

$$t = D_{max} - D_{min}$$

e_s = scostamento superiore



con interferenza

$D_{min} \text{ albero} > D_{max} \text{ foro}$

(STABILE)

• Sistema ISO → 19 qualità di tolleranze fondamentali

Qualità di tolleranza	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Tolleranza IT	7i	10i	16i	25i	40i	64i	100i	160i	250i	400i	640i	1000i	1600i

Nota: a partire dalla qualità 6 i valori delle tolleranze fondamentali sono moltiplicati per 10 ogni volta che si passa da una qualità a quella di 5 gradi superiore.

$i =$ unità di tolleranza

ampiezza di t

$$i = 0.45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0.001 D \text{ } \mu\text{m}$$

• l'intervallo di tolleranze è legato a D ($< 500 \text{ mm}$)

• posizione di t

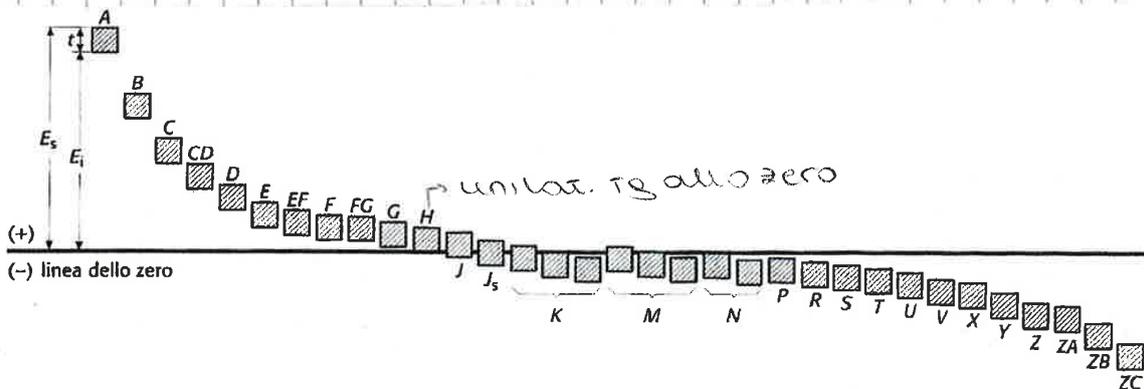


Fig. 2-16 Le diverse posizioni del campo di tolleranza rispetto alla linea dello zero per fori, secondo le norme ISO.

la posizione è determinata da una lettera

$J_s =$ tolleranza bilaterale

alberi (lettere minuscole)

DIMENSIONE NOMIALE mm		SCOSTAMENTI SUPERIORI es											SCOSTAMENTI INFERIORI ei																										
		GRADI DI TOLLERANZA: tutti											GRADI DI TOLLERANZA: tutti																										
oltre	fino a	a ¹⁾	b ¹⁾	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js ²⁾	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18	IT19	IT20	IT21	IT22	IT23	IT24	IT25	IT26	IT27	IT28	IT29	IT30	
3	3.5	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	0	-2	-4	-6	0	+2	+4	+6	+10	+14	+18	+23	+28	+34	+41	+47	+54	+63	+73	+84	+96	+109	+124	+140	+158	+178	+200
3	6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0	0	-2	-4	-6	+1	+4	+8	+12	+15	+19	+23	+28	+34	+41	+47	+54	+63	+73	+84	+96	+109	+124	+140	+158	+178	+200	
6	10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+9	+5	0	0	-2	-5	-8	+1	+6	+10	+15	+19	+23	+28	+34	+41	+47	+54	+63	+73	+84	+96	+109	+124	+140	+158	+178	+200		
10	14	+290	+150	+85	+60	+42	+26	+19	+14	+10	+6	0	0	-3	-6	-9	+1	+7	+12	+16	+20	+24	+28	+34	+41	+47	+54	+63	+73	+84	+96	+109	+124	+140	+158	+178	+200		
14	18	+300	+160	+90	+65	+44	+27	+20	+15	+11	+7	0	0	-4	-8	-12	+2	+8	+15	+22	+28	+35	+41	+47	+54	+63	+73	+84	+96	+109	+124	+140	+158	+178	+200	+218	+242	+274	
18	24	+310	+170	+95	+70	+46	+28	+21	+16	+12	+8	0	0	-5	-10	-15	+2	+9	+17	+26	+34	+43	+49	+54	+63	+73	+84	+96	+109	+124	+140	+158	+178	+200	+218	+242	+274		
24	30	+320	+180	+100	+75	+50	+30	+22	+17	+13	+9	0	0	-6	-12	-18	+2	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+77	+87	+97	+109	+124	+140	+158	+178	+200	+218	+242	+274	+300	+325		
30	40	+330	+190	+105	+80	+54	+32	+24	+18	+14	+10	0	0	-7	-14	-21	+2	+12	+22	+36	+45	+59	+75	+90	+102	+120	+146	+174	+210	+254	+310	+365	+420	+480	+525	+585	+630		
40	50	+340	+200	+110	+85	+58	+34	+26	+20	+15	+11	0	0	-8	-16	-24	+2	+13	+24	+37	+47	+63	+81	+99	+117	+144	+172	+210	+254	+310	+365	+420	+480	+525	+585	+630			
50	65	+350	+210	+115	+90	+62	+36	+28	+22	+16	+12	0	0	-9	-18	-27	+2	+14	+26	+41	+51	+71	+91	+114	+144	+172	+210	+254	+310	+365	+420	+480	+525	+585	+630	+680	+720		
65	80	+360	+220	+120	+95	+66	+38	+30	+24	+18	+13	0	0	-10	-20	-30	+2	+15	+28	+43	+55	+79	+104	+134	+162	+200	+254	+310	+365	+420	+480	+525	+585	+630	+680	+720	+760	+800	
80	100	+370	+230	+125	+100	+70	+40	+32	+26	+20	+14	0	0	-11	-22	-33	+2	+16	+30	+47	+61	+87	+116	+144	+172	+210	+254	+310	+365	+420	+480	+525	+585	+630	+680	+720	+760	+800	
100	120	+380	+240	+130	+105	+74	+42	+34	+28	+22	+15	0	0	-12	-24	-36	+2	+17	+32	+51	+67	+95	+126	+154	+182	+220	+274	+330	+385	+440	+495	+550	+600	+650	+700	+750	+800		
120	140	+390	+250	+135	+110	+78	+44	+36	+30	+24	+16	0	0	-13	-26	-39	+2	+18	+34	+55	+73	+103	+136	+164	+192	+230	+284	+340	+395	+450	+505	+560	+610	+660	+710	+760	+810		
140	160	+400	+260	+140	+115	+82	+46	+38	+32	+26	+18	0	0	-14	-28	-42	+2	+19	+36	+59	+81	+113	+148	+176	+214	+268	+324	+380	+435	+490	+545	+600	+650	+700	+750	+800	+850		
160	180	+410	+270	+145	+120	+86	+48	+40	+34	+28	+20	0	0	-15	-30	-45	+2	+20	+38	+63	+87	+121	+158	+186	+224	+278	+334	+390	+445	+500	+555	+610	+660	+710	+760	+810	+860		
180	200	+420	+280	+150	+125	+90	+50	+42	+36	+30	+22	0	0	-16	-32	-48	+2	+21	+40	+67	+93	+129	+168	+206	+250	+306	+362	+417	+472	+527	+582	+637	+692	+747	+802	+857	+912		
200	225	+430	+290	+155	+130	+94	+54	+46	+40	+34	+24	0	0	-17	-34	-51	+2	+22	+42	+71	+99	+137	+178	+216	+260	+316	+372	+427	+482	+537	+592	+647	+702	+757	+812	+867	+922		
225	250	+440	+300	+160	+135	+98	+56	+48	+42	+36	+26	0	0	-18	-36	-54	+2	+23	+44	+75	+105	+145	+188	+226	+270	+326	+382	+437	+492	+547	+602	+657	+712	+767	+822	+877	+932		
250	280	+450	+310	+165	+140	+102	+60	+52	+46	+40	+30	0	0	-19	-38	-57	+2	+24	+46	+79	+111	+153	+200	+248	+292	+348	+404	+460	+515	+570	+625	+680	+735	+790	+845	+900	+955		
280	315	+460	+320	+170	+145	+106	+62	+54	+48	+42	+32	0	0	-20	-40	-60	+2	+25	+48	+83	+117	+161	+210	+258	+302	+358	+414	+470	+525	+580	+635	+690	+745	+800	+855	+910	+965		
315	355	+470	+330	+175	+150	+110	+66	+58	+52	+46	+34	0	0	-21	-42	-63	+2	+26	+50	+87	+123	+169	+218	+266	+310	+366	+422	+478	+533	+588	+643	+698	+753	+808	+863	+918	+973		
355	400	+480	+340	+180	+155	+114	+70	+62	+56	+50	+38	0	0	-22	-44	-66	+2	+27	+52	+91	+129	+177	+226	+274	+318	+374	+430	+486	+542	+598	+654	+710	+766	+822	+878	+934	+990		
400	450	+490	+350	+185	+160	+118	+74	+66	+60	+54	+42	0	0	-23	-46	-69	+2	+28	+54	+95	+135	+185	+234	+282	+326	+382	+438	+494	+550	+606	+662	+718	+774	+830	+886	+942	+998		
450	500	+500	+360	+190	+165	+122	+78	+70	+64	+58	+46	0	0	-24	-48	-72	+2	+29	+56	+99	+141	+191	+240	+288	+332	+388	+444	+500	+556	+612	+668	+724	+780	+836	+892	+948	+1004		
500	560	+510	+370	+195	+170	+126	+82	+74	+68	+62	+50	0	0	-25	-50	-75	+2	+30	+58	+103	+147	+197	+246	+294	+338	+394	+450	+506	+562	+618	+674	+730	+786	+842	+898	+954	+1010		
560	630	+520	+380	+200	+175	+130	+86	+78	+72	+66	+54	0	0	-26	-52	-78	+2	+31	+60	+107	+153	+203	+252	+300	+344	+390	+446	+502	+558	+614	+670	+726	+782	+838	+894	+950	+1006		
630	710	+530	+390	+205	+180	+134	+90	+82	+76	+70	+58	0	0	-27	-54	-81	+2	+32	+62	+111	+159	+209	+258	+306	+350	+396	+452	+508	+564	+620	+676	+732	+788	+844	+900	+956	+1012		
710	800	+540	+400	+210	+185	+138	+94	+86	+80	+74	+62	0	0	-28	-56	-84	+2	+33	+64	+115	+165	+215	+264	+312	+356	+402	+458	+514	+570	+626	+682	+738	+794	+850	+906	+962	+1018		
800	900	+550	+410	+215	+190	+142	+98	+90	+84	+78	+66	0	0	-29	-58	-87	+2	+34	+66	+119	+171	+221	+270	+318	+362	+408	+464	+520	+576	+632	+688	+744	+800	+856	+912	+968	+1024		
900	1000	+560	+420	+220	+195	+146	+102	+94	+88	+82	+70	0	0	-30	-60	-90	+2	+35	+68	+123	+175	+225	+274	+322	+366	+412	+468	+524	+580	+636	+692	+748	+804	+860	+916	+972	+1028		
1000	1100	+570	+430	+225	+200	+150	+106	+98	+92	+86	+74	0	0	-31	-62	-93	+2	+36	+70	+127	+181	+231	+280	+328	+372	+418	+474	+530	+586	+642	+698	+754	+810	+866	+922	+978	+1034		
1100	1250	+580	+440	+230	+205	+154	+110	+102	+96	+90	+78	0	0	-32	-64	-96	+2	+37	+72	+131	+187	+237	+286	+334	+378	+424	+480	+536	+592	+648	+704	+760	+816	+872	+928	+984	+1040		
1250	1400	+590	+450	+235	+210	+158	+114	+106	+100	+94	+82	0	0	-33	-66	-99	+2	+38	+74	+135	+193	+243	+292	+340	+384	+430	+486	+542	+598	+654	+710	+766	+822	+878	+934	+990	+1046		
1400	1600	+600	+460	+240	+215	+162	+118	+110	+104	+98	+86	0	0	-34	-68	-102	+2	+39	+76	+139	+201	+251	+300	+348	+392	+438	+494	+550	+606	+662	+718	+774	+830	+886	+942	+998	+1054		
1600	1800	+610	+470	+245	+220	+166	+122	+114	+108	+102	+90	0	0	-35	-70	-105	+2	+40	+78	+143	+207	+257	+306	+354	+398	+444	+500	+											

scostamenti fondamentali

alberi

Scostam. fondam.		e_s					j_s	e_i								
Posizione	Qualità	d	e	f	g	h		k	m	n	p	r	s	t	u	
Dimensioni (mm)	> 500 ÷ 560	-260	-145	-76	-22	0	$e_s = -1/2 IT$	0	+26	+44	+78	+150	+280	+400	+600	
	> 560 ÷ 630							0	+30	+60	+88	+175	+340	+500	+740	
	> 630 ÷ 710	-290	-160	-80	-24	0		0	+34	+56	+100	+210	+430	+620	+940	
	> 710 ÷ 800							0	+40	+66	+120	+250	+520	+780	+1150	
	> 800 ÷ 900	-320	-170	-86	-26	0		0	+48	+78	+140	+300	+640	+960	+1450	
	> 900 ÷ 1000							0	+58	+92	+170	+400	+920	+1350	+2000	
	> 1000 ÷ 1120	-350	-195	-98	-28	0		0	+68	+110	+195	+440	+1000	+1500	+2300	
	> 1120 ÷ 1250							0	+76	+135	+240	+550	+1250	+1900	+2900	
	> 1250 ÷ 1400	-390	-220	-110	-30	0		0				+460	+1100	+1650	+2500	
	> 1400 ÷ 1600							0				+580	+1400	+2100	+3200	
	> 1600 ÷ 1800	-430	-240	-120	-32	0										
	> 1800 ÷ 2000															
	> 2000 ÷ 2240	-480	-260	-130	-34	0										
	> 2240 ÷ 2500															
> 2500 ÷ 2800	-520	-290	-145	-38	0											
> 2800 ÷ 3150																

fori

Scostam. fondam.		E_i					J_s	E_s								
Posizione	Qualità	D	E	F	G	H		K	M	N	P	R	S	T	U	
Dimensioni (mm)	> 500 ÷ 560	+260	+145	+76	+22	0	$E_s = +1/2 IT$	0	-26	-44	-78	-150	-280	-400	-600	
	> 560 ÷ 630							0	-30	-60	-88	-175	-340	-500	-740	
	> 630 ÷ 710	+290	+160	+80	+24	0		0	-34	-56	-100	-210	-430	-620	-940	
	> 710 ÷ 800							0	-40	-66	-120	-250	-520	-780	-1150	
	> 800 ÷ 900	+320	+170	+86	+26	0		0	-48	-78	-140	-300	-640	-960	-1450	
	> 900 ÷ 1000							0	-58	-92	-170	-400	-920	-1350	-2000	
	> 1000 ÷ 1120	+350	+195	+98	+28	0		0	-68	-110	-195	-440	-1000	-1500	-2300	
	> 1120 ÷ 1250							0	-76	-135	-240	-550	-1250	-1900	-2900	
	> 1250 ÷ 1400	+390	+220	+110	+30	0		0				-460	-1100	-1650	-2500	
	> 1400 ÷ 1600							0				-580	-1400	-2100	-3200	
	> 1600 ÷ 1800	+430	+240	+120	+32	0										
	> 1800 ÷ 2000															
	> 2000 ÷ 2240	+480	+260	+130	+34	0										
	> 2240 ÷ 2500															
> 2500 ÷ 2800	+520	+290	+145	+38	0											
> 2800 ÷ 3150																

la dimensione si può scrivere come

(v. nominale) e_s/e_i

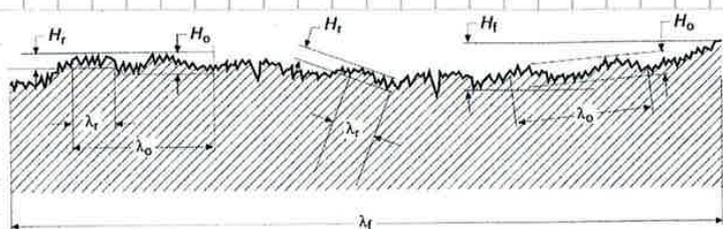
Materiali	Intervallo di temperatura (°C)	Coefficiente β (°C ⁻¹)	Materiali	Intervallo di temperatura (°C)	Coefficiente β (°C ⁻¹)
Acciaio (C% = 0,05 + 0,85)	- 200° ÷ 0°	9 · 10 ⁻⁶	Bronzo di Alluminio	20° ÷ 100°	15 · 10 ⁻⁶
	0° ÷ 100°	12 · 10 ⁻⁶	Ghisa	- 200° ÷ 20° 20° ÷ 100°	9 · 10 ⁻⁶
	100° ÷ 400°	13 · 10 ⁻⁶			10 · 10 ⁻⁶
	400° ÷ 500°	14 · 10 ⁻⁶	Nichel	- 200° ÷ 0° 0° ÷ 100° 100° ÷ 1000°	10 · 10 ⁻⁶
	500° ÷ 700°	17 · 10 ⁻⁶			13 · 10 ⁻⁶
		16 · 10 ⁻⁶			
Acciaio Austenitico	0° ÷ 100°	18 · 10 ⁻⁶	Ottone	- 200° ÷ 20° 20° ÷ 100° 100° ÷ 300°	17 · 10 ⁻⁶
Acciai legati	0° ÷ 100°	13 · 10 ⁻⁶			19 · 10 ⁻⁶
	100° ÷ 1000°	20 · 10 ⁻⁶			20 · 10 ⁻⁶
Alluminio	- 250° ÷ 200°	3 · 10 ⁻⁶	Rame	- 250° ÷ -200° - 200° ÷ 20° 20° ÷ 300° 400° ÷ 1000°	4 · 10 ⁻⁶
	- 200° ÷ 180°	8 · 10 ⁻⁶			13 · 10 ⁻⁶
	- 180° ÷ 20°	18 · 10 ⁻⁶			17 · 10 ⁻⁶
	- 80° ÷ 0°	22 · 10 ⁻⁶			19 · 10 ⁻⁶
	0° ÷ 100°	24 · 10 ⁻⁶	Tungsteno	- 200° ÷ 100° 100° ÷ 1000°	4
	0° ÷ 300°	25 · 10 ⁻⁶			5
	0° ÷ 500°	27 · 10 ⁻⁶			
Bronzo	- 200° ÷ 20°	15 · 10 ⁻⁶	Ghisa	- 200° ÷ 20° 20° ÷ 100°	22
	20° ÷ 100°	18 · 10 ⁻⁶			27

INDICAZIONI SUI DISEGNI

- **albero** : lunghezza di un tratto pieno anche se non cilindrico
- **foro** : lunghezza di un tratto cavo anche se non cilindrico

• irregolarità superficiali

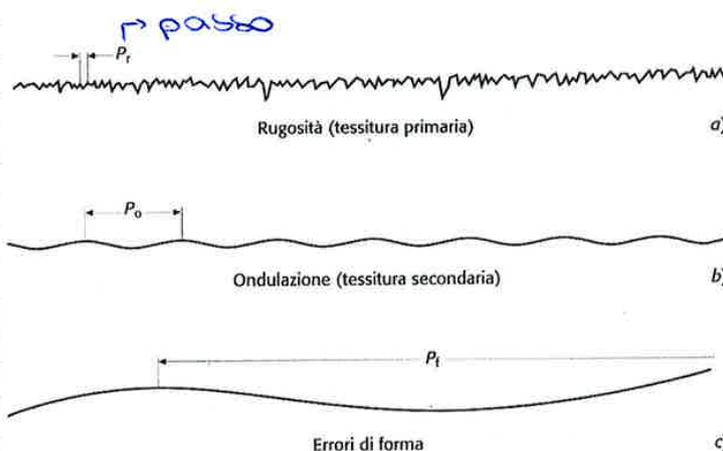
- errori di forma: deviazioni della superficie misurate dalle superfici medie al netto degli errori microgeometrici
- errori microgeometrici:
 - ↳ rugosità (tessitura primaria):
 - ↳ ondulazioni (tessiture secondarie)



H_f = errori di forma

H_r = rugosità

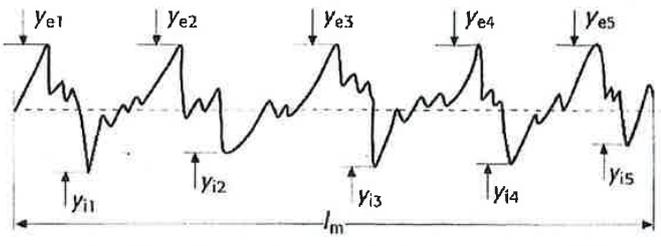
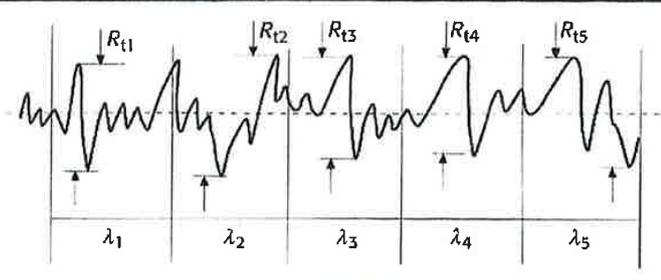
H_o = ondulazioni



H_f : errori macroscopici di piccola ampiezza, da ricercare negli errori propri del sistema che ha prodotto la superficie

rugosità: irregolarità microgeometriche di ampiezza molto piccola e piccolo passo, che derivano dal moto di alimentazione e dalle caratteristiche del materiale

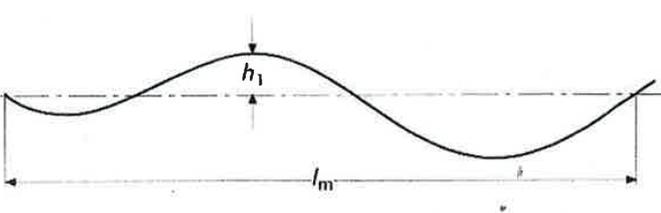
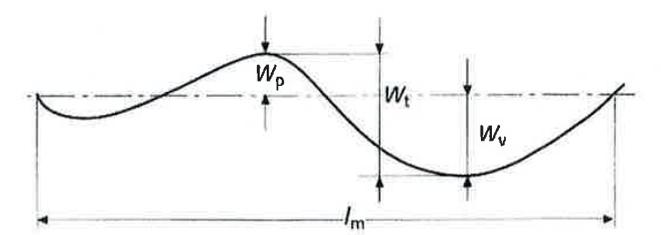
ondulazioni: irregolarità microgeometriche che hanno ampiezza e passo superiori, che derivano da vibrazioni del sistema

R_z (ISO)	$\frac{\sum_{i=1}^5 y_{ei} + \sum_{i=1}^5 y_{vi} }{5}$		ISO
R_z (DIN)	$\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{ti}$		DIN

R_z = media aritmetica dell' altezze delle 5 creste predominanti e delle 5 valli più profonde (ISO)

R_z = media delle distanze tra picco più alto e valle più profonda (DIN)

PARAMETRI di ONDULAZIONE

W_a	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i $	
W_t (W_p, W_v)		

TOLLERANZE DI FORMA E POSIZIONE

Tolleranze geometriche	Designazione	Simbolo
Di forma	Rettilineità	—
	Planarità	□
	Circolarità	○
	Cilindricità	∅
Di posizione	Inclinazione	∠
	Parallelismo	∥
	Normalità	⊥
	Concentricità e coassialità	◎
	Simmetria	≡

- **di forma**: definite dall'ampiezza della fascia entro la quale devono essere compresi tutti gli errori macrogeometrici perché siano assicurate le caratteristiche di funzionalità
- **di posizione**: definite dall'ampiezza della fascia entro la quale deve essere compresa la deviazione di una superficie dalle specifiche richieste rispetto ad una superficie di riferimento

Inviluppo (E) (facoltativo)

↓
cilindro ideale avente diametro corrispondente a quello dello scostamento superiore

massimo materiale (M) (facoltativo)

↓
se le dimensioni reali di un componente sono inferiori a quelle di massimo materiale, le tolleranze geometriche possono essere aumentate pur continuando a garantire l'accoppiamento

I MATERIALI

5

• Classificazione

- ↳ metallica
- ↳ polimerica
- ↳ natura inorganica

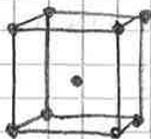
STRUTTURA METALLICA

- **legame metallico** → uno o più e⁻ si allontanano dall'atomo originario e vengono condivisi tra più atomi vicini creando un numero elevato di ioni positivi immersi in una nuvola di cariche negative
 - ↓
 - si crea **reticolo cristallino**
 - ↓
 - elevata resistenza e conducibilità sia elettrica che termica
- ↳ gli e⁻ costituiscono cariche vaganti che si insinuano nello spazio tra gli ioni
- ↳ se gli ioni si allontanano tra loro, la nuvola elettronica tende a fissarsi in equilibrio stabile, secondo distanze ben definite

RETICOLO CRISTALLINO

- **reticolo cristallino** → struttura che è composta da un elevato n° di ioni metallici
- **cella unitaria** → più piccola porzione di volume che ripetuta riempie completamente il reticolo

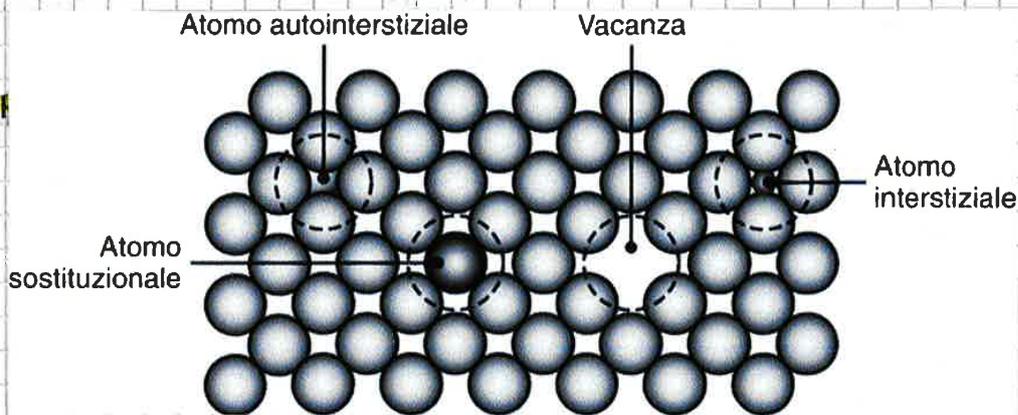
1) cella cubica a corpo centrato



• grano cristallino

- insieme di celle cristalline con medesimo orientamento che compongono il metallo
- la maggior parte dei metalli è costituita da strutture policristalline
- le dimensioni incidono sulle proprietà meccaniche dei metalli (> dimensioni, più facile deformabilità)

IMPERFEZIONI NEI CRISTALLI

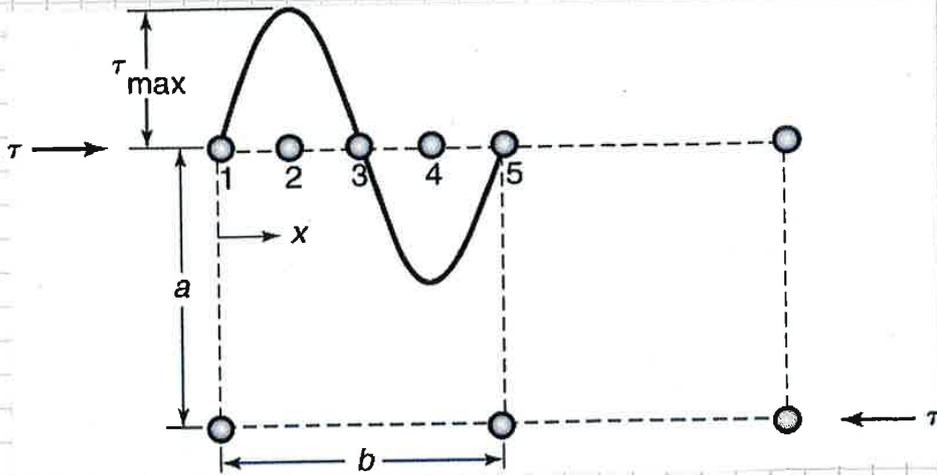


2) difetti di punto

frenano scorrimento metallico

- **vacanze**: mancanza di un atomo nel reticolo cristallino, conferisce maggiore duttilità
- **atomo interstiziale**: un atomo di diverso tipo è inserito all'interno delle maglie del reticolo
- **atomo autointerstiziale**: all'interno del reticolo è inserito un atomo dello stesso tipo
- **atomo sostituzionale**: un atomo di diversa natura va a prendere la posizione all'interno del reticolo di un atomo originale

• andamento forza di taglio

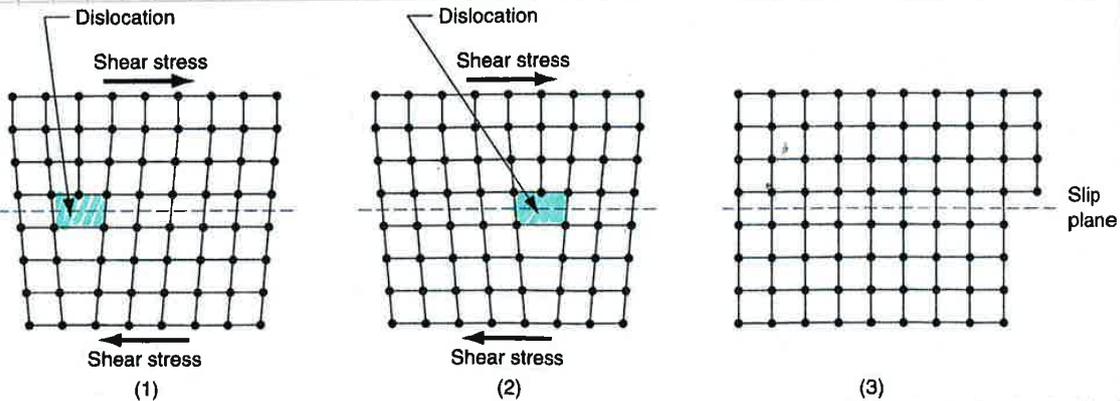


quando non è applicata τ gli atomi sono in equilibrio

• sotto l'applicazione di una forza di taglio, la fila di atomi superiore si muove verso destra
quando $x=0$ o $x=b$, $\tau=0$

τ varia secondo un andamento sinusoidale

• effetto delle dislocazioni



la presenza di una dislocazione abbassa la soglia per ottenere lo scorrimento o plastico

incrudimento → fenomeno per cui si innescano un aumento delle tensioni di taglio necessaria a ottenere ulteriori deformazioni

ESERCITAZIONE rappresentazione grafica

1) valutazione della quota

41 H 8

è un foro

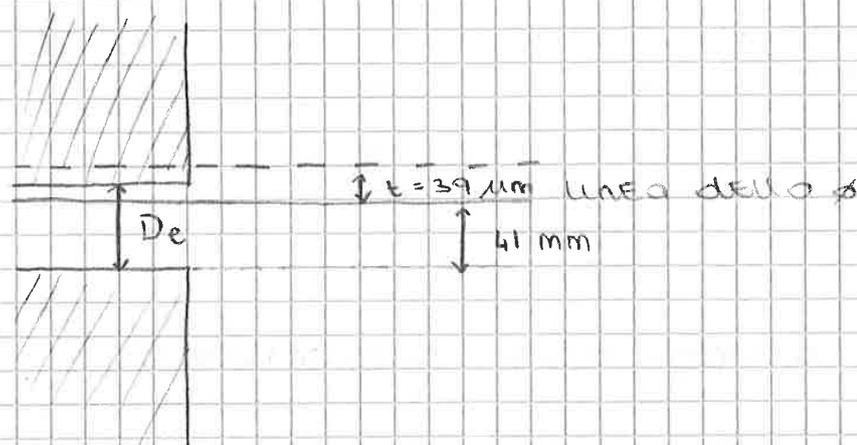
$D = 41 \text{ mm}$

$H =$ posizione di $t \rightarrow E_i = 0$ foro base

$IT 8 =$ qualità di $t \rightarrow t = 39 \mu\text{m}$

$$t = E_s - E_i \rightarrow E_s = 39 \mu\text{m}$$

14



parete inferiore
del foro

2) valutazione della quota

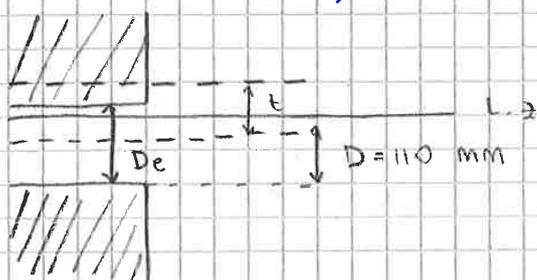
110 J 7 è un foro

$D = 110 \text{ mm}$

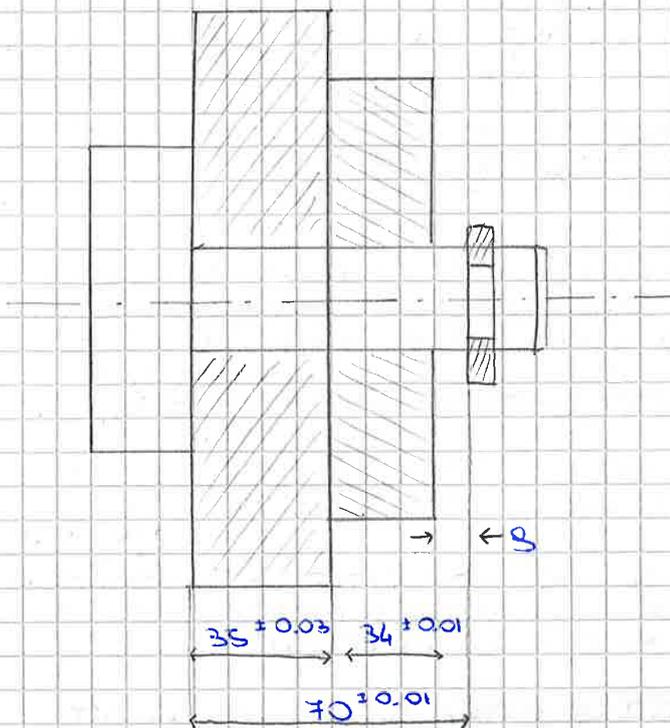
$J \rightarrow E_s = 22 \mu\text{m}$

$\rightarrow E_i = -13 \mu\text{m}$

$IT 7 \rightarrow t = 35 \mu\text{m}$



4) Valutare il componente e la quotatura del gioco usando i due approcci



I componenti hanno intervallo t simmetrico

$$t_A = 0.06 \text{ mm}$$

$$t_B = 0.02 \text{ mm}$$

$$t_C = 0.02 \text{ mm}$$

Worst case

$$t_g = \sum t_i$$

$$t_g = 0.06 + 0.02 + 0.02$$

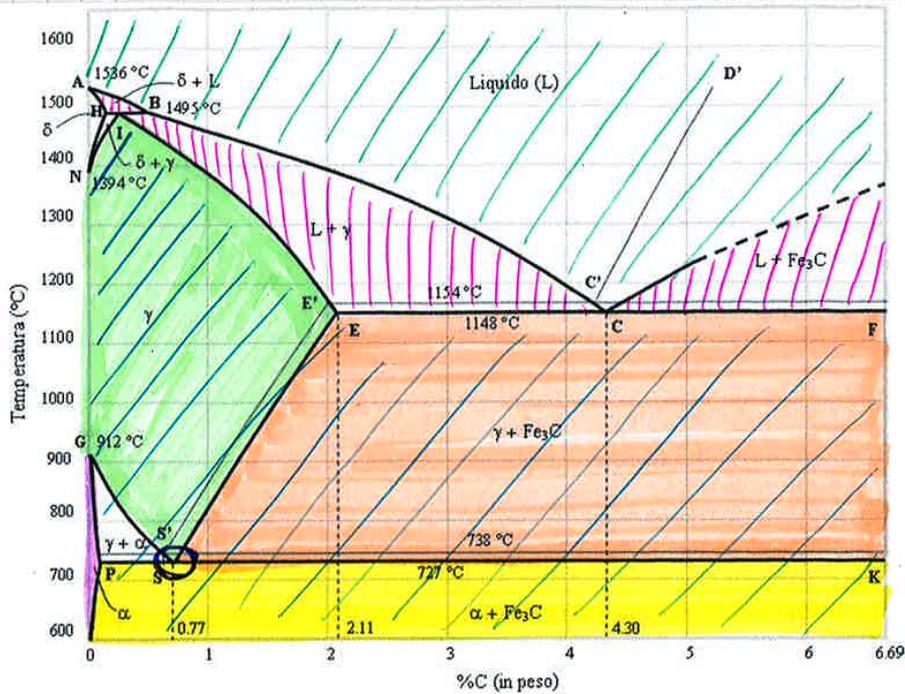
$$t_g = 0.1 \text{ mm}$$

Statistico

$$t_g = \sqrt{\sum t_i^2}$$

$$t_g = \sqrt{0.0036 + 2 \cdot 0.004}$$

$$t_g = 0.0663 \text{ mm}$$



(% soluzione) di carbonio in questo caso

//// = stato liquido: $T > 1536^\circ$ quando ho 0% di carbonio, $1148^\circ < T < 1536^\circ$ quando invece è presente

/// = stato solido + liquido

/// = stato solido

La struttura della lega non è sempre la stessa, quindi ci sono regioni diverse dove ha comportamenti differenti

 = regione dell'austenite: soluzione solida interstiziale di carbonio nel ferro γ . Il ferro puro tra $912^\circ < T < 1394^\circ$ è presente nella forma allotropica γ (CCF) e ha una solubilità fino al 2.11% di carbonio a $T=1148^\circ$. È la zona dove le leghe si presentano nella loro forma più duttile

 = regione della ferrite: soluzione solida interstiziale di carbonio nel ferro α (CC). Essendo molto compatta non presenta elevati valori di solubilità di carbonio (max 0.022%)

 = regione della perlite: lega binaria di ferro α e cementite (Fe_3C). È molto dura e fragile per la cementite

TRATTAMENTI TERMICI

1) Trattamento termico

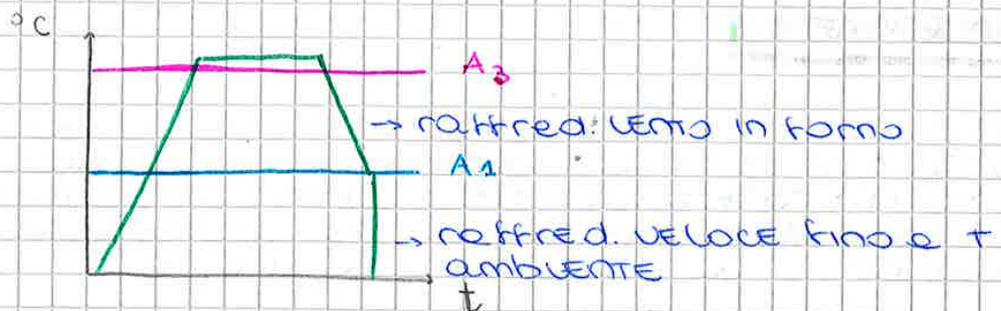
- si possono modificare le proprietà meccaniche dei metalli con cicli termici
- operazione mediante la quale un metallo o una lega viene sottoposto a cicli termici senza arrivare alla sua fusione (T inferiori al pt di fusione)

1) ricottura

consiste in un ciclo termico di un riscaldamento a T elevate, seguito da un raffreddamento lento in aria o in forno per rendere più omogeneo e lavorabile il materiale

da temperatura di austenizzazione, un' adeguata permanenza a questa temperatura e poi raffreddamento fino a T ambiente ottenendo una perle

diminuisce la resistenza meccanica, ma aumenta la lavorabilità (duttilità)



A_3 = temperatura fine austenizzazione

A_1 = temperatura inizio austenizzazione

2) Tempra

1) riscaldamento a T elevate ($800 - 900^\circ C$) che è seguito da un raffreddamento rapido in acqua o olio

è un trattamento tipico delle acciai speciali che presentano allo stato bonificato ancora una buona lavorabilità

Trattamenti superficiali

cambiano solo le proprietà delle superfici del pezzo

- per rimozione dello strato superficiale (meccanico, mediante solventi)
- per conversione delle superfici (ossidazione, anodizzazione, fosfatazione, cromatura)
- termica (cementazione, nitrurazione)
- per deposizione (elettrolitica, meccanica)

• in base alle proprietà

- ↳ termoplastici
- ↳ termindurenti
- ↳ elastomeri

Omopolimero



polimero con stessa tipologia di monomero

Copolimero alternato



Copolimero a blocchi

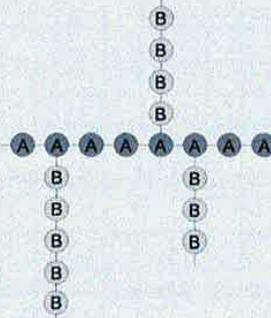


Copolimero random



polimero con diversa tipologia di monomero

Copolimero innestato



Termoplastici

- ↳ ottenuti per processo di calore
- ↳ si possono modellare più volte anche se sono soggetti a invecchiamento termico (facili da riciclare)

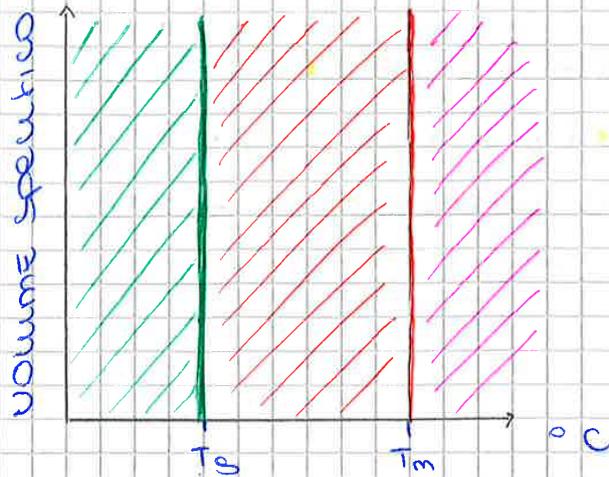
Termoindurenti

- ↳ modellazione per reticolazione
- ↳ il materiale base è allo stato liquido
- ↳ non si può rimodellare il materiale

Elastomeri

↳ comportamento elastico del modello (gomme)

PROCESSO DI SOLIDIFICAZIONE



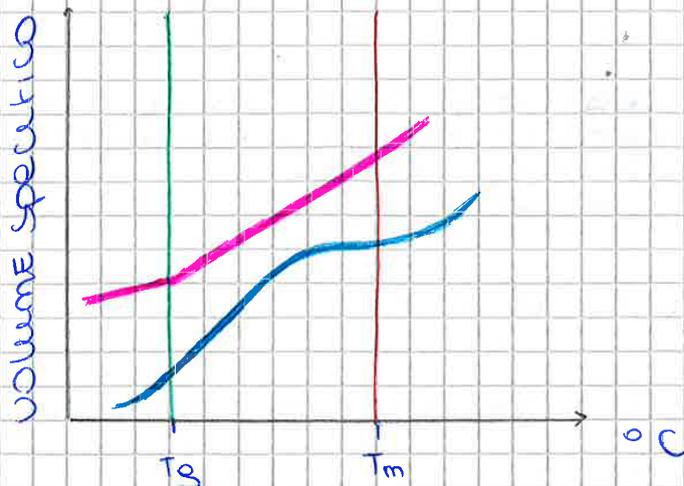
T_g = temperatura di TRANSIZIONE VETROSA

T_m = temperatura di FUSIONE

/// = solido VETROSO (duro e fragile) quando $T < T_g$

/// = liquido visco-elastico quando $T_g < T < T_m$

/// = liquido viscoso quando $T > T_m$

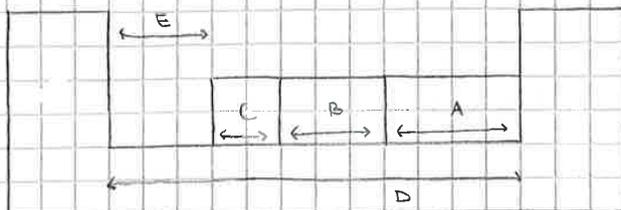


— = polimeri (semi)cristallini

- = polimeri amorfi, caratterizzati da un'unica temperatura T_g , non ho T di fusione (T_m)

ESERCITAZIONE rappresentazione grafica

1)



E = canale

A = 11.125 \bar{J}_s 3 mm

B = 11.000 \bar{J}_s 2 mm

C = 10.750 \bar{J}_s 4 mm

D = 32.905 \pm X mm

? X / $E_{min} = 0.005$ mm

X = TOLLERANZA

2X = intervallo di TOLLERANZA

$E = D - (A + B + C)$

TROVO QUOTATURE

IT 3 \rightarrow $t = 3 \mu\text{m}$ $\bar{J}_s \rightarrow$ intervallo simmetrico

A = 11.125 \pm 0.0015 mm

IT 2 \rightarrow $t = 2 \mu\text{m}$ B = 11.000 \pm 0.001 mm

IT 4 \rightarrow $t = 5 \mu\text{m}$ C = 10.750 \pm 0.0025 mm

$E_{min} \rightarrow$ uso approccio statistico

$D_{min} = (A+B+C)_{max}$

$t_E = \sqrt{t_D^2 + t_A^2 + t_B^2 + t_C^2}$

$= \sqrt{(2X)^2 + (3)^2 + (2)^2 + (5)^2}$

$= \sqrt{4X^2 + 38}$

$$t_A = 0.3 \text{ mm}$$

$$t_B = 0.2 \text{ mm}$$

$$t_r = \sqrt{t_A^2 + t_B^2}$$
$$= \sqrt{(0.3)^2 + (0.2)^2}$$

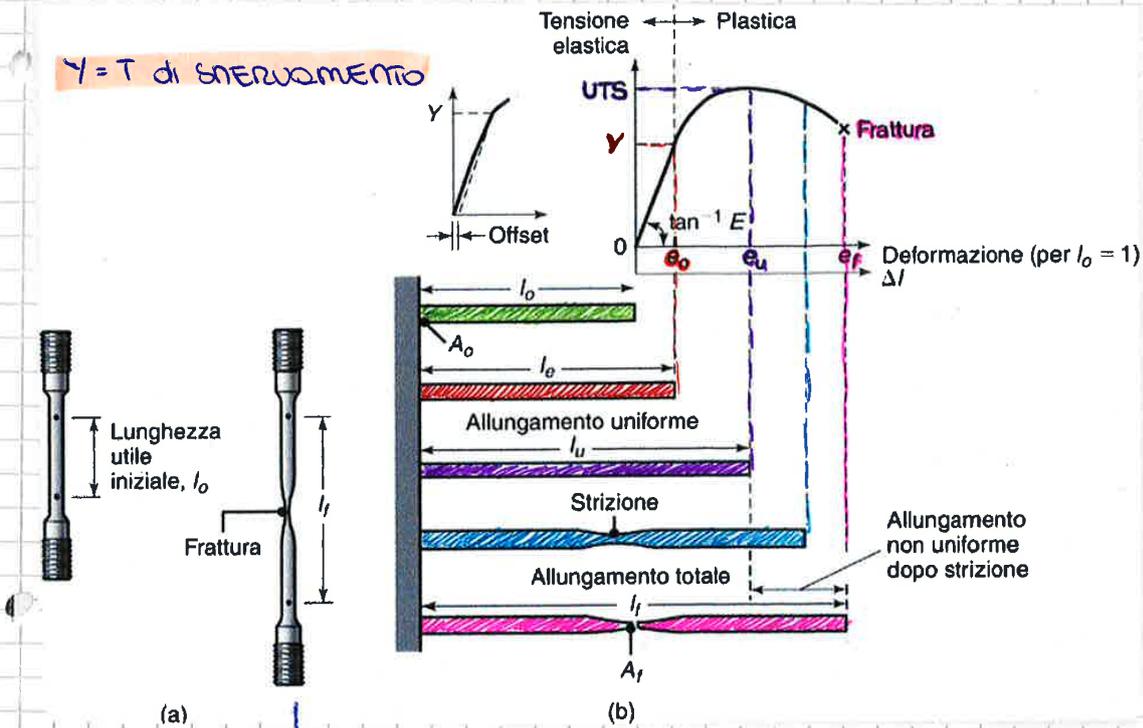
$$t_r = 0.36 \text{ mm}$$

$$R = 5.25 + 15.1 = 20.35$$

$$R = 20.35 \pm 0.18 \text{ mm}$$

• **dinamica delle prove**

$\gamma = T$ di snervamento



ha subito una prova di trazione completa

deformazione $e = \Delta l / L_0$

tensione $T_n = F / S_0$

fino a γ → comportamento elastico (T di snervamento)
 dopo γ → comportamento plastico

UTS = tensione ultima trazione → fino a qui ho un allungamento uniforme

dopo UTS → strizione, tutte le deformazioni si concentrano nel collo di strizione

• **tensione nominale**

$$\sigma_n = F / S_0$$

• **deformazione nominale**

$$e = \Delta l / L_0$$

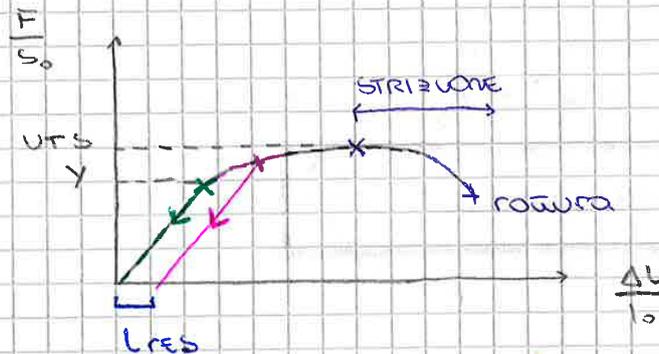
$$R_e = E \frac{\Delta L}{L_0}$$

LEGE HOOKE

es. prova di trazione

La tensione cresce fino a quella di snervamento γ . Se il carico viene rimosso, tornerebbe indietro per recuperare la deformazione che aveva in portanza, ovvero la lunghezza a riposo.

Se il carico viene rimosso dopo γ , avrebbe avuto un ritorno di tipo elastico, ma seguendo una retta // a quella che descrive il comportamento elastico del materiale. Si verifica una deformazione irreversibile L_{res} .



dopo UTS ho il fenomeno di strizione, fino ad arrivare alla tensione a rottura

da γ a UTS \rightarrow sono tutte T di snervamento.

CARATTERISTICHE

- TENACITÀ \rightarrow energia assorbita per unità di volume per portare il materiale a rottura
- DUILITÀ \rightarrow allungamento massimo ①
 \rightarrow massima riduzione di sezione ②

$$① A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$$

$$② Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100$$

TENSIONI NOMINALI e REALI

TENSIONE nominale

$$\sigma_n = F / S_0$$

TENSIONE reale

$$\sigma = F / S$$

DEFORMAZIONI NOMINALI e REALI

deformazione nominale

$$e = \Delta l / l_0$$

deformazione reale

$$d\varepsilon = dl / l$$

$$\varepsilon = \ln (l / l_0)$$

es.

Caso $l_0 \rightarrow l_1 + l_1 \rightarrow l_2$

def. reale $\varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} + \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_2}{l_0} = \varepsilon_{TOT}$

def. nominale $e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} \neq e_{TOT}$

deformazione plastica

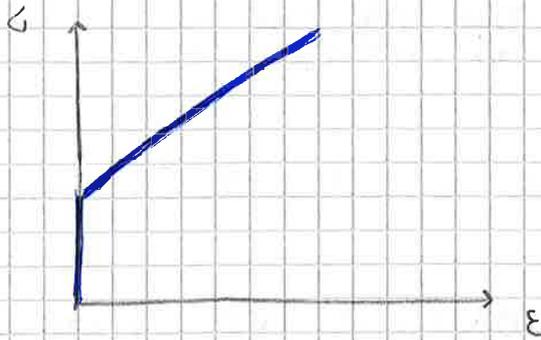
• CONSERVAZIONE DEL VOLUME

$$\frac{l}{l_0} = \frac{S_0}{S}$$

• CONVERSIONE TENSIONI

$$\sigma = \sigma_n \frac{S_0}{S}$$

② LINEARE



$$\sigma = Y + K \cdot \epsilon$$

comportamento
plastico, mate-
riale incoerente

$l_0 S_0 = S l$ ipotesi volume costante

area sup. provino $S_0 = \pi/4 D_0^2$ (cerchio)

def. naturale nel pt di instabilità $\frac{l_{str}}{l_0} = \frac{S_0}{S_{str}}$

quindi $\epsilon = \ln\left(\frac{l_{str}}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{S_0}{S_{str}}\right)$

Δl [mm]	F [kN]	S [mm ²]	σ_n [MPa]	e [%]	σ [MPa]	ϵ [%]
0	16	50,3	318	0,0	318	0,0
0,2	25	50,1	497	0,4	499	0,4
0,8	30	49,5	597	1,6	606	1,6
2	36	48,3	716	4,0	745	3,9
4	42	46,5	836	8,0	902	7,7
6	45	44,9	895	12,0	1003	11,3
8,6	46	42,9	915	17,2	1073	15,9
9,8	33	18,1	657	19,6	1824	102,2

→ strizione

$\sigma_n = F/S_0$

$e = \frac{\Delta l}{l_0}$

$\sigma = F/S$

$\epsilon = \ln(l_{str}/l_0)$

sono in grado di recuperare tutti i dati della tabella

zona di strizione

→ vale principio di conservazione del volume, ma non ho più un cilindro

conosco D_{str} , posso calcolarlo

$S = \pi/4 D_{str}^2$

per tutte le altre righe uso la conservazione del volume

$S l = S_0 l_0$

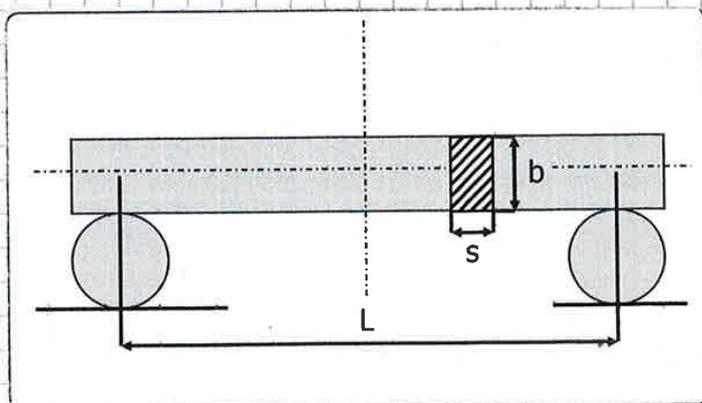
la prova di durezza equivale ad una prova di compressione localizzata

come si ottiene una deformazione permanente del materiale, esiste una correlazione tra misura di durezza e tensione di snervamento (R_e o σ_y)

$$HB \cong 3 R_e$$

PROVA DI FLESSIONE

- determinazione delle caratteristiche materiali limitatamente alle deformazioni elastiche
- verifica del carico corrispondente a una determinata freccia
- per materiali fragili, che non presentano deformazioni permanenti fino alla rottura, rivela il carico di rottura della provetta



• $c = F/S$ devo calcolare il valore di S
 ↓
 uso legge di conserv. del volume
 $S_0 l_0 = S l \rightarrow S = \frac{S_0 l_0}{l}$

quindi $c = \frac{F \cdot l}{S_0 l_0}$

ma lo so che posso +1 e -1 senza che il rapporto cambi

$$c = \frac{F}{S_0} \left(\frac{l}{l_0} - 1 + 1 \right) = \frac{F}{S_0} \left(\frac{l - l_0}{l_0} + 1 \right)$$

$$= \frac{F}{S_0} \left(\frac{\Delta l}{l_0} + 1 \right) = c_n (1 + e)$$

• $\epsilon = \ln(l/l_0)$

ma lo so che posso +1 e -1 senza che il rapporto cambi

$$\epsilon = \ln \left(\frac{l}{l_0} + 1 - 1 \right) = \ln \left(\frac{l - l_0}{l_0} + 1 \right)$$

$$= \ln \left(\frac{\Delta l}{l_0} + 1 \right) = \ln(1 + e)$$

per $e \rightarrow 0$ $\ln(1+e) \approx e$ quindi la det. nominale e reale coincidono

quindi calcolo

c	ϵ
0	0
242,6	0,08
320,7	0,15
385,7	0,22
439,9	0,28
483,8	0,34
525,8	0,41

$$0.18 = 0.36 y \rightarrow n = 0.5$$

$$\log k = 2,92 \rightarrow k = 836,22$$

2)

Un componente di un velivolo è costituito da una barra di diametro $d = 20 \text{ mm}$ e lunghezza $l_0 = 400 \text{ mm}$ sottoposta a trazione pura. Per la sua produzione si propone di utilizzare una lega Al 7075-T6 oppure la lega di titanio Ti-6Al-4V oppure acciaio AISI 4340 (temprato e raffreddato a 425°C).

Calcolare:

- l'allungamento sotto il carico a trazione di 80 kN ;
- il carico di snervamento;
- il carico prima della frattura.

	1	2	3
	Ti-6 Al-4V	AISI 4340	Al 7075-T6
E [MPa]	119500	210000	70000
σ_s [MPa]	825	1365	496
UTS [MPa]	898	1470	558

$$a) \sigma_n = F / S_0$$

conosco $F = 80000 \text{ N}$

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$l_0 = 400 \text{ mm}$$

$$S_0 = \pi/4 d^2 = 314,16 \text{ mm}^2 \quad (\text{cilindro})$$

$$\text{quindi } \sigma_n = 254,6 \text{ [MPa]}$$

|| $\sigma_n < \sigma_s$ sono nel campo elastico, quindi è valida la legge di Hooke

$$\sigma_n = E \cdot e = E \cdot \frac{\Delta L}{l_0}$$

$$F = 80000 \text{ N}$$

$$l_0 = 400 \text{ mm}$$

$$SF = 2$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_s}{SF} = \frac{\sigma_s}{2}$$

TENSIONE massima

$$\sigma_{\max 1} = 412.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max 2} = 682.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max 3} = 248 \text{ MPa}$$

valutiamo S_0 per non superare σ_{\max}

$$S_0 = F / \sigma_{\max}$$

$$S_{01} = 193.9 \text{ mm}^2$$

$$S_{02} = 117.2 \text{ mm}^2$$

$$S_{03} = 322.6 \text{ mm}^2$$

Volume $S_0 l_0 = V$

$$V_1 = 0.078 \text{ dm}^3$$

$$V_2 = 0.047 \text{ dm}^3$$

$$V_3 = 0.129 \text{ dm}^3$$

ora trovo il peso $P = V \cdot d$

$$P_1 = 0.34 \text{ Kg} \rightarrow \text{più LEGGERO}$$

$$P_2 = 0.37 \text{ Kg}$$

$$P_3 = 0.36 \text{ Kg}$$

capacità di uno strumento di rilevare anche le minime variazioni della grandezza misurata

$$S_A = \frac{dU}{dE}$$

sensibilità assoluta

quando ho una caratteristica lineare $S_A = k$

② accuratezza

è il grado di corrispondenza del dato teorico, desumibile da una serie di valori misurabili, con il dato reale o di riferimento, ovvero la differenza tra valore medio campionato e valore vero o di riferimento

③ ripetibilità

margine di variazione del valore ottenuto dallo strumento misurando ripetutamente la stessa grandezza nelle stesse condizioni

④ riproducibilità

margine di variazione del valore ottenuto dallo strumento misurando ripetutamente la stessa grandezza in condizioni diverse

⑤ risoluzione di lettura

il più piccolo incremento di misure leggibile sulla scala

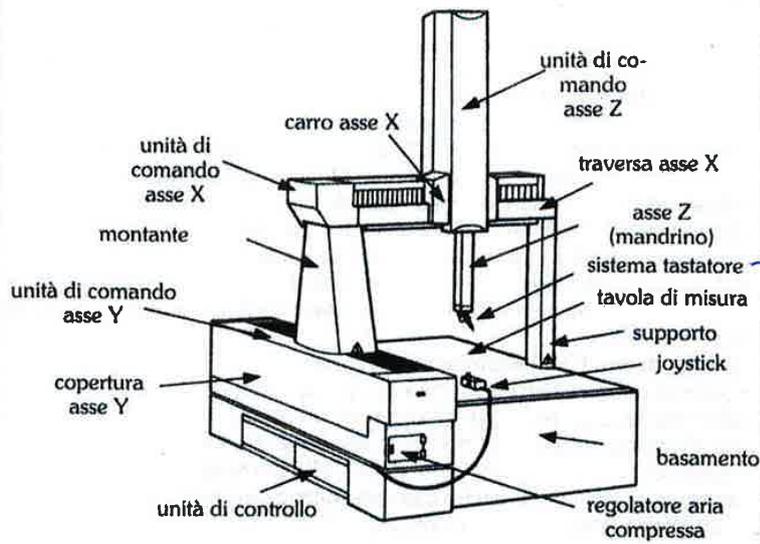
⑥ stabilità

capacità di fornire un segnale in uscita costante nel tempo quando la grandezza misurata rimane costante nel tempo

⑦ prontezza

rapidità con cui lo strumento esegue la misura o rileva le variazioni della grandezza misurata

macchine a misura coordinate



→ a contatto con il pezzo che deve essere misurato

• durometri

- ↳ idraulico o meccanico : applicazione del carico
- ↳ manometro o pendolo : misurazione del carico

• Tipologie durometri

- ↳ universali, esecuzione secondo diversi metodi
- ↳ speciali, esecuzione di un solo metodo
- ↳ automatico o manuale
- ↳ fissa o portatile

PROVA MOHS

- prove basate sulla capacità di un materiale più duro di scalfire uno più fragile
- è basata su una scala da 1 (talco) a 10 (diamante)
- ogni materiale con un grado di durezza superiore può scalfire quello di durezza minore

PROVA BRINELL (caratterizza proprietà meccaniche)

- la prova consiste nel far penetrare nel pezzo una sfera di acciaio di diametro D con una forza F
- si misura il diametro d dell'impronta del penetratore sul pezzo
- **durezza Brinell HB**: rapporto carico applicato e superficie dell'impronta
- $D = 10$ mm dimensione standard
- $P =$ carico di prova, espresso in Kgf (chilogrammi-forza)
 - ↳ per esprimerlo in $N \rightarrow P = 0.102 F$

$$HB = \frac{P}{S}$$

$$\frac{Kgf}{mm^2}$$

$$e \quad HB \approx 3 Re$$

↓
correlaz. tra du-
rezza e T di
snervamento

PROVE NON DISTRUTTIVE

42

ETAI

- consentono di valutare di fatto stato o struttura dei materiali senza alterare lo stato fisico del pezzo
- sono procedimenti indiretti: valutano le criticità attraverso la loro influenza sulle proprietà fisiche del materiale in esame
- SCELTA delle prove in base a:
 - ↳ proprietà fisiche
 - ↳ stato del materiale
 - ↳ grado di finitura superficiale
 - ↳ tipo, posizione, entità dei difetti
- affidabilità → probabilità che la prova riveli difetti di dimensioni e forma specificate
- fasce in cui sono usate le PND
 - ↳ collaudi di accettazione: controlli di qualità sui semilavorati presso i fornitori o all'arrivo in magazzino (liquidi penetranti e ultrasuoni)
 - ↳ controlli in processo: sostituiscono i collaudi finali e sono automatici
 - ↳ controlli in servizio: controlli e trattamenti durante la vita della macchina, in funzionamento o in manutenzione (industria nucleare)

LIQUIDI PENETRANTI

- analisi dello stato delle superfici del materiale
- i difetti vengono messi in risalto con liquidi speciali a bassa viscosità e tensione superficiale che penetrano per capillarità nelle discontinuità
- il liquido penetrato nelle fessure rimane intrappolato e viene evidenziato da un agente ostor-bente

ULTRASUONI

- Il fascio ultrasonoro viene generato da trasduttori che trasmettono all'interno del pezzo impulsi riflessi dal materiale e rielaborati da un oscilloscopio
- impiego di onde elastiche dette ultrasuoni perché a frequenze $250 \text{ kHz} \div 25 \text{ MHz}$
- onde longitudinali \rightarrow si eccita un solido elastico con vibrazione alternata plane: tra alterne di compressione e dilatazione
- onde trasversali \rightarrow vibrazione del solido in direzione perpendicolare al moto perché soggetto a forze di taglio
- onde superficiali \rightarrow propagazione dell'onda lungo una strato superficiale
- onde flessurali \rightarrow si verificano in lamiere con spessore pari alle lunghezze d'onda

RADIOGRAFIA

- rilevamento sulla pellicola della variazione di attenuazione che un fascio a raggi X subisce in funzione degli spessori attraversati
- le discontinuità emergono come zone omnerite
- per spessori fino a 150 mm \rightarrow radiazioni γ con esposizione panoramica
- per spessori oltre 10 cm \rightarrow acceleratori lineari
- si possono rilevare difetti dell'ordine di $1 \div 2\%$ dello spessore del pezzo, dopo si usano gli ultrasuoni

• **parametri di elasticità**

METALLI	E (GPa)	G (GPa)	v
Alluminio	79	26	0,34
Cromo	279	115	0,21
Rame	130	48	0,34
Piombo	14	5	0,43
Magnesio	45	17	0,29
Molibdeno	325	123	0,32
Nichel	200	76	0,31
Ferro	211	82	0,29
Acciai deb. legati	200	76	0,33
Acciai inossid. (18-8)	193	66	0,28
Tantalio	186	69	0,34
Titanio	116	44	0,32
Tungsteno	411	160	0,28

metre invece

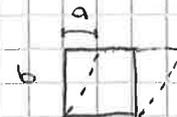
$$E = G_n / \epsilon$$

dato un materiale



A = area

viene deformato



$$\gamma = \frac{\Delta l}{l}$$

def. di taglio

$$\tau = F / A$$

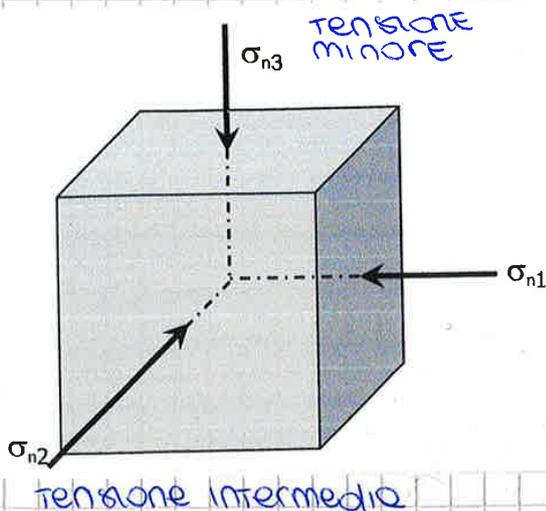
tensione di taglio

$$G = \tau / \gamma$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

ν = coef. poisson

• **analisi triassiale delle tensioni**



descrive la tensione maggiore

> 0 trazione

< 0 compressione

• **comportamento rigido plastico**

- il volume del materiale è costante indipendentemente dalla pressione di sollecitazione (principio di conservazione del volume)
- le deformazioni sono permanenti
- la tensione è costante, la deformazione totale si distribuisce alle 3 direzioni principali (solo se perfettamente plastico)

• **velocità di deformazione e tensione**

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m$$

C = coef. di resistenza

$\dot{\epsilon}$ = velocità di deformazione reale

m = esponente di sensibilità alle velocità di deformazione

• **equazioni Levy-Mises**

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \lambda \left[\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right] \\ \dot{\epsilon}_2 = \lambda \left[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right] \\ \dot{\epsilon}_3 = \lambda \left[\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right] \end{cases}$$

dicono come $\dot{\epsilon}$ sia legata allo stato triassiale

se $\dot{\epsilon} = 0 \rightarrow \sigma_1 = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$

ovvero una σ è uguale alla media delle altre due

λ = coef. di proporzionalità.

• **limite di snervamento**

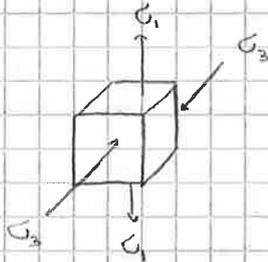
- limite oltre al quale il materiale inizia a deformarsi plasticamente

STATI TENSIONALI

16

Tensione piana

$\sigma_2 = 0$



- Criterio di Tresca

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Y$$

- Criterio di Von Mises

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2$$

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_3 = Y^2$$

- Tensione equivalente

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_3}$$

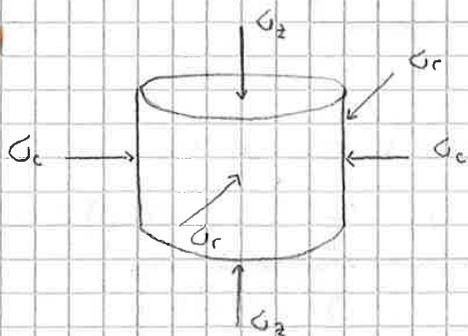
Se $\sigma_{eq} = Y$ il materiale deforma plasticamente

- deformazione equivalente \rightarrow non varia, non so come si deforma nelle tre direzioni

vale $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$

Tensione assialsimmetrica

$\sigma_r = \sigma_c$



• Tensione equivalente

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

• deformazione equivalente

accome $\epsilon_2 = 0 \rightarrow \epsilon_1 = -\epsilon_3$

secondo P.C.V $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$

sostituisco in $\frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{1/2}$

$$\epsilon_{eq} = \frac{2\sqrt{3}}{3} |\epsilon_1|$$

$$\epsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} |\epsilon_1|$$

LAVORO DI DEFORMAZIONE PLASTICA

in equilibrio

$$\vec{F} \cdot \vec{u} = \int_V \int_{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} dV$$

↓
lavoro f. esterne

↓
lavoro t. interne

• lavoro volumico

$$\frac{L}{V} = \int_0^{\epsilon_{fin}} \sigma_{eq} d\epsilon_{eq}$$

con stato tensionale uniforme

• lavoro di deformazione uniforme (legge esponenziale)

$$L = V \int_0^{\epsilon_{fin}} C \epsilon^n d\epsilon = VC \frac{\epsilon_{fin}^{n+1}}{n+1}$$

considerando $\sigma = C \epsilon^n$

• Tensione media

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\epsilon_{fin}} \int_0^{\epsilon_{fin}} \sigma_{eq} d\epsilon_{eq}$$

$$F = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$$

ESERCITAZIONE

prova di trazione

4) Data la curva:

Δl [mm]	F [N]
0	1600
0,2	2500
0,8	3000
2	3600
4	4200
6	4500
8,6	4600
9,8	5300

? curva (σ, ϵ)
? curva (σ_n, e)

Noti:

il carico di rottura F_m [N]	3300
La lunghezza iniziale del provino l_0 [mm]	20
L'area della sezione iniziale S_0 [mm ²]	5,6
L'area della sezione di rottura S_{str} [mm ²]	1,6

calcolo tensione nominale

$$\sigma_n = F / S_0$$

286
446
536
643
750
804
821
589

calcolo deformazione nominale

$$e = \Delta l / l_0$$

0 %
1 %
4 %
10 %
20 %
30 %
43 %
49 %

calcolo tensione reale

$$\sigma = \sigma_n (1 + e)$$

286
451
554
707
900
1045

5) data la curva $c = 1200 \text{ €} \cdot \epsilon^{0.35}$

? UTS

$$K = 1200$$

$$n = 0.35$$

trovo UTS quando $\frac{dF}{d\epsilon} = 0$

ma come $F = \sigma S$

$\frac{d}{d\epsilon} (\sigma S) \rightarrow$ non conosco S

ma $\epsilon = \ln\left(\frac{S_0}{S}\right) \rightarrow e^\epsilon = \frac{S_0}{S} \rightarrow S = S_0 e^{-\epsilon}$

$$\frac{d}{d\epsilon} (c S_0 e^{-\epsilon}) = S_0 \left[\frac{d}{d\epsilon} (c e^{-\epsilon}) \right]$$

$$= S_0 \left(\frac{dc}{d\epsilon} e^{-\epsilon} - e^{-\epsilon} c \right) = 0$$

quando è che è vera questa condizione?

$$\frac{dc}{d\epsilon} e^{-\epsilon} - c e^{-\epsilon} = 0 \quad \vee \quad S_0 = 0$$

mai

$$e^{-\epsilon} \left(\frac{dc}{d\epsilon} - c \right) = 0$$

$$\downarrow$$

$$e^{-\epsilon} = 0 \quad \vee \quad \frac{dc}{d\epsilon} - c = 0$$

$\hookrightarrow c = \frac{dc}{d\epsilon}$ condiz. instabile

$$\frac{(1200 \text{ €} \cdot \epsilon^{0.35})}{d\epsilon} = 1200 \text{ €} \cdot \epsilon^{0.35}$$

$$1200 \cdot 0.35 \text{ €} \cdot \epsilon^{0.35-1} = 1200 \text{ €} \cdot \epsilon^{0.35} \rightarrow \epsilon = 0.35$$

$$\text{UTS} = 1200 \cdot 0.35^{0.35} = 831.01$$

b) $S = S_{45} \cos(45^\circ) \rightarrow S_{45} = 10 \text{ mm}^2$

$F_n = F \cos(45^\circ) \rightarrow F_n = 40.71 \text{ N}$

$\sigma_n = \frac{F_n}{S_{45}} = 4.07 \text{ MPa}$

8) Si supponga di sottoporre ad una prova di trazione un provino di un materiale il cui regime di comportamento plastico è ben descritto dalla seguente legge costitutiva lineare:

► $\sigma = A + B \cdot \epsilon$

con $A = 1294 \text{ MPa}$, $B = 650 \text{ MPa}$.

Si sa che il materiale, fino a snervamento, presenta un comportamento elastico (Modulo di Young $E = 210000 \text{ MPa}$).

► Si stimi il valore del carico di snervamento ottenibile secondo le norme UNI ($\epsilon_{res} = 0,2\%$).

► Si tracci inoltre un grafico (σ, ϵ) che descrive il comportamento del materiale in campo elasto-plastico.

a) per il comportamento elastico secondo la legge di Hooke

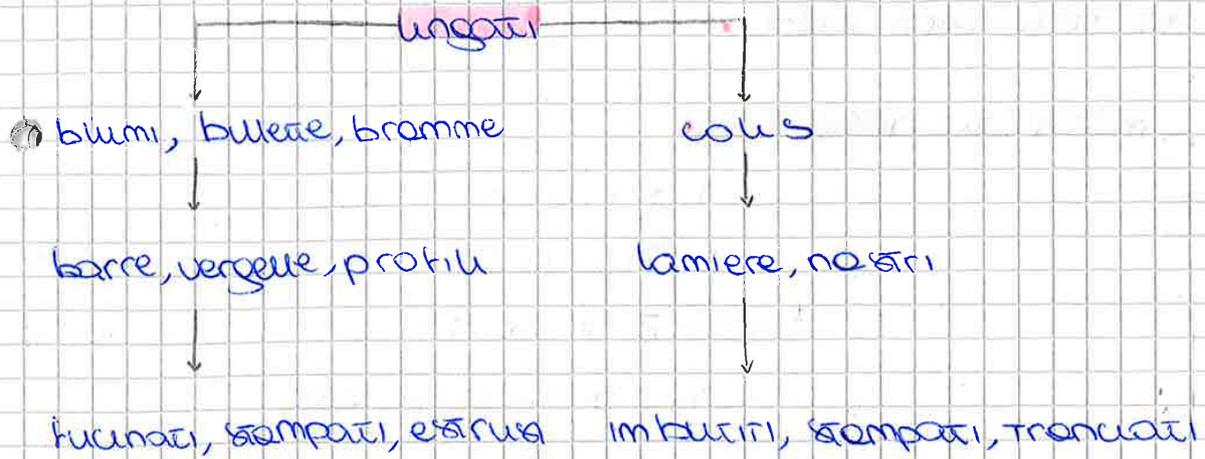
$\sigma = E (\epsilon - \epsilon_{res})$

per il comportamento plastico $\sigma = A + B \epsilon$

ovengo $\begin{cases} \sigma = \frac{A + B \epsilon_{res}}{1 - B/E} \\ \epsilon = \frac{A + E \cdot \epsilon_{res}}{E - B} \end{cases} \rightarrow \sigma = 1299.32 \text{ MPa}$

b) applico legge di Hooke

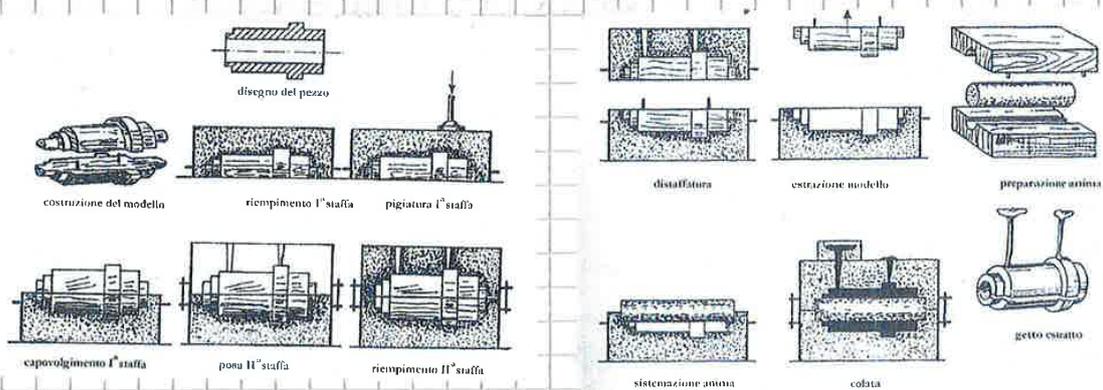
$\sigma = E (\epsilon - \epsilon_{res})$



PROCESSO DI FUSIONE

Il processo fusori si articola in 4 fasi

- 1) **fusione** del materiale in un apposito forno
- 2) **colata** del metallo fuso in una apposita forma (con l'ausilio di un sistema di colate)
- 3) **solidificazione** del metallo in forma, dove il metallo cede calore passando dallo stato liquido a quello solido
- 4) **estrazione** del getto dalle forme



- **anima** → elemento colloco nell e forme. Una volta solidificato il pezzo creano cavità e fori

MODELLO NEI PROCESSI FUSORI (elementi critici)

- fenomeno **stosquadro** → parte del pezzo rientrante e che se riprodotta nel modello provocherebbero la rottura della forma quando il mo- dello viene estratto

Soluzioni

- modifiche in fase di progettazione
- applicazione di Tasselli
- utilizzo modelli scomponibili

- **angoli di sforno** → angoli realizzati per facilitare l'estrazione del modello dalla forma
- **portate d'anima** → sedi dove appoggio le sedi dell'anima in fase di inserimento all'interno della forma durante la colata
- **racordi** → curvature sul modello rispetto a spigoli vivi sul prodotto finito che consentono al metallo liquido di scattare meglio durante la fase di colata all'interno della cavità della forma.
- **scomposizione modello** → si riducono al minimo **stosquadri**

• possono essere di diversi tipi

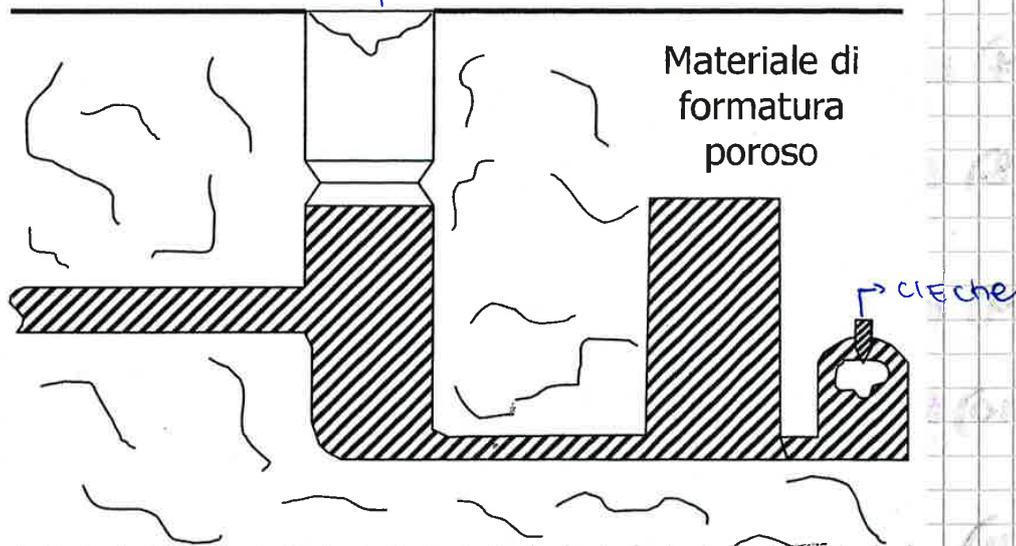
↳ a cielo aperto

- ↳ affiorano sulla parte superiore della forma
- ↳ a costone contatto con form
- ↳ collegate con un collare al getto

↳ cieche

- ↳ sono totalmente immerse nella forma
- ↳ una punta in terra di fonderie rallenta la solidificazione della zona
- ↳ cavità di ritiro a contatto con form

↳ a cielo aperto



• forme → sferiche (la migliore)

- ↳ cilindriche (più comune)
- ↳ a sezione quadrata
- ↳ a sezione rettangolare
- ↳ miste