



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BRESCIA

ESAME DI STATO DI ABILITAZIONE ALL'ESERCIZIO DELLA PROFESSIONE DI INGEGNERE  
(Lauree Specialistiche D.M. 509/99 - Lauree Magistrali D.M. 270/04 - Lauree Vecchio Ordinamento)

**SEZIONE A** - Seconda sessione 2018

**PRIMA PROVA SCRITTA DEL 15 NOVEMBRE 2018**

**SETTORE INDUSTRIALE**

**Tema n. 1:**

Il cedimento a fatica rappresenta la principale causa di rottura di componenti meccanici in esercizio. Il candidato discuta in relazione a tale fenomeno:

- 1) i meccanismi di danneggiamento (es. nucleazione/propagazione) a livello microstrutturale nei materiali metallici e/o materiali di altra natura.
- 2) i diagrammi utilizzati per la rappresentazione ed interpretazione della resistenza a fatica in regimi ad alto o basso numero di cicli e metodologie di indagine sperimentale.
- 3) i criteri per la verifica di resistenza a fatica, anche in presenza di sollecitazioni medie non nulle o stati di sforzo multi-assiali.

**Tema n. 2:**

Il candidato illustri i possibili cedimenti di natura statica (sovraccarichi, cedimenti di schianto, fenomeni di fragilità ed infragilimento) che possono interessare un qualsiasi componente meccanico realizzato in materiale metallico, evidenziando i meccanismi di frattura che si generano, i principali fattori di influenza e le migliori soluzioni adottabili per prevenirli e/o limitarne gli effetti. Si faccia infine un esempio a scelta per ogni cedimento descritto.

**Tema n. 3:**

Il candidato esponga una panoramica dei principi a cui si ispira la cosiddetta produzione snella in ambito industriale. Descriva inoltre alcune delle tecniche impiegate nell'ambito della produzione snella, quali il total productive maintenance, il just in time, il kanban e il kaizen, mettendo anche in evidenza quali sono gli effetti attesi del loro impiego sulle prestazioni operative dei sistemi produttivi.

**Tema n. 4:**

Dinamica del corpo rigido: quali sono i parametri di massa e come si determinano; come si studia la dinamica col metodo newtoniano e con quello energetico.

**Tema n. 5:**

Il Candidato analizzi e descriva le principali caratteristiche di un impianto a vapore per la produzione di energia elettrica, evidenziando le ragioni per cui questi motori vengono utilizzati per applicazioni di grande potenza (ovvero a partire da potenze elettriche pari alle decine di MW).

Tra gli argomenti da sviluppare si richiede di trattare in particolare i seguenti punti:

- 1) Fondamenti termodinamici e configurazioni di ciclo più comuni;
- 2) Motivazione della rigenerazione per l'acqua d'alimento caldaia;
- 3) Caratteristiche del condensatore e implicazioni impiantistiche legate alla scelta della temperatura (e della pressione) di condensazione;
- 4) Principali caratteristiche delle turbine utilizzate, sia per la parte di alta pressione (stadi iniziali) che per quella di bassa pressione (stadi finali).



**SECONDA PROVA SCRITTA DEL 23 NOVEMBRE 2018**

**SETTORE INDUSTRIALE**

**Classi di laurea appartenenti al settore:**

**LM/25 - Ingegneria dell'automazione**

**LM/31 - Ingegneria gestionale**

**LM/33 - Ingegneria meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali**

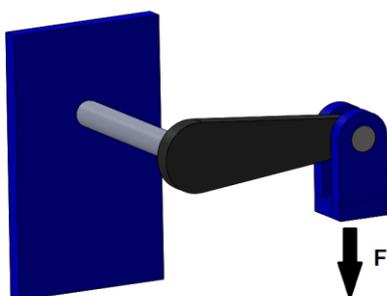
**LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare**

**LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali**

**Tema n. 1 (classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/31 - Ingegneria gestionale, classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**

Il candidato illustri i metodi sperimentali per la misura delle deformazioni di sua conoscenza evidenziandone pregi e limitazioni, in particolare in riferimento alla natura locale o globale del metodo, alla possibilità di misura con o senza contatto, alla strumentazione necessaria ed alle procedure operative. Con riferimento agli esempi sotto riportati, il candidato descriva metodologie e pratica operativa mediante le quali, a partire da misure di deformazione, poter determinare:

- Entità del carico applicato  $F$  nel sistema rappresentato in Figura 1a;
- L'entità di eventuali tensioni residue nella ruota ferroviaria rappresentata in Figura 1b;
- Effetti di intaglio nel componente in figura 1c.



a)



b)



c)

Figura 1

**Tema n. 2 (classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/31 - Ingegneria gestionale e classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare):**

Tra i difetti cristallini presenti nei materiali metallici i bordi grano sicuramente hanno una grossa influenza sulle proprietà meccaniche dei materiali metallici. Il candidato parta da questo concetto ed illustri sia tramite modelli teorici sia con esempi pratici quali possono essere i comportamenti del materiale metallico e i fenomeni di danneggiamento influenzati dai bordi grano. Infine il candidato faccia un esempio di un caso di cedimento di un componente meccanico in esercizio sottoposto a particolari condizioni di sollecitazione e temperatura e illustri come si può controllare la dimensione del grano per prevenire la failure.

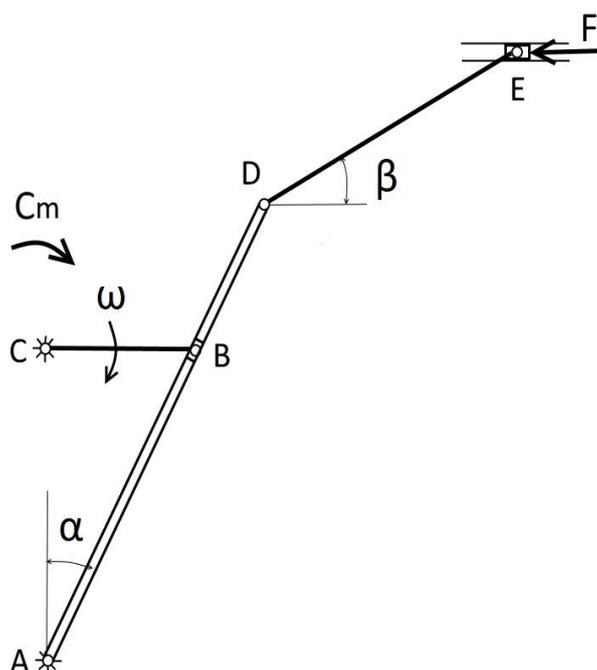
**Tema n. 3 (classe LM/31 - Ingegneria gestionale, classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**

Con riferimento ai rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori derivanti dall'esposizione ad ambienti termici severi freddi, il candidato:

- faccia alcuni esempi di ambienti lavorativi nei quali tipicamente ci si può attendere la presenza dei rischi in questione;
- identifichi e descriva i riferimenti normativi per la loro valutazione;
- descriva i fattori dai quali essi dipendono;
- descriva le misure che è possibile adottare per la loro riduzione.

Il candidato definisca inoltre una procedura operativa per l'organizzazione delle attività necessarie alla valutazione dei rischi da esposizione ad ambienti termici severi freddi in un'azienda con un numero elevato di lavoratori che svolgono diverse mansioni in diversi reparti.

**Tema n. 4 (classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/31 - Ingegneria gestionale, classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**



Del glifo rappresentato in figura sono noti i seguenti dati:

- 1)  $CB = 0,15$  m;
- 2)  $AD = 0,5$  m;
- 3)  $DE = 0,3$  m;
- 4)  $AC = 0,3$  m;
- 5)  $\alpha = 30^\circ$ ;
- 6)  $\beta = 30^\circ$ ;
- 7)  $\omega = 4$  rad/s (costante);
- 8)  $F = 1800$  N;
- 9)  $m_E = 60$  kg (massa dello stantuffo);
- 10)  $m_{\text{glifo}} = 35$  kg (massa del glifo);
- 11)  $J_A = 120$  kg m<sup>2</sup> (momento d'inerzia dello stantuffo rispetto all'asse normale al piano del moto passante per A).

Sono note anche le seguenti condizioni:

- 12) il meccanismo è in un piano orizzontale;
- 13) la manovella CB è ortogonale alla retta passante per A e C;
- 14) lo stantuffo E si muove ortogonalmente alla retta passante per A e C;
- 15) la manovella CB ha massa trascurabile;
- 16) la biella DE ha massa trascurabile;
- 17) gli attriti sono trascurabili.

Determinare la coppia  $C_m$  nella posizione data.

**Tema n. 5 (classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare, classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/31 - Ingegneria gestionale, e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**

Si consideri un impianto di sollevamento acqua costituito da due bacini situati a quote differenti collegati tra loro da un condotto in cui l'acqua è convogliata con una pompa centrifuga. La pompa è accoppiata ad un motore elettrico che ruota alla velocità di 3000 rotazioni al minuto.

-) Utilizzando il diagramma di Baljé per le turbopompe fornito in allegato e considerando i seguenti dati:

- 1) Dislivello tra il pelo libero del bacino a valle e il pelo libero del bacino a monte:  $\Delta z = 22,5$  metri;
- 2) Portata nominale di acqua:  $Q = 10$  litri/secondo;
- 3) Perdita di carico idraulico alla portata nominale tra il bacino a valle e la flangia di aspirazione della pompa: 2,5 metri di colonna d'acqua;
- 4) Perdita di carico idraulico alla portata nominale tra la flangia di mandata della pompa e il bacino a monte: 5,0 metri di colonna d'acqua;
- 5) NPSH di incipiente cavitazione della pompa alla portata nominale: 3,7 metri di colonna d'acqua;
- 6) Pressione di vapore e dei gas disciolti nell'acqua nelle condizioni di esercizio dell'impianto: 250 millimetri di colonna d'acqua.

-) Assumendo che la girante della pompa abbia le seguenti caratteristiche geometriche:

- 1) Numero di pale:  $z = 10$ ;
- 2) Rapporto tra altezza di pala B all'uscita della girante e diametro esterno D della girante:  $B/D = 1/10$ .

-) Utilizzando la correlazione di Stanitz per calcolare il fattore di slittamento  $\mu$  (slip factor) in funzione del numero di pale:

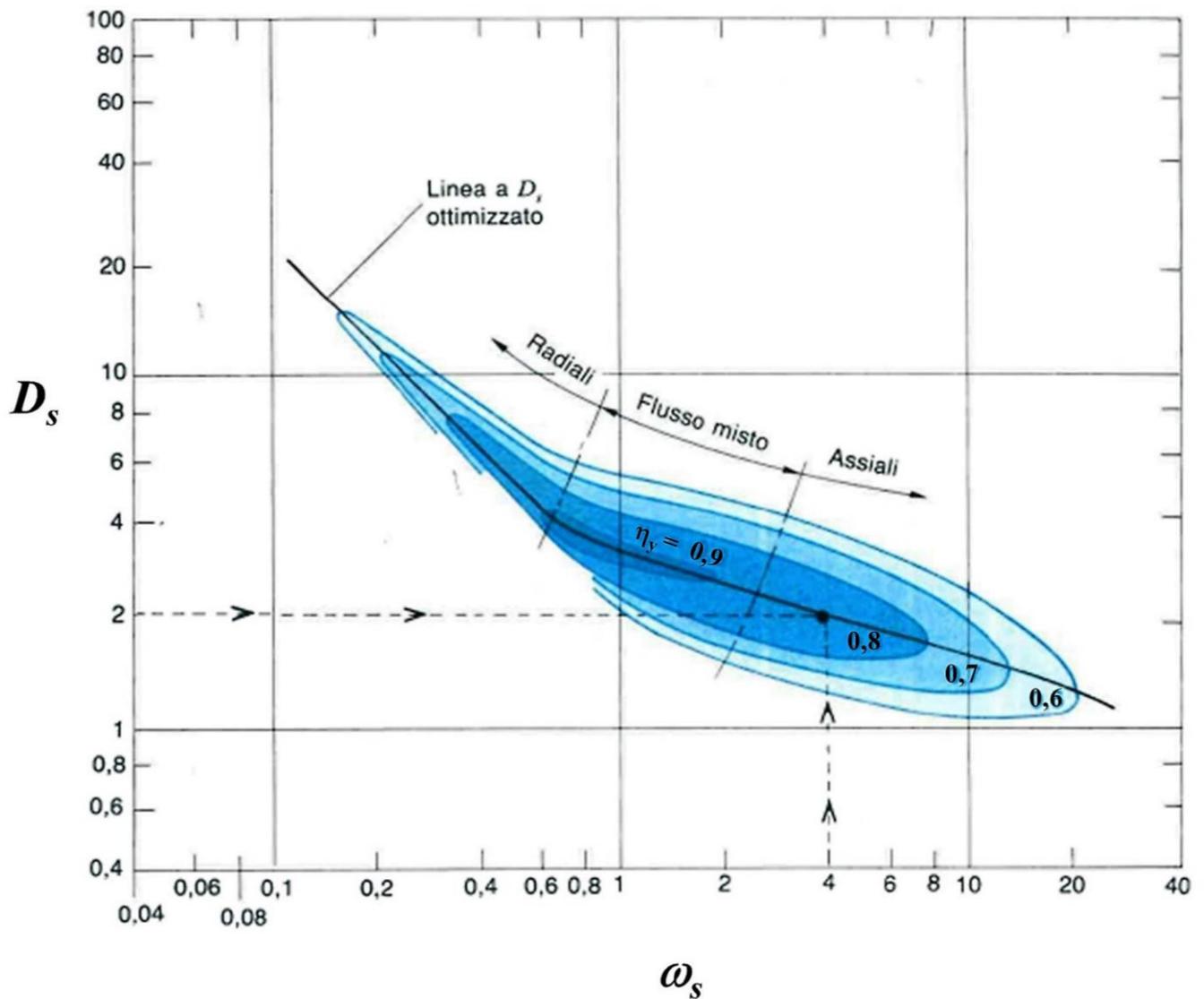
$$\mu = 1 - \frac{0.63\pi}{z} \quad \text{in cui} \quad \mu = 1 - \frac{v_{slip}}{u_2}$$

Con  $v_{\text{slip}}$  che indica la velocità di slittamento dell'acqua all'uscita della girante,  $u_2$  la velocità periferica della girante e  $z$  indica il numero di pale.

Si determinino, giustificandone la motivazione, le seguenti grandezze:

- Potenza all'albero della pompa;
- Quota massima di installazione della pompa;
- Diametro della girante della pompa centrifuga;
- Angolo delle pale all'uscita della girante della pompa.

Si effettuino, giustificandone la motivazione, tutte le ipotesi di lavoro necessarie per lo svolgimento del tema.





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BRESCIA

ESAME DI STATO DI ABILITAZIONE ALL'ESERCIZIO DELLA PROFESSIONE DI INGEGNERE  
(Lauree Specialistiche D.M. 509/99 - Lauree Magistrali D.M. 270/04 - Lauree Vecchio Ordinamento)

SEZIONE A - Prima sessione 2018

**PROVA PRATICA DI PROGETTAZIONE DEL 10 GENNAIO 2019**

**SETTORE INDUSTRIALE**

**LM/25 - Ingegneria dell'automazione**

**LM/31 - Ingegneria gestionale**

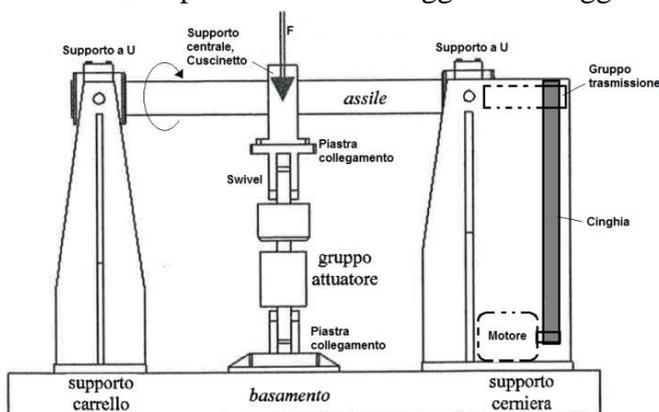
**LM/33 - Ingegneria meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali**

**LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare**

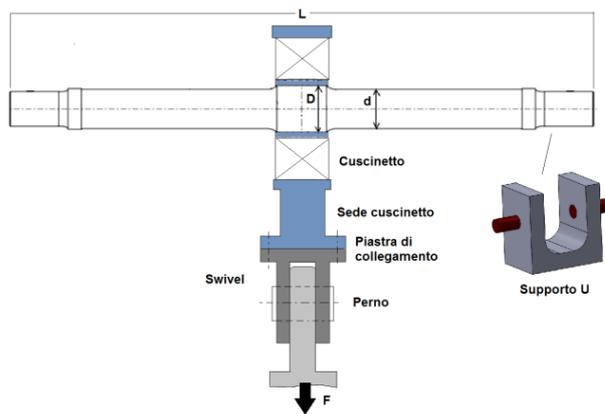
**LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali**

**Tema n. 1 (classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/31 - Ingegneria gestionale, classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**

Un'azienda produttrice di assili ferroviari vuole caratterizzarne la resistenza a fatica mediante test a flessione rotante su provini full-scale. La configurazione del banco prova è riportata schematicamente in Fig. 1 e prevede l'applicazione di un carico in corrispondenza della sezione di mezzeria, mediante attuatore servo-idraulico. L'assile è posto in rotazione da un sistema motore elettrico/riduttore a cinghia, collegato mediante il gruppo trasmissione. Il provino "full-scale" ha la geometria schematicamente riportata Fig. 2. In corrispondenza della sezione centrale è presente un cuscinetto, la cui sede è collegata al gruppo attuatore mediante piastra imbullonata su uno swivel con perno. Le estremità dell'assile, su cui sono calettate boccole ferroviarie, poggiano su un apposito supporto ad U, in grado di ruotare su perni, che consente le operazioni di montaggio/smontaggio.



**Fig. 1**



**Fig. 2**

## Parte 1

- 1.1. Dimensionare l'attuatore in modo tale da generare sulla sezione di diametro  $d$  dell'assile uno stato di sollecitazione pari a 2,5 volte limite di fatica presunto  $\sigma_f$ . Stimare ingombri dimensionali e pressioni di esercizio, eventualmente anche in riferimento ad attuatori commerciali.
- 1.2. Determinare la deflessione centrale e le rotazioni alle estremità dell'assile quando l'attuatore esercita il carico massimo nominale.
- 1.3. Dimensionare le viti di ancoraggio da utilizzarsi nelle piastre di collegamento tra attuatore e sede cuscinetto centrale e tra attuatore e basamento.
- 1.4. Eseguire il dimensionamento dei perni utilizzati per i supporti ad U e di quelli utilizzati nello swivel dell'attuatore.
- 1.5. Scegliere il cuscinetto centrale e proporre una soluzione per la sede (Facoltativo).

## Parte 2

- 2.1. Eseguire un dimensionamento di massima dell'albero di trasmissione (coppia trasmessa  $C_t$ , velocità di rotazione  $\omega$ ) e dell'interfaccia di collegamento tra albero di trasmissione ed assile (NB si ha facoltà di prevedere lavorazioni meccaniche o forature della zona di estremità dell'assile).
- 2.2. Eseguire schizzo costruttivo dell'assieme del gruppo trasmissione (inclusa puleggia a sei cinghie trapezoidali e cuscinetti di supporto), scegliendo opportunamente il tipo di giunto da interporre tra assile e gruppo trasmissione.

## Parte 3

- 3.1. Definire il set-up di un sistema di monitoraggio del danneggiamento dell'assile in tempo reale durante la prova, specificando grandezze da misurare, sensori, metodi di acquisizione ecc...
- 3.2. Supponendo di voler determinare il limite di fatica full scale di un assile definire un protocollo di prova, anche in riferimento a normative, stimando carichi, tempi e provini necessari

## DATI

**L** = Lunghezza assile: 2000 mm

**d** = diametro corpo assile: 160 mm

**$\sigma_f$**  = Limite di fatica presunto: 220 MPa

**D** = Diametro centrale assile: 190 mm

**$\omega$**  = Velocità rotazione: 1200 giri/min

**$C_t$**  = Coppia trasmessa: 500 Nm

Il candidato ha facoltà di ipotizzare in maniera motivata dati/dimensioni non forniti nel testo.

**Tema n. 2 (classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/31 - Ingegneria gestionale e classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare):**

### **Esercizio 1**

Un tubo di diametro esterno (OD) di 90 mm e diametro interno (ID) di 70 mm funziona ad una pressione ( $p$ ) di 400 bar. La rottura della valvola a valle del tubo ha causato un aumento di pressione che lo ha fatto esplodere. L'esame della superficie della frattura ha rivelato un difetto metallurgico sulla superficie interna del tubo di forma semiellittica con una profondità di 1,6 mm e una lunghezza di 4,5 mm. Questo difetto era orientato perpendicolarmente allo stress applicato.

1) Quale pressione ha causato questa failure?

La formula per lo stress per la teoria delle pareti sottili è:

$$\sigma = p \frac{(ID)}{2t}$$

Mentre considerando spessori maggiori è:

$$\sigma = p \left[ \frac{(L^2 + 1)}{(L^2 - 1)} \right]$$

Dove  $t$  è lo spessore della parete del tubo e  $L$  è il rapporto OD/ ID.

2) Il candidato scelga la formula e ne spieghi il motivo.

La tenacità a frattura della lega in stato piano di deformazione è pari a  $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  e il fattore di correzione della geometria può essere ricavato dal grafico sottostante.

3) Il candidato individui, in base ai dati, alle frattografie e alle micrografie, rispettivamente di figura 2 e 3, in che materiale metallico è costruito il tubo in questione, eventuali trattamenti termici subiti e come viene prodotto, spiegandolo dettagliatamente.

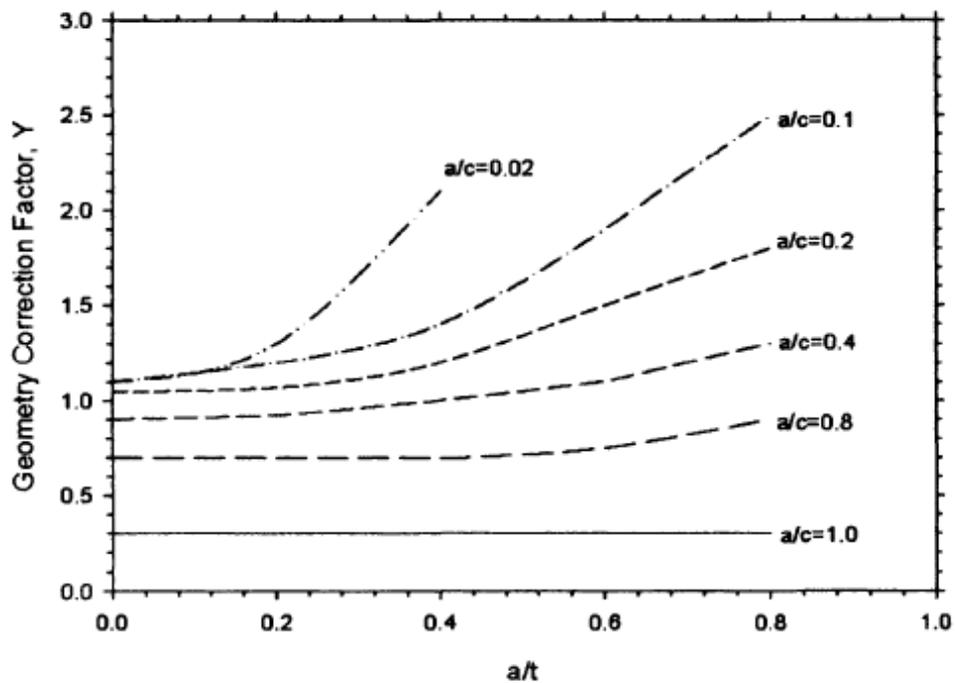


Figura 1: fattore di correzione della geometria per cricca semi-ellittica in tensione.

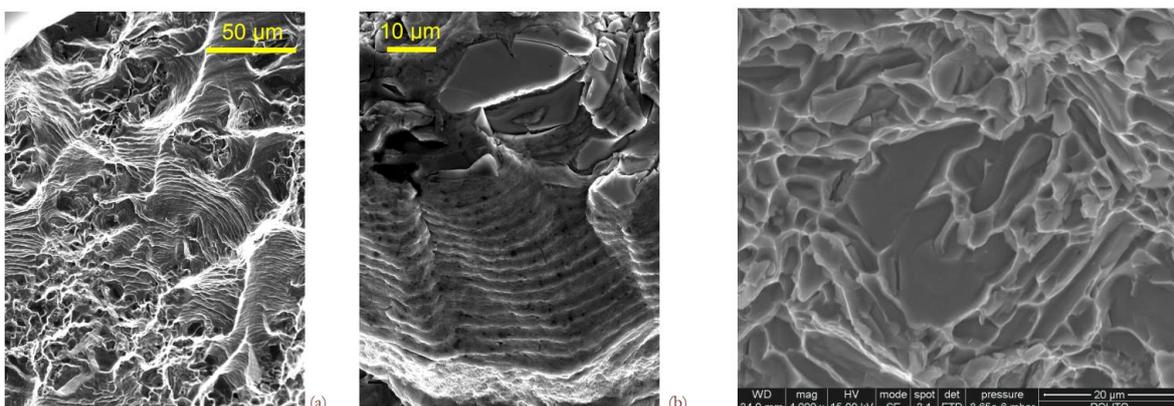


Figura 2: frattografie a diverso ingrandimento ed in diverse zone.

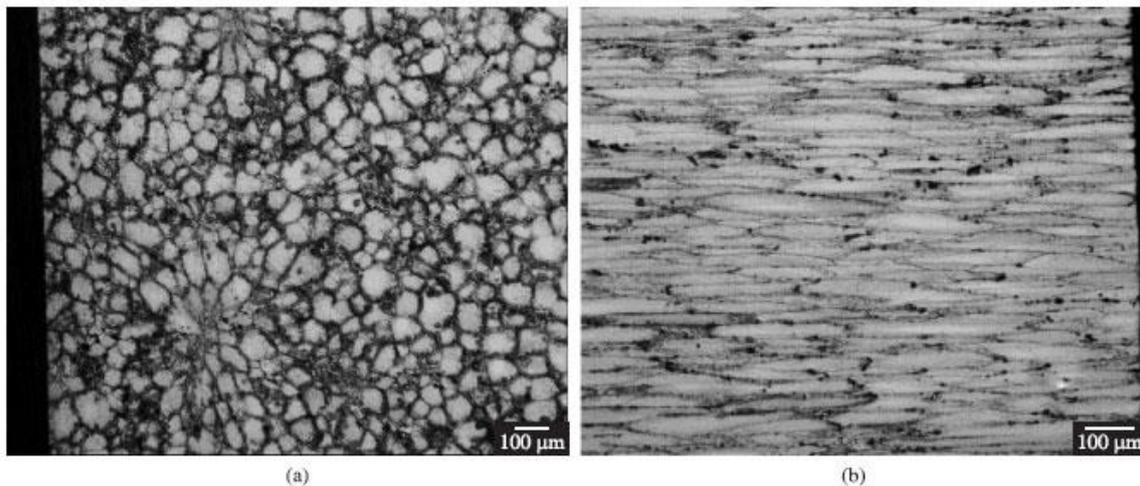


Figura 3: micrografie rappresentative della lega utilizzata e della tecnica produttiva.

4) Un nuovo tubo è stato fabbricato con la stessa lega e sottoposto ad ispezione non distruttiva prima dell'installazione. Tale controllo ha dimostrato che il tubo conteneva un difetto molto simile e con la stessa orientazione profondo 1,5 mm, ma con una forma semicircolare.

Assumendo le normali condizioni di funzionamento, cioè senza sbalzi di pressione e un'evacuazione giornaliera a zero pressione, il tubo resisterà per la durata desiderata/prevista di 30 anni? Supponiamo che, in questo caso, il fattore di correzione della geometria abbia un valore costante di 0.7 e sia noto che  $\frac{da}{dN} = 6,25 \times 10^{-8}$  corrispondente ad un  $\Delta k = 10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ . L'esponente  $m$  della legge di Paris è pari a 4.

5) In base ai risultati ottenuti il candidato valuti eventuali misure di prevenzione ed esponga la sua opinione in merito alla scelta del materiale/trattamento termico; eventualmente consigli, giustificandone la motivazione, un materiale alternativo.

## Esercizio 2

Per un componente di un reattore nucleare che lavora a temperature tra 800 e 950°C è stata scelta una superlega 617 a base di Nichel. Al fine di confermare la bontà della scelta fatta, sono state eseguite una serie di prove di creep attraverso l'utilizzo di provini la cui geometria è rappresentata in figura 1, in diverse condizioni di temperatura/stato di sforzo. I dati sperimentali sono poi stati utilizzati per costruire le curve di creep ed ottenere le costanti del materiale utilizzate nelle equazioni di creep. In aggiunta sono state investigate le microstrutture/frattografie relative alle superfici di frattura dei provini utilizzati nella sperimentazione a tre diverse temperature attraverso l'utilizzo di un microscopio ottico (OM) e di un microscopio a scansione (SEM).

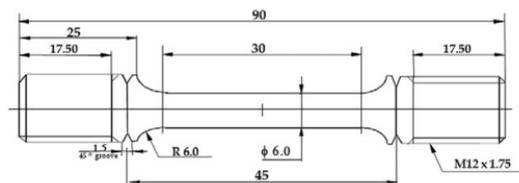
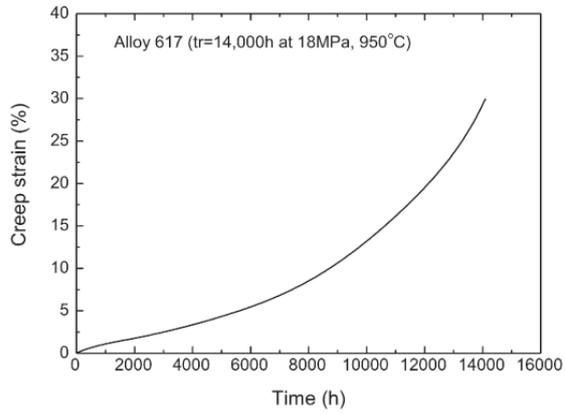


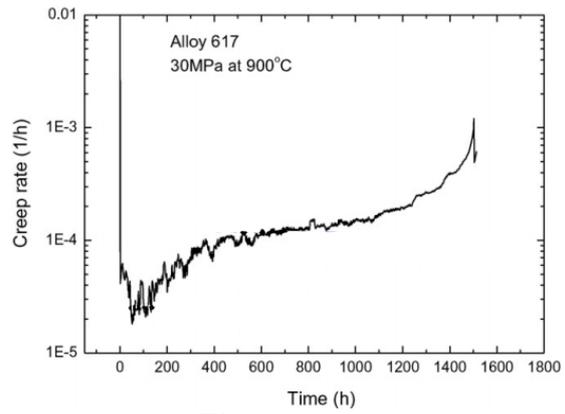
Figura 1: provino utilizzato per le prove creep

Al candidato si richiede di analizzare in modo critico e commentare dettagliatamente i risultati ottenuti e riportati di seguito:

1. Fig. A<sub>1</sub>: curva di creep per la lega 617 ottenuta a seguito dell'applicazione di uno stato di sforzo di 18 MPa a 950°C per un tempo di 14.000 h.  
Fig. A<sub>2</sub>: velocità di deformazione in funzione del tempo per la lega 617 a seguito dell'applicazione di uno stato di sforzo di 30 MPa a 900°C.



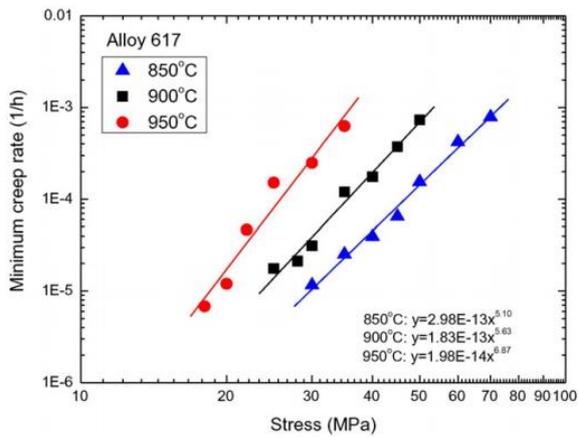
**Fig. A1**



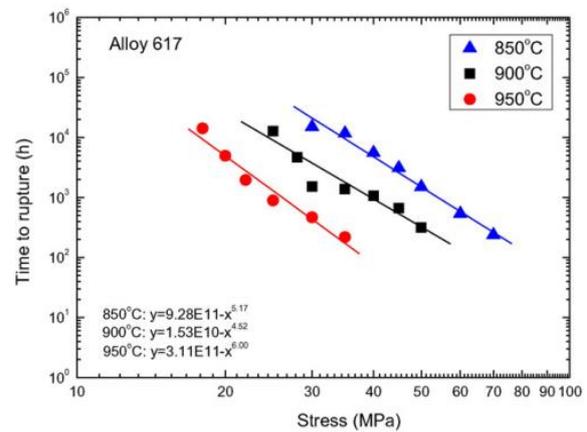
**Fig. A2**

2. Fig. B1: minima velocità di deformazione a creep in funzione dello stato di sforzo applicato a tre diverse temperature

Fig. B2: tempo di rottura in funzione dello stato di sforzo applicato alle medesime temperature.



**Fig. B1**



**Fig. B2**

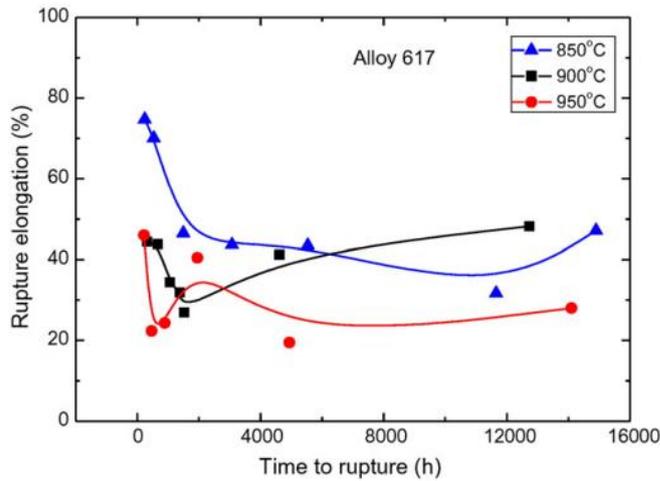
Tabella B: costanti del materiale A, n, A', n' ottenute utilizzando la legge di potenza

$$t_r = A' \sigma^{n'}$$

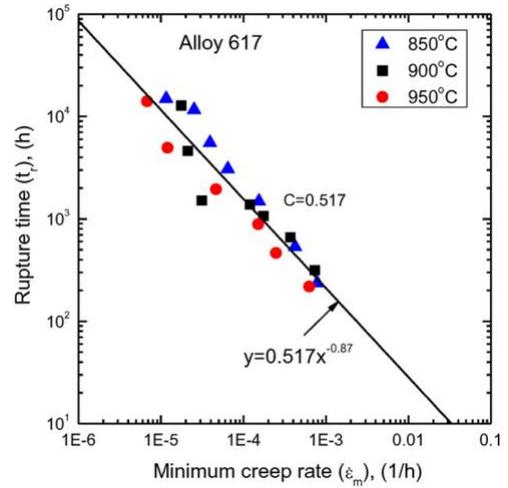
Temp. (°C)	A	n	A'	n'
850	$2.98 \times 10^{-13}$	5.10	$9.28 \times 10^{11}$	5.17
900	$1.83 \times 10^{-13}$	5.63	$1.53 \times 10^{10}$	4.52
950	$1.98 \times 10^{-14}$	6.87	$3.11 \times 10^{11}$	6.00

3. Fig. C1: Allungamento a rottura in funzione del tempo di rottura alle tre diverse temperature.

Fig. C2: tempo di rottura in funzione della minima velocità di deformazione a creep in scala bilogarithmica alle tre temperature investigate.

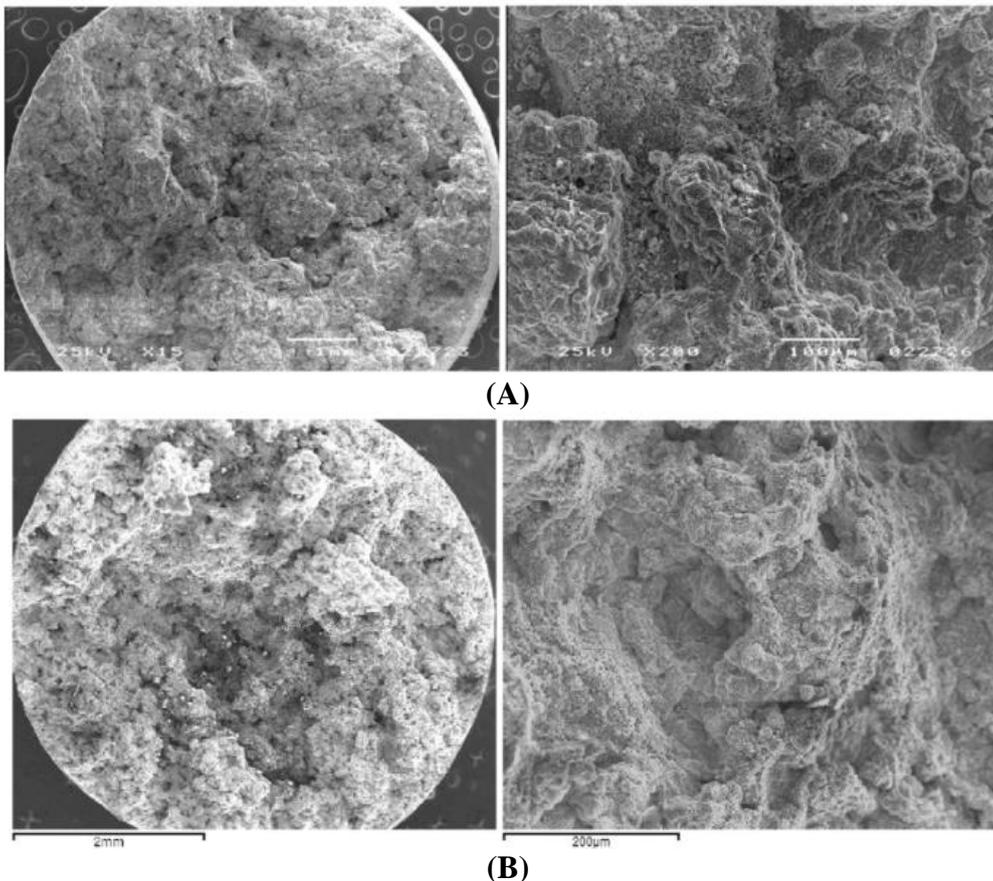


**Fig. C1**



**Fig. C2**

4. Figure 2 (A) e 2 (B): immagini SEM a diverso ingrandimento delle superfici di frattura dei campioni in lega 617 riscontrate a seguito dell'applicazione di uno stato di sforzo di 20MPa a 950 °C per un tempo di 5.000 h nel primo caso (A) e di 30 MPa a 850°C per un tempo di applicazione del carico di 15.000 h per il caso (B).



**Fig. 2.**

5. Figura 3: particolari a diverso ingrandimento delle superfici di frattura e della microstruttura dei campioni in lega 617 riscontrate a seguito dell'applicazione di uno stato di sforzo di 30MPa a 850 °C per un tempo di 15.000 h.

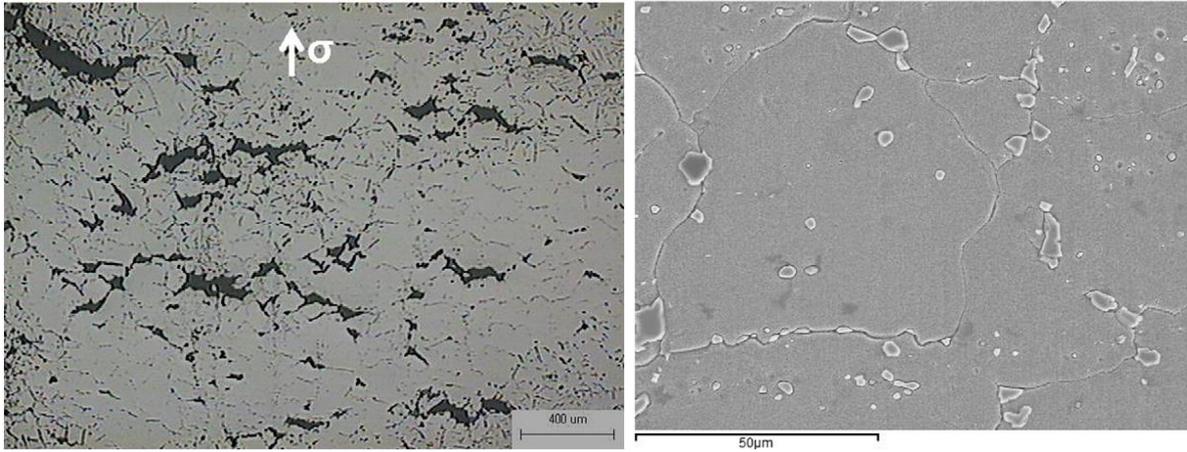


Fig. 3.

### Esercizio 3

Una piastra di larghezza totale 100 mm e spessore 5 mm, con cricca centrale passante (fig. 1), è soggetta ad una forza di trazione  $P=50$  kN.

- 1) Determinare le condizioni di cedimento della piastra.
- 2) Determinare la lunghezza massima ammessa per la cricca, nel caso che si voglia garantire un coefficiente di sicurezza pari a 3 sul carico.

(Materiale: Alluminio 2014- T651;  $K_{IC} = 24$  MPa $\sqrt{m}$ ;  $\sigma_{sn} = 430$  MPa).

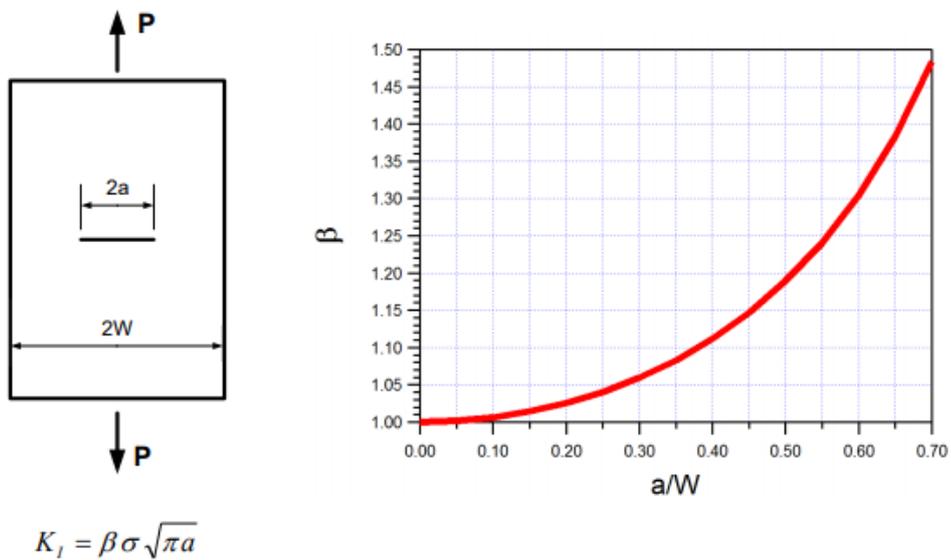


Fig. 1

**Tema n. 3 (classe LM/31 - Ingegneria gestionale, classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**

La Car Components S.p.A. è un'azienda multinazionale operante nel settore automotive in qualità di "Tier One", ovvero come fornitrice di primo livello di componenti e sistemi destinati alle principali aziende automobilistiche di tutto il mondo. Uno dei siti produttivi di Car Components si trova in Provincia di Brescia ed è specializzato nella produzione di pompe acqua per il raffreddamento del motore destinate sia al cosiddetto "primo impianto", ovvero all'installazione su veicoli nuovi da parte delle diverse case automobilistiche clienti, che al cosiddetto "aftermarket", ovvero al circuito dei pezzi di ricambio originali e non.

Da qualche mese l'azienda sta conducendo una trattativa con un potenziale nuovo cliente relativamente ad un contratto della durata di 6 anni che prevedrebbe, a regime, la fornitura di 350'000 pompe all'anno ad un prezzo di € 90 cadauna.

La firma del contratto comporterebbe la necessità di realizzare un investimento per adeguare la capacità produttiva sia acquistando nuove macchine/mezzi di lavoro che assumendo del personale aggiuntivo.

Il ciclo produttivo della pompa da fornire può essere sintetizzato come nella tabella seguente.

Operazione	T <sub>C</sub>	T <sub>Std</sub>
a. Lavorazione meccanica corpo pompa	1,9	1,5
b. Assemblaggio sottogruppi	3,4	10,3
c. Assemblaggio principale	2,5	2,1
d. Finitura e controllo qualità	4,0	9,6
e. Imballo e spedizione	1,1	2,6

dove:

- T<sub>C</sub> è il tempo ciclo per pezzo, espresso in minuti e decimi di minuto (carico macchina),
- T<sub>Std</sub> è il tempo standard uomo per pezzo, espresso in minuti e decimi di minuto (carico uomo).

Il costo del corpo pompa e di tutti gli altri componenti acquistati all'esterno sarebbe pari a 40 €/pompa. Da una stima, si prevede inoltre quanto indicato di seguito relativamente alle macchine/mezzi di lavoro ed agli operatori necessari.

Dati relativi alle macchine/mezzi di lavoro	a.	b.	c.	d.	e.
Disponibilità delle macchine/mezzi di lavoro	0,95	0,85	0,90	0,99	0,99
Scarti, in ppm	3'400	450	1'400	120	0
Investimento per ogni macchina/mezzo di lavoro, in €	800'000	330'000	480'000	48'000	12'000

<b>Dati relativi agli operatori</b>	<b>a.</b>	<b>b.</b>	<b>c.</b>	<b>d.</b>	<b>e.</b>	<b>Totale</b>
Incidenza percentuale dei tempi di attrezzaggio e altre perdite	14%	12%	4%	5%	0%	
Rendimento del lavoro, rapportato alla base 133	131/133	132/133	132/133	130/133	130/133	
Incidenza percentuale delle ore di lavoro indiretto sulle ore di lavoro diretto						10%
Assenteismo del lavoro diretto, in percentuale						7%
Assenteismo del lavoro indiretto, in percentuale						5%
Rapporto percentuale del numero di impiegati sulle maestranze						6%

L'organizzazione del lavoro potrebbe prevedere le seguenti configurazioni dei turni di lavoro:

- giornata,
- 8x5x2 (8 ore/turno, 5 giorni/settimana, 2 turni/giorno),
- 8x5x3 (8 ore/turno, 5 giorni/settimana, 3 turni/giorno),
- 6x6x3 (6 ore/turno, 6 giorni/settimana, 3 turni/giorno),
- 6x6x4 (6 ore/turno, 6 giorni/settimana, 4 turni/giorno).

Il costo del lavoro relativamente ad un singolo addetto è valutabile invece come nella tabella seguente.

Configurazione dei turni	Giornata	8x5x2	8x5x3	6x6x3	6x6x4
Costo annuo per addetto	€ 29'800	€ 30'500	€ 33'000	€ 33'400	€ 34'100

Si determini il numero di macchine/mezzi di lavoro necessari a regime ed il numero degli addetti necessari per ciascuna delle configurazioni dei turni di lavoro sopra presentate.

Prendendo poi in considerazione la sola configurazione dei turni di lavoro che comporta il costo minore per l'azienda, si valuti la redditività dell'iniziativa con i metodi che si ritengono più opportuni.

Per la valutazione, si assuma un orizzonte temporale di riferimento pari alla durata del contratto (6 anni). Si tenga inoltre conto che l'investimento in macchine e mezzi di lavoro sarebbe liquidato per il 70% prima di avviare la produzione e per il restante 30% durante il primo anno di attività; di conseguenza, la quantità di pompe prodotte e fornite nel primo anno sarebbe pari a 250'000 unità, mentre dal secondo anno in avanti la quantità sarebbe quella a regime (350'000 unità/anno).

Si consideri poi, in prima approssimazione, l'impiego del personale totalmente variabile con le quantità prodotte, trascurabili tutti i costi di materiale indiretto, di struttura, se non precedentemente esposti, influente l'impatto del capitale circolante ed un valore residuo delle macchine/mezzi di lavoro nullo.

Inoltre, si esprima la valutazione sia trascurando che considerando l'impatto delle tasse; in questo secondo caso, si supponga una percentuale di tassazione del 24% ed un piano di ammortamento fiscale a quote costanti a 6 anni, senza distinzione tra le macchine/mezzi di lavoro e tra gli esercizi. Si tenga inoltre conto che le macchine per l'operazione "lavorazione meccanica corpo pompa" (a) sono classificabili come beni funzionali alla trasformazione tecnologica e digitale dei processi produttivi secondo il modello "Industria 4.0" e che, secondo la Legge 30 n. 145 del dicembre 2018 (Legge di bilancio 2019), per tali macchine è elargito un incentivo di natura fiscale che consiste nella maggiorazione delle quote di ammortamento (iperammortamento) nella misura seguente:

- 170% per gli investimenti fino a 2,5 milioni di euro;
- 100% per gli investimenti oltre 2,5 milioni di euro e fino a 10 milioni di euro;
- 50% per gli investimenti oltre 10 milioni di euro e fino a 20 milioni di euro;
- 0% per gli investimenti oltre 20 milioni di euro.

In conclusione, specificando eventuali ipotesi necessarie e sulla base dei risultati ottenuti, si esprime un parere motivato sulla firma o meno del contratto.

**Tema n. 4 (classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/31 - Ingegneria gestionale, classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**

Un sistema di movimentazione è costituito da una slitta che scorre su una guida orizzontale mossa da un nastro che si avvolge su due pulegge (fig. 1). La slitta spinge pezzi che oppongono una resistenza pari a  $F$ . Una puleggia è mossa da un gruppo motore – riduttore con caratteristiche da determinare. È inoltre assegnata la legge di moto (fig. 2).

Si assuma:

- la forza  $F$  agisce solo nel tratto a velocità costante (tratto 2, fig. 2);
- assenza di slittamento fra cinghia e pulegge;
- cinghia di massa trascurabile;
- cinghia inestensibile;
- assenza di perdite fra cinghia e pulegge;
- l'elemento di contatto anteriore della slitta con la guida è un pattino;
- baricentro  $G$  della slitta alla stessa altezza della cinghia;
- le ruote della slitta siano in condizione di puro rotolamento.

Determinare:

1. definire i parametri della trasmissione;
2. la coppia motrice  $C_m$  durante il tratto 1 (accelerazione);
3. la coppia motrice  $C_m$  durante il tratto 2 (velocità costante);
4. la caratteristica meccanica del motore (fig. 3);
5. la coppia di frenatura  $C_f$  da applicare nel tratto 3, supponendo il motore scollegato.

Dati

? indica un valore da definire.

### **Motore**

Tipo Asincrono (caratteristica meccanica approssimata come in tab. 1 e fig. 3)

$C_m$ : ?	Coppia motrice [N m]
$C_{m-max}$ : ?	Coppia motrice massima e di spunto [N m]
$J_m$ : $0,1 (1 + 0,02 C_{m-max})$	Momento d'inerzia [ $kg\ m^2$ ]
$n_0$ : ?	Velocità di sincronismo [giri/min]
$n_c$ : Tab. 2	Velocità limite del tratto a coppia costante [giri/min]

### **Pulegge**

$R$ : 0,1	Raggio [m]
$J_p$ : 0,5	Momento d'inerzia [ $kg\ m^2$ ]
$C_f$ : ?	Coppia di frenatura [N m]

### **Trasmissione**

$i$ : ?	Rapporto di riduzione
$\eta$ : $0,99 - 5 * 10^{-4} i^2$	Rendimento per $1 < i \leq 30$

### **Slitta (fig. 4)**

$m$ : 40	Massa della slitta [kg]
----------	-------------------------

$f_c$ :	0,15	Coefficiente d' attrito cinetico
$f_v$ :	0,05	Coefficiente d' attrito volvente
$F$ :	1.500	Forza resistente che agisce nel tratto 2 (velocità costante) [N]
$h$ :	0,1	Distanza del baricentro e della cinghia dal piano di scorrimento
$r$ :	0,06	Raggio delle ruote [m]
$J_r$ :	0,02	Momento d' inerzia totale di entrambe le ruote [kg m <sup>2</sup> ]
$e$ :	0,1	Distanza orizzontale ruota-baricentro [m]
$b$ :	0,15	Distanza orizzontale pattino-baricentro [m]
$d$ :	0,15	Distanza verticale forza-baricentro [m]

### **Legge di moto (fig. 2)**

$v_c$ :	1	Velocità di lavoro (tratto 2) [m/s]
$t_2 - t_1$ :	4	Durata del tratto di spinta in cui agisce la forza F [s]
$t_3$ :	5	Durata del ciclo di lavoro [s]
$t_1 - t_0 = t_3 - t_2$		[s]

*Tabella 1*

$0 \leq \omega_m \leq \omega_c$	$C_m = C_{m-max}$
$\omega_m > \omega_c$	$C_m = C_{m-max} [1 - (\omega_m - \omega_c) / (\omega_0 - \omega_c)]$

### Legenda pedici

- m: motore
- c: limite tratto coppia costante
- 0: velocità di sincronismo

*Tabella 2*

Numero poli	$N_c$ [giri/min]
2	2.700
4	1.350
6	900
8	680

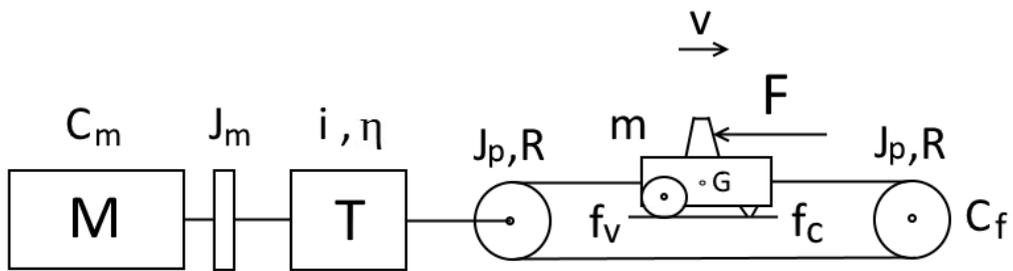


Figura 1 – Il sistema di movimentazione.

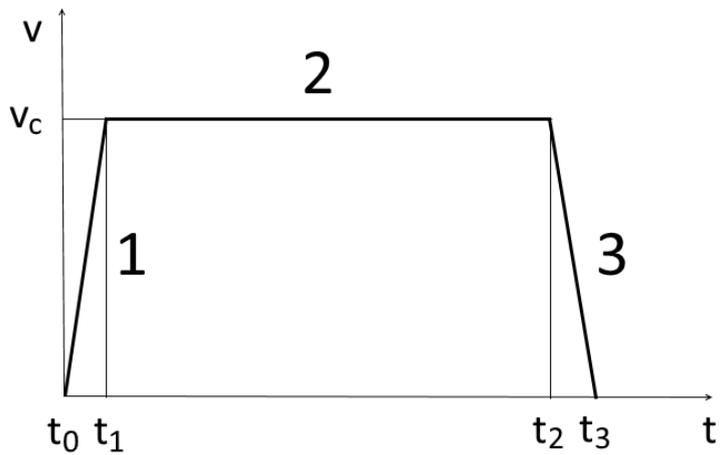


Figura 2 – Legge di moto della slitta.

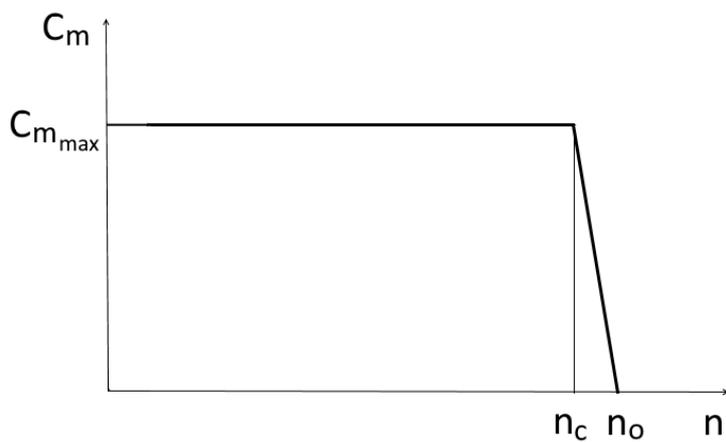


Figura 3 – Caratteristica meccanica del motore.

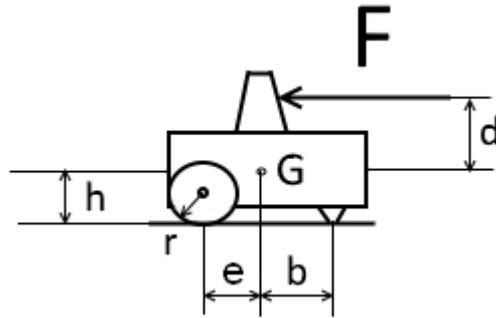


Figura 4 – La slitta.

**Tema n. 5 (classe LM/30 - Ingegneria energetica e nucleare, classe LM/33 - Ingegneria Meccanica ed Ingegneria meccanica dei materiali, classe LM/25 -Ingegneria dell'automazione, classe LM/31 - Ingegneria gestionale, e classe LM/53 - Scienza e ingegneria dei materiali):**

Si consideri un impianto di produzione di energia termoelettrica basato su un ciclo combinato turbogas-vapore, con la sezione a vapore del ciclo combinato ad un solo livello di pressione.

### Sezione Turbogas

Il turbogas utilizzato nell'impianto è caratterizzato dai seguenti dati:

Dati Turbogas	
Potenza utile all'albero	300 MW
Portata di combustibile	15.45 kg/s
Potere calorifico inferiore del combustibile	41.1 MJ/kg
Temperatura gas di scarico	564 °C
Portata gas di scarico	611 kg/s

Per semplicità trattare il gas di scarico del turbogas come un gas perfetto con calore specifico a pressione costante  $C_P = 1100 \text{ J/kgK}$ .

### Sezione Vapore

Il vapore viene generato in una caldaia a recupero alimentata dal gas scaricato dal turbogas in cui si succedono in controcorrente il surriscaldatore, l'evaporatore (con degasatore integrato) e l'economizzatore. La temperatura di condensazione della sezione a vapore dell'impianto è pari a 50 °C.

Si richiede di effettuare il dimensionamento di massima della sezione a vapore del ciclo combinato. Giustificandone la motivazione, determinare in particolare:

1. Pressione di condensazione, pressione di vaporizzazione, temperatura di surriscaldamento e portata di vapore, tenendo conto dei vincoli di scambio termico posti dalla caldaia a recupero e in modo da

ottimizzare per quanto possibile il recupero del calore disponibile nel gas di scarico della turbina a gas. Ipotizzare a tal fine valori ragionevoli per

- a) la differenza di temperatura tra i gas di scarico e il vapore all'ingresso della caldaia a recupero ( $\Delta T$  di "approach point"),
  - b) la minima differenza tra temperatura dei gas di scarico e temperatura di ebollizione dell'acqua ( $\Delta T$  di "pinch point");
2. Potenza all'albero della pompa e della turbina e potenza utile della sezione a vapore, ipotizzando valori ragionevoli per il rendimento idraulico della pompa e per il rendimento isentropico della turbina;
  3. Rendimento termodinamico del ciclo combinato.

### Ultimo stadio della turbina a vapore di bassa pressione

Si effettui inoltre il dimensionamento di massima dell'ultimo stadio della turbina a vapore di bassa pressione che scarica nel condensatore, in modo da soddisfare ai seguenti requisiti/vincoli di progetto:

Velocità di rotazione della turbina	$N = 3000 \text{ RPM}$
Velocità all'apice delle pale rotoriche	$u_a \leq 400 \text{ m/s}$
Rapporto altezza di pala/diametro medio	$\frac{h}{D_m} \leq \frac{1}{3}$
Rapporto Energia Cinetica di scarico/Salto entalpico totale	$\frac{E_{ks}}{\Delta h_{tot}} \leq \frac{2}{100}$
Massimo Mach della velocità relativa all'apice del rotore	$M_{wa} \leq 1.2$
Titolo di vapore allo scarico	$x \geq 0,9$

in cui  $\Delta h_{tot}$  indica il salto entalpico del vapore dall'uscita della caldaia a recupero all'ingresso del condensatore. Si assuma inoltre un valore del coefficiente di ingombro delle pale rotoriche allo scarico pari a:

$$\xi \stackrel{\text{def}}{=} \frac{A_{\text{flow}}}{A_{\text{geom}}} = 0.95$$

Giustificandone la motivazione, determinare in particolare:

1. Numero di flussi necessari a smaltire l'intera portata di vapore;
2. Diametro medio e altezza di pala del rotore;
3. Triangoli di velocità alla base, al raggio medio e all'apice delle pale rotoriche.

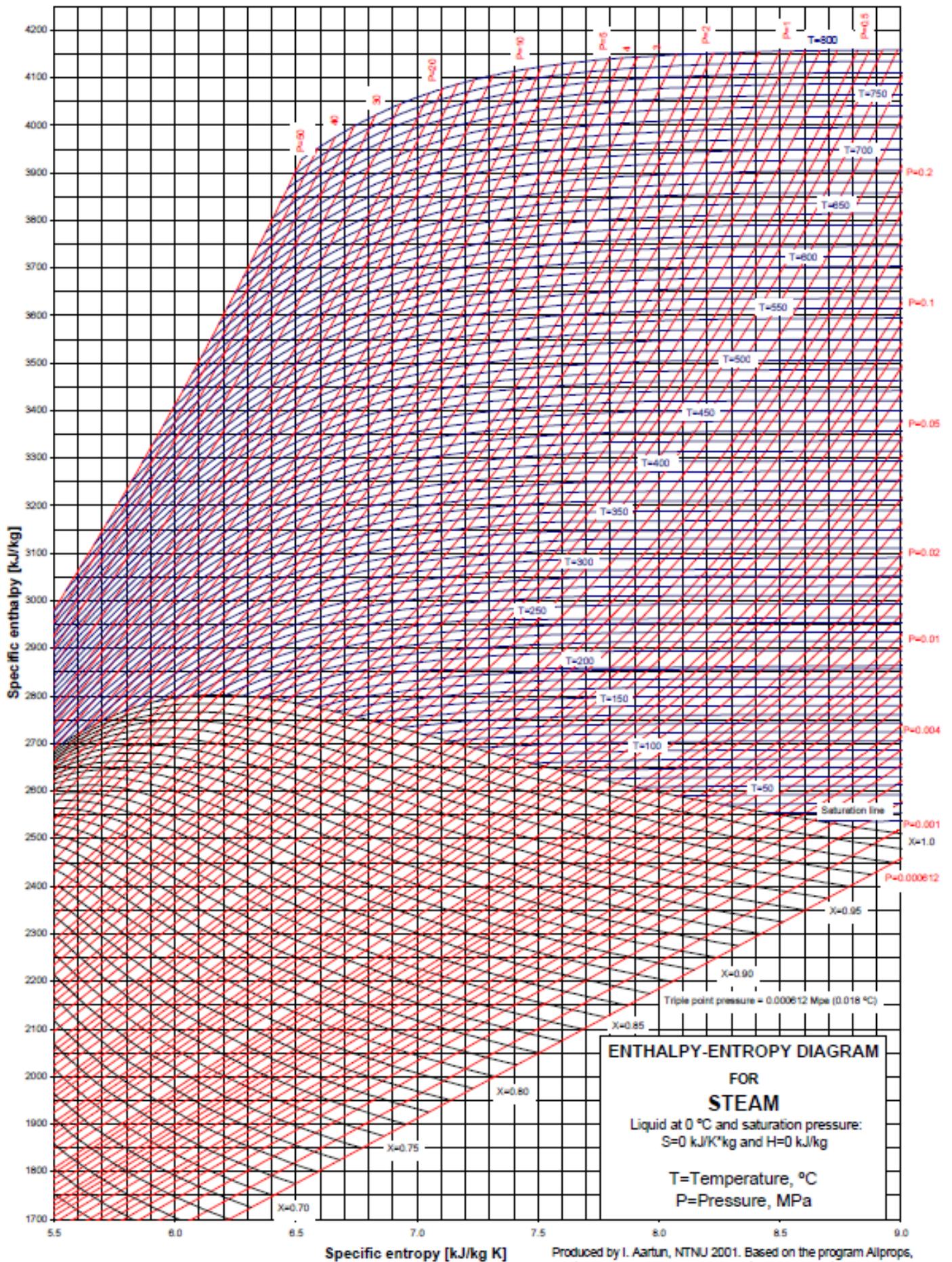
Effettuare, giustificandone la motivazione, tutte le ipotesi necessarie allo svolgimento del tema.

## **Proprietà termodinamiche e allegati**

Mentre, come precedentemente specificato, il gas combusto all'uscita del turbogas può essere trattato come un gas perfetto, il vapore deve essere considerato con le sue reali proprietà termodinamiche. A tal fine viene fornito in allegato:

1. Diagramma di Mollier del vapore;
2. Tabella con le condizioni di liquido e di vapore saturo in funzione della temperatura.

L'acqua allo stato liquido può invece essere trattata come un liquido ideale a densità costante.



Produced by I. Aartun, NTNU 2001. Based on the program Allprops, Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho.

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table

Temp., $T$ °C	Sat. press., $P_{\text{sat}}$ kPa	Specific volume, $\text{m}^3/\text{kg}$		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, $v_f$	Sat. vapor, $v_g$	Sat. liquid, $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Sat. vapor, $u_g$	Sat. liquid, $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Sat. vapor, $h_g$	Sat. liquid, $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Sat. vapor, $s_g$
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

TABLE A-4

Saturated water—Temperature table (Concluded)

Temp., <i>T</i> °C	Sat. press., <i>P</i> <sub>sat</sub> kPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg·K		
		Sat. liquid, <i>v</i> <sub>f</sub>	Sat. vapor, <i>v</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>u</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>u</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>u</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>h</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>h</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>h</i> <sub>g</sub>	Sat. liquid, <i>s</i> <sub>f</sub>	Evap., <i>s</i> <sub>fg</sub>	Sat. vapor, <i>s</i> <sub>g</sub>
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Source: Tables A-4 through A-8 are generated using the Engineering Equation Solver (EES) software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. The routine used in calculations is the highly accurate Steam\_IAPWS, which incorporates the 1995 Formulation for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, issued by The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS). This formulation replaces the 1984 formulation of Haar, Gallagher, and Kell (NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Co., 1984), which is also available in EES as the routine STEAM. The new formulation is based on the correlations of Saul and Wagner (J. Phys. Chem. Ref. Data, 16, 893, 1987) with modifications to adjust to the International Temperature Scale of 1990. The modifications are described by Wagner and Pruss (J. Phys. Chem. Ref. Data, 22, 783, 1993). The properties of ice are based on Hyland and Wexler, "Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H<sub>2</sub>O from 173.15 K to 473.15 K," *ASHRAE Trans.*, Part 2A, Paper 2793, 1983.