

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base



A.A.2020-2021

CORSO DI LAUREA IN ARCHITETTURA QUINQUENNALE, 3° ANNO
INSEGNAMENTO DI FISICA TECNICA AMBIENTALE – PROFF. L.BELLIA E B.I. PALELLA

APPENDICE A

- A1. SISTEMI ED UNITÀ DI MISURA
- A2. IL CALCOLO DELLE PROPRIETÀ DI UNA SOSTANZA
- A3. L'INTERPOLAZIONE LINEARE
- A4. TABELLE PER IL CALCOLO DELLE PROPRIETÀ

NAPOLI, FEBBRAIO 2021

A1. SISTEMI ED UNITÀ DI MISURA

A1.1 Introduzione

Ai fenomeni che si osservano in natura sono spesso associabili grandezze fisiche che, in opportune combinazioni, forniscono leggi e relazioni che descrivono i fenomeni stessi.

Ad esempio, per un corpo in movimento che si sposta lungo una traiettoria rettilinea, percorrendo spazi uguali in tempi uguali, comunque piccoli, la legge del moto può scriversi:

$$ds = v \cdot dt$$

avendo indicato con dt il tempo impiegato a percorrere lo spazio ds . Se nella precedente relazione si assumono come grandezze fondamentali spazio e tempo, la grandezza v , in tal caso costante, che rappresenta la velocità del moto sarà derivata dal loro rapporto. La possibilità di definire per essa un valore numerico resta legata alla misurabilità di ds e di dt . Misurare una qualsiasi grandezza G significa confrontarla con un'altra dimensionalmente omogenea assunta come unità campione. La misura di G è esprimibile secondo la relazione:

$$G = n \cdot U$$

dove U rappresenta l'unità di misura scelta ed n è un numero reale. Il numero che esprime il valore della grandezza misurata può essere diverso a seconda dell'unità campione prescelta: ad esempio la misura dell'altezza di un edificio sarà 30, 0,030 o 3000 a seconda che l'unità prescelta sia rispettivamente il metro, il chilometro o il centimetro.

A1.2 Il Sistema Internazionale

Storicamente deriva dal Sistema Giorgi (dal nome del suo ideatore) noto anche come sistema MKS poiché considerava come unità fondamentali solo quelle associate alle tre grandezze lunghezza, massa e tempo (M=metro; K=kilogrammo; S=secondo). Il Sistema Internazionale fu definito ed approvato dalla Conferenza Generale dei Pesi e Misure nel 1960, ed è indicato con la sigla SI: le sue unità di misura sono fissate in base ad accordi internazionali, ed esso rappresenta una normativa razionale ed unificata per tutte le misurazioni scientifiche, industriali e commerciali. Adottato ufficialmente all'interno dei Paesi della Comunità Europea, secondo quanto stabilito dalla direttiva CEE del 18 ottobre 1971 n.71/354/ CEE, viene raccomandato in molti altri Paesi; il suo uso è inoltre incoraggiato da quasi tutte le organizzazioni per l'unificazione, tra cui l'I.S.O. (International Organization for Standardization). Il Sistema Internazionale stabilisce le unità di misura di sette grandezze fondamentali, di due grandezze supplementari (Tab.A1.1) e di tutte le grandezze derivate.

Tab.A1.1 - Grandezze fondamentali e supplementari e relative unità di misura del Sistema Internazionale.

UNITA' FONDAMENTALI			
GRANDEZZA	DIMENSIONE	UNITA SI	SIMBOLO
Lunghezza	[L]	metro	m
Massa	[M]	kilogrammo	kg
Tempo	[T]	secondo	s
Corrente elettrica	[I]	ampere	A
Temperatura termodinamica	[θ]	kelvin	K
Intensità luminosa	[J]	candela	cd
Quantità di sostanza	[n]	mole	mol
UNITA' SUPPLEMENTARI			
GRANDEZZA	UNITA SI	SIMBOLO	
Angolo piano	radiante	rad	
Angolo solido	steradiano	sr	

Le unità SI caratterizzate da un nome proprio nella scrittura estesa vanno riportate con l'iniziale minuscola. Ad esempio l'unità di misura della potenza è il watt, quella dell'energia il joule, etc. Viceversa quando delle suddette unità di misura si adotta il simbolo, allora questo va riportato con la maiuscola. Ad esempio 15 W, 210 J, etc.

Nel SI accanto alle 3 unità fondamentali (m, kg, s) vengono introdotte anche le 3 corrispondenti dimensioni fondamentali, designate con le seguenti lettere maiuscole poste tra parentesi quadre:

massa [M]
lunghezza [L]
tempo [T]

Si noti che le tre dimensioni fondamentali, M, L, T, non vanno assolutamente confuse con le unità di misura o con i prefissi dei loro multipli e sottomultipli. Ad ogni grandezza fisica corrisponde un'unica equazione dimensionale derivante dalla definizione stessa:

$$[\text{velocità}] = \frac{[\text{spazio}]}{[\text{tempo}]} = \frac{[L]}{[T]} = [L][T^{-1}]$$

Dall'equazione precedente, tramite la Tab. A.1 si deduce l'unità di misura della velocità: m/s. La verifica delle dimensioni di ogni grandezza fisica è pertanto un comodo mezzo per controllare se una serie di operazioni o di passaggi di calcolo qualsiasi è stata condotta esattamente. Ad esempio, poichè

$$[\text{forza}] = [\text{massa}] \cdot [\text{accelerazione}] = [M][L T^{-2}]$$

$$[\text{Spostamento}] = [L]$$

risulterà:

$$[\text{energia, lavoro}] = [\text{forza}] \cdot [\text{spostamento}] = [M][L T^{-2}][L] = [M L^2 T^{-2}]$$

Nota l'equazione dimensionale si possono ricavare agevolmente le unità di misura della grandezza energia:

$$\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{N m}$$

Non essendo pratico l'uso delle sole unità SI è necessario introdurre multipli e sottomultipli decimali, individuati da prefissi che prendono il nome di prefissi SI. A tali prefissi corrispondono potenze di 10 il cui esponente, positivo o negativo è, nella maggior parte dei casi, un multiplo di 3 (Tab. A1.2).

Tab. A1.2- Prefissi SI

prefisso	simbolo	fattore	prefisso	simbolo	fattore
deca	da	10 ¹	deci	d	10 ⁻¹
etto	h	10 ²	centi	c	10 ⁻²
kilo	k	10 ³	milli	m	10 ⁻³
mega	M	10 ⁶	micro	μ	10 ⁻⁶
giga	G	10 ⁹	nano	n	10 ⁻⁹
tera	T	10 ¹²	pico	p	10 ⁻¹²

Il simbolo di un prefisso può essere affiancato al simbolo di una unità fondamentale, supplementare o derivata per formare il simbolo del multiplo o sottomultiplo di quella unità. Ad esempio 1 M Pa = 10⁶ Pa. Non si possono utilizzare prefissi composti come ad esempio 3*10⁻¹² A= 3 pA e non 3µµA. Con riferimento alla Tab. A1.1 si fa notare che l'unità di misura della temperatura termodinamica è il kelvin; è errata la designazione *grado kelvin* così come °K: l'espressione corretta di un valore di temperatura secondo il SI è, ad esempio

$$T=300K$$

Tab. A1.3 - Grandezze derivate e loro unità nel SI

GRANDEZZA	DIMENSIONI	UNITA SI	SIMBOLO
Velocità	[LT ⁻¹]	metro/secondo	m/s
Accelerazione lineare	[LT ⁻²]	metro/secondoquadrato	m/s ²
Densità(massa volumica)	[ML ⁻³]	kilogrammo/metrocubo	kg/m ³
Forza	[MLT ⁻²]	newton	1N=1kgm/s ²
Pressione	[ML ⁻¹ T ⁻¹]	newton/metroquadrato	N/m ² =1Pa
Energia, Lavoro	[ML ² T ⁻²]	joule	1J=1Nm
Costante universale dei gas	[ML ² T ⁻² Θ ⁻¹]	joule/(kg-mole kelvin)	J/kg-moleK
Costante dei gas	[ML ² T ⁻² Θ ⁻¹]	joule/(kilogrammo kelvin)	J/kgK
Potenza	[ML ² T ⁻³]	watt	1W=1J/s
Portata volumetrica	[L ³ t ⁻¹]	metricubi/secondo	m ³ /s
Portata massica	[MT ⁻¹]	kilogrammi/secondo	kg/s
Conduttività termica	[MLT ⁻³ Θ ⁻¹]	watt/(metro kelvin)	W/m K
Viscosità dinamica	[ML ⁻¹ T ⁻¹]	pascal secondo	Pa s
Viscosità cinematica	[L ² T ⁻¹]	metroquadrato/secondo	m ² /s
Conduttanza superficiale	[MT ⁻³ Θ ⁻¹]	watt/(metro quadro kelvin)	W/m ² K

Dalle unità fondamentali e supplementari si ottengono, con opportune combinazioni, le unità di tutte le grandezze derivate. Per ragioni di praticità, ad alcune di esse, spesso a causa della loro complessità, sono stati attribuiti nomi (in genere il nome dello scienziato a cui si ispirano) e simboli speciali. In Tab. A1.3 sono riportate le unità SI delle grandezze derivate di maggior uso nel calcolo tecnico.

A1. 3 Altri sistemi di unità di misura

Le unità del SI vanno gradatamente sostituendo quelle dei sistemi preesistenti: alcuni di essi se ne diversificano completamente, altri solo per la parziale sostituzione di alcune unità. La conoscenza delle unità di altri sistemi e dei rispettivi fattori di conversione è pertanto una condizione operativamente indispensabile.

Un sistema che risulta ancora oggi usato è il Sistema Tecnico (ST) detto anche Sistema degli Ingegneri. Esso assume come grandezze fondamentali la lunghezza, la forza ed il tempo, adottando come unità di misura rispettivamente il metro, il kilogrammo-forza (o kilogrammo-peso o kilopond) ed il secondo. Il kilogrammo forza (kg_f o kp) è definito come quella forza che applicata alla massa di 1 kg imprime ad essa un'accelerazione pari a quella di gravità, fissata a 9, 8 m/s² . Pertanto, è facile ricavare che:

$$1 \text{ kgf} = \text{massa} \cdot \text{acc. di gravità} = 1 \text{ kg} \cdot 9.807 \text{ m/s}^2 = 9, 807 \text{ kg m/s}^2 = 9, 807 \text{ N}$$

Di conseguenza in tale sistema l'unità di massa è un'unità derivata:

$$\text{massa} = \frac{\text{forza}}{\text{acc. di gravità}} = \frac{\text{kg}_f}{\text{m/s}^2} = \text{kg}_f \text{ m}^{-1} \text{ s}^2$$

Nel ST, analogamente a quanto già visto per il SI, accanto alle tre unità fondamentali (kp, m, s) vengono definite anche le tre corrispondenti dimensioni fondamentali:

forza [F]
lunghezza [L]
tempo [T]

Pertanto nel ST le dimensioni della massa sono:

$$[\text{massa}] = [F] [L^{-1}] [T^2]$$

L'unità di lavoro e di energia è il kilogrammetro ($\text{kg}_f \text{ m}$ o più raramente kgm) . Risulta:

$$1 \text{ kg}_f \text{ m} = 9,807 \text{ J}$$

La particolarità di tale sistema che, per certi aspetti rappresenta un'incoerenza metrologica, è quella di utilizzare una unità di misura diversa dal kpm per l'energia termica: la kilocaloria che equivale a 427 kpm, si ha quindi:

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kpm} = 427 \cdot 9,807 = 4187 \text{ J}$$

L'unità di misura della pressione è il kg_f / m^2 che corrisponde al millimetro di colonna d'acqua ($\text{mm H}_2\text{O}$).

Poiché nei concetti e definizioni di base della Termodinamica (cfr. A. Cesarano, P. Mazzei, Elementi di Termodinamica Applicata, 1987, Liguori Editore) si è soliti distinguere tra grandezze totali e specifiche, è bene ricordare che quest'ultime, nella maggior parte dei casi, s'intendono nel SI riferite all'unità di massa (kg). Talvolta, invece, le grandezze specifiche sono riferite ad altre grandezze estensive, come il volume. Così ad esempio nel SI si parla di *massa volumica*, impropriamente denominata anche *densità*, definita come massa/volume (kg/m^3), mentre nel ST, ormai desueto, si parla di *peso specifico*, definito come peso/volume (kp/m^3).

Altro sistema di unità di misura è quello britannico, o meglio, i Sistemi Britannici poiché ne esistono tre tipi. Tali sistemi, nonostante i ripetuti inviti di unificazione al Sistema Internazionale rivolti al Regno Unito ed agli Stati Uniti, continuano talvolta ad essere usati in tali Paesi sia nel campo scientifico che in quello industriale e commerciale. L'ente di unificazione americano N.B.S.(National Bureau of Standard) pur avendo da alcuni anni riconosciuto ed imposto a livello nazionale l'uso del SI, non riesce del tutto nel suo intento unificatore: si assiste così ancor oggi, nella letteratura tecnica anglosassone, all'adozione di detti Sistemi di Unità di Misura.

Infine, c'è da notare che, per alcune grandezze fondamentali e derivate, esistono unità non SI di uso comune non classificabili nei sistemi sopra accennati, per tale motivo vengono denominate unità fuori sistema. L'uso di tali unità non SI deve tuttavia essere scoraggiato in favore di quelli SI, sia per facilitare lo scambio di dati ed informazioni, sia per evitare inutili complicazioni di calcolo quando si fa uso contemporaneo di unità non coerenti ed unità SI. Si riportano in Tab. A1.4 le unità non SI di uso comune, e le relative equivalenze con le unità SI.

In Tab. A1.5 si riportano i coefficienti di conversione relativi alle grandezze più significative nel calcolo tecnico.

A.1.4 Fattori di conversione

Tab. A1.4 - Unità non SI di uso comune

GRANDEZZA	UNITA'	SIMBOLO	CONVERSIONE NEL SI
Lunghezza	miglio terrestre		1 miglio = 1609 m
	miglio marino		1 miglio = 1853 m
	angstrom	\AA	$1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$
Massa	tonnellata	t	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
Tempo	ora	h	1 h = 3600 s
	minuto	min	1 min = 60 s
Area	ettaro	ha	$1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$
Volume	litro	l	$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
Velocità	kilometro/ora	km/h	$1 \text{ km/h} = (1000/3600) \text{ m/s}$
	nodo		$1 \text{ nodo} = (1853/3600) \text{ m/s}$
Pressione	atmosfera normali	atm	$1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
	atmosfera tecnica	at	$1 \text{ at} = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$
	bar		$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
	millimetro di mercurio (torr)	mmHg	$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ torr} = 1,3310^2 \text{ Pa}$
Lavoro, energia	kilowatt ora	kWh	$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$
	grande caloria	Cal	$1 \text{ Cal} = 4,187 \cdot 10^3 \text{ J}$
	elettronvolt	eV	$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Potenza	Cavallo	CV	$1 \text{ CV} = 7,35 \cdot 10^2 \text{ W}$

Tab. A1.5 – Coefficienti di conversione

GRANDEZZA FISICA	UNITA DI MISURA	SIMBOLO	MOLTIPLICARE	UNITA DI MISURA SI	SIMBOLO
			DIVIDERE		
Lunghezza	pollice	in	$2,540 \cdot 10^{-2}$	metri	m
	piede	ft	$3,048 \cdot 10^{-1}$	metri	m
	yard	yd	$9,144 \cdot 10^{-1}$	metri	m
	miglio	mile	$1,609 \cdot 10^3$	metri	m
Superficie	Pollici quadri	sq in	$6,4516 \cdot 10^{-4}$	metri quadri	m ²
	Piedi quadri	sq ft	$9,290 \cdot 10^{-2}$	metri quadri	m ²
Volume	pollici cubi	cu in	$1,6387 \cdot 10^{-5}$	metri cubi	m ³
	pie di cubi	cu ft	$2,8317 \cdot 10^{-2}$	metri cubi	m ³
	gallone USA	gal	$3,785 \cdot 10^{-3}$	metri cubi	m ³
	gallone UK	gal	$4,546 \cdot 10^{-3}$	metri cubi	m ³
Massa	libbra	lb	$4,536 \cdot 10^{-1}$	kilogrammi	kg
	oncia	oz	$2,835 \cdot 10^{-2}$	kilogrammi	kg
Densità	<u>Libbra</u>	<u>lb</u>	1,6018 10	<u>kilogrammi</u>	<u>kg</u>
	<u>Piede cubo</u>	<u>cu ft</u>		<u>metro cubo</u>	<u>m³</u>
	<u>libbra</u>	<u>lb</u>	2 76810 ⁴	<u>kilogrammi</u>	<u>kg</u>
	<u>pollice cubo</u>	<u>cu in</u>		<u>metro cubo</u>	<u>m³</u>
Velocità	<u>pie de</u>	<u>ft</u>	$5,08 \cdot 10^{-3}$	<u>metri</u>	<u>m</u>
	<u>minuto</u>	<u>min</u>		<u>secondo</u>	<u>s</u>
	<u>miglio</u>	<u>mile</u>	$4,4704 \cdot 10^{-1}$	<u>metri</u>	<u>m</u>
	<u>ora</u>	<u>h</u>		<u>secondo</u>	<u>s</u>
Portata:					
- massica	<u>libbra</u>	<u>lb</u>	$7,5604 \cdot 10^{-3}$	<u>kilogrammi</u>	<u>kg</u>
	<u>minuto</u>	<u>min</u>		<u>secondo</u>	<u>s</u>
- volumetrica	<u>galloni USA</u>	<u>gal</u>	$6,306 \cdot 10^5$	<u>metri cubi</u>	<u>kg</u>
	<u>minuto</u>	<u>min</u>		<u>secondo</u>	<u>s</u>
	<u>galloni UK</u>	<u>gal</u>	$7,583 \cdot 10^{-5}$	<u>metri cubi</u>	<u>kg</u>
	<u>minuto</u>	<u>min</u>		<u>secondo</u>	<u>s</u>
	<u>pie di cubi</u>	<u>cu ft</u>	$4,722 \cdot 10^{-4}$	<u>metri cubi</u>	<u>m³</u>
	<u>minuto</u>	<u>min</u>		<u>secondo</u>	<u>s</u>
Forza	kilopond	kp=kgf	9,807	newton	N
	libbra forza	lbf	4,4498	newton	N
Pressione:					
	bar	bar	10 ⁵	pascal	Pa
	<u>kilopond</u>	<u>kp</u>	9,807	pascal	Pa
	metro quadro	m ²		-	
	Atmosfera	atm	$1,013 \cdot 10^5$	pascal	Pa
	(760 mmHg)				
	<u>libbra forza</u>	<u>psi</u>	$6,895 \cdot 10^3$	pascal	Pa
	pollici quadri				
	atmosfera tecnica	at	$9,807 \cdot 10^4$	pascal	Pa
	(lcp/cm ²)				
	<u>libbra forza</u>	<u>lbf</u>	$4,7882 \cdot 10^{-1}$	pascal	Pa
	pie di quadri	ft ²			
	mm colonna H ₂ O	mmH ₂ O	9,807	pascal	Pa

Tab. A1.5 – Coefficienti di conversione (continua)

GRANDEZZA FISICA	UNITA DI MISURA	SIMBOLO	MOLTIPLICARE	UNITA DI MISURA SI	SIMBOLO
			DIVIDERE		
Energia	kilowattora	kW h	3,600 10 ⁶	joule	J
	kilocalorie	kcal	4,187 10 ³	joule	J
	kilopond metro	kpm	9,807	joule	J
	libbra forza piede	lbf ft	1,356	joule	J
	unità termica britannica	Btu	1,055 10 ³	joule	J
Potenza	kilocalorie/ora	kcal/h	1,163	watt	W
	<u>kilopond metro</u> ora	<u>kp m</u> h	2,724 10 ⁻³	watt	W
	<u>unità ter. brit.</u> ora	<u>Btu</u> h	2,928 10 ⁻¹	watt	W
	cavallo vapore	CV	7,35 10 ²	watt	W
	horse power	HP	7,45 10 ²	watt	W
Viscosità: -cinematica	stoke	St	10 ⁻⁴	<u>metro quadro</u> secondo	<u>m²</u> s
	<u>piedi quadri</u> ora	<u>ft²</u> h	2,58 10 ⁻⁵	<u>metro quadro</u> secondo	<u>m²</u> s
	<u>metri quadri</u> ora	<u>m²</u> h	2 778 10 ⁻⁴	<u>metro quadro</u> secondo	<u>m²</u> s
	poise	p	1,0010 ⁻¹	pascal secondo	Pas
-dinamica	<u>lib forza sec</u> pollice quadro	<u>lbfs</u> in ²	6,89510 ³	pascal secondo	Pas
	<u>lib forza sec</u> pollice quadro	<u>lbfs</u> in ²	4,788 10	pascal secondo	Pas
			-		-
Conduttività termica		<u>kcal</u> hm ^{°C}	1,163	<u>watt</u> metro kelvin	<u>W</u> m K
		<u>kJ</u> hm ^{°C}	2,77810 ⁻¹	<u>watt</u> metro kelvin	<u>W</u> m K
		<u>Btu</u> ft h °F	1,730	<u>watt</u> metro kelvin	<u>W</u> m K
Conduttanza termica unitaria		<u>kcal</u> hm ^{2°C}	1,163	<u>watt</u> metro quadro kelvin	<u>W</u> m ² K
		<u>kJ</u> hm ^{2°C}	2,77810 ⁻¹	<u>watt</u> metro quadro kelvin	<u>W</u> m ² K
		<u>Btu</u> ft ² h°F	5,677	<u>watt</u> metro quadro kelvin	<u>W</u> m ² K

A.1.5 La scala di temperatura

La scala di temperatura attualmente in vigore è la Scala Internazionale Pratica di Temperatura (SIPT-68) già definita nel 1948 (SIPT-48) e successivamente revisionata nel 1968. Nel 1975 è stata pubblicata la versione finale della SIPT-68, alla quale qui si fa riferimento. Nella parte introduttiva del testo di definizione della SIPT-68 si stabilisce che le unità di misura accettate sono il *kelvin* (simbolo K) ed il *grado Celsius* (simbolo °C) e che le due unità sono dimensionalmente uguali. Nel SI, pertanto, una temperatura può essere espressa sia in kelvin che in gradi Celsius; la relazione tra temperatura in gradi Celsius e quella in kelvin è la seguente:

$$T [^{\circ}\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15 \text{ K}$$

Per ragioni storiche si è posta l'origine della scala Celsius a 273,15 K (punto di solidificazione dell'acqua). Si osservi che la temperatura espressa in kelvin non può assumere valori negativi. I paesi anglosassoni adottano come unità di misura della temperatura il grado Fahrenheit [°F], definito come risulta dal prospetto riepilogativo mostrato in Tab. A1.6.

Tab. A1.6- Relazioni per la conversione della temperatura nelle varie unità di misura.

$$T[^{\circ}\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15$$

$$T[\text{K}] = T[^{\circ}\text{C}] + 273,15$$

$$T[^{\circ}\text{F}] = 32,00 + 9/5 T[^{\circ}\text{C}]$$

$$T[^{\circ}\text{C}] = 5/9 (T[\text{F}] - 32,00)$$

$$\Delta T[^{\circ}\text{C}] = \Delta T[\text{K}]$$

$$\Delta T[^{\circ}\text{C}] = 0,5556 \Delta T[^{\circ}\text{F}]$$

$$\Delta T[^{\circ}\text{F}] = 1,8 \Delta T[^{\circ}\text{C}]$$

A2 IL CALCOLO DELLE PROPRIETÀ DI UNA SOSTANZA

A2.1 Il riconoscimento della fase di una sostanza

Una sostanza la cui temperatura è maggiore di quella critica si trova in fase aeriforme; in tale condizione, allorché la pressione assume valori inferiori a quello della pressione critica si può assumere valido il modello di comportamento di gas ideale secondo cui le proprietà pressione, volume e temperatura sono legate tra loro dall'equazione di stato:

$$pV = mRT \quad (A2.1)$$

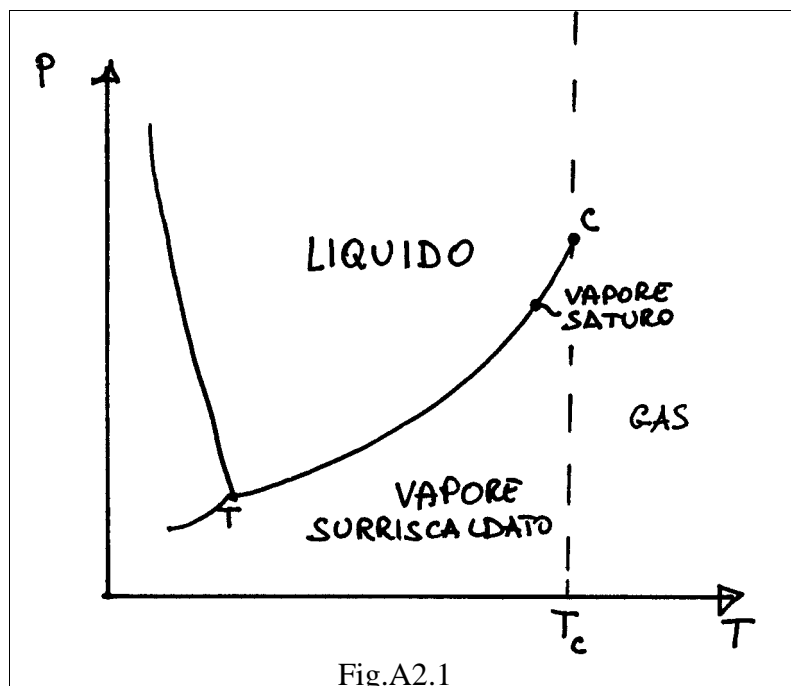
o, in termini specifici

$$pv = RT \quad (A2.2)$$

i valori delle temperature e delle pressioni critiche di alcune sostanze sono riportati in tab.A4.1. Nell'ambito delle applicazioni che seguono si applicherà il modello di comportamento da gas ideale, dopo aver verificato che la temperatura sia maggiore di quella critica, senza effettuare controlli sulla pressione. Se la temperatura è inferiore a quella critica, allora la sostanza può essere in fase liquida, in fase aeriforme (vapore surriscaldato) oppure in passaggio di fase liquido-aeriforme. Le condizioni di passaggio di fase liquido-aeriforme sono dette di "saturazione"

Si ricorda che, durante il passaggio di fase, se la pressione si mantiene costante lo sarà anche la temperatura e viceversa; tali valori rappresentano tutti e soli i punti della curva di saturazione. Fissate pressione e temperatura di saturazione, il passaggio di fase avviene gradualmente tra due condizioni estreme: quando la sostanza è ancora tutta in fase liquida e quando è tutta in fase aeriforme. Nel primo caso si dice che la sostanza è in condizioni di *liquido saturo*, nel secondo in condizioni di *vapore saturo secco*. In condizioni intermedie, ossia quando sono presenti entrambe le fasi in proporzioni diverse la sostanza si dice essere in condizioni di *di vapore saturo*.

Riportando sul piano di coordinate temperatura e pressione, detto piano p-T o piano delle fasi, i punti corrispondenti alle condizioni di saturazione si osserva che appartengono ad una curva, detta curva di saturazione, i cui estremi sono il punto triplo T ed il punto critico C, fig.A2.1.



Le due regioni di piano delimitate dalla curva di saturazione rappresentano rispettivamente la zona della fase liquida e quella della fase aeriforme.

Per una generica sostanza con temperatura compresa tra quella tripla e quella critica, noti i valori di pressione e temperatura, è possibile definire quali sono le fasi presenti, effettuando un confronto con i valori di saturazione e mediante l'ausilio del piano termodinamico p-T.

In particolare, riferendosi all'acqua, le coppie di coordinate (p, T) dei punti appartenenti alla curva di saturazione sono riportate nelle prime due colonne delle tabelle A4.5 ed A4.6. Le altre colonne della tabella riportano i valori delle proprietà volume specifico, energia interna specifica ed entalpia specifica nelle condizioni di liquido saturo e vapore saturo secco.

Note la pressione e la temperatura dell'acqua è possibile determinare quali sono le fasi presenti con l'ausilio delle tabelle A4.5 ed A4.6:

1 - Se la pressione assegnata è maggiore della pressione di saturazione alla temperatura assegnata la sostanza è in condizioni di liquido:

$$p > p_s(T) \quad \text{fase liquida}$$

2- Se la pressione assegnata è minore della pressione di saturazione alla temperatura assegnata, la sostanza è in fase aeriforme e viene detta in condizioni di vapore surriscaldato:

$$p < p_s(T) \quad \text{fase di vapore surriscaldato}$$

3- Se la pressione assegnata uguaglia quella di saturazione alla temperatura assegnata la sostanza è in passaggio di fase:

$$p = p_s(T) \quad \text{fase di vapore saturo}$$

Esempio:

sostanza acqua:

- a) $T = 80,0^\circ\text{C}$; $p = 0,4736 \text{ bar}$
- b) $T = 80,0^\circ\text{C}$; $p = 0,2530 \text{ bar}$
- c) $T = 80,0^\circ\text{C}$; $p = 1,0100 \text{ bar}$

Dalla tab.A4.5, alla temperatura $T = 80,0 \text{ }^\circ\text{C}$ corrisponde una pressione di saturazione $p_s(80,0^\circ\text{C}) = 0,4736 \text{ bar}$, fig. A2.2.

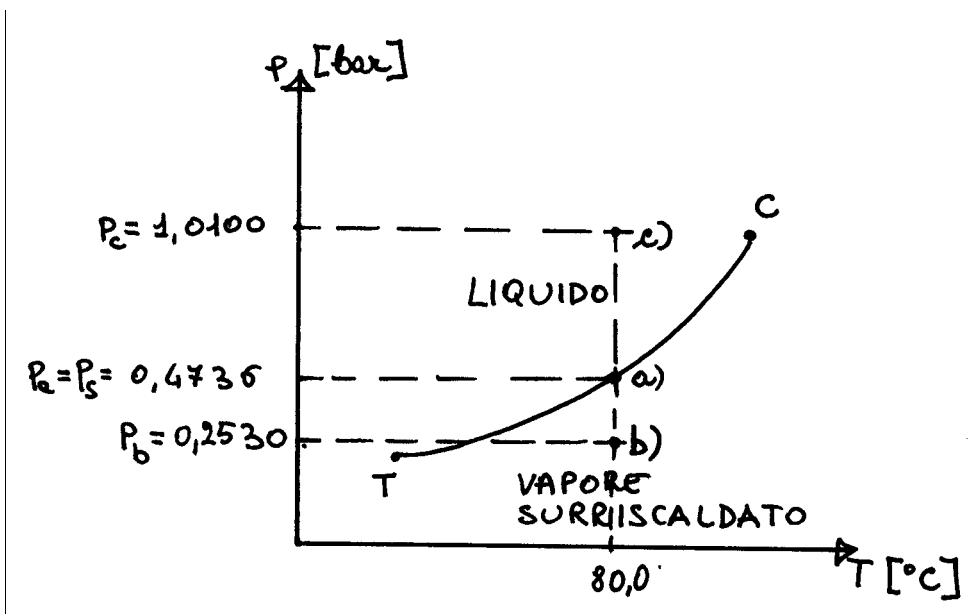


Fig.A2.2

- a) $p = 0,4736$ bar risulta uguale a $p_s(T)$, per cui la sostanza è in condizioni di passaggio di fase liquido-aeriforme, ossia in condizioni di saturazione;
- b) $p = 0,2530$ bar è minore di $p_s(T)$, per cui la sostanza è in condizioni di vapore surriscaldato;
- c) $p = 1,0100$ bar è maggiore di $p_s(T)$, per cui la sostanza è in fase liquida;

Analogamente è possibile riconoscere la fase confrontando il valore di temperatura assegnato con quello di saturazione corrispondente alla pressione assegnata $T_s(p)$, ad esempio:

$$T = 60,0^\circ\text{C} \text{ e } p = 2,7011 \text{ bar}$$

In corrispondenza della pressione assegnata, dalla tabella A4.5 si ricava che la temperatura di saturazione è $T_s(2,7011 \text{ bar}) = 130,0^\circ\text{C}$

Poiché la temperatura assegnata risulta minore rispetto a quella di saturazione, la sostanza è in fase liquida, come si evince dalla rappresentazione sul piano (p,T) , fig. A2.3.

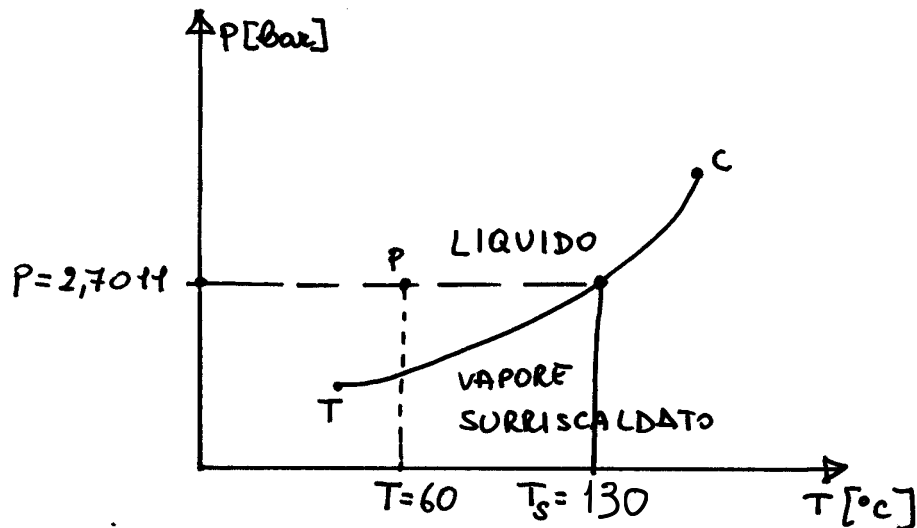


Fig.A2.3

A2.2 Il calcolo dell'energia interna e dell'entalpia

In alcuni casi il calcolo dell'energia interna e dell'entalpia specifica è molto semplice. Ciò accade quando la sostanza che costituisce il sistema termodinamico in esame è tutta nello stato di aggregazione gassoso, liquido o solido, cioè quando nel sistema è presente una sola fase. E' possibile calcolare il valore dell'energia interna specifica e dell'entalpia specifica in tali condizioni ritenendo che vi sia una proporzionalità diretta tra le variazioni di queste proprietà e la variazione di temperatura. Nel caso dei gas a comportamento ideale si ha:

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

$$\Delta h = c_p \Delta T$$

Nella relazione, che è valida per temperature comprese tra 0°C e 100°C, c_v e c_p rappresentano rispettivamente il calore specifico¹ a volume costante ed il calore specifico a pressione costante del gas. Per i liquidi e per i solidi risulta:

$$\Delta h \cong \Delta u = c \cdot \Delta T$$

in cui c rappresenta il calore specifico della sostanza ed è considerato, nell'ambito delle applicazioni che interessano il settore dell'edilizia e degli impianti di condizionamento ambientale, costante con la temperatura.

Se si vuole calcolare l'energia interna specifica o l'entalpia specifica corrispondente ad un particolare valore di temperatura, occorre valutare la variazione di questa rispetto ad uno stato di riferimento, in cui convenzionalmente si pone il valore della proprietà pari a zero. Come stato di riferimento si ipotizza quello corrispondente alla temperatura $T_0 = 0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$, in cui si pone $u_0 = 0 \text{ kJ/kg}$ e $h_0 = 0 \text{ kJ/kg}$. Per i gas si ha:

$$u - u_0 = c_v \cdot (T - T_0)$$

$$h - h_0 = c_p (T - T_0)$$

ossia:

$$u = c_v * (T - T_0)$$

$$h = c_p * (T - T_0)$$

mentre per i liquidi:

$$h - h_0 \cong u - u_0 = c (T - T_0)$$

ossia:

$$h \cong u = c (T - T_0)$$

Per la fase liquida i valori di energia interna e di entalpia, dipendendo dalla sola temperatura, coincidono con i valori di liquido saturo alla temperatura assegnata e, per l'acqua, possono essere letti nelle Tabelle A4.5 ed A4.6.

¹ Capacità termica e Calore specifico

La quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di una sostanza, di una data massa, di un valore prefissato varia da sostanza a sostanza. Per esempio, il calore richiesto per innalzare di 1°C la temperatura di 1 kg d'acqua è di 4186 J, mentre il calore necessario per variare di 1°C la temperatura di 1 kg di rame è solamente di 387 J.

La **capacità termica**, C , di un campione particolare di una sostanza è definita come la quantità di calore necessaria per aumentare la temperatura del campione stesso di un grado Celsius.

Da questa definizione deriva che se Q unità di calore vengono fornite ad una sostanza facendone variare la temperatura di ΔT , allora $Q = C \Delta T$.

La capacità termica di un qualsiasi corpo è proporzionale alla sua massa. È quindi conveniente definire la capacità

termica per unità di massa di una sostanza, c , **chiamata calore specifico**: $c = \frac{C}{m}$.

A3. L'INTERPOLAZIONE LINEARE

Accade spesso nella pratica professionale di dover utilizzare tabelle o diagrammi per il calcolo del valore di una grandezza y in funzione del valore assunto da un'altra grandezza x . Nella Tab. A3.1 che segue si riportano, ad esempio, i valori assunti da una qualsiasi grandezza y , al variare della x tra 5 e 35.

x	y
5	15
10	30
15	45
20	60
25	75
30	90
35	105

Tab.A3.1

Si supponga ora di dover determinare il valore assunto dalla y per un valore intermedio di x , ad esempio $x = 23$, che non compare nella tabella.

Nel caso in esame, la relazione che lega i valori di x riportati in Tab. A3.1 è di tipo lineare ed infatti la rappresentazione grafica dei dati della tabella fornisce sul piano x,y di Fig. A3.1 una retta che passa per l'origine degli assi, la cui equazione è:

$$y = cx$$

con $c = y/x = \text{cost.}$ In questo caso, molto semplice, se, per ogni valore di x riportato in Tab. A3.1, si calcola il rapporto y/x si ottiene un valore costante e pari a 3. Risulterà quindi per $x = 23$:

$$y = 3 \cdot 23 = 69$$

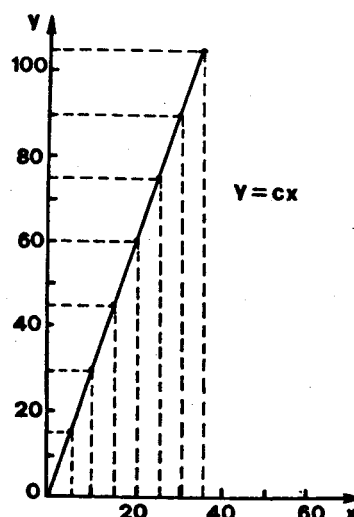


Fig.A3.1

Si esamini ora la Tab. A3.2. La rappresentazione grafica dei dati fornisce ancora una retta (Fig. A3.2), essa tuttavia non passa per l'origine degli assi e la sua equazione è del tipo:

$$y = c_1x + c_2$$

x	y
5	135
10	160
15	185
20	210
25	235
30	260
35	285

Tab.A3.2

La retta che incontra l'asse delle ordinate per $y = c_2$ e l'asse delle ascisse per $x = -c_2/c_1$. Nel caso si voglia calcolare per $x = 23$, valore che non compare in tabella, il corrispondente valore assunto dalla y è possibile utilizzare ancora una procedura d'interpolazione lineare.

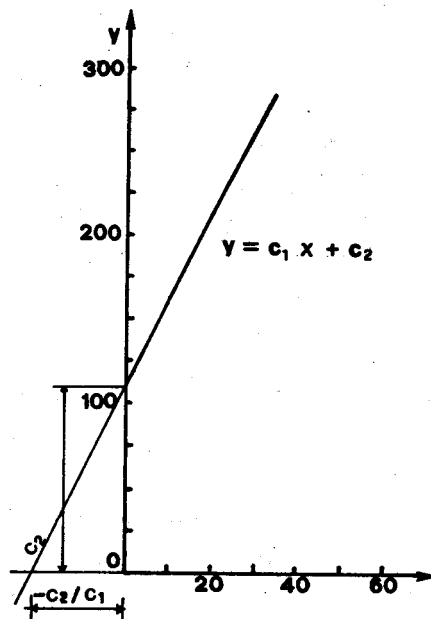


Fig.A3.2

Si scelga perciò un intervallo Δx che contiene il valore di x assegnato, come, ad esempio, quello che ha per estremi i valori $x_1 = 20$ ed $x_2 = 25$, cui corrispondono i valori $y_1 = 210$ ed $y_2 = 235$. I punti $A(x_1, y_1)$, e $B(x_2, y_2)$ sono due punti della retta tracciata sul diagramma di Fig. A3.3. In corrispondenza della ascissa $x = 23$, è indicata sul diagramma l'ordinata incognita y .

Per i triangoli simili ABC e AEF si può scrivere:

$$\frac{BC}{EF} = \frac{AC}{AF}$$

Tenendo conto delle coordinate dei punti estremi di ciascun segmento, la precedente relazione fornisce:

$$\frac{235 - 210}{y - 210} = \frac{25 - 20}{23 - 20}$$

da cui è possibile ricavare il valore incognito della y :

$$\frac{25}{y - 210} = \frac{5}{3}$$

$$y - 210 = 25 \cdot \frac{3}{5}$$

$$y = 210 + 25 \cdot \frac{3}{5}$$

$$y = 225$$

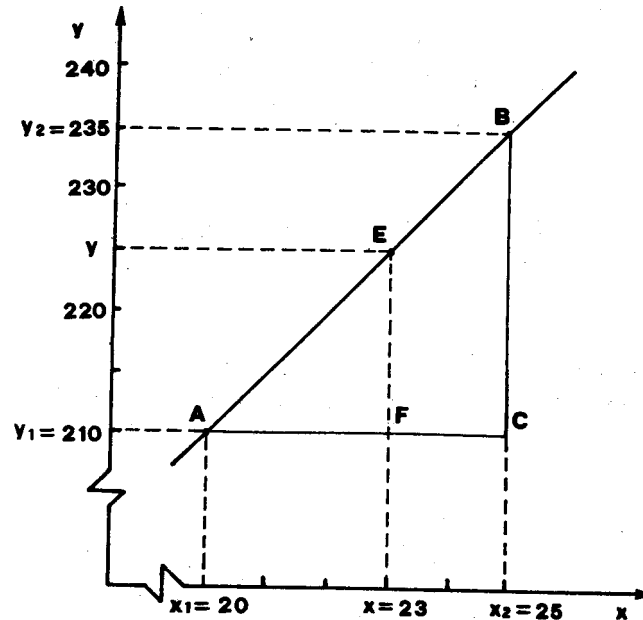


Fig.A3.3

Spesso i dati su cui operare l'interpolazione non sono legati da semplici relazioni lineari. Resta tuttavia possibile, anche in questi casi, applicare la procedura d'interpolazione lineare purché il passo della tabella risulti sufficientemente piccolo. Questa affermazione può essere chiarita esaminando il diagramma di Fig. A3.4. È evidente che confondere il tratto di curva AB con il segmento AB comporta un errore non trascurabile. Tuttavia se si considera il tratto di curva A_1B_1 esso praticamente coincide con il segmento A_1B_1 : è possibile in tal caso utilizzare l'interpolazione lineare.

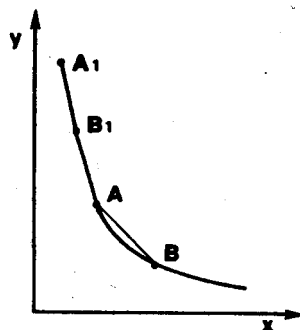


Fig.A3.4

A4 TABELLE PER IL CALCOLO DELLE PROPRIETÀ

Tab. A4.1 Temperatura critica, pressione critica e costante caratteristica di alcune sostanze in unità del SI

SOSTANZA	T _c [K]	p _c [Pa·10 ⁻⁵]	R [J/kgK]
Acqua, H ₂ O	647,3	221,1	461,70
Anidride carbonica, CO ₂	304,2	73,9	188,99
Aria	132,4	37,7	287,13
Azoto, N ₂	126,2	33,9	296,91
Elio, He	5,2	2,3	2078,0
Idrogeno, H ₂	33,2	13,3	4126,4
Ossido di carbonio, CO	132,9	35,0	296,93
Ossigeno, O ₂	154,8	50,8	260,83

Tab.A4.2 Calori specifici medi per alcuni gas in unità del SI. I valori in tabella sono utilizzabili per valori di temperatura tra 0°C e 100°C. Per temperature superiori a 100°C si veda A. Cesarano, P. Mazzei, Elementi di Termodinamica Applicata, 1987 Liguori Editore.

SOSTANZA	c _p	c _v
	[kJ/kgK]	[kJ/kgK]
Vapor d'acqua surriscaldato, H ₂ O	1,93	-
Anidride carbonica, CO ₂	0,685	0,676
Aria	1,01	0,717
Azoto, N ₂	1,04	0,743
Elio, He	5,19	3,11
Idrogeno, H ₂	14,2	10,1
Ossido di carbonio, CO	1,04	0,743
Ossigeno, O ₂	0,917	0,656

Tab.A4.3 Calori specifici medi per alcuni liquidi in unità del SI. I valori in tabella sono utilizzabili negli intervalli di temperatura indicati.

SOSTANZA	Intervallo di temperatura °C	c _p = c _v = c [kJ/kgK]
Aqua, H ₂ O	0 ÷ 150	4,2
Ammoniaca, NH ₃	-30 ÷ 30	4,6
Benzolo	15 ÷ 65	1,8
Freon 12	-40 ÷ 40	0,92
Glicerina	10 ÷ 50	2,4
Olio leggero	15 ÷ 150	2,0

Tab.A4.4 Calori specifici medi per alcuni solidi in unità del SI. I valori in tabella sono utilizzabili per temperature prossime a 20°C.

SOSTANZA	ρ	$c_p = c_v = c$
	[kg/m ³]	[kJ/kg/K]
Acciaio inox 18-10	7820	0,46
Alluminio	2710	0,88
Argento	10500	0,23
Calcestruzzo	2250	0,88
Ferro puro	7870	0,42
Lana di roccia	60	0,67
Lana di vetro	100	0,80
Legno di pino	500	2,8
Legno di quercia	800	2,4
Mattoni da muratura	1750	0,84
Mattoni in argilla refratt.	2300	0,84
Oro	19270	0,13
Ottone	8500	0,37
Platino	21450	0,13
Poliuretano espanso	35	1,6
Polistirolo espanso	15	1,22
Rame puro	8940	0,38
Stagno	7300	0,23
Vetro per finestra	2800	0,80

Tab. A4.5 – Proprietà termodinamiche dell'acqua in condizioni di liquido saturo e vapore saturo secco (0°C – 195°C)

T	p	Volume spec.		Entalpia specifica			Energia interna specifica		
		$v_l \cdot 10^3$ m ³ /kg	v_{vs} m ³ /kg	h_l kJ/kg	h_{vs} kJ/kg	$h_{vs}-h_l$ kJ/kg	u_l kJ/kg	u_{vs} kJ/kg	$u_{vs}-u_l$ kJ/kg
(°C)	bar								
0	0,006107	1,0002	206,3	0,00	2500,5	2500,5	0	2374,5	2374,5
5	0,008722	1,0000	147,1	21,05	2509,7	2488,6	21,05	2360,4	2339,3
10	0,012275	1,0002	106,4	42,03	2518,9	2476,9	42,03	2388,3	2346,3
15	0,017045	1,0008	77,96	62,96	2528,1	2465,1	62,96	2895,2	2332,2
20	0,02337	1,0017	57,84	88,86	2587,3	2458,4	88,86	2402,1	2318,2
25	0,03166	1,0029	43,41	104,74	2546,4	2441,7	104,74	2409,0	2304,3
30	0,04241	1,0048	32,94	125,61	2555,5	2429,9	125,61	2415,7	2290,1
35	0,05621	1,0059	25,26	146,47	2564,5	2418,0	146,46	2422,5	2276,0
40	0,07374	1,0078	19,56	167,34	2573,5	2406,2	167,83	2429,8	2262,0
45	0,09581	1,0099	15,28	188,22	2582,4	2394,2	188,21	2436,0	2247,8
50	0,12384	1,0121	12,05	209,11	2591,3	2382,2	209,10	2442,7	2233,6
55	0,15740	1,0146	9,583	280,00	2600,1	2370,1	229,98	2449,3	2219,3
60	0,1992	1,0172	7,682	250,91	2608,8	2857,9	250,89	2455,8	2204,9
65	0,2501	1,0200	6,205	271,84	2617,4	2345,5	271,81	2462,2	2190,4
70	0,3116	1,0229	5,048	292,78	2625,9	2383,1	292,75	2468,6	2175,8
75	0,3855	1,0260	4,135	313,74	2634,2	2320,5	313,70	2474,8	2161,1
80	0,4736	1,0293	3,410	384,72	2642,5	2307,8	334,67	2481,8	2146,3
85	0,5780	1,0327	2,829	355,72	2650,7	2295,0	355,66	2487,2	2131,5
90	0,7011	1,0863	2,361	376,75	2658,7	2281,9	376,68	2498,2	2116,5
95	0,8453	1,0400	1,982	397,80	2666,6	2268,8	397,71	2499,1	2101,4
100	1,0132	1,0438	1,673	418,88	2674,4	2255,5	418,77	2504,9	2086,1
105	1,2080	1,0479	1,419	439,99	2682,1	2242,1	439,26	2510,7	2070,8
110	1,4326	1,0520	1,210	461,13	2689,6	2228,5	460,98	2516,3	2055,3
115	1,6905	1,0563	1,036	482,31	2697,0	2214,7	482,13	2521,9	2039,8
120	1,9853	1,0608	0,8913	503,5	2704,2	2200,7	503,3	2527,3	2024,0
125	2,3208	1,0654	0,7700	524,8	2711,4	2186,6	524,6	2532,7	2008,1
130	2,7011	1,0702	0,6679	546,1	2718,8	2172,2	545,8	2537,9	1992,1
135	3,181	1,0751	0,5817	567,5	2725,1	2157,6	567,2	2548,0	1975,8
140	3,614	1,0802	0,5084	588,9	2731,8	2142,9	588,5	2548,1	1959,6
145	4,155	1,0855	0,4459	610,4	2738,3	2127,9	610,0	2553,1	1943,1
150	4,760	1,0910	0,3924	631,9	2744,5	2112,6	631,4	2557,7	1926,3
155	5,438	1,0966	0,8464	653,5	2750,6	2097,1	652,9	2562,4	1909,5
160	6,180	1,102~	0,3068	675,2	2756,5	2081,3	674,5	2566,9	1892,4
165	7,008	1,1085	0,2724	696,9	2762,2	2065,3	696,1	2571,3	1875,2
170	7,920	1,1147	0,2426	718,8	2767,6	2048,8	717,9	2575,5	1857,6
175	8,925	1,1211	0,2166	740,7	2772,7	2032,0	739,7	2579,4	1839,7
180	10,027	1,1278	0,1939	762,7	2777,6	2014,9	761,6	2583,2	1821,6
185	11,234	1,1347	0,1740	784,8	2782,1	1997,3	783,3	2586,6	1803,1
190	12,552	1,1418	0,1564	807,0	2786,3	1979,3	805,6	2590,0	1784,4
195	18,989	1,1491	0,1409	829,4	2790,2	1960,8	827,8	2593,1	1765,3

Tab. A4.6– Proprietà termodinamiche dell'acqua in condizioni di liquido saturo e vapore saturo secco (200°C – 374,15°C)

T	p	Volume spec.		Entalpia specifica			Energia interna specifica		
		$v_l \cdot 10^3$	v_{vs}	h_l	h_{vs}	$h_{vs}-h_l$	u_l	u_{vs}	$u_{vs}-u_l$
(°C)	bar	m ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
200	15,551	1,1568	0,1273	851,8	2793,7	1941,9	850,0	2595,7	1745,7
205	17,245	1,1647	0,1151	874,4	2796,8	1922,4	872,4	2598,3	1725,9
210	19,080	1,1729	0,1043	897,1	2799,4	1902,3	894,9	2600,4	1705,5
215	21,063	1,1814	0,09471	920,0	2801,7	1881,7	917,5	2602,3	1684,8
220	23,201	1,1903	0,08611	943,0	2803,4	1860,4	940,2	2603,6	1663,4
225	25,504	1,1994	0,07841	966,2	2804,6	1838,4	963,1	2604,6	1641,5
230	27,979	1,2090	0,07150	989,6	2805,4	1815,8	986,2	2605,4	1619,2
235	30,635	1,2190	0,06528	1013,2	2805,5	1792,4	1009,5	2605,5	1596,0
240	33,480	1,2293	0,05967	1036,9	2805,1	1768,2	1032,8	2605,3	1572,5
245	36,524	1,2402	0,05460	1060,1	2804,1	1743,3	1056,4	2604,7	1548,3
250	39,78	1,2515	0,05002	1085,1	2802,5	1717,4	1080,1	2603,5	1523,4
255	43,24	1,2633	0,04586	1109,5	2800,3	1690,7	1104,0	2602,0	1498,0
260	46,94	1,2757	0,04209	1134,3	2797,4	1663,1	1128,3	2599,8	1471,5
265	50,87	1,2888	0,03865	1159,3	2793,8	1634,5	1152,8	2597,2	1444,4
270	55,05	1,3025	0,03552	1184,5	2789,5	1604,9	1177,3	2594,0	1416,7
275	59,49	1,3169	0,03266	1210,2	2784,5	1574,3	1202,4	2590,2	1387,8
280	64,19	1,3322	0,03005	1236,1	2778,7	1542,5	1227,5	2585,8	1358,3
285	69,17	1,3483	0,02766	1262,5	2772,2	1509,6	1253,2	2580,9	1327,7
290	74,45	1,3665	0,02546	1289,3	2764,9	1475,6	1279,1	2575,4	1296,3
295	80,03	1,3837	0,02345	1316,5	2756,9	1440,2	1305,4	2569,2	1263,8
300	85,92	1,4033	0,02160	1344,2	2748,0	1403,6	1332,1	2562,4	1230,3
305	92,14	1,424	0,01989	1372,5	2738,3	1365,5	1359,4	2555,1	1195,7
310	98,70	1,447	0,01832	1401,3	2727,7	1326,0	1387,0	2546,9	1159,9
315	105,61	1,471	0,01687	1430,9	2716,8	1285,8	1415,4	2538,6	1123,2
320	112,00	1,498	0,01549	1461,3	2702,4	1241,3	1444,4	2527,5	1083,1
325	120,57	1,527	0,01420	1492,5	2685,7	1193,1	1474,1	2514,5	1040,4
330	128,65	1,560	0,01298	1524,8	2666,4	1141,5	1504,7	2499,4	994,7
335	137,14	1,597	0,01184	1558,4	2644,3	1086,0	1536,5	2481,9	945,4
340	146,08	1,638	0,01077	1593,5	2620,2	1026,7	1569,6	2462,9	893,3
345	156,48	1,687	0,009766	1630,5	2593,4	963,0	1604,3	2441,6	837,3
350	166,37	1,746	0,008803	1670,3	2562,3	892,2	1641,4	2416,7	775,3
355	175,77	1,817	0,007878	1714,5	2527,4	812,8	1682,6	2388,8	706,2
360	186,74	1,908	0,006967	1762,2	2483,1	720,9	1726,6	2353,0	626,4
365	198,30	2,03	0,00604	1817,9	2425,9	608,0	1777,6	2306,1	528,5
370	210,62	2,23	0,00499	1893,7	2339,9	446,2	1846,8	2234,9	388,1
371	213,06	2,30	0,00474	1914,2	2316,1	401,9	1866,2	2214,2	249,0
372	215,62	2,37	0,00447	1938,2	2287,1	349,0	1887,1	2190,7	303,7
373	218,22	2,49	0,00415	1972,0	2252,3	280,4	1917,7	2161,7	244,0
374	220,86	2,79	0,003862	2043,2	2187,6	144,4	1981,6	2107,5	126,9
374,15	221,29	3,18	0,00318	2099,7	2099,7		2029,3	2029,3	0