

COSTRUZIONE DELLE TURBINE: FATTORE D'UMIDITÀ

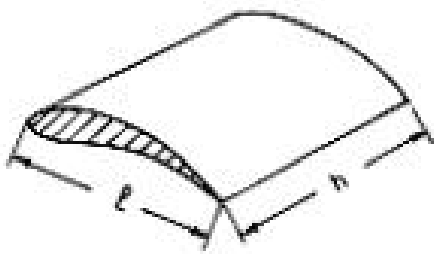
Dal punto di vista dei parametri costruttivi in uso l'angolo formato dalle direzioni dei vettori velocità u e c_1 , viene di regola preventivato tra $15-18^\circ$ (per motivi noti).

MACCHINE AD AZIONE

L'angolo β_1 acuto viene scelto di solito all'interno della gamma di valori compreso tra i $27-30^\circ$ quindi l'angolo di deviazione del fluido $\pi - 2\beta_{\text{costr}}$ è dell'ordine di 120° .

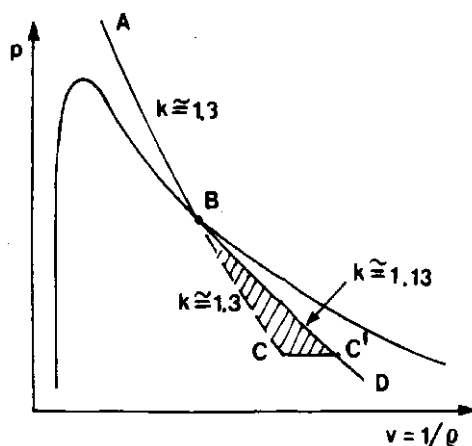
MACCHINE A REAZIONE

L'angolo $\beta_{1\text{costr}}$ è di 90° perchè imposto dalle condizioni di massimo rendimento, mentre il $\beta_{2\text{costr}}$ è più piccolo rispetto al $\beta_{1\text{costr}}$ ed è intorno ai 20° per cui l'angolo di deviazione $\pi - \beta^*$ è all'incirca 70° .



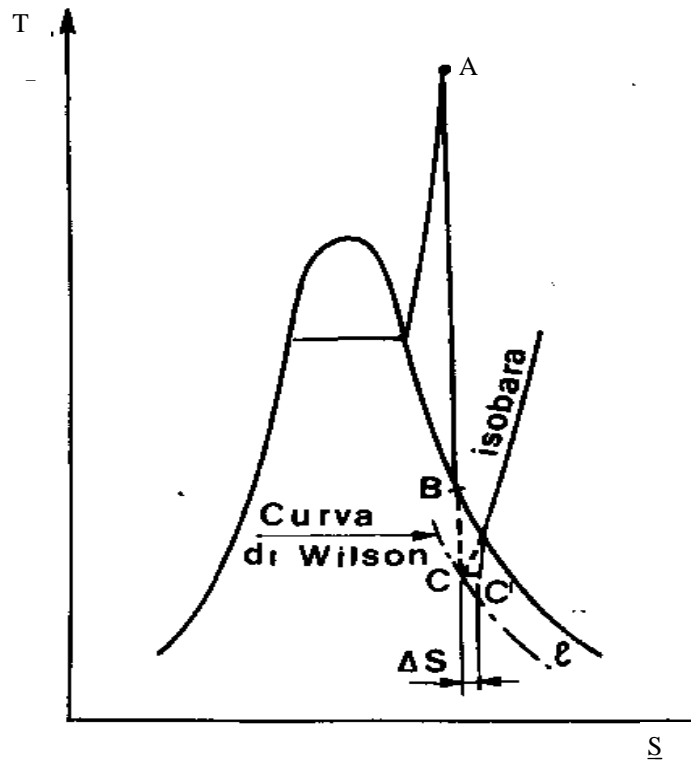
Il rapporto passo corda, tra una pala e quella successiva nella schiera palare per le turbine, varia tra $0,5-0,7$ (il passo è la distanza circonferenziale tra una pala e la successiva, la corda è la distanza massima tra gli estremi di pala λ). Un aspetto particolare di cui va tenuto conto nella valutazione del rendimento di una turbina a vapore è il fattore di umidità che esprime in

sostanza la percentuale della fase liquida negli ultimi stadi, che lavorano a vapore saturo. La percentuale di umidità è data in definitiva dal complemento del titolo $1-x$ se x è il titolo. La frazione di liquido condiziona il valore del rendimento dello stadio e condiziona anche la vita della turbina stessa, in termini di erosione del liquido sulle pale. Il fenomeno che accompagna la formazione del liquido è un fenomeno non molto semplice e instabile in chiave termodinamica, in quanto risente di una certa inerzia comportamentale del fluido, di una certa isteresi termodinamica. Supponiamo per semplicità che il fluido evolve secondo una adiabatica isoentropica e quindi con $k = 1.3$ per il vapore surriscaldato, una volta che il fluido attraversa la curva limite teoricamente dovrebbe espandere sempre isoentropicamente con un $k = 1.13$ che corrisponde al vapore saturo ma per motivi di isteresi propria il fluido si dimentica di



condensare subendo un sottoraffreddamento che non da inizio alla condensazione. Il fluido in seguito si ricorda che deve condensare quando il processo di espansione è proseguito fino ad un certo punto, passando da uno stadio metastabile C ad una situazione stabile C' e improvvisamente si manifesta in seno al fluido la parte liquida la quale inizia con la formazione di piccole gocce.

Questo fenomeno prende il nome di sottoraffreddamento del liquido rubando il nome ad altri fenomeni con i quali non ha niente a che fare ed è chiaramente irreversibile. Anche se facciamo riferimento ad un processo non isoentropico, al quale è connesso un tratto positivo di entropia nel piano H-S, nel piano P-v possiamo puntualizzare sotto forma di area del triangolo mistilineo BCC', la quota di lavoro perduto (integrale vdp) che non viene resa utile dal fluido per effetto dell'isteresi termodinamica. Vediamo il fenomeno nel piano T-S. Con riferimento ad una espansione adiabatica isoentropica come in figura, il fluido continua ad espandere fino ad un certo punto seguendo la legge di espansione con $k = 1.3$, poi al punto C si ricorda di iniziare la propria condensazione e allora abbiamo repentinamente lo spostamento del punto C metastabile



ad un punto C' che invece è stabile. A questo processo è connesso una variazione positiva di entropia. Il fenomeno non è facile da analizzare. Molti studi teorici e sperimentali sono stati condotti da varie parti e hanno permesso di concludere che esiste una curva che porta il nome di curva di Wilson dal nome dello studioso che la ha studiata. La curva di Wilson rappresenta con buona approssimazione il luogo dei punti in corrispondenza dei quali il vapore passa dallo stato sottoraffreddato metastabile ad uno stato stabile. Essa è pressoché congruente con la curva limite superiore e la si può con buona approssimazione ottenere immaginando di spostare rigidamente verso il basso la curva limite in

corrispondenza di una diminuzione di entalpia dell'ordine del 10% a parità di entropia. Sia nel piano H-S che nel piano T-S abbiamo con buona approssimazione una situazione del genere indicato in figura. Conseguenze pratiche della formazione di liquido nella turbina

Le conseguenze pratiche sono sostanzialmente 2.

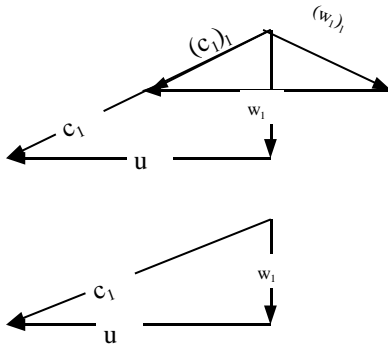
La prima riguarda la penalizzazione della potenza specifica cioè il lavoro per l'unità di massa che il fluido riesce a produrre nella turbina.

La seconda riguarda la tendenza progressiva all'erosione da parte del liquido nei confronti della palettatura soprattutto in corrispondenza del bordo d'ingresso della pala che si trova così soggetto a bombardamento delle gocce liquide.

Per quanto riguarda la diminuzione di potenza non è molto difficile rendersi conto qualitativamente. Infatti sia per una macchina ad azione che per una a reazione facendo riferimento ai triangoli di velocità in ingresso e alla condizione di massimo rendimento:

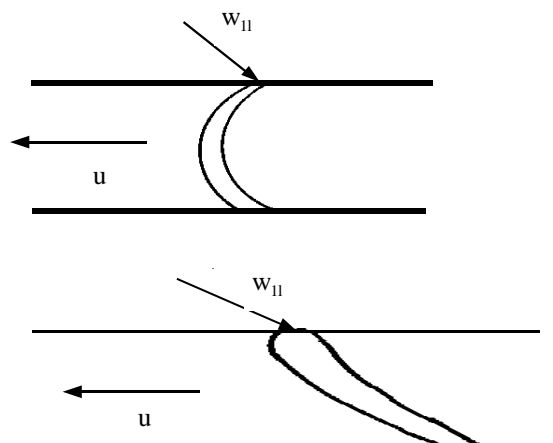
$$\frac{u}{c_1} = \cos \frac{a_1}{2} \quad \text{per } R = 0$$

$$\frac{u}{c_1} = \cos a_1 \quad \text{per } R = 0.5$$



Immaginiamo che i triangoli di velocità indicati in figura siano disegnati in presenza di solo vapore. Ora vogliamo vedere, esistendo una frazione $1-x$ di liquido, quale sia il comportamento di quest'ultimo. Il liquido chiaramente non espande, nel senso che esso durante l'espansione non è accompagnato dalla dilatazione e di conseguenza non sarà accompagnato da variazione di energia cinetica.

Non è esatto, dal punto di vista concettuale, dire che il liquido non espande secondo le leggi che sono proprie degli aeriformi. La conseguenza pratica di tutto questo sta nel fatto che il liquido non raggiunge la velocità che raggiunge l'aeriforme, quindi il modulo della velocità del liquido sarà molto più basso del vettore c_1 che compete al vapore. Il liquido si troverà ad essere in linea di massima trascinato dall'aeriforme con una velocità che dipenderà dal tipo di macchina, dalle condizioni di funzionamento, dal rapporto tra i moduli delle velocità all'ingresso del rotore, ma in ogni caso è difficile che il liquido possa essere animato da un modulo di velocità $(c_1)_l$ maggiore ad un $1/5$ del vettore analogo per il vapore. La velocità $(c_1)_l$ con la quale si muove il liquido è molto più contenuta e di conseguenza, se noi immaginiamo di rappresentare il triangolo di velocità in ingresso per il liquido, avremo un triangolo come in figura sopra. Il liquido all'ingresso del rotore produrrà una azione d'urto all'imbocco del rotore stesso. Consideriamo la palettatura come in figura nel caso $R = 0$. Il liquido eserciterà all'ingresso una azione che in linea di massima sarà frenante. La quota di liquido, pari a $1-x$, provocherà una diminuzione di potenza in quanto opererà sulla macchina un lavoro specifico, per la sola fase liquida, negativo. Analogo discorso per la macchina a reazione.



Vediamo come si penalizza la potenza specifica, cioè il lavoro per unità di portata. Essa potrà essere scritta, con riferimento ad un modello monodimensionale, come:

$$P = P_s x + P_l (1 - x).$$

Indichiamo con P_s la potenza specifica del vapore e con P_l la potenza specifica prodotta dal liquido la quale sarà ordinariamente negativa per quanto prima detto. Si introduce il fattore di umidità $U = P/P_s$ come rapporto tra la potenza specifica che viene rilasciata dal fluido per unità di massa del fluido composto, per una quota x dal vapore e per una quota $1-x$ dal liquido, diviso per la potenza che verrebbe prodotta se operasse esclusivamente la fase vapore.

$$U = \frac{P}{P_s} = X + \frac{P_l(1 - X)}{P_s}$$

Nei calcoli di progetto si fa riferimento ad un fattore di umidità U uguale ad x in quanto il secondo termine del secondo membro è piccolo di per se, perché x è piuttosto prossimo all'unità. Una volta che il vapore valica la curva limite, continua ad espandersi mentre il titolo passa dal valore 1 fino ad un valore minimo che è sempre dell'ordine del 93-94 % quindi $1-x$ è molto piccolo. La potenza P_l in valore assoluto (termine negativo) è molto modesto rispetto a P_s per effetto della modesta velocità con la quale il fluido investe la palettatura. In definitiva possiamo ritenere, con una approssimazione più che decente, che il fattore di umidità venga confuso con x e serve per correggere il rendimento di stadio. Il fattore di umidità può essere moltiplicato per il rendimento di stadio, che non tiene conto del fattore di umidità, oppure può essere conglobato nel coefficiente riduttore della velocità $c_1^{(*)}$. In ogni caso costituisce un accorgimento non inessenziale nella valutazione della prestazione dello stadio, quando ci si trovi in presenza di liquido, in particolare negli ultimi stadi di bassa pressione. Per quanto riguarda gli effetti erosivi del liquido sulla palettatura è chiaro che è opportuno tentare di contenerli il più possibile in quanto a lungo andare possono danneggiare irrimediabilmente la palettatura in corrispondenza del bordo d'attacco. Una soluzione usata spesso è quella di rivestire le palette in corrispondenza del bordo d'attacco con materiali resistenti (Stellite), realizzando anche delle scanalature che gentilmente invitano le goccioline di liquido a fuoriuscire, per effetto della forza centrifuga, radialmente nel canale palare ma sono tecniche piuttosto costose. Oggi c'è la tendenza a sostituire le piastre di stellite con riporti, ad esempio di carburi duri usando tecniche più sofisticate per esempio con bombardamento di particelle di materiale aggiunto in presenza di campi elettromagnetici.

(*) in particolare nel coefficiente f riduttore delle velocità statoriche