

**Criteria di calcolo per il rivestimento termico
di ugelli soggetti ad un flusso di gas ad alta temperatura
(propellenti ad elevato impulso specifico)
per durate relativamente lunghe (*)**

F. BOSMAN (**)

Ricevuto il 19 Febbraio 1963

RIASSUNTO. — Il presente lavoro ha lo scopo di fornire dei criteri pratici di progetto per il rivestimento termico di ugelli per razzi ad elevate durate di combustione.

Lo sviluppo che ha condotto alla formulazione di detti criteri ha richiesto in una prima fase lo studio della propagazione del flusso di calore attraverso una parete doppia costituita da materiali differenti (isolante e metallo); tale studio si è concluso definendo gli elementi base che caratterizzano il fenomeno.

Successivamente si è svolta una ricerca numerica allo scopo di esplorare il campo di variabilità di tali parametri caratteristici in vista di applicare determinati materiali e per l'involucro metallico e per il rivestimento.

Tale indagine è stata effettuata mediante calcoli eseguiti con il computer digitale IBM 1620.

A questo punto si è proceduto alla soluzione numerica del problema in forma adimensionale, la soluzione è stata effettuata per un certo numero dei parametri caratteristici allo scopo di ricoprire, dando valori determinati, tutto il campo di variabilità di questi.

Queste diverse soluzioni sono state ricavate mediante calcolatrice analogica (DONNER) simulando il fenomeno della propagazione del calore.

Diagrammati questi risultati si è infine definito un criterio per ottenere rapidamente, in base alle caratteristiche dei gas, dei materiali usati e degli spessori relativi, i parametri caratteristici per i quali il calcolo già è stato eseguito.

Sono in corso delle prove sperimentali che confermano, almeno secondo i primi risultati, le conclusioni del calcolo; i migliori accordi con la teoria

(*) Nota presentata al 2° Congresso Internazionale Tecnico Scientifico dello Spazio. Roma, 19-23 Giugno 1962.

(**) Società Bombrini Parodi-Delfino.

si hanno per le sezioni del convergente, in cui l'ipotesi base della teoria stessa, cioè l'assenza di erosione, è rispettata.

A termine della ricerca sperimentale sarà possibile fornire dei criteri di calcolo più completi, consigliando per ogni tipo di rivestimento preso in considerazione i coefficienti sperimentali relativi.

SUMMARY. — The purpose of the paper is to furnish practical criteria for the thermal casing of nozzles that are subjected to long periods of combustion. Much research effort has been expended in the investigation of the variability of characteristic parameters, particularly the selection of materials and the metallizing covering for the casing. This research has been aided by the use of an IBM 1620 computer. Numerical solutions in nondimensional form have been obtained for several characteristic parameters for plating. Various solutions have been found by having an analogy calculator (DONNER) simulate the phenomenon of heat propagation. Diagrammatic results provide a criteria for finding characteristic parameters rapidly. Experimental data confirm the calculated results. When this research is completed, it will be possible to furnish more complete criteria, with recommendations for relative experimental coefficient of every type of casing now under consideration.

PREMESSA.

In un motore razzo uno dei problemi di maggior importanza è quello di evitare il riscaldamento dell'involucro metallico oltre i limiti consentiti delle caratteristiche dei materiali nelle condizioni di lavoro.

Per i motori a propellente liquido il problema, come è noto, si risolve refrigerando la camera di combustione e l'ugello con uno dei propellenti prima di inviarlo alla combustione. In tal modo si può mantenere bassa la temperatura delle parti metalliche in quanto il calore trasmesso alla parete dai gas combusti viene completamente asportato dal fluido refrigerante. Il fenomeno della propagazione del calore cioè si manifesta nel suo aspetto di regime, e secondo queste ipotesi si eseguono di conseguenza i calcoli relativi.

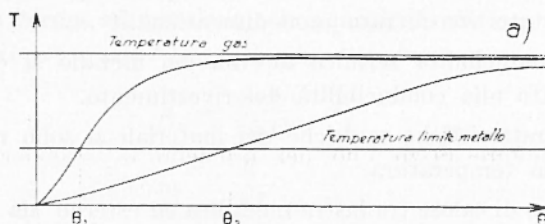
Nei motori a propellente solido il problema termico, pur restando sempre della massima importanza, va affrontato da un punto di vista completamente diverso.

Infatti per tali motori non è possibile applicare il principio del raffreddamento, a meno di non fare assegnamento su riserve di fluido inerti dal punto di vista della combustione; quindi il calore che la parete riceve dai gas deve necessariamente accumularsi nella parete stes-

sa, poiché il calore scambiato con l'aria esterna, per convenzione ed irraggiamento è una quantità completamente trascurabile.

La temperatura della parete cresce quindi nel tempo tendendo ad un valore di regime molto alto, pari cioè alla temperatura dei gas caldi. Tuttavia questo valore asintotico non verrà raggiunto poiché il riscaldamento si interrompe al cessare della combustione. Il problema consiste dunque nell'impedire che il massimo valore della temperatura a fine combustione superi i limiti consentiti.

Questi limiti, per quanto si scelgano materiali che abbiano elevate caratteristiche meccaniche ad alta temperatura, sono sempre piuttosto bassi rispetto alla temperatura dei gas, che può essere ad es. nei propellenti compositi, dell'ordine dei 4000 °K. Questo significa che un motore a propellente solido può avere una sufficiente durata di funzionamento solo se si rallenta opportunamente il riscaldamento dell'involucro. La fig. seguente riporta qualitativamente il guadagno di tempo di combustione ottenuto con il rallentamento suddetto.



Si nota, a parità di temperatura limite raggiungibile, la possibilità di passare dalla durata θ_1 alla durata θ_2 .

Dalle leggi del riscaldamento di una lastra piana che accumuli il calore ceduto da un gas ad alta temperatura si nota come una maggiore lentezza di riscaldamento si può ottenere facendo assegnamento su materiali di alto calore specifico, di alto peso specifico e di bassa conducibilità termica, oppure a parità di questi elementi si può ricorrere ad elevati spessori dell'involucro. Date le caratteristiche dei materiali metallici di normale impiego, una soluzione vera e propria non si ottiene seguendo questa strada a meno di non aumentare eccessivamente il peso del motore usando ugelli di spessore sproporzionato.

Una soluzione razionale si ottiene invece affidando all'involucro solo una funzione meccanica di resistenza alle sollecitazioni di esercizio ed impedendone il riscaldamento mediante l'uso di materiali coibenti interposti tra metallo e gas caldi. Si possono, ottenere infatti in questa

maniera degli involucri di basso peso totale, di resistenza meccanica adeguata, e capaci di sopportare il contatto dei gas caldi per un tempo relativamente lungo.

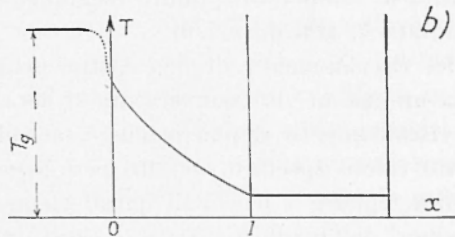
Si tende cioè a realizzare, mediante il concorso di più materiali, quelle caratteristiche che non è possibile riscontrare in un materiale unico, affidando ad ognuno un compito particolare.

Parte I - RISCALDAMENTO DI UNA PARETE METALLICA RIVESTITA DI MATERIALE ISOLANTE.

In vista di determinare in sede di progetto gli elementi per la costruzione di un ugello di determinate caratteristiche, si è reso necessario uno studio generale della propagazione del calore per un involucro metallico termicamente isolato. Lo studio è stato condotto sotto le seguenti ipotesi:

- 1) L'involucro si considera come una parete piana, cioè il flusso di calore è stato considerato monodimensionale.
- 2) La conducibilità termica interna del metallo si è considerata infinita rispetto alla conducibilità del rivestimento.
- 3) Le caratteristiche termiche dei materiali si sono ritenute indipendenti dalla temperatura.
- 4) Il flusso di calore tra lastra metallica ed esterno sia trascurabile.

In tali ipotesi il problema si imposta nella forma seguente:



$$\text{Equazione} \quad \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{K}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$\text{Condizioni al contorno} \quad \begin{cases} X = 0 & -X \frac{\partial T}{\partial x} = h (T_g - T) \\ X = l & -K \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_m c_m l_m \frac{\partial T}{\partial \theta} \end{cases}$$

Condizioni iniziali: $\theta = 0 \quad T = T_0$

ove

T = Temperatura al tempo θ nella ascissa x

T_g = Temperatura dei gas

k = Conducibilità termica interna della parte isolante

h = Coefficiente di scambio termico dei gas

ρ = Densità del materiale isolante

ρ_m = Densità del metallo

l, l_m = Spessori rispettivamente dell'isolante e del metallo

θ = Tempo

La parete si è cioè schematizzata nel solo strato isolante che riceve il calore dai gas attraverso una superficie e lo cede attraverso la superficie opposta ad un serbatoio di calore (metallo).

Al fine di dare maggiore generalità al problema, e di individuare i parametri caratteristici del fenomeno in esame, si è ritenuto opportuno a mettere in forma adimensionale le equazioni scritte:

Ponendo

$$n = \frac{\rho_m C_m l_m}{\rho C l}$$

$$m = \frac{K}{h l}$$

$$X = \frac{K \theta}{\rho C l^2} = \alpha \theta$$

$$Y = \frac{T_g - T}{T_g - T_0}$$

$$\xi = \frac{x}{l}$$

Le equazioni e le relative condizioni si presentano nella forma:

Equazione $\frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} = \frac{\partial Y}{\partial X}$

Condizioni $\left\{ \begin{array}{l} \xi = 0 \quad m \frac{\partial Y}{\partial \xi} = Y \\ \xi = 1 \quad - \frac{\partial Y}{\partial \xi} = n \frac{\partial Y}{\partial X} \\ X = 0 \quad Y = 1 \end{array} \right.$

dalle quali è possibile osservare come i parametri che definiscono l'andamento del riscaldamento della parete (secondo le ipotesi viste) siano i tre seguenti:

$$m, n \text{ ed } \alpha$$

Il parametro m rappresenta il rapporto delle resistenze che si oppongono al flusso termico per unità di superficie nel passaggio dal gas alla lastra metallica, attraverso i due strati e cioè: lo strato limite del gas e la parete isolante:

$$m = \frac{\text{Resistenza strato limite}}{\text{Resistenza parete isolante}}$$

Il valore numerico di m rappresenta perciò un indice dell'importanza che acquista un tipo di resistenza rispetto all'altra. Ad esempio quando si ha $m = 1$ significa che la protezione termica fa assegnamento per metà sul rivestimento e per metà sullo strato limite; una lastra metallica non rivestita avrà un valore teorico di m pari ad ∞ ; per i rivestimenti infine che si cerca di realizzare converrà provvedere ad una resistenza termica maggiore di quella offerta naturalmente dallo strato limite del gas, cioè converrà realizzare valori di m inferiori ad 1.

Il parametro n , è il rapporto delle capacità termiche del metallo e dell'isolante riferite ad una stessa superficie. Il valore numerico di questo parametro è un indice del contributo fornito dai due strati nell'accumulare il calore. Per $n \gg 1$ è il metallo che funge da serbatoio termico mentre l'isolante ha solo la funzione di sbarramento termico. Per $n \simeq 1$ entrambi i materiali intervengono nella funzione di accumulatori, ed infine per $n \ll 1$, l'isolante assolve completamente le funzioni di sbarramento e di serbatoio, mentre al metallo resta solamente quella della resistenza meccanica.

Il parametro α , rapporto tra la diffusibilità del materiale isolante e il quadrato del suo spessore, rappresenta l'inverso del prodotto della resistenza termica dello strato e della sua capacità termica

$$\frac{1}{\alpha} = \text{Resistenza termica} \times \text{Capacità termica}$$

È chiaro quindi che è preferibile orientarsi verso valori alti di $\frac{1}{\alpha}$ cioè verso bassi valori di α .

La soluzione dell'equazione monodimensionale di Fourier si può formulare in una funzione espressa come una serie di auto-funzioni. Tale funzione rappresenta la distribuzione nello strato isolante della temperatura al variare del tempo. Poiché interessa particolarmente co-

noscere il riscaldamento del metallo, la soluzione va considerata nel punto $\xi = 1$ od $x = l$, dove la temperatura dell'isolante uguaglia quella del metallo.

Si ottiene così un'espressione della temperatura relativa variabile soltanto in funzione del tempo.

Tale espressione, come è riportata nel lavoro degli autori John H. Grover e William H. Holter (vedi *Jet Propulsion*, Vol. 27, n° 12 Dic. 1957) è la seguente:

$$Y m = \sum_1^{\infty} \frac{2 e^{-X \lambda_i^2} (1 + m \lambda_i^2) (1 + n^2 \lambda_i^2) \cos \lambda_i}{\lambda_i^2 (m + n) \{ (1 + m^2 \lambda_i^2) (1 + n^2 \lambda_i^2) + n (1 + m^2 \lambda_i^2) + m (1 + n^2 \lambda_i^2) \}}$$

Come è facile osservare la soluzione si presenta in una forma simmetrica rispetto ai parametri m ed n , in modo cioè da non cambiare di valore sostituendoli reciprocamente. Partendo da questa constatazione gli stessi autori hanno introdotto il parametro $\mu = m + n + m \cdot n$, anche esso simmetrico. In tal modo è possibile esprimere la soluzione trovata in una nuova forma ove compare il solo parametro μ al posto della coppia m ed n . I parametri che caratterizzano il fenomeno vengono così ad essere ridotti sostanzialmente a due, cioè a dire μ ed a .

L'espressione a cui ci riferisce è la seguente:

$$Y m = \sum_1^{\infty} \frac{2 \mu e^{-X \lambda_i^2} \sec \lambda_i}{1 + \mu + \mu^2 \lambda_i^2}$$

ove λ_i sono le radici dell'equazione

$$\lambda_i \operatorname{tg} \lambda_i = \frac{1}{\mu}$$

Parte II - APPLICAZIONE DELLA TEORIA AI CASI PRATICI.

a) I risultati teorici visti si presentano in forma particolarmente adatta ad una applicazione pratica. Infatti tracciando nel piano X, Y le curve $\mu = \operatorname{cost}$, per vari valori di μ , si ottiene un diagramma che permette il calcolo della temperatura del metallo riferita a quello del gas, dopo un tempo determinato e relativamente a determinati valori delle grandezze:

Spessore metallo

Spessore isolante

Tipo metallo

Tipo isolante

Coeffic. scambio termico dei gas.

È possibile definire lo spessore di un determinato materiale isolante in vista di mantenere la temperatura del metallo al di sotto di un prefissato limite, durante un periodo di tempo prestabilito.

Prima di tracciare le dette curve si è preferito operare una ricerca dei valori μ che si ottengono con l'impiego dei materiali metallici di impiego più comune; dei materiali isolanti attualmente usati per i rivestimenti termici, e dei coefficienti di scambio termico più probabili, date le caratteristiche dei propellenti usati e le condizioni di efflusso dei gas negli ugelli. La ricerca ha richiesto un lungo lavoro di calcolo come è facile intuire se si pensa al numero di variabili che intervengono nella determinazione del parametro μ ed ai numerosi materiali isolanti commercialmente reperibili. Il calcolo è stato eseguito con la calcolatrice elettronica IBM 1620. A termine di ogni calcolo la macchina ha fornito i valori di μ e a e della serie dei parametri relativi.

I materiali metallici presi in considerazione sono l'acciaio e l'alluminio, mentre per gli isolanti si è analizzato un campo notevolmente più vasto, pur limitandoci ai prodotti reperibili sul mercato specializzato; gli spessori infine sono stati scelti: per i metalli nel campo dei valori possibili date le condizioni di lavoro ammissibili, e per gli isolanti in base ai limiti consentiti dai procedimenti tecnologici.

Si sono ottenuti valori di μ variabili da 0,2 a 10 per rivestimenti in resine fenoliche rinforzate con varie sostanze inorganiche (Carbone, Amianto, Vetro ecc.), e valori superiori, cioè variabili da 4 ÷ 5 fino a 300, per i rivestimenti come i materiali del tipo Rokide (ossidi di Alluminio e Zirconio).

b) Ognuna delle curve $\mu = \text{cost}$ nel piano X, Y rappresenta in forma adimensionale il riscaldamento di una lastra metallica ricoperta da uno strato isolante, come già visto. Questo riscaldamento si manifesta in una forma che si presta particolarmente per una simulazione; si è così ritenuto opportuno risolvere il problema con l'aiuto di una calcolatrice analogica, anziché procedere al calcolo numerico secondo l'espressione citata.

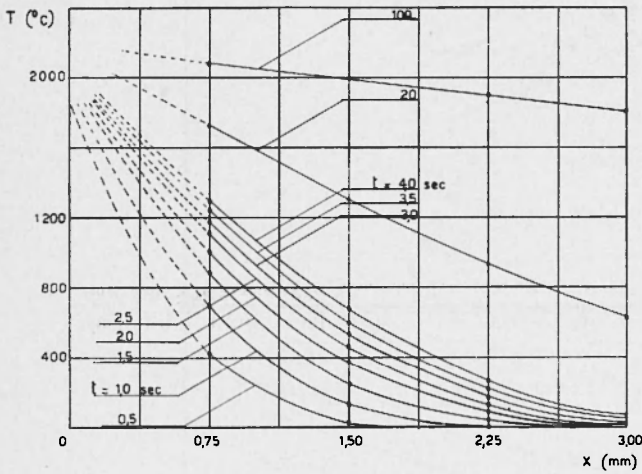
In tal modo si è evitata la complessità del calcolo che tra l'altro implica la ricerca degli autovalori, radici dell'equazione $\lambda_i \operatorname{tg} \lambda_i = \frac{1}{\mu}$ e si è ottenuto l'andamento nella sua forma continua nel tempo anziché per punti. Il procedimento seguito per adattare il problema alla calcolatrice analogica (Donner) è stato quello di simulare la parete isolante con un determinato numero di punti riducendo il sistema, costituito dall'equazione di Fourier e dalle condizioni relative ad un determinato

numero di equazioni algebriche ove le incognite sono le temperature dei punti considerati.

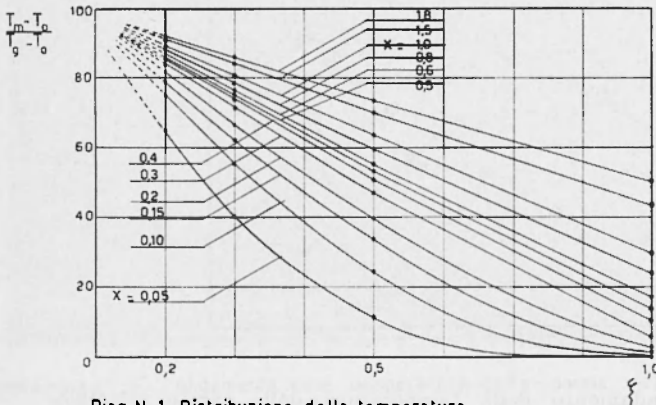
Il valore della temperatura che ha permesso il tracciamento dei diagrammi in esame è relativa all'ultimo punto; tuttavia si sono rilevati per alcuni casi anche i valori di qualche punto interno onde avere un'idea dell'andamento della temperatura nell'interno dello strato.

I diagrammi della figura seguente riportano due di questi rilievi.

Per quanto riguarda la rappresentazione delle curve $\mu = \text{cost}$ nel piano X, Y si è constatato che queste assumono una forma di più pratica



Rivestimento : DURESTOS 3 mm
 Metallo : ACCIAIO 1 mm
 Temperatura Gas $T_g = 2250$ °C
 Temperatura iniziale $T_0 = 30$ °C
 Coeff. scambio termico $h = 10^4 \frac{\text{Cal}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C sec}}$



$\mu = 2$ $\alpha = 0,01 \text{ sec}^{-1}$

Diag. N. 1 Distribuzione della temperatura nell'interno dello strato isolante..

applicazione se si riportano sull'asse delle ordinate, anziché i valori di Y , i corrispondenti valori di $1 - Y = \frac{T_m - T_o}{T_g - T_o}$.

In tal modo infatti si leggono immediatamente le temperature del metallo come percentuali rispetto alla temperatura dei gas.

Se inoltre si riporta accanto al diagramma così trasformato il fascio delle rette $\alpha = \text{cost}$ di equazione $X = \alpha \theta$, tracciate nel piano θ, X

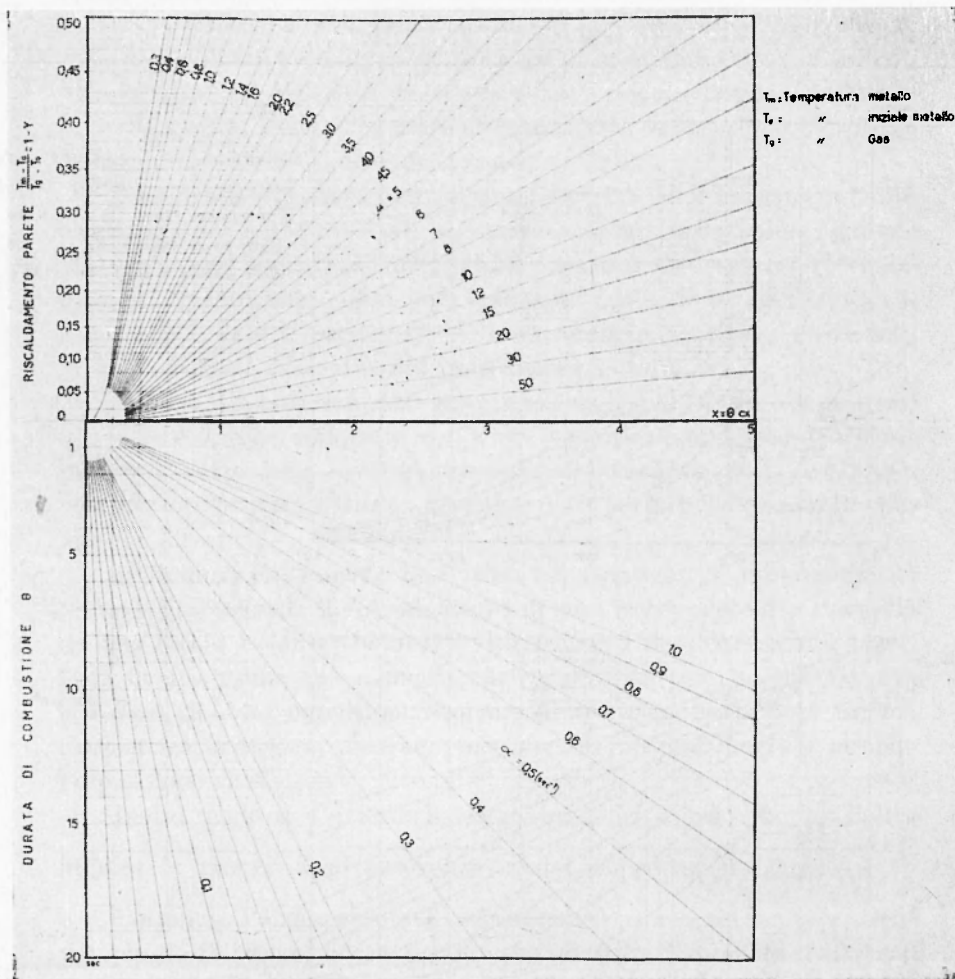


Diagramma n. 2 - Andamento della temperatura della parete metallica nel tempo per diversi valori dei parametri α e μ .

si possono leggere i valori delle temperature relative direttamente in funzione del tempo.

I diagrammi seguenti sono stati costruiti con i criteri su esposti, ed è chiaro come permettano la lettura del rapporto $T_m - T_o / T_g - T_o$ relativo ad un tempo θ , per una determinata coppia di parametri α e μ .

e) All'atto pratico il calcolo della temperatura di una parete metallica rivestita resta fin qui ancora un procedimento complesso in quanto, come già detto, la lettura nel diagramma costruito (tempera-

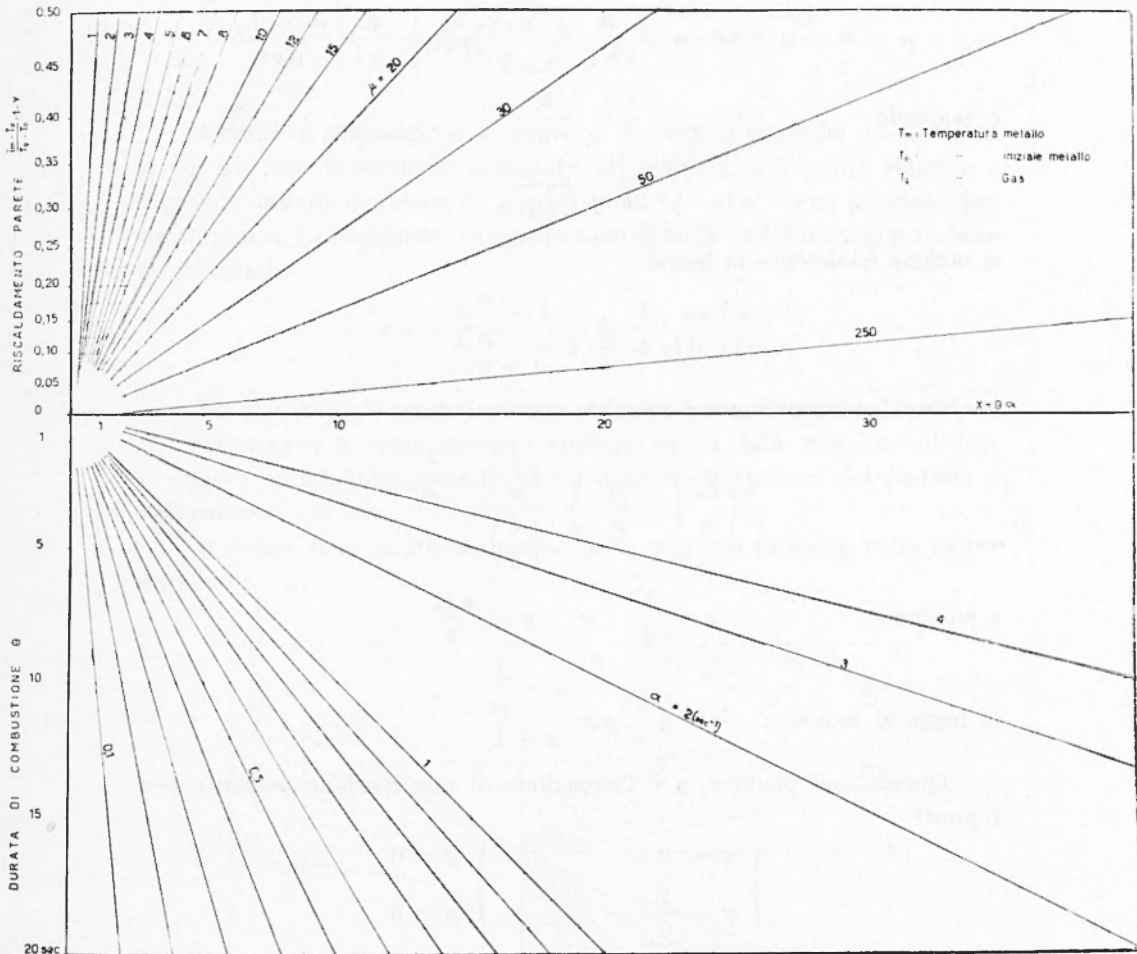


Diagramma n° 3 - Andamento della temperatura della parete metallica nel tempo per diversi valori dei parametri α e μ .

tura-tempo) richiede la conoscenza degli elementi μ ed a che vanno determinati ogni volta in base al particolare caso in esame.

Si è reso quindi necessario ricercare un metodo pratico per una determinazione rapida di detti parametri. Per ogni accoppiamento isolante-metallo si legge in un diagramma, il quale, in base agli spessori dei materiali e del coefficiente di scambio termico dei gas, fornisce i parametri μ ed a ; con questi si può così entrare nel diagramma temperatura-tempo.

Se si considera l'espressione di μ nella sua forma completa cioè

$$\mu = m + n + m \cdot n = \frac{K}{h l} + \frac{\rho_m c_m l_m}{\rho c l} + \frac{K}{h l} \frac{\rho_m c_m l_m}{\rho c l}$$

e ponendo

$$a = \frac{K}{h}$$

$$b = \frac{\rho_m c_m}{\rho c}$$

si ottiene facilmente la legge:

$$l_m = \frac{\mu}{b} \cdot \frac{l - \frac{a}{\mu}}{l + a}$$

Dividendo entrambi i membri per a si ricava:

$$\left(\frac{l_m}{a}\right) = \frac{\mu}{b} \frac{l}{a} \frac{\left(\frac{l}{a}\right) - \frac{1}{\mu}}{\left(\frac{l}{a}\right) + 1}$$

e ponendo

$$x = \frac{l}{a} \quad \text{e} \quad y = \frac{b l_m}{a}$$

la legge si esprime:

$$y = \mu x \frac{x - \frac{1}{\mu}}{x + 1}$$

Questa, nel piano x, y è l'equazione di una iperbole passante per i punti

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 0 \\ x = \frac{1}{\mu} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} y = 0 \\ x = 0 \end{array} \right.$$

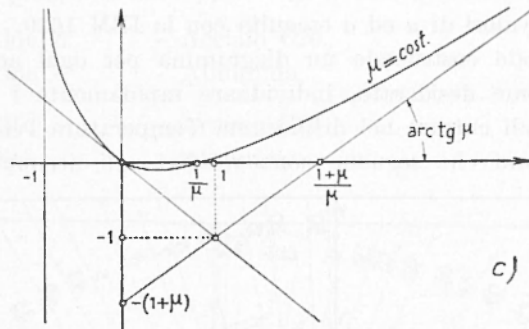
avente per asintodi le rette

$$x = -1$$

ed

$$y = \mu x - (1 + \mu)$$

e tangente nell'origine $y = -x$, come è riportato in figura seguente:

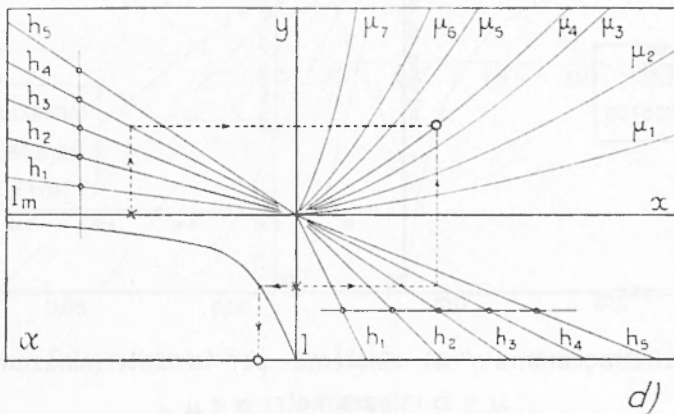


Avendo a disposizione le curve $\mu = \text{cost.}$, è possibile il calcolo di μ per un caso particolare, segnando nel piano x, y il punto relativo e leggendo quindi il valore di μ corrispondente alla curva passante per detto punto. Le coordinate di questo sono di facile individuazione tramite le relazioni:

$$x = l \frac{h}{K}, \quad y = l_m \frac{h}{K} \frac{\rho_m C_m}{K_0 C}$$

Ma per evitare anche questa complicazione si possono riportare nel diagramma le rette espresse analiticamente dalle relazioni ultime, e leggere quindi direttamente in funzione degli spessori del metallo e dell'isolante.

Il valore di μ si trova dunque nella maniera indicata nella figura seguente:



Sempre nello stesso diagramma si è riportato, utilizzando il quadrante rimasto libero, la curva $\alpha = \alpha(l)$ calcolata già per punti nell'indagine dei valori di μ ed α eseguita con la IBM 1620.

In tal modo costruendo un diagramma per ogni accoppiamento si possono, come desiderato, individuare rapidamente i parametri μ ed α con i quali entrare nel diagramma Temperatura-Tempo.

I diagrammi che seguono sono relativi agli accoppiamenti

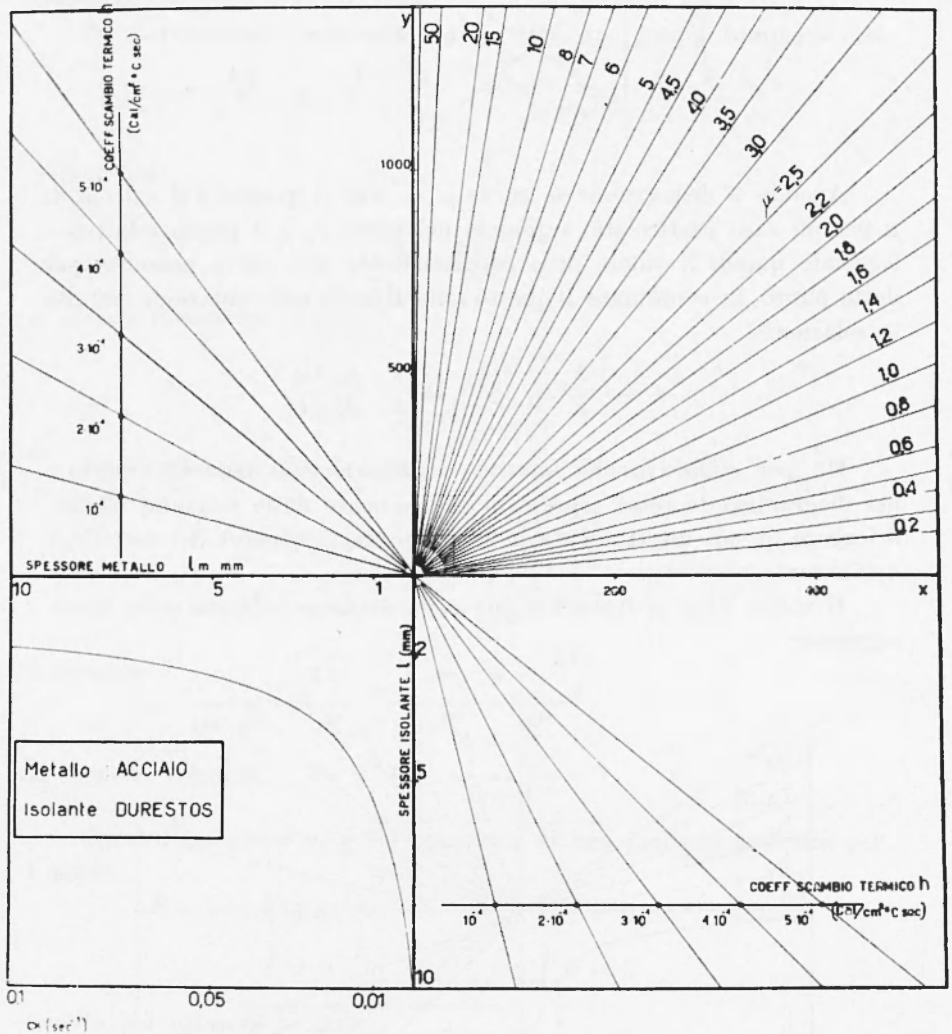


Diagramma n° 4 - Sistema per la determinazione dei parametri α e μ -

- Durestos RA 9 - Acciaio C20
- Durestos RA 9 - Alluminio
- Rokide Z - Acciaio C20
- Rokide Z - Alluminio
- Grafite - Acciaio C20
- Grafite - Alluminio

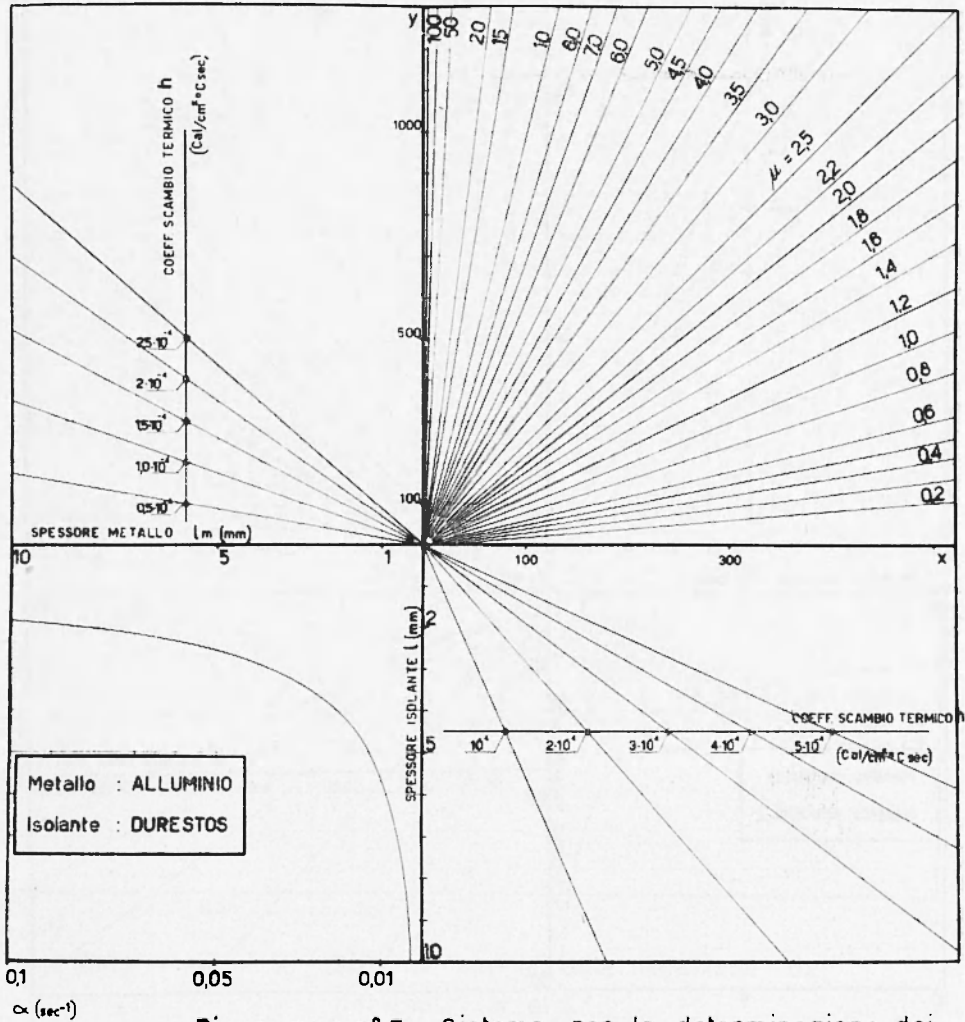


Diagramma n° 5 - Sistema per la determinazione dei parametri α e μ -

I valori numerici delle caratteristiche dei materiali ai quali si riferiscono i diagrammi costruiti sono state assunte dai cataloghi delle società produttrici e dal testo « Missile Engineering Handbook ».

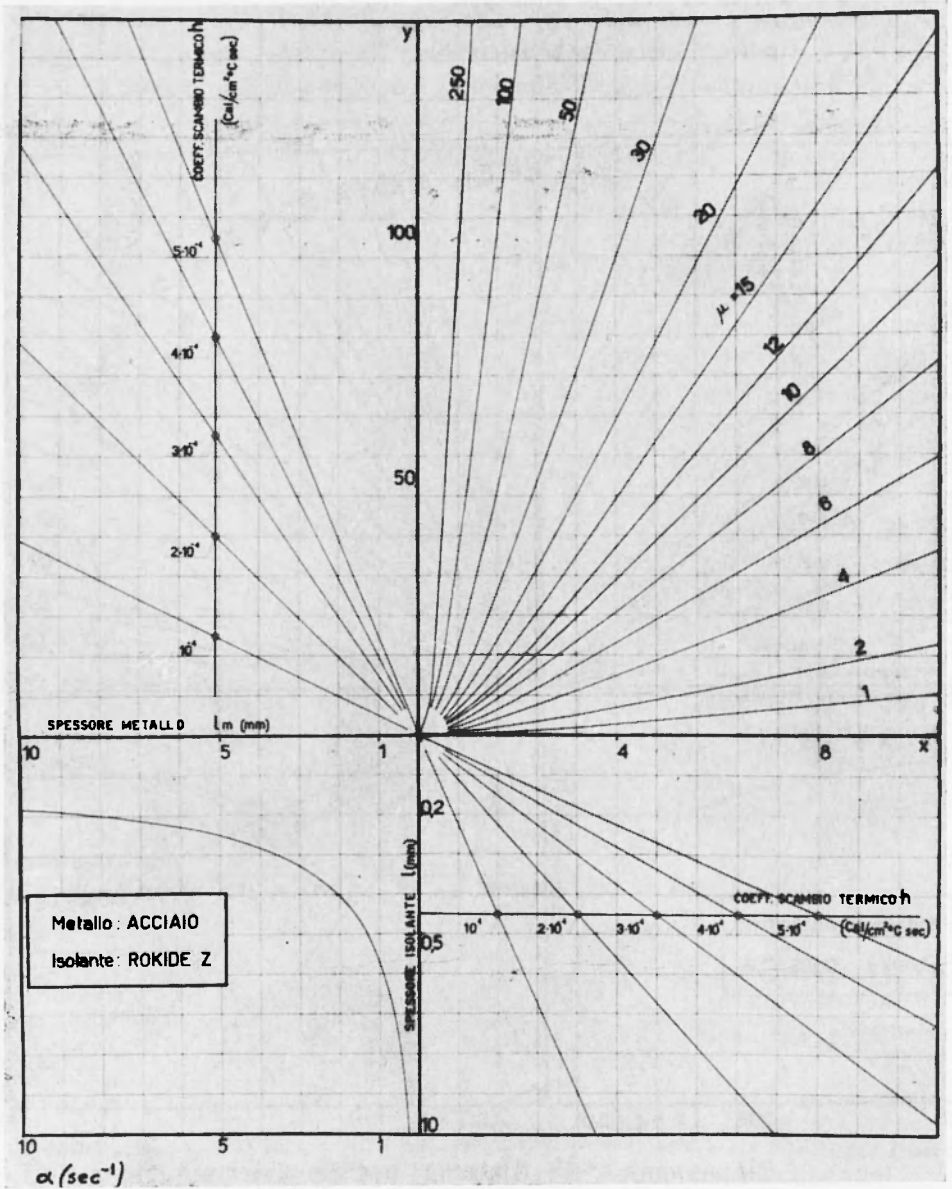


Diagramma n. 6 - Sistema per la determinazione dei parametri α e μ .

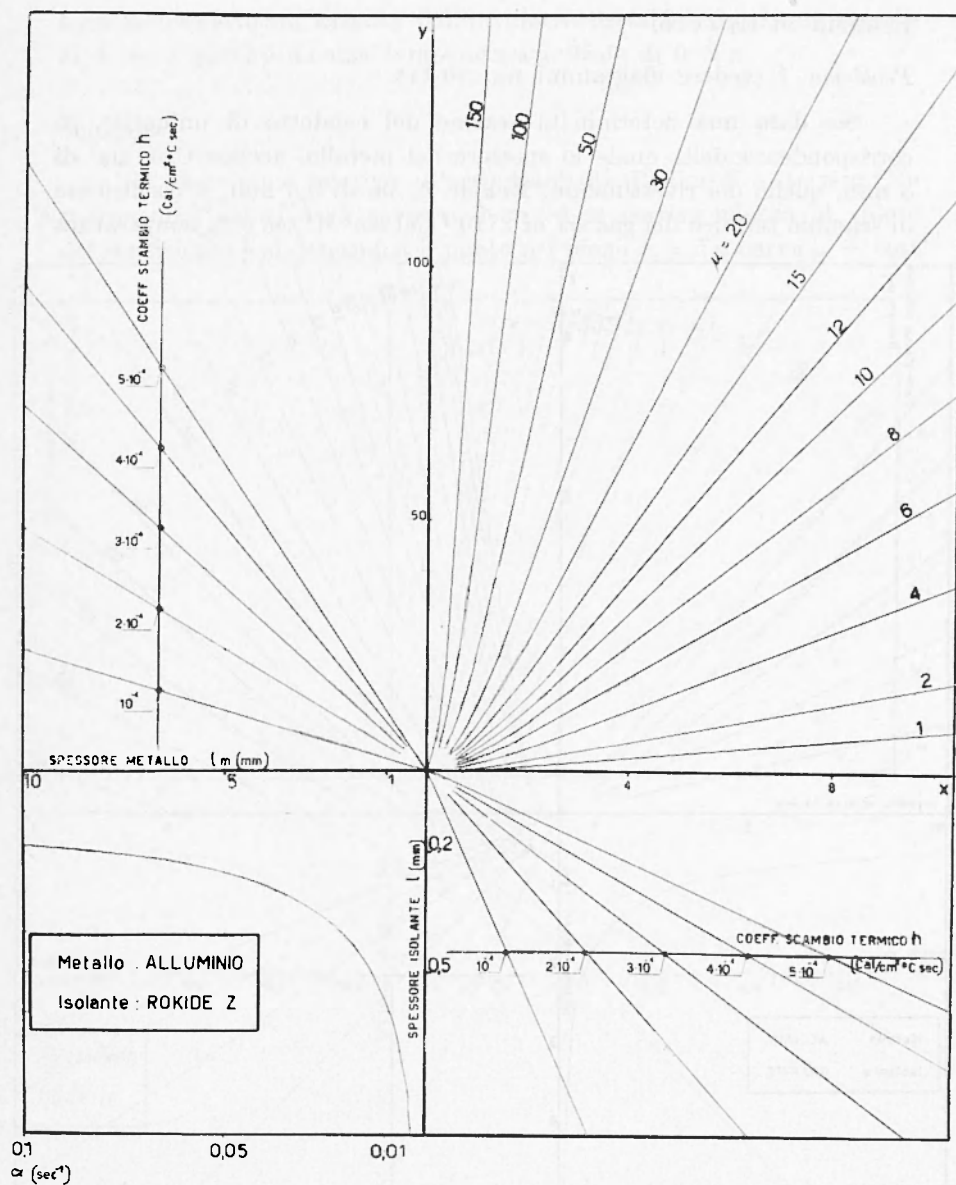


Diagramma n° 7 - Sistema per la determinazione dei parametri α e μ .

ESEMPIO DI CALCOLO.

Problema 1 (vedere diagrammi nn. 10-11).

Sia data una determinata sezione del condotto di un'ugello, in corrispondenza della quale lo spessore del metallo, acciaio C20 sia di 3 mm, quello del rivestimento, Rokide Z, sia di 0,5 mm, il coefficiente di scambio termico dei gas sia di $2 \cdot 10^{-1}$ Cal/cm² °C sec e la temperatura

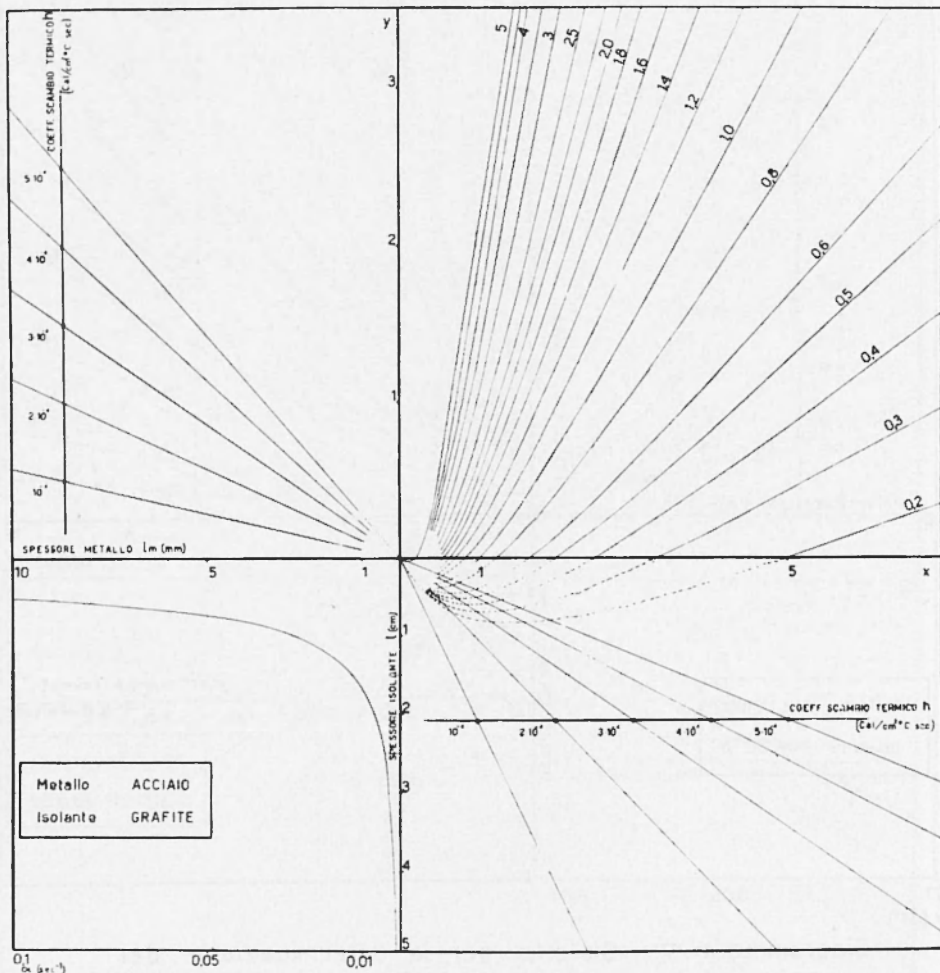


Diagramma n° 8 - Sistema per la determinazione dei parametri α e λ .

dei gas in corrispondenza abbia il valore di 2.000 °C. Si vuole determinare la temperatura assunta dall'involucro metallico dopo una durata di 3 sec a partire da una temperatura iniziale di 0 °C.

Soluzione.

Nel diagramma relativo all'accoppiamento Rokide Z - Acciaio C20 si leggono i valori degli spessori detti ed in corrispondenza al valore del coefficiente h si determina il punto nel piano x, y . La curva $\mu = \text{cost}$

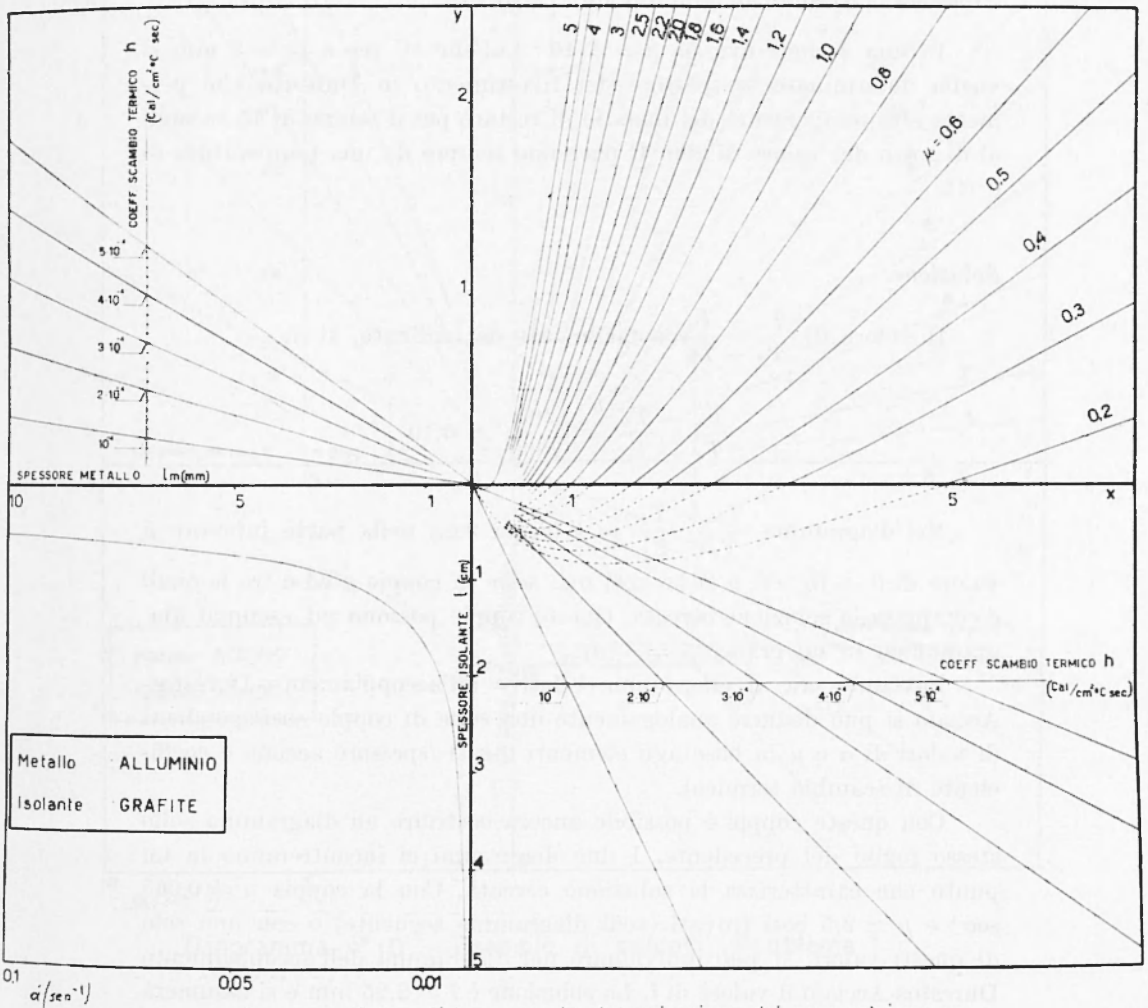


Diagramma n° 9 - Sistema per la determinazione dei parametri α e μ .

che passa per detto punto è la $\mu = 9$ (avendo interpolato tra i valori di $\mu = 8$ e $\mu = 10$). Contemporaneamente si legge in basso il valore di $\alpha = 1,25 \text{ sec}^{-1}$. Passando ora nel diagramma $T_m - T_o / T_g - T_o = F(\theta)$ si legge il valore di $T_m - T_o / T_g - T_o$ corrispondente ai valori θ , α e μ cioè il valore $\frac{T_m - T_o}{T_g - T_o} = 0,3$. La temperatura del metallo sarà allora

$$T_m = T_o + 0,3 (T_g - T_o) = 0,3 T_g = 600 \text{ }^\circ\text{C}$$

Problema 2 (vedere diagrammi nn. 12-13-14)

In una sezione ove sia $h = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Cal/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C sec}$ e $l_m = 3 \text{ mm}$ si voglia determinare lo spessore del rivestimento in Durestos che permetta alla temperatura del metallo di restare per il tempo di 15 secondi al di sotto del valore di $200 \text{ }^\circ\text{C}$ partendo sempre da una temperatura di $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Soluzione.

Il valore di $\frac{T_m - T_o}{T_g - T_o}$ è facilmente determinato, si ha

$$\frac{T_m - T_o}{T_g - T_o} = \frac{200}{2000} = 0,10$$

Nel diagramma $\frac{T_m - T_o}{T_g - T_o} = F(\theta)$, si fissa nella parte inferiore il valore di $\theta = 15 \text{ sec}$. e si ha così una serie di coppie μ ed α tra le quali è compresa la soluzione cercata. Queste coppie possono ad esempio diagrammarsi in un grafico $\alpha = \alpha(\mu)$.

Passando ora al diagramma relativo all'accoppiamento Durestos-Acciaio si può dedurre analogamente una serie di coppie corrispondenti di valori di α e μ in base agli elementi fissati (spessore acciaio e coefficiente di scambio termico).

Con queste coppie è possibile ancora costruire un diagramma sullo stesso foglio del precedente. I due diagrammi ci incontreranno in un punto che caratterizza la soluzione cercata. Con la coppia $\alpha = 0,065 \text{ sec}^{-1}$ e $\mu \approx 2,5$ così trovati (vedi diagramma seguente) o con uno solo di questi valori, si può individuare nel diagramma dell'accoppiamento Durestos-Acciaio il valore di l . La soluzione è $l = 2,25 \text{ mm}$ e si assumerà ad es. $l = 3 \text{ mm}$.

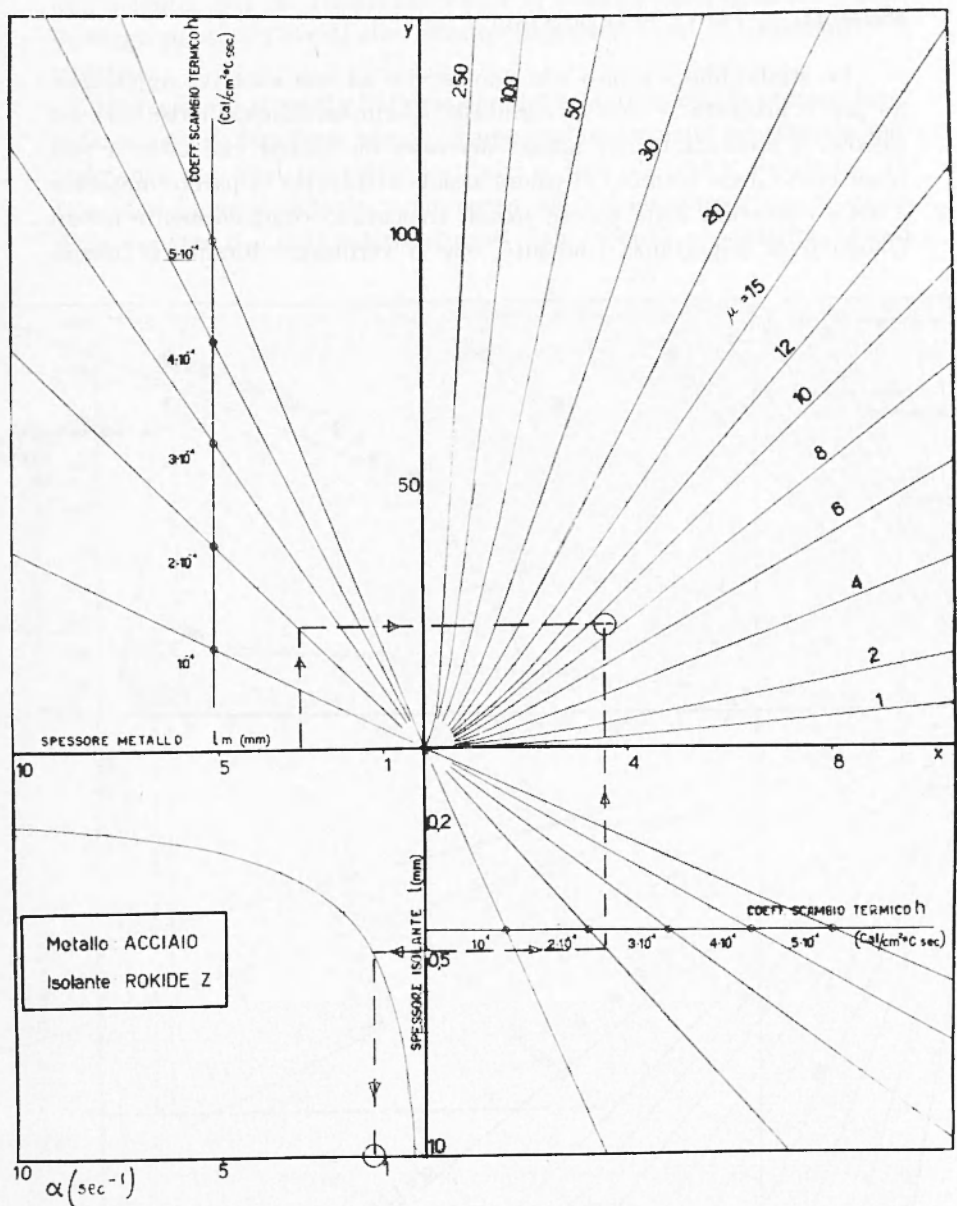


Diagramma n°10 -Esempio di calcolo : Problema 1

Parte III - PROVE SPERIMENTALI.

Lo studio finora svolto non può servire ad una effettiva applicazione per il progetto se non si verificano sperimentalmente i risultati del calcolo. I risultati teorici infatti derivano da ipotesi che oltre a non tener conto dello scambio di calore assiale attraverso la parete metallica e della curvatura della parete stessa, trascurano completamente alcuni fenomeni di importanza rilevante, che si verificano durante il funzio-

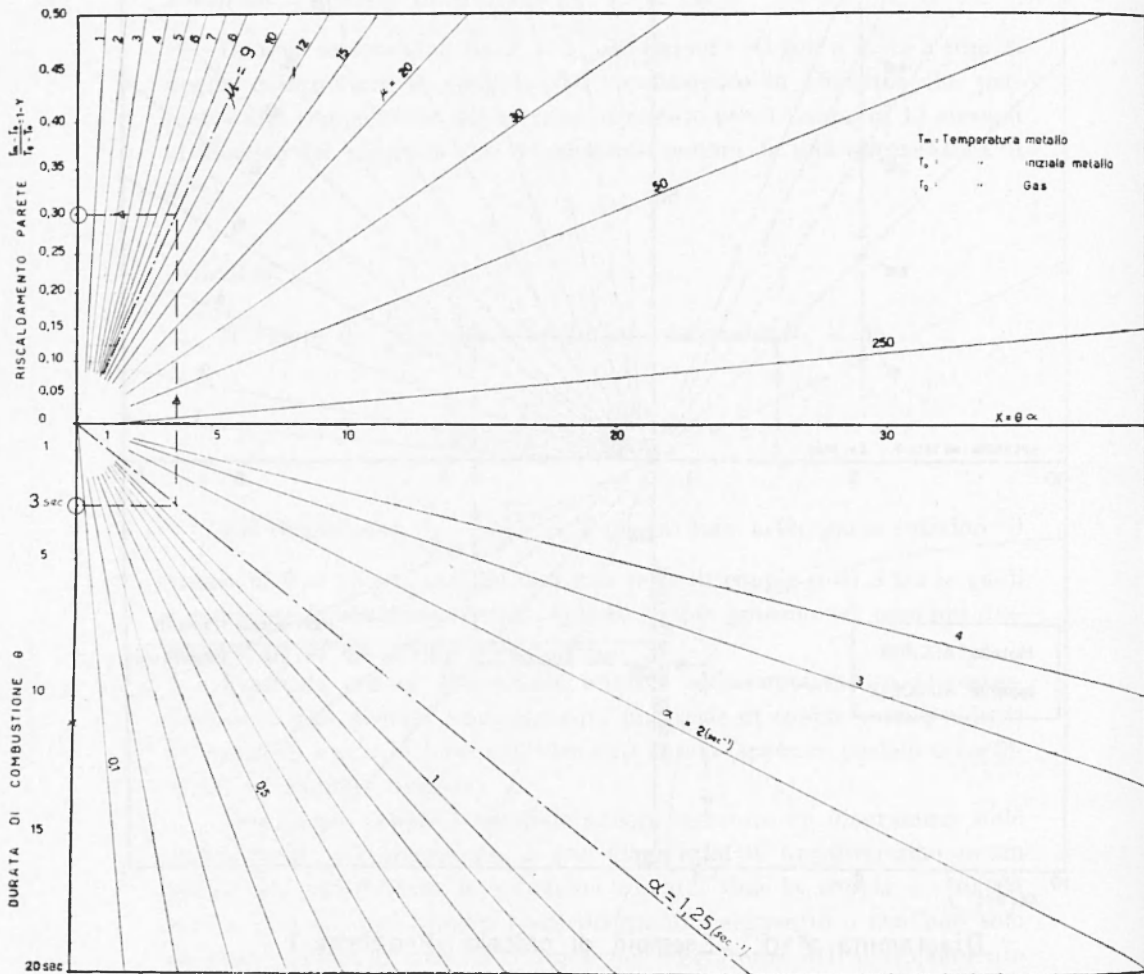


Diagramma n° 11 - Esempio di calcolo : Problema 1

namento, e cioè, ad esempio, la variazione delle caratteristiche dell'isolante con il riscaldamento e l'erosione dell'isolante stesso, l'irraggiamento, l'eventuale effetto ablativo, con cambiamenti di stato ecc.

Per quanto riguarda l'alterazione del materiale con la temperatura, il fenomeno si manifesta spesso in una carbonizzazione superficiale specialmente per quei materiali costituiti a base di resine sintetiche. Di tale alterazione è difficile tener conto nei calcoli soprattutto a causa della penuria dei dati relativi forniti dalle società produttrici. Questi

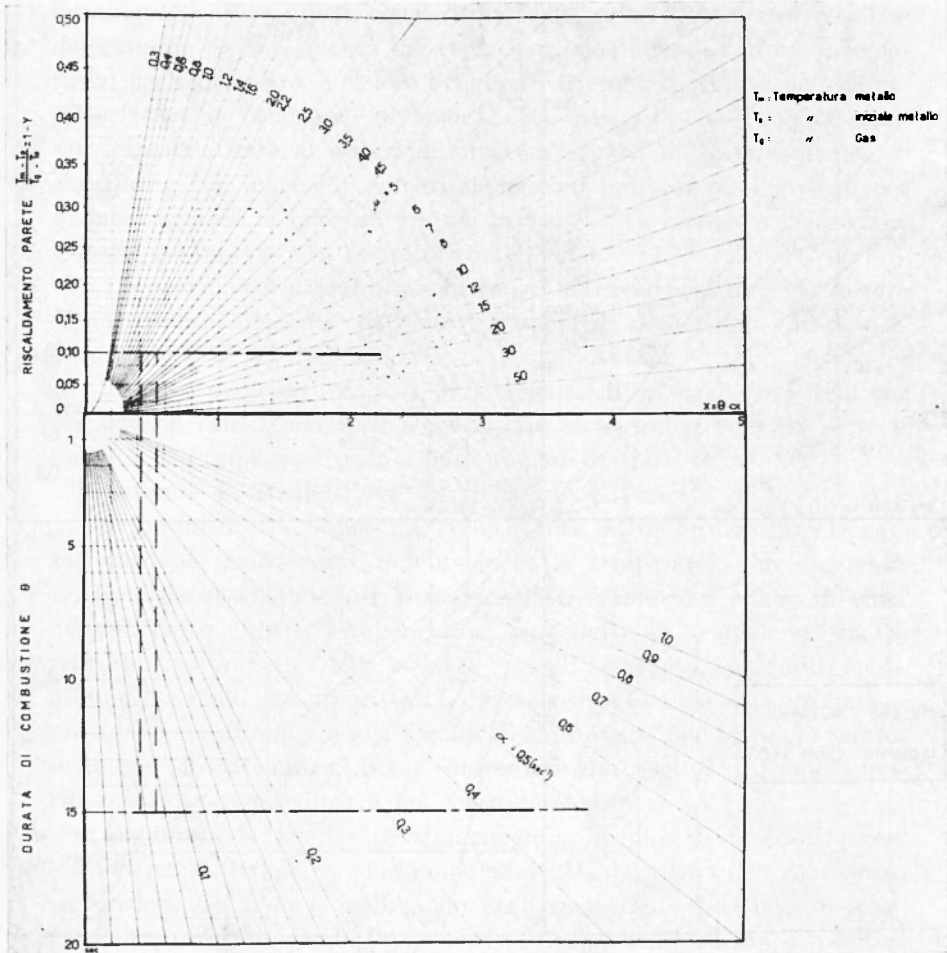


Diagramma n. 12 - Esempio di calcolo: Problema 2.

infatti sono limitati ad intervalli di temperatura eccessivamente ristretti rispetto a quelli di interesse pratico.

L'erosione è un fenomeno notevolmente più complesso e tale, da annullare a volte l'effetto del rivestimento.

Va tuttavia notato che gli effetti di detta erosione sono limitati, almeno nel loro aspetto più pericoloso, alle sezioni del divergente dell'ugello.

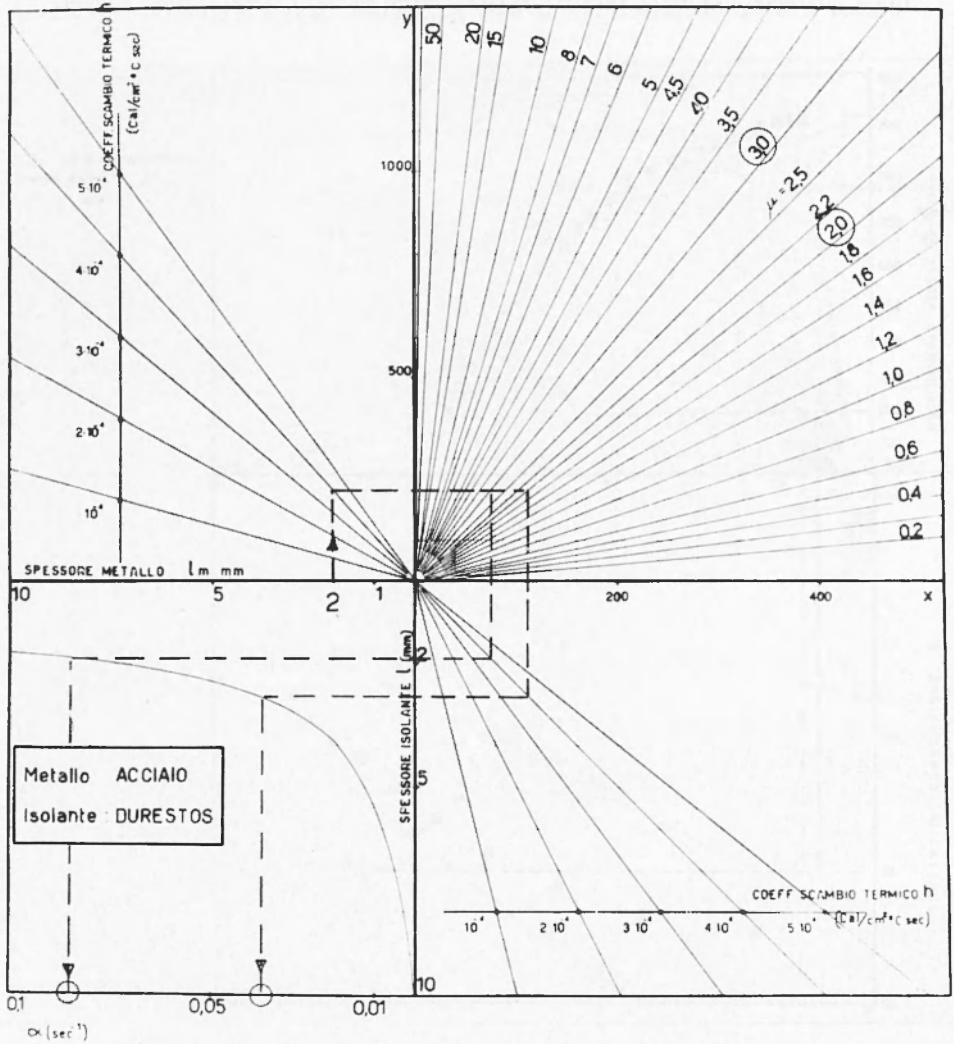


Diagramma n° 13 -Esempio di calcolo: Problema 2

L'erosione inoltre si manifesta soprattutto per quei materiali isolanti a base di resine, cioè per gli isolanti stampabili (Fiberite, Durestos ecc.) che sono applicati al supporto mediante incollaggio, mentre è avvertita in misura notevolmente minore nei rivestimenti a base di ossidi metallici, come ad es. $Zr O_2$, $Al_2 O_3$ che vanno commercialmente sotto il nome di Rokide e che sono applicati al supporto metallico secondo la tecnica della proiezione allo stato fuso.

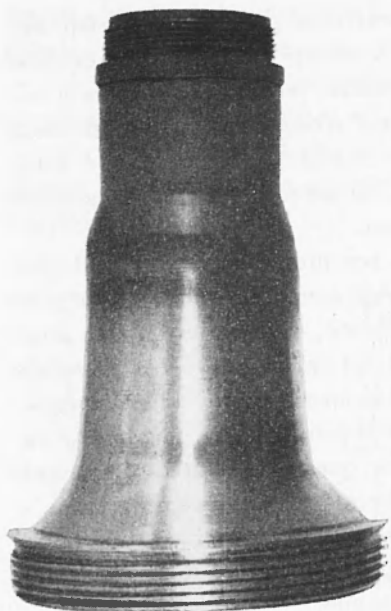
È in corso attualmente uno studio per procedere ad una indagine sperimentale sui vari materiali offerti dal mercato per seguire il loro comportamento in esercizio a varie condizioni, onde definire entro quali limiti questi si accordano con i risultati del calcolo. Sarà così possibile determinare di conseguenza dei coefficienti sperimentali, ad es. maggiorativi per lo spessore, e la loro eventuale dipendenza dai fattori che caratterizzano le condizioni di lavoro. Con questi elementi sperimentali sarà possibile dare ai criteri di progetto esposti un valore pratico, e classificare tali materiali isolanti in base ai loro campi d'impiego per quanto riguarda le temperature dei propellenti, le pressioni d'esercizio, le parti del motore ed i tempi di combustione.

Le prove sono attualmente in corso; tuttavia possiamo già fornire alcuni risultati ottenuti con motori a tempi di combustione brevi, dell'ordine cioè di $2 \div 2,5$ sec.

La foto seguente mostra il rivestimento di un ugello ottenuto per stampaggio con il materiale isolante che va commercialmente sotto il nome di Durestos, costituito a base di fibre di amianto.

Durante la combustione in vicinanza dell'inserito di grafite si è avuta localmente l'erosione del rivestimento ed uniformemente la carbonizzazione. Dalla parte dell'involucro la temperatura ha raggiunto un limite sconsigliabile per il materiale in esame, del valore di circa 300 °C, detto «blister temperature», per effetto della quale sul materiale stesso si formano delle vesciche, visibili nella foto, con conseguente alterazione delle sue proprietà. Lo spessore usato in questa prima applicazione era di mm 1,5 e la tecnica di stampaggio non ancora a punto, onde non si è ritenuto di poter confrontare tali risultati con quelli teorici per ricavarne deduzioni nel senso desiderato.

Migliorata la tecnica di stampaggio a seguito di ulteriori prove sullo stesso materiale, si sono infine effettuati dei rilievi di temperature in funzione del tempo, realizzando degli spessori di rivestimento maggiori (3 mm) e bruciando propellenti a diversa temperatura di combustione. Il rivestimento è stato usato sia nel solo convergente che nel divergente.

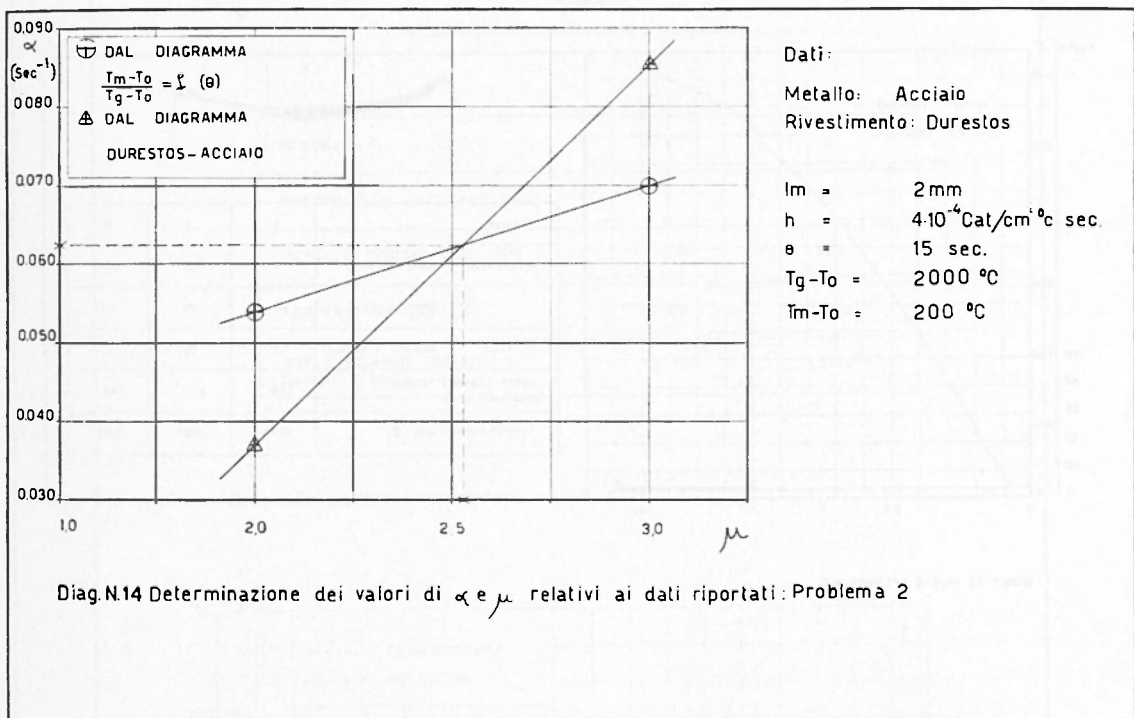


Le misure eseguite con coppie termo-elettriche saldate esternamente all'involucro metallico hanno dimostrato il non avvenuto riscaldamento nel convergente per tutto il tempo di combustione, in accordo con i calcoli teorici; nel divergente invece si è avuto un riscaldamento irregolare da attribuirsi molto probabilmente al cedimento del rivestimento; questo infatti durante la combustione è stato completamente asportato dopo una prima erosione.

Si riportano nei diagrammi seguenti alcuni dei rilievi effettuati.

Il calcolo teorico di confronto precedentemente effettuato ha richiesto la determinazione del coefficiente di scambio termico dei gas.

La sua valutazione è stata effettuata applicando l'espressione fornita per tale coefficiente da D. R. Bartz nella pubblicazione: « A Simple



Equation for Rapid Estimation of Nozzle Convective Heat Transfer Coefficients». Vedi Jet Propulsion Vol. 27, n° 1, Gennaio 1957 ove si tiene conto della sola convezione

$$h = \frac{0,026}{D^{*0,2}} \left(\frac{\mu^{0,2} C_p}{P_r^{0,6}} \right)_0 \left(\frac{P_c g}{C^*} \right)^{0,3} \left(\frac{D^*}{r_c} \right)^{0,1} \left(\frac{A^*}{A} \right)^{0,9} \sigma$$

$$\text{con } \sigma = \frac{1}{\left[\frac{1}{2} \frac{T_w}{T_o} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) + \frac{1}{2} \right]^{0,8 (\omega/5)} \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right] \omega(5)}$$

ove A^* = Sezione contratta

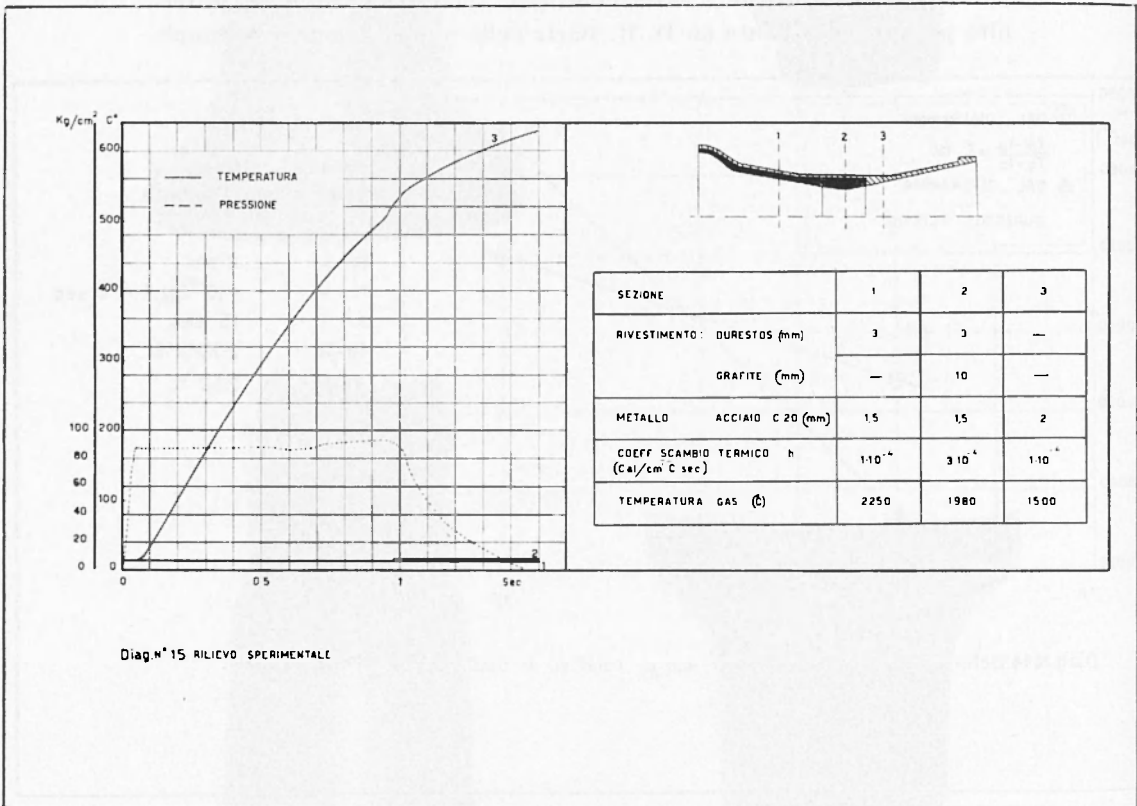
A = Sezione generica

C = Calore specifico a pressione costante (BTU/lb °F)

C = Velocità caratteristiche (F.P.S)

D = Diametro della sezione generica (in)

D_* = Diametro della sezione contratta (in)



g = accelerazione di gravità (F.P.S²)

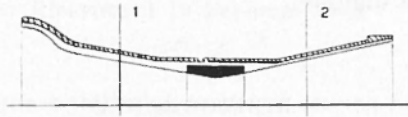
h = coefficiente di scambio termico dei gas (BTU/in² sec °F)

P_c = pressione nella camera (lb/in²)

T_w = temperatura parete (°R)

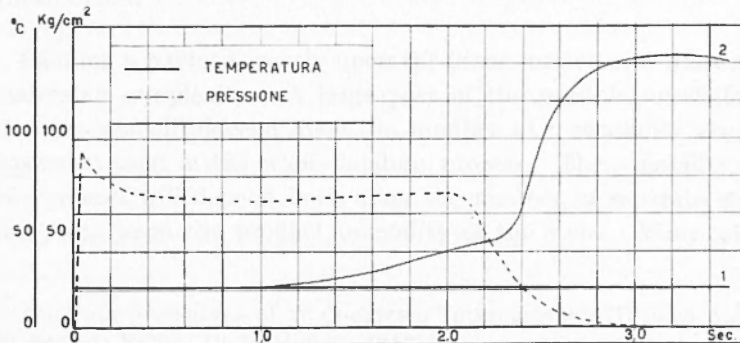
T_o = temperatura di ristagno (°R)

- r_c = raggio di curvatura della gola
- n = numero di Mach
- μ = viscosità (lb/in sec)
- γ = rapporto dei calori specifici (schimensionale)
- ω = esponente della temperatura nella equazione della viscosità.



SEZIONE	1	2
RIVESTIMENTO OURESTOS (mm)	3	1.5
METALLO ACCIAIO C20 (mm)	1.50	1.35
TEMPERATURA GAS (°C)	3500	2300
COEFF. SCAMBIO TERMICO h (Cal/cm ² °C sec)	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$

Diag. N°16 RILIEVO SPERIMENTALE



Per quanto riguarda la temperatura dei gas questa si è valutata per le sezioni in esame con la $T = T^0 / 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$ ponendo in T^0 la temperatura di combustione del propellente e valutando M in base al rapporto $\frac{A}{A^*}$.

Ringrazio il Centro di Calcolo UCC per la fattiva collaborazione prestata ed in particolare il Dott. Giampiero Vergelli per la prestazione alle macchine calcolatrici, Donner 3400 (calcolatrice analogica) ed IBM 1620 (computatore digitale).

BIBLIOGRAFIA

- (¹) MAYER E., *Heat Flow in Composite Slabs*. « ARS-Journal », **22**, (3 Maggio/Giugno, 1952).
 - (²) BARTZ D. R., *A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective Heat Transfer Coefficients*. « ARS-Journal », **27**, 1, (Gennaio 1957).
 - (³) GROVER J. H. e HOLTER W., *Solution of the Transient Heat-Conduction Equation for an Insulated, Infinite Metal*. « ARS-Journal », **27**, (12 Dicembre 1957).
-