

Titolo
Relazione attività relativa all'azione CAST3M

Autore: Giuseppe Mauro Giannuzzi

Descrittori
Tipologia del documento: Rapporto Tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

Argomenti trattati: Energia Nucleare, termo meccanica, Calcolo di strutture civili, software

Sommario

Nel presente rapporto sono state evidenziate le attività svolte nel periodo di consuntivazione maggio 2009 – settembre 2010 delle attività svolte nell'ambito dell'azione CAST3M.

In particolare sono riportati:

- il materiale oggetto dei corsi di formazione nella termo-meccanica delle strutture orientata all'impiego di CAST3M
- le modifiche apportate alla procedura HTCTRAN per riattivarne il funzionamento
- Lo stato dell'arte sulla struttura dei calcestruzzi con particolare riferimento agli aspetti connessi con il trasferimento del calore.

Note

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMMISSIONE	28.9.2010	NOME	G.M. Giannuzzi	R. Tinti	S. Monti
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

SOMMARIO

INTRODUZIONE GENERALE.....	5
PARTE I: COMPOSIZIONE, STRUTTURA E PROPRIETÀ TERMICHE DEI CALCESTRUZZI PER L'ADEGUAMENTO DELLA PROCEDURA HTCTRAN.....	7
COMPOSIZIONE E STRUTTURA DEI CALCESTRUZZI	7
<i>Il legante</i>	8
<i>L'aggregato</i>	11
<i>Il mix-design</i>	13
<i>Struttura del calcestruzzo indurito</i>	14
EFFETTO DELLA TEMPERATURA SULLA MICROSTRUTTURA DEL CALCESTRUZZO	18
EFFETTO SULLE PROPRIETÀ TERMICHE DEL CALCESTRUZZO	22
CONCLUSIONI.....	24
BIBLIOGRAFIA-PARTE I.....	25
ALLEGATO 1	26
PARTE II: INTRODUZIONE ALLE PROBLEMATICHE TERMOMECCANICHE E ALL'UTILIZZO DEL SISTEMA DI CALCOLO AGLI ELEMENTI FINITI	
CAST3M	27
SOMMARIO.....	27
MATERIALE OGGETTO DEL CORSO	28
CONCLUSIONE GENERALE.....	120

Listato Figure

<i>Figura 1 Struttura del gel tobermoritico</i>	8
<i>Figura 2 Andamento della frazione idratata nel tempo per composti di cemento Portland (Collepari)</i>	10
<i>Figura 3 Andamento delle resistenze meccaniche nel tempo per composti di cemento Portland (Collepari)</i>	10
<i>Figura 4 Rappresentazione schematica delle porzioni volumetriche di pasta di cemento a differenti stadi di idratazione (Neville)</i>	11
<i>Figura 5 Schematizzazione delle 5 fasi del mix-design (Collepari)</i>	13
<i>Figura 6 Descrizione schematica della struttura del calcestruzzo e proporzioni volumetriche dei componenti (G.L. England)</i>	14
<i>Figura 7 Rappresentazione della struttura porosa</i>	14
<i>Figura 8 Zona transizione aggregato malta (Coppola)</i>	15
<i>Figura 9 Struttura di silicati idrati (CSH) secondo il modello Feldman-Sereda.</i>	16
<i>Figura 10 Meccanismo che governa il ritiro e il rigonfiamento del calcestruzzo al variare dell'acqua in esso contenuta.</i>	16
<i>Figura 11 Rappresentazione schematica di un mezzo poroso insaturo</i>	17
<i>Figura 12 Rappresentazione schematica di un mezzo poroso insaturo</i>	17
<i>Figura 13 Isobare di deidratazione di paste in cemento Portland (Taylor)</i>	18
<i>Figura 14 Distribuzione dimensionale dei pori in funzione della temperatura in calcestruzzo ordinario (Noumowe)</i>	19
<i>Figura 15 Variazione in peso e porosimetria al mercurio di un calcestruzzo ordinario (NC) e di un calcestruzzo ad alte prestazioni (HSC) (Noumowe)</i>	19
<i>Figura 16 Funzione di deidratazione per un calcestruzzo ordinario</i>	20
<i>Figura 17 Perdita di peso di aggregato calcareo e siliceo e calcestruzzo causata dal riscaldamento (Bazant)</i>	21
<i>Figura 18 Effetto della temperatura sulla densità calcestruzzo fatto con aggregato calcareo: (a) Harmaty & Allen; (b) stagionato a 20°C e umidità relativa a 65% (Schneider); (c) stagionatura in acqua (Schneider). (Bazant)</i>	21
<i>Figura 19 Variazione della conduttività termica in funzione della temperatura (Marechal)</i>	22
<i>Figura 20 Variazione della conduttività termica in funzione della temperatura (Schneider)</i>	22


 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP1 - 010	0	L	4	122

Figura 21 Calore specifico di differenti calcestruzzi (Schneider) _____24

Listato Tabelle

Tabella 1 Cementi secondo norma UNI EN 197/1:2001 _____9

Tabella 2 Caratteristiche di rocce impiegabili come aggregato _____12


Tabella 3 Reazioni di trasformazione e decomposizione di calcestruzzi quarzatici e calcarei _____20

Introduzione Generale

Il programma di lavoro nell'ambito dell'azione CAST3M prevede due attività principali.

La prima attività comprende la diffusione dello strumento sia all'interno dell'ENEA che all'esterno, in particolare ad Università, Enti di ricerca ed Industrie coinvolte in attività di ricerca con ENEA. Parallelamente prevede il controllo prestazionale dello strumento, con segnalazione al CEA di eventuali malfunzionamenti e la proposizione di modifiche e correzioni da apportare software. Si sono pertanto organizzati corsi per ingegneri in formazione presso i centri ENEA della Casaccia e di Portici per un totale di circa 90 ore di lezione, inserendo nei corsi sia gli aspetti teorici del comportamento termo-meccanico di materiali e strutture, sia l'addestramento all'uso di CAST3M per l'analisi di tali problematiche. Si opera l'introduzione dello strumento CAST3M, con finalità didattiche e di ricerca, presso il Dipartimento di Trasporti e Costruzione dell'Università di Padova. Il materiale prodotto per i corsi è riportato nella Parte II del presente report. Per quanto riguarda le installazioni su PC non si riscontrano problemi né in ambiente Windows né LINUX; si contano 14 installazioni presso il UTRINN, UTFISST e UTIS e il Laboratorio ELIOSLAB e due presso l'Università di Padova. Si sta verificando la possibilità di installare il codice sul sistema di calcolo CRESCO (ENEA-Portici): la versione seriale non dovrebbe presentare particolari problemi, mentre la versione parallela di CAST3M non presenterebbe a detta del CEA al momento vantaggi sufficienti da giustificare il lavoro di implementazione sulla macchina suddetta.

La seconda attività prevede lo sviluppo e validazione di modelli per il comportamento di calcestruzzo in temperatura; in particolare è richiesta la revisione della procedura (scritta in linguaggio Gibiane) HTCTRAN per lo studio in forma accoppiata del trasferimento di massa e di calore nei calcestruzzi, basata sul modello proposto da BAZANT-THONGUTHAI; sulla procedura HTCTRAN, sviluppata da ENEA ed implementata nel 1998 in CAST3M, occorre operare degli aggiornamenti per estenderne il campo di applicabilità e migliorarne la funzionalità. L'esecuzione di casi test agganciando la versione HTCTRAN-1998 con la versione CAST3M-2009 hanno evidenziato un malfunzionamento della procedura, per cambiamenti effettuati sull'operatore numerico che realizza il prodotto di 'campi per elementi'. Si è proceduto quindi a modificare in HTCTRAN la costruzione dei 'campi per elementi', che supportano i gradienti di pressione e di temperatura, prima di effettuare l'operazione di moltiplicazione, che porta alla costruzione del termine per il trasporto di calore per convezione, ristabilendo così il corretto funzionamento. Le modifiche apportate, riportate nell'Allegato 1 per la sola parte a cavallo della modifica, sono correntemente operanti nella versione CAST3M-2010. Si sta lavorando per estenderne il funzionamento in presenza di proprietà termo-igrometriche del calcestruzzo variabili con la temperatura e a domini 3D, ciò richiede come si chiarirà nella Parte I del rapporto, di rivisitare l'estesa letteratura sul comportamento in temperatura dei calcestruzzi, al fine di introdurre variazioni dei parametri fisici in linea sia con i dati

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 010	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 6	di 122
--	---	------------------	----------------------	------------------	------------------

sperimentali disponibili che con le caratteristiche fenomenologiche ed ingegneristiche alla base del modello di BAZANT-THONGUTHAI.

PARTE I: Composizione, struttura e proprietà termiche dei calcestruzzi per l'adeguamento della procedura HTCTRAN.

Il modello proposto da BAZANT-THONGUTHAI per il trasferimento di massa e calore nei calcestruzzi, implementato nella procedura HTCTRAN ([16]e[17]), si basa su un approccio fenomenologico che cerca di limitare opportunamente senza perdita di capacità predittiva, l'estesa mole di dati sulle caratteristiche fisiche e meccaniche, richieste da altri modelli che entrano più in profondità nel comportamento fisico del calcestruzzo. Peraltro ENEA ha già sviluppato con l'Università di Padova, un altro programma, chiamato HITECOSP, basato sul modello proposto da SCHREFLER, che realizza una modellazione dei fenomeni fisici di dettaglio con accoppiamento completo tra termica, meccanica e igrometria, risultando però oneroso sia nella fase di identificazione dei parametri del modello che per i tempi di calcolo richiesti.

Ne consegue che il modello BAZANT resta uno strumento utile per un primo approccio ingegneristico ed quindi conveniente migliorarne alcune caratteristiche senza stravolgerne la filosofia che ne è alla base.

In quanto segue faremo richiami sulla struttura interna dei calcestruzzi avendo come obiettivo di risalire alla proprietà macroscopiche attraverso gli ingredienti del mix-design; raccoglieremo dalla letteratura i comportamenti fondamentali dei calcestruzzi sia in fase di riscaldamento che di raffreddamento, verificando che le tecniche e le procedure di esecuzione delle misure delle grandezze fisiche del calcestruzzo siano congruenti con i parametri da introdurre nel modello BAZANT.

Composizione e struttura dei calcestruzzi

Per comprendere i fenomeni termo fisici e meccanici che si realizzano sottoponendo a riscaldamento un calcestruzzo è essenziale conoscere le caratteristiche e le quantità dei costituenti di base (aggregati, leganti ...) e la struttura assunta dal calcestruzzo a fine stagionatura. Le percentuali in volume dei vari costituenti dei calcestruzzi sono generalmente comprese entro i seguenti limiti:

- Inerti (ghiaia o pietrisco e sabbia) 60-78%
- Acqua (compresa quella presente negli inerti) 14-22%
- Cemento 7-14%
- Aria 1- 6%
- Additivi (fluidificanti, areanti, acceleranti e ritardanti) - %

In quanto segue si richiameranno gli elementi essenziali dei costituenti del calcestruzzo, rimandando per una completa trattazione a testi specializzati richiamati in bibliografia [1-6].

Il legante

Il calcestruzzo è un materiale composito costituito principalmente da un aggregato minerale inglobato in una matrice di pasta di cemento indurito. Miscelando la polvere di cemento, avente la funzione di legante, con opportuna quantità di acqua si attiva il processo di idratazione ed indurimento; i singoli costituenti chimici del cemento sono di seguito riportati con le rispettive proporzioni:

- Silicato tricalcico C_3S 50–70%
- Silicato bicalcico C_2S 5–35%
- Alluminato tricalcico C_3A 7–14%
- Alluminatoferrito tetracalcico C_4AF 6–12%
- Gesso (ritardante di presa) $C\check{S}H_2$ 3–5%

In cui in forma abbreviata:

C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; \check{S} = SO₃; C₃A = 3CaO·Al₂O₃; H = H₂O; CH = Ca(OH)₂; F=Fe₂O₃

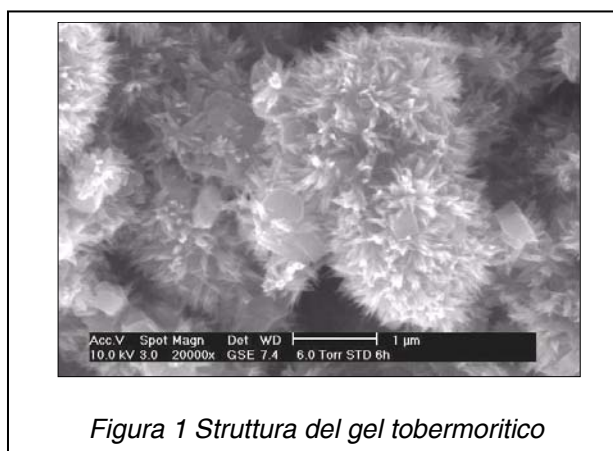


Figura 1 Struttura del gel tobermoritico

I cementi possono essere divisi in quattro categorie di seguito riportate unitamente al campo di impiego prevalente:

- **Cemento Portland ordinario:** costituisce più del 80% del cemento prodotto, adatto ad un uso generale dove non ci sia esposizione a solfati presenti nei suoli e nelle acque.
- **Cemento pozzolanico:** adatto per opere marine e nel caso di acque solfatate, minor resistenza iniziale e calore di idratazione rispetto al Portland; viene ottenuto per macinazione di clinker, gesso e pozzolana che combinandosi con idrossido di calcio formando ulteriore C-S-H.
- **Cemento d'altoforno:** impiega loppa d'altoforno (scoria nella lavorazione dell'acciaio) con comportamento simile alla pozzolana, ma può indurire sia pur

lentamente in assenza di calce, adatti a costruzioni massicce per il basso calore di idratazione, buona resistenza alle acque aggressive e solfatiche.

- **Cemento alluminoso:** prodotto per cottura di miscele contenenti calcare e bauxite, caratterizzato da rapido indurimento particolarmente idoneo per i climi freddi, è largamente impiegato come materiale refrattario.

La norma UNI-EN 197/1:2001 regola la composizione di 27 sottotipi di cementi a cui il produttore deve far riferimento nella dichiarazione di conformità; la *Tabella 1* sotto riportata contiene le denominazione e le composizioni dei vari cementi.

Tabella 1 Cementi secondo norma UNI EN 197/1:2001

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)	UNI EN 197/1:2001 - Composizione (Percentuale in massa) ^a										Costituenti secondari		
		Costituenti principali												
		Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare				
					Naturale P	Naturale calcinata Q	Silicea V	Calcica W		T	L		LL	
		K	S	D ^{b)}										
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5	
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P CEM II/B-P	80-94 65-79	-	-	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5	
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-Q CEM II/B-Q	80-94 65-79	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	-	-	0-5 0-5	
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-V CEM II/B-V	80-94 65-79	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	-	0-5 0-5	
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-W CEM II/B-W	80-94 65-79	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	0-5 0-5	
	Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-T CEM II/B-T	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	0-5 0-5	
		CEM II/A-L CEM II/B-L	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	0-5 0-5
		CEM II/A-LL CEM II/B-LL	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	0-5 0-5
	CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5 0-5
	CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/A CEM IV/B	65-89 45-64	-	11-35 36-55	11-35 36-55	11-35 36-55	11-35 36-55	11-35 36-55	-	-	-	0-5 0-5
	CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A CEM V/B	40-64 20-38	18-30 31-50	-	18-30 31-50	18-30 31-50	18-30 31-50	-	-	-	-	0-5 0-5

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari

b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%

c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento.

La completa idratazione dei silicati presenti nel cemento porta alla costruzione del C-S-H, noto come gel tobermoritico visualizzato in *Figura 1*.

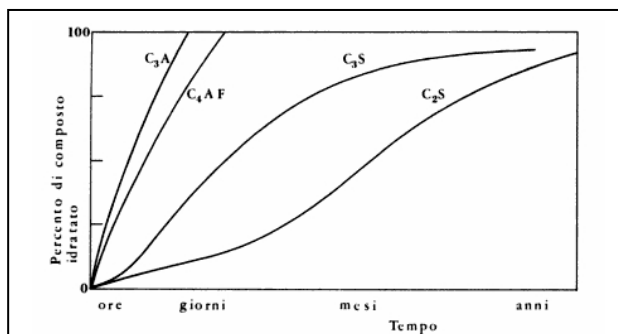


Figura 2 Andamento della frazione idratata nel tempo per composti di cemento Portland

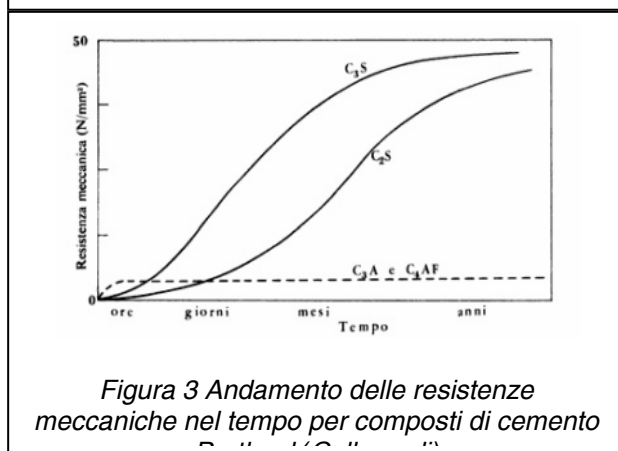
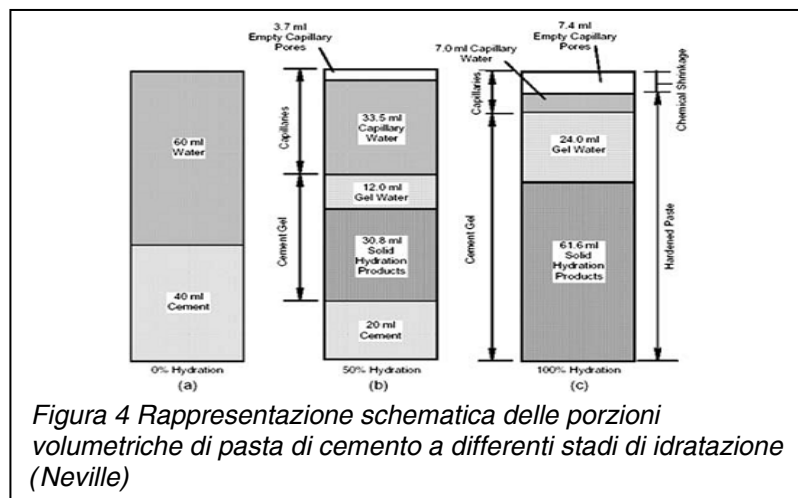


Figura 3 Andamento delle resistenze meccaniche nel tempo per composti di cemento

L'idratazione dei composti è di tipo esotermico con calore di idratazione proporzionale alla velocità di reazione. Il C₃S sviluppa durante l'idratazione circa 125 kcal/kg, il C₂S ne sviluppa circa 63 kcal/kg, mentre il C₃A, 215 kcal/kg. La quantità totale di calore che si può sviluppare, per una certa massa di clinker, è pari all'incirca alla somma dei calori di idratazione dei singoli composti puri. Ne consegue che nei getti massivi è opportuno ridurre le frazioni di C₃S e soprattutto di C₃A (che peraltro contribuisce scarsamente alla resistenza meccanica finale) per ridurre il calore totale di idratazione e la velocità con cui esso si sviluppa e conseguentemente il danno prodotto dalla dilatazione differenziale parti tra interne ed esterne del getto. In *Figura 2* si riportano qualitativamente le percentuali di idratazione dei singoli componenti in funzione del tempo, mentre nella *Figura 3* si evidenzia il diverso contributo nel tempo alla resistenza degli stessi, da notare come la resistenza si incrementi soprattutto per il silicato bicalcico ben oltre i 28 giorni.

In *Figura 4* si mostra il volume dei componenti della pasta di cemento a vari stadi d'idratazione confezionata con un rapporto acqua cemento pari a 0.475 in recipiente sigillato.

Si nota che a completa idratazione la pasta è fatta da particelle solide, acqua inglobata nel gel, acqua capillare e pori capillari. L'acqua capillare viene consumata nella formazione dei prodotti solidi di idratazione e riempie i pori del gel. Si manifesta una certa riduzione nel volume occupato dalla pasta indurita comparato al volume originario della pasta fresca pari a circa il 7.4%.



Assumendo che il peso dell'acqua chimicamente combinata con il cemento è 23% del peso del cemento possono essere dedotte le seguenti relazioni in peso ed in volume dei costituenti della pasta indurita:

1. $W_n = 0.23 mc$ in cui W_n è il peso dell'acqua chimicamente legata (od anche acqua non-evaporabile), m la porzione di cemento idratato e c il peso del cemento in grammi.
2. Il volume dell'acqua legata è pari a $0.172 mc$ (cm^3).
3. Il volume delle particelle di gel $0.489 mc$ (cm^3) (volume cemento idratato+acqua necessaria).
4. Volume del gel $0.68 mc$ (cm^3) (volume delle particelle e dei pori del gel).
5. Il volume dei pori capillari è pari a $W_0 - 0.36mc$ con W_0 volume dell'acqua d'impasto.

La quantità di cemento presente nel calcestruzzo e grado di idratazione sono parametri importanti non solo per resistenza meccanica; essi determinano la permeabilità e la porosità del calcestruzzo e la quantità d'acqua rilasciata nel processo di deidratazione che si attiva oltre i 105 °C.

L'aggregato

Teoricamente sarebbe possibile confezionare murature impiegando la sola pasta di cemento, che allo stato indurito possederebbe prestazioni meccaniche sufficienti a sopportare carichi impegnativi, ma nella pratica ciò sarebbe impensabile. Le strutture così realizzate sarebbero antieconomiche, soggette a meccanismi di degrado promossi da agenti chimici esterni, sarebbero soggette a forti ritiri dovuti ai cambiamenti termo-igrometrici, e presenterebbero grossi problemi nello smaltimento del calore di idratazione che causerebbe rilevanti fessurazioni del manufatto.

Tali problemi vengono aggirati sostituendo nella produzione del calcestruzzo parte della pasta con gli aggregati (anche noti come inerti). Una lista di rocce impiegabili come aggregato è riportata in *Tabella 2*.

Tabella 2 Caratteristiche di rocce impiegabili come aggregato

Name	Symbol	Geological origin	Composition	Density (kg/m ³)	Mean grain size (mm)
Anorthosite	AN	Igneous	Almost all plagioclase feldspars	2700	0.5
Diabase	DI	Igneous	Mainly plagioclase feldspars and pyroxenes	2960	0.5
Dolomite	DO	Sedimentary	Carbonate group	2830	0.01
Dunite	DU	Igneous	Almost all olivines	3250-3270	1.0
Gabbro	GA	Igneous	Mainly plagioclase feldspars, pyroxenes and olivines	2860-2880	3.0
Gneiss	GN	Metamorphic	Layered mineral, mainly feldspar and quartz	2640	0.2
Granite-1	GR-1	Igneous	Mainly potash feldspars and quartz	2610	1.5-2.0
Granite-2	GR-2	Igneous	Mainly potash and plagioclase-feldspars, quartz	2640	0.5
Hypersthene	HY	Igneous	Pyroxene group	3290	2.0
Limestone	LI	Sedimentary	Carbonate group, mainly calcite	2610	0.001-0.01
Obsidian	OB	Igneous	Glassy potash feldspar and quartz	2440	
Pyrex	PY	Artificial		2230	
Quartz monzonite	QM	Igneous	Mainly potash and plagioclase-feldspars and quartz	2640	1.0
Quartzitic sandstone	QS	Sedimentary	Mainly quartz	2640-2650	0.3
Slate	SL	Metamorphic	Layered clay minerals	2760	

La norma UNI 8520 stabilisce i requisiti minimi degli aggregati. Essa individua tre gruppi di criteri di accettazione in funzione della classe di resistenza prevista per il calcestruzzo da produrre; i principali parametri considerati sono:

- l'assenza di impurità dannose al calcestruzzo (impurità minerali, grumi di argilla, cloruri, solfati, particelle leggere, sostanze organiche, etc.);
- la distribuzione granulometrica ed il contenuto di frazioni fini;
- l'assorbimento d'acqua, la stabilità alle aggressioni chimiche ed all'azione del gelo;
- la forma;
- la resistenza meccanica.

Le prestazioni del calcestruzzo influenzate dagli aggregati sono le seguenti:

- proprietà reologiche del calcestruzzo fresco (lavorabilità);
- proprietà elasto-meccaniche del calcestruzzo indurito;
- proprietà termo igrometriche del calcestruzzo indurito;
- cinetica di idratazione del cemento, tempi di presa e di indurimento.

Se l'aggregato non supera i 4-5 mm prende il nome di sabbia; se è formato da granuli più grossi è chiamato ghiaia (di origine alluvionale e di forma tondeggiante), pietrisco (se proveniente dalla frantumazione di roccia e di forma irregolare).

Per la valutazione della distribuzione granulometrica ottimale per il confezionamento del calcestruzzo nel caso di calcestruzzi con consistenza plastico-fluida e dosaggi relativamente elevati, trova impiego la curva di Fuller e Thompson modificata:

$$P = \frac{\left[100 \sqrt{\left(\frac{d}{D} \right) - C} \right]}{(100 - C)} \times 100$$

con:

$$C = \frac{c}{c + \text{Agg}}$$

dove: P è il passante percentuale al setaccio di apertura d;
 D è il diametro massimo dell'aggregato di maggiori dimensioni;
 c la massa di cemento per metro cubo di impasto;
 Agg la massa degli aggregati per metro cubo di impasto.

Il mix-design

Per mix-design s'intende il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste e cioè dalla lavorabilità del calcestruzzo fresco, dalla resistenza meccanica e dalla durabilità del manufatto.

Le fasi sono articolate come segue:

1. determinazione del quantitativo d'acqua (a) in funzione della lavorabilità, dal tipo di inerte (tondeggiante o frantumato) e dalla sua dimensione, oltre che dall'uso di additivi fluidificanti;
2. fissato il tipo e la classe di resistenza del cemento e la resistenza del calcestruzzo indurito attesa si determina il rapporto acqua cemento;
3. il rapporto acqua cemento (a/c) deve tener conto inoltre dalla durabilità del conglomerato indurito in relazione al grado di aggressione ambientale (classe di esposizione) oltre che dell'aggiunta di aria per contrastare la formazione di ghiaccio;
4. si calcola il valore la quantità di cemento (c) fissato (a) e quindi il volume dell'inerte V_i per differenza tra il volume del

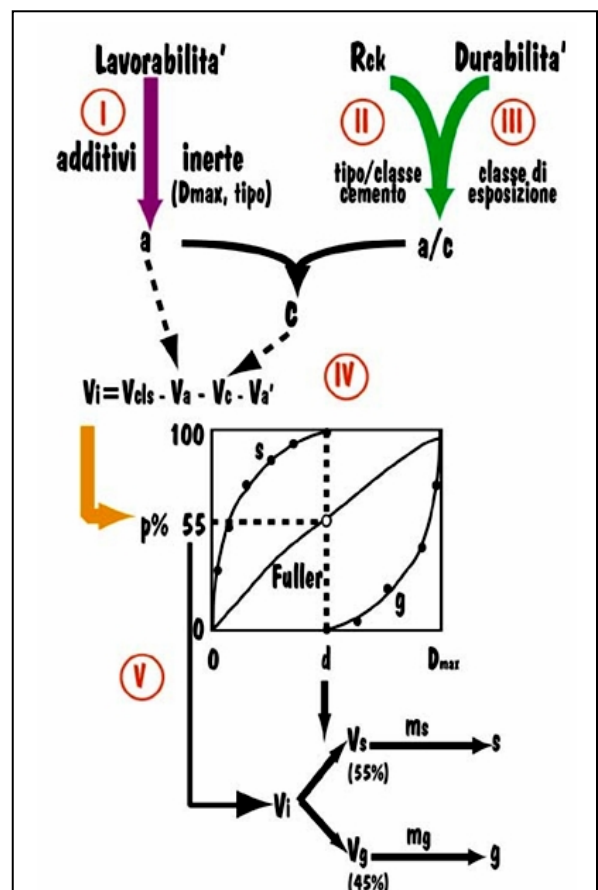


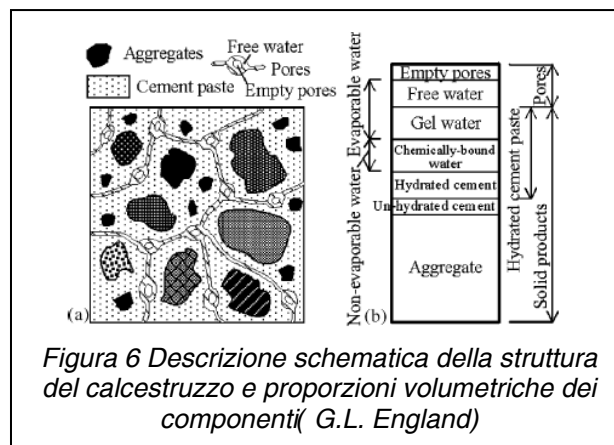
Figura 5 Schematizzazione delle 5 fasi del mix-design (Colleparidi)

- calcestruzzo V_{cls} e quello degli altri ingredienti (acqua cemento ed aria);
- il volume dell'inerte viene ripartito in quello dei singoli inerti (sabbia e ghiaia) in base alla curva granulometrica prescelta (es. Fuller e Thompson modificata) e si arriva quindi alla determinazione delle rispettive masse volumiche m_s e m_g .

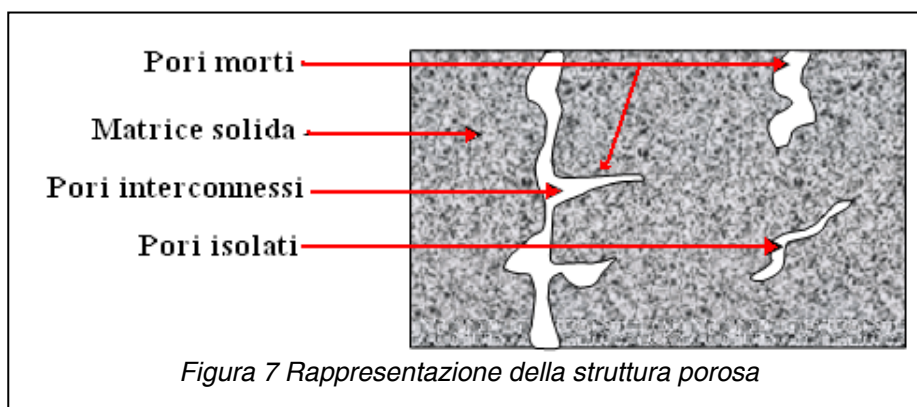
Struttura del calcestruzzo indurito

La struttura finale del calcestruzzo (pasta e aggregato) è rappresentata schematicamente in *Figura 6*.

L'aggregato è disperso in una matrice solida costituita dalla pasta, al cui interno si presenta una rete di canalicoli che connettono la porosità parzialmente sature di acqua libera.

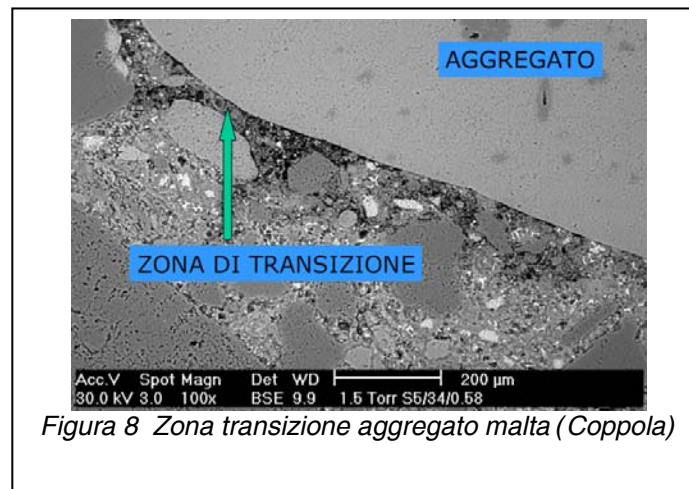


La porosità totale del calcestruzzo è prevalente nella pasta, anche se il contributo associato all'aggregato può essere non trascurabile. Essa si distingue in porosità interconnessa che partecipa ai fenomeni di trasporto, porosità morta che partecipa all'accumulo di umidità ma non da contributo alla permeabilità e porosità isolata (*Figura 7*).



Oltre alle fasi solide propriamente dette a getto avvenuto possono comparire all'interfaccia pasta aggregato zone porose e meccanicamente più deboli (ITZ- Interfacial transition zone) dovute alla risalita di acqua (bleeding); tali zone (*Figura 8*) esercitano un'influenza sulle proprietà del materiale composto significativamente maggiore di ciò che ci si attenderebbe dalle sue dimensioni ridotte (poche decine di

hm); contribuiscono inoltre ad incrementare la permeabilità del materiale con conseguenze quindi sulla durabilità del manufatto.



Le prestazioni elasto-meccaniche (resistenza meccanica a compressione e trazione e modulo elastico), le variazioni dimensionali determinate da carichi agenti e dalle condizioni igrometriche e termiche ambientali (deformazione viscosa, ritiro e dilatazione termica) e la durabilità dipendono dalla natura e dalla morfologia dei prodotti di idratazione. Per predire con sufficiente accuratezza le prestazioni della pasta e quindi del calcestruzzo si può ricorrere al modello di Feldman e Sereda.

Secondo tale modello il legame che tiene unite le varie particelle nasce dal contatto solido-solido in un numero limitato di punti della struttura filamentose del CSH (punti A di *Figura 9*). L'acqua presente negli spazi interstici (punti X), deve intendersi appartenente alla struttura solida che contribuisce attivamente alla rigidità della struttura e non semplicemente come acqua che riempie i pori del gel. Sulla superficie dei (punti O) è presente l'acqua assorbita fisicamente, mentre nel resto dei pori capillari si ha l'acqua cosiddetta libera in quanto esente da qualsiasi influenza rappresentata dalle forze di attrazione esercitate dalle superfici dei pori stessi.

L'interstiziale gioca un ruolo importante nella conduzione termica della pasta, ma come vedremo se fuoriesce dal gel difficilmente può essere reintegrata idratando il calcestruzzo e ne consegue quindi che il calcestruzzo risa turato ha conducibilità inferiore a quello vergine.

Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP1 - 010	0	L	16	122

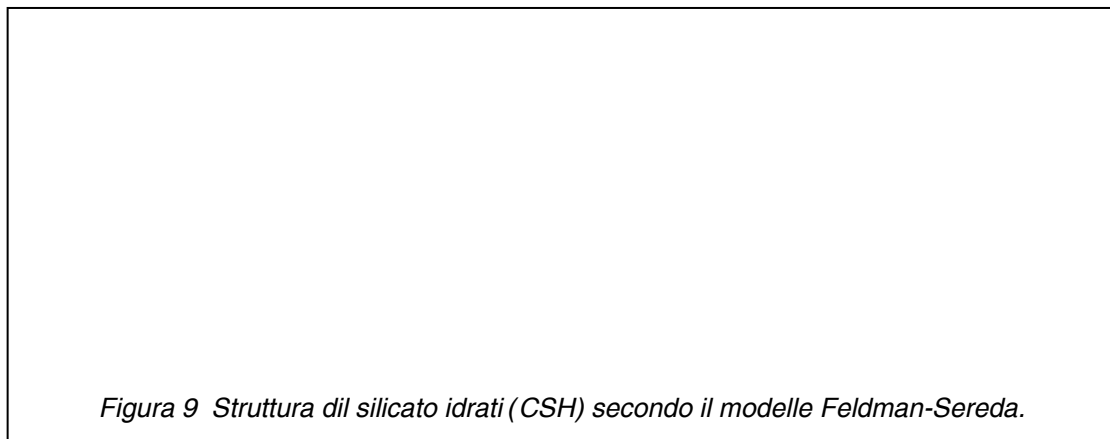


Figura 9 Struttura del silicato idrati (CSH) secondo il modello Feldman-Sereda.

La contrazione di volume del calcestruzzo dipende dall'evaporazione dell'acqua presente nella matrice cementizia verso l'ambiente esterno, ciò è ancor più accelerato in presenza di un riscaldamento (es. incendio, assorbimento di radiazione per schermi nucleari ...). La perdita di acqua libera presente nei pori determina solo modeste contrazioni nella pasta di cemento in conseguenza della modesta intensità delle forze capillari esercitate dall'acqua sullo scheletro solido.

Ben più elevati valori assume invece il ritiro quando per effetto di una prolungata esposizione all'ambiente secco o ad elevate temperature, l'evaporazione interessa sia l'acqua adsorbita che quella interstratica *Figura 10*.

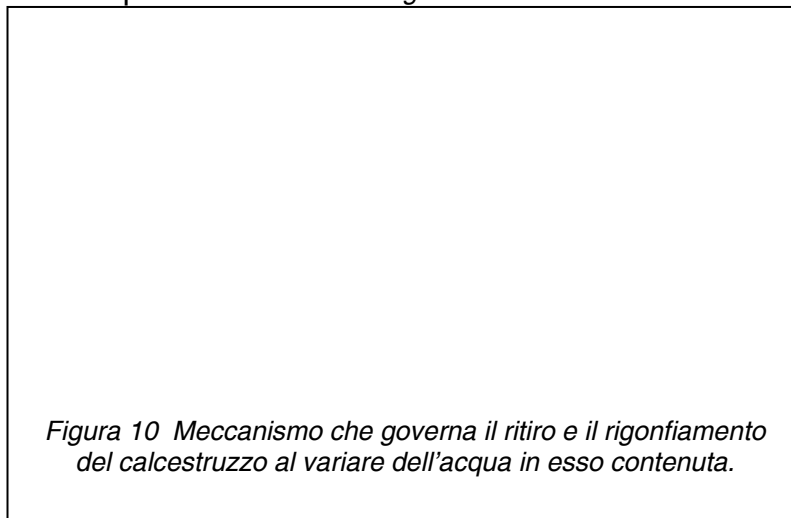


Figura 10 Meccanismo che governa il ritiro e il rigonfiamento del calcestruzzo al variare dell'acqua in esso contenuta.

In *Figura 11* si hanno le relazioni intercorrenti tra i vari parametri caratteristici del calcestruzzo visto come mezzo poroso, ove:

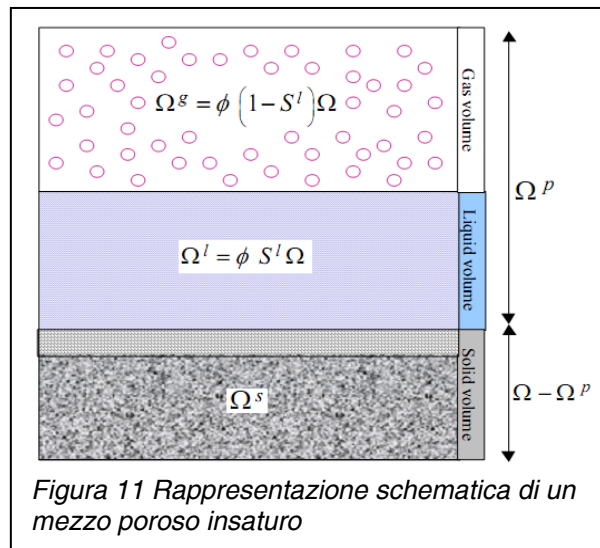
Ω è un volume elementare del calcestruzzo (REV);

Ω_p il volume dei pori;

F la porosità definita come rapporto tra Ω_p e Ω ;

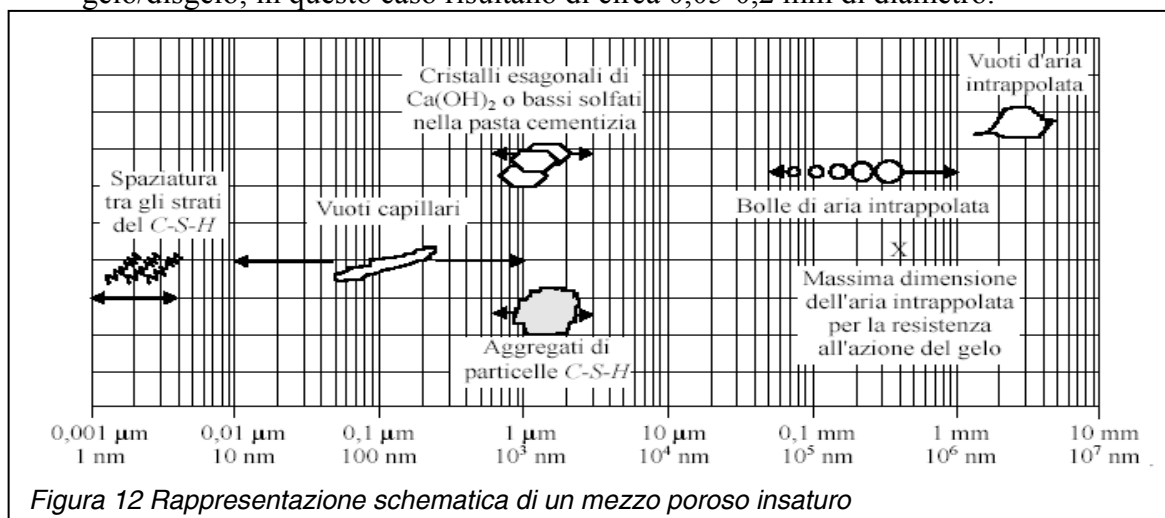
S_l la frazione dei liquidi nei pori (nota anche col nome di saturazione).

S_g la frazione dei pori occupata dal gas (aria e vapore).



Le dimensioni dei pori della pasta idratata sono rappresentati in *Figura 12*:

- i pori nel gel C-S-H hanno dimensioni da qualche frazione di nm a qualche nm; sono troppo piccoli per influenzare la durabilità del calcestruzzo o le sue proprietà protettive nei confronti delle armature;
- i pori capillari hanno diametri da 10 a 50 nm, se il calcestruzzo è ben idratato e prodotto con bassi rapporti acqua/cemento, ma possono arrivare fino a 3-5 μm se il calcestruzzo è ottenuto con alti rapporti a/c o presenta un basso grado di idratazione;
- i pori o vuoti dovuti all'inglobamento d'aria: questi vuoti possono essere introdotti accidentalmente per effetto di vortici durante la miscelazione o in seguito a difettoso costipamento e allora possono avere dimensioni fino a qualche mm. Viceversa possono, come già accennato, essere aggiunti intenzionalmente con l'aiusilio di agenti tensioattivi all'impasto in modo da conferire al calcestruzzo resistenza all'azione del gelo/disgelo; in questo caso risultano di circa 0,05-0,2 mm di diametro.



Altro parametro geometrico, importante per il trasporto di massa, è la tortuosità definita secondo Carman come:

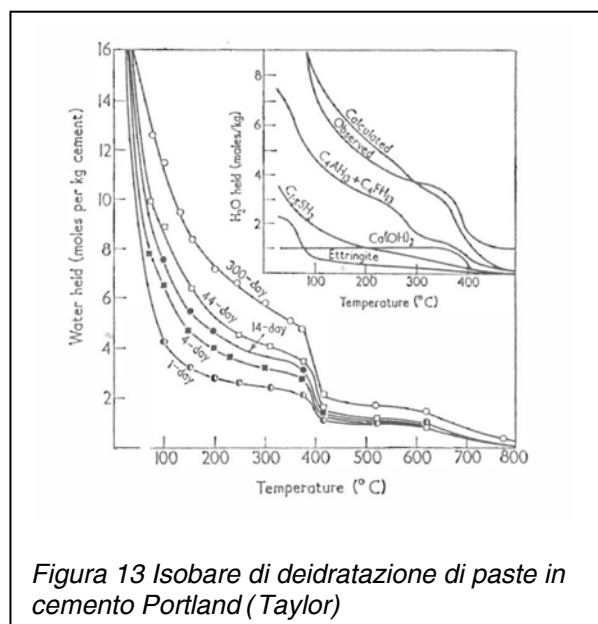
$$T=(L_e/L)^2$$

dove: L_e è la lunghezza effettiva percorsa dal fluido che attraversa un materiale di lunghezza L .

Effetto della temperatura sulla microstruttura del calcestruzzo

Sotto ponendo la pasta indurita ad un'analisi termogravimetrica si può stimare la quantità di acqua rilasciata in funzione della temperatura. In Figura 13 riportano i risultati osservati da Taylor su una pasta di cemento Portland. Gran parte dell'acqua fuoriesce a temperatura inferiori a 100 °C. Le analisi sono state condotte su paste con diverso grado di maturazione da un giorno a 300 giorni; le paste con maturazione maggiore evidenziano una minor perdita d'acqua (acqua libera) sotto i 100°C.

La variazione di pendenza intorno ai 400°C è legata alla dissociazione dell'idrossido di calcio noto anche con il nome di portlandite.



La perdita di stabilità della fase solida di un calcestruzzo quando esposto a temperatura influisce sulla sua struttura dei pori. I cambiamenti fisici e chimici nella fase solida inducono cambiamenti sulla distribuzione dimensionale dei pori e sulla porosità totale. Noumowe [11] ha fornito la distribuzione dei pori per differenti livelli di temperature per un calcestruzzo ordinario (NC) scaldato fino a 600°C (Figura 14). Si può vedere che il volume totale di un calcestruzzo riscaldato non cresce linearmente con l'aumentare della temperatura (Figura 15). A 300°C, si ha un relativamente piccolo incremento nel volume dei pori in comparazione alla perdita di peso.

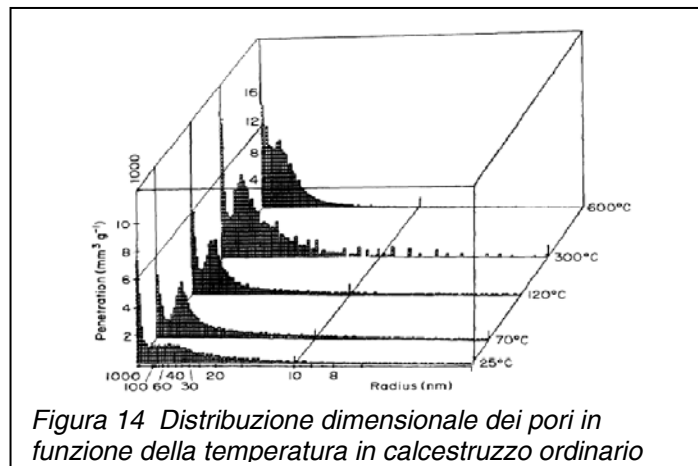


Figura 14 Distribuzione dimensionale dei pori in funzione della temperatura in calcestruzzo ordinario

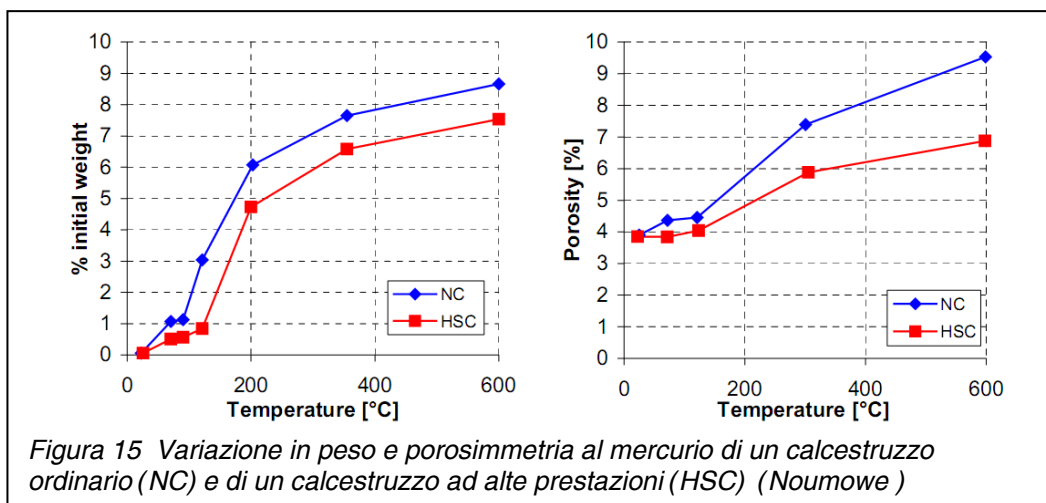


Figura 15 Variazione in peso e porosimetria al mercurio di un calcestruzzo ordinario (NC) e di un calcestruzzo ad alte prestazioni (HSC) (Noumowe)

Dai risultati sperimentali anche di altri autori (Schneider [12]) emerge che la dipendenza dalla temperatura della porosità può essere approssimata da una relazione del tipo:

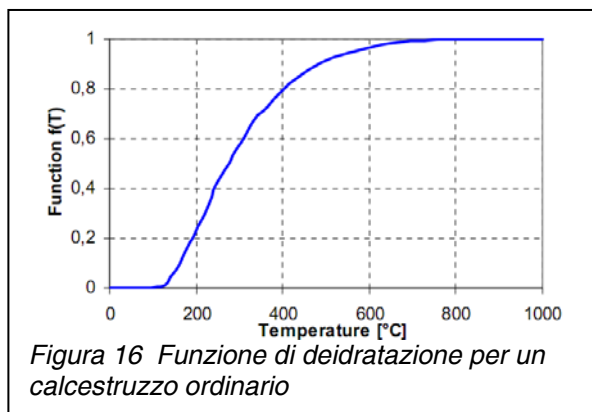
$$F(T) = F_0 + A_F(T - T_0)$$

La quantità di acqua che è rilasciata dalla deidratazione m_{dehydr} (Kg per m³ di calcestruzzo) quando si raggiungono varie temperature è stata ottenuta sperimentalmente da misure di perdita di peso e può essere espressa in accordo con Bazant [7] come:

$$m_{\text{dehydr}}(T) = m_{\text{hydr}}(105^\circ\text{C}) f(T)$$

in cui la $f(T)$ è una funzione del tipo riportato in Figura 16.

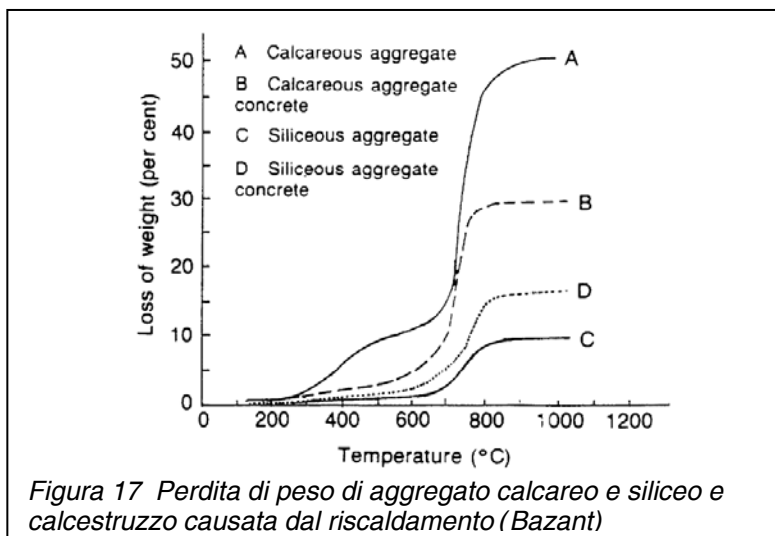
Occorre sottolineare che il rilascio di acqua è quasi istantaneo con il raggiungimento di una data temperatura e raffreddando di nuovo il calcestruzzo non si ha una reidratazione se non in tempi molto lunghi e molto parziale.



Le reazioni occorrenti nel calcestruzzo, insieme con i ranges di temperatura, i calori di reazione e trasformazione e le quantità reagenti sono stati analizzati da Schneider (Tabella 3) con l'impiego della DTA (Differential Thermal Analysis).

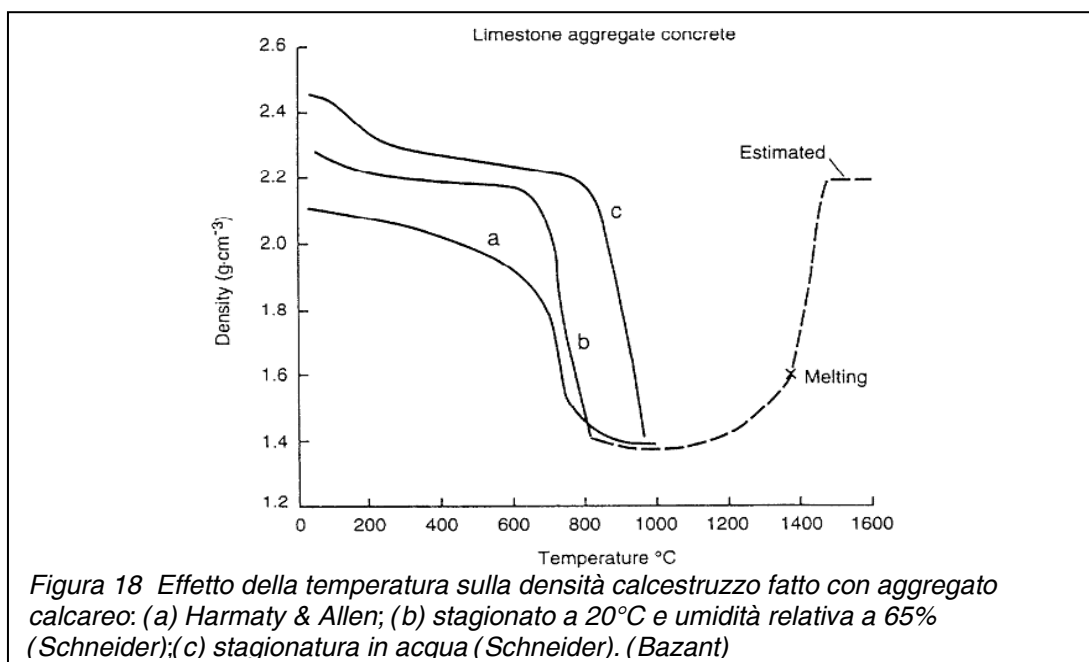
Tabella 3 Reazioni di trasformazione e decomposizione di calcestruzzi quarziticci e calcarei

Temperature range (°C)	Transformation or decomposition reaction	Heat of reaction or transformation (kJ/kg)	Heat of reaction or transformation (MJ/m ³ concrete)	Reacted quantity (kg/m ³ concrete)
30– 120	Evaporation of physically bound water	Heat of evaporation of water: 2258	290	130 kg water
30– 300	Breakdown of gel, first stage of dehydration	Heat of hydration: 250	20	< 78 kg hardened cement paste
120– 600	Release of zeolitically bound or chemisorbed water	Heat of evaporation of water: 2258	135	60 kg water
450– 550	Decomposition of portlandite $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	1000	< 40	< 40 kg
570	Transformation of quartz $\alpha \rightarrow \beta \text{SiO}_2$	Quartzitic: 5.86 Limestone: 5.90	8.8 1.2	1500 kg quartz 200 kg quartz
600– 700	Decomposition of the CSH-phases; formation of $\beta\text{-C}_2\text{S}$	Heat of hydration: 500	120	< 240 kg hardened cement paste
600– 900	Only limestone: decarbonation of the limestone	Heat of decomposition: 1637	2360	1600 kg limestone: CaCO_3 -proportion 90%
from 1100–1200	Melting of concrete, formation of vitreous substances	Melting heat: 500–1000	Quartzitic: 1575 Limestone: 1125	2100 kg concrete 1500 kg concrete



Le curve A e C in *Figura 17* mostrano la perdita di massa in funzione della temperatura per, rispettivamente, un aggregato calcareo, contenente carbonati, e aggregato siliceo, contenente silice.

La rilevante perdita di massa per l'aggregato carbonatico è dovuta alla dissociazione del carbonato che comporta la produzione di CO₂. Le curve B e D corrispondono a calcestruzzi confezionati con i due tipi di aggregati.



Il cambiamento di densità con la temperatura per aggregato calcareo di *Figura 18*, mostra nei risultati ottenuti da Schneider che tra 20 e 150°C il cambiamento di densità è condizionato dalle condizioni di stagionatura del calcestruzzo. Tra 600 e 900°C la forte riduzione di densità è imputata alla decarbonatazione. Oltre i 1000°C sinterizzazioni e poi la fusione del calcestruzzo portano la densità a risalire.

Effetto sulle proprietà termiche del calcestruzzo

L'evoluzione e la distribuzione della temperatura in qualsiasi struttura è governata dalle proprietà termiche del materiale, in particolare, dalla capacità termica e la conducibilità termica. Nel caso del calcestruzzo, è più difficile determinare queste proprietà a causa dei numerosi fenomeni che occorrono simultaneamente all'interno della microstruttura e che non possono essere separati facilmente. Questi effetti, come già accennato, includono la variazione della porosità, del contenuto di umidità, tipo e quantità dell'aggregato, cambiamenti nella composizione chimica o di fase che richiedono cessioni od assorbimenti di calore.

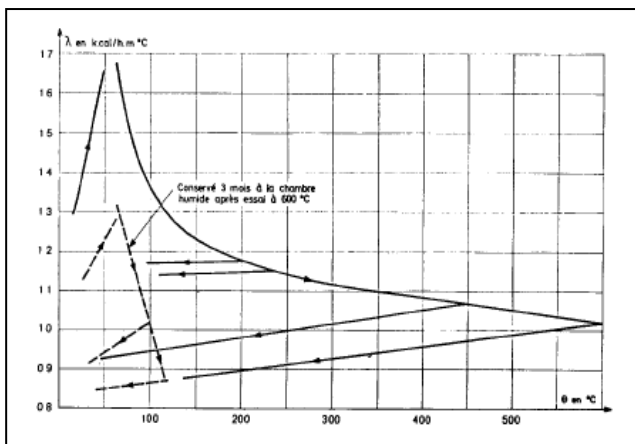


Figura 19 Variazione della conduttività termica in funzione della temperatura (Marechal)

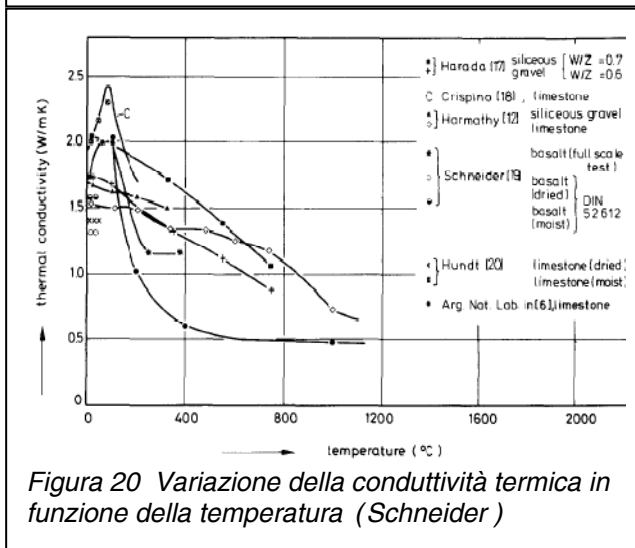


Figura 20 Variazione della conduttività termica in funzione della temperatura (Schneider)

Marechal Figura 19 ha condotto una serie di misure di conducibilità su calcestruzzi con uno strumento appositamente costruito presso il CEBTP, che richiede solo lievi gradienti di temperatura; le misure sono condotte a differenti temperature e all'equilibrio termodinamico. Va notato che la conducibilità fino a 70°C è crescente, poi decrescente e temperature superiori.

La prima parte della curva corrisponde all'aumento di conducibilità del cemento, dell'acqua e dell'aria, conducibilità che cresce quanto più la fase vapore contenuta nei pori e nei capillari del calcestruzzo entra in convezione. Aldilà di 70°C, la fuoriuscita di acqua produce una diminuzione importante di conducibilità. Se dopo aver raggiunto una certa temperatura, si misura la conducibilità riducendo la temperatura, i valori trovati si allineano su di una retta. Quindi il primo riscaldamento come già accennato modifica l'equilibrio termo-igrometrico interno e come conseguenza la conducibilità.

Marechal ha inoltre verificato che malgrado una riuniformazione importante dei provini trattati, non si torna ad avere la conducibilità iniziale e ciò a causa della distruzione di un gran numero di legami interstiziali che non possono più essere ripristinati.

Schneider, in *Figura 20* comparando tests condotti da vari ricercatori, mostra come i valori misurati sono compresi in un vasto range su l'intero campo di temperature esplorate.

Schneider ribadisce che importanti fattori che influenzano la conducibilità sono: l'aggregato, la pasta indurita, il volume dei vuoti e la distribuzione e il contenuto di acqua; oltre a ciò, sottolinea che i risultati risentono del metodo di misura e dall'interpretazione degli stessi.

Nell'Eurocodice 2 e 4 si adotta un compromesso facendo variare la conducibilità di un calcestruzzo ordinario tra un limite inferiore e superiore dato dalle relazioni di seguito riportate:

$$\lambda = 2 - 0.2451(T/100) + 0.0107(T/100)^2 \quad (\text{limite superiore})$$

$$\lambda = 1.36 - 0.136(T/100) + 0.057(T/100)^2 \quad (\text{limite inferiore})$$

Nel codice HITECOSP2, basato sul modello Schrefler, sviluppato in ENEA in collaborazione con l'Università di Padova ([13][14] e [15]) si è utilizzata la seguente correlazione:

$$\lambda = \lambda_d \left(1 + 4 \frac{S_l \phi \rho_l}{(1 - \phi) \rho_s} \right)$$

dove S_l è la saturazione, ρ_l e ρ_s le densità del liquido e della parte solida, ϕ la porosità, λ_d la conducibilità del materiale secco calcolata con la relazione seguente:

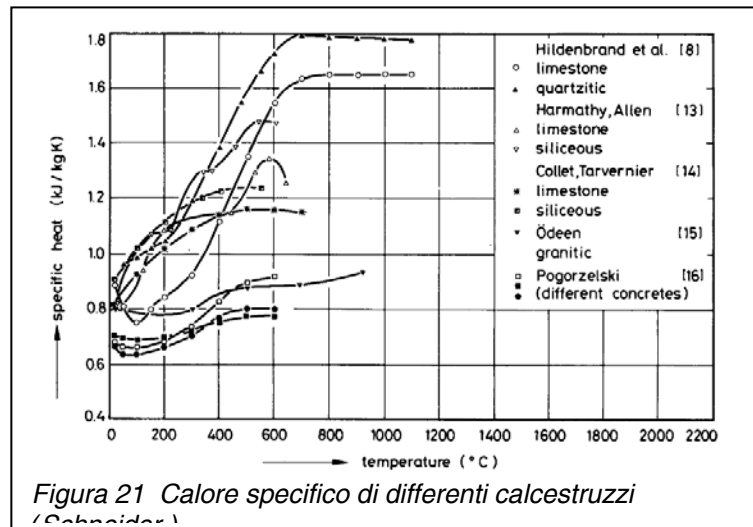
$$\lambda_d = \lambda_{d0} (1 - A_1 (T - T_0))$$

In cui λ_{d0} è la conducibilità del secco alla temperatura T_0 e A_1 un opportuno coefficiente.

Wittman ha proposto in funzione del contenuto di umidità la relazione seguente:

$$\lambda = \lambda_d + \frac{W}{W_0} (\lambda_0 - \lambda_d)$$

In cui W è il contenuto di umidità corrente e W_0 quello iniziale, e λ_0 conducibilità solido umido .



In *Figura 21* Schneider confronta i calori specifici di calcestruzzi calcarei, quarzitici, silicei e granitici. Il calore specifico è incrementato dalla presenza di acqua ($C_p=4.1868 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$); inoltre le reazioni che accadono ad alte temperature, di tipo prevalentemente endotermico, causano un apparente incremento del calore specifico.

Conclusioni

La struttura dei calcestruzzi e per conseguenza le caratteristiche termiche ad esse associate possono variare in un ampio spettro in dipendenza del mix del calcestruzzo e delle condizioni di stagionatura e della successiva permanenza nell'ambiente operativo del manufatto; a ciò spesso si aggiungono difficoltà nell'utilizzo di dati provenienti da vari sperimentatori con tecniche non ancora standardizzate. Ciò non consente di individuare correlazioni per le proprietà valide sempre e in un range esteso di temperature. Va inoltre tenuto conto che spesso i comportamenti fisici introdotti nei modelli spesso non si accordano completamente con le grandezze sperimentali. E' inoltre difficile lo sviluppo di un modello valido anche per le alte temperature, come è mostrato dal quadro molto complesso oltre i 600°C illustrato da Schneider. Tenuto peraltro tali temperature in campo nucleare potrebbe essere raggiunto solo in eventi estremi quali lo sversamento del corium fuso, mentre temperature molto più contenute si hanno nei calcestruzzi di schermaggio e di contenimento o nei contenitori per la conservazione di rifiuti radioattivi, appare ragionevole tarare un modello per temperature $400\text{-}550^\circ\text{C}$. Ciò risulterebbe utile anche in altri settori dell'ingegneria energetica in cui i calcestruzzi che possono trovarsi ad operare anche volutamente come nel caso di elementi per l'accumulo termico abbinato a fonti rinnovabili a tali temperature.

Bibliografia-Parte I

- [1] M. Collepari –*Il nuovo calcestruzzo*– Quarta Edizione;Edizioni Tintoretto;2006
- [2] L. Coppola –*Concretum*– McGraw-Hill;2007
- [3] J. Baron,J.P. Ollivier –*La durabilité des bétons*– Ponts et chaussées;1992
- [4] A.M. Neville–*Properties of concretes*– Fourth Edition;Longman;1992
- [5] M. Collepari –*Scienza e tecnologia del calcestruzzo*–Terza edizione;Hoepli;1991
- [6] J.Kropp, H.K. Hilsdorf–*Performance criteria for concrete durability*– RILEM Report 12;1995
- [7] Z.P. Bazant, M.F. Kaplan-*Concrete at high temperature*-Longman;1996
- [8] Y. Ichikawa, G.L. England, *Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures*, Nuclear Engineering and design 228 245–259;2004
- [9] D.R. Flynn, *Response of high performance concrete to fire conditions: Review of thermal property data and measurement techniques*, NIST GCR 99-767;1999
- [10] J.C. Maréchal, *Contribution à l'Etude des Propriétés Thermiques et mécaniques du Béton en fonction de la Température*, Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics No. 274 (Oct. 1970), p. 121.
- [11] A. Noumowe, *Effet de hautes temperatures (20-600 °C) sur le béton – Cas particulier du béton à hautes performance; Thèse de Génie Civil. I.N. S.A. Lyon;1995;*
- [12] M. Schneider, H.J. Herbst, *Permeabilitaet und Porositaet von Beton bei hohen Temperaturen*, Deutscher Ausschuss Stahlbeton, 403;1989
- [13] F.Pesavento, G.M. Giannuzzi- *HITECOSP2-Theoretical Manual* - ENEA-UNIPD; 2006
- [14] F.Pesavento,G.M. Giannuzzi- *HITECOSP2- User Guide* - ENEA-UNIPD; 2006
- [15] F.Corsi, G.M.Giannuzzi, G.Khoury, C.Majorana, B.Schrefler, P.Kalifa, M.Cheyrezy, M. Behloul, B.Aarup, *Scientific Summary of the HITECO Research BRITE Programme*,ACI Int Conf on “State-of-the-art in high performance concrete” Chicago;1999
- [16] G.M.Giannuzzi, *Heat and Mass Transfer in Concrete at High Temperature: Theoretical Manual of HTCTTRAN procedure*, ENEA CT-SBE-00014;1998
- [17] G.M.Giannuzzi, *Validation of HTCTTRAN procedure*, ENEA CT-SBE-00012;1998

ALLEGATO 1

'DEBPROC' HTCTRAN N_PAS*'ENTIER' NN_PAS*'ENTIER' N_ITER*'ENTIER'
T_PAS*'FLOTTANT' MODL1*'MMODEL' TAV1*'TABLE' ;

.....

*-----

* Heat convection term

*-----

TTTT ='NOMC' 'T' TTT;

PPPP ='NOMC' 'T' PPP;

GRAP='GRAD' MODL1 PPPP;

GRAT='GRAD' MODL1 TTTT;

~~GRATX = 'EXCO' FF1 GRAT 'SCAL';~~

~~GRATY = 'EXCO' FF2 GRAT 'SCAL';~~

~~GRAPX = 'EXCO' FF1 GRAP 'SCAL';~~

~~GRAPY = 'EXCO' FF2 GRAP 'SCAL';~~

GRATX='MANU' 'CHML' MODL1 'SCAL' ('EXCO' FF1 GRAT 'SCAL') RIGIDITE;

GRATY='MANU' 'CHML' MODL1 'SCAL' ('EXCO' FF2 GRAT 'SCAL') RIGIDITE;

GRAPX='MANU' 'CHML' MODL1 'SCAL' ('EXCO' FF1 GRAP 'SCAL') RIGIDITE;

GRAPY='MANU' 'CHML' MODL1 'SCAL' ('EXCO' FF2 GRAP 'SCAL') RIGIDITE;

ZZZZ1 = 'CHAN' 'NOEUD' MODL1 GRAPX;

GRAPCX = 'CHAN' 'CHPO' MODL1 ZZZZ1;

ZZZZ2 = 'CHAN' 'NOEUD' MODL1 GRAPY;

GRAPCY = 'CHAN' 'CHPO' MODL1 ZZZZ2;

~~GRAPTX = MODL1 GRAPX * GRATX;~~

~~GRAPTY = MODL1 GRAPY * GRATY;~~

LM1= 'MOTS' 'SCAL' 'SCAL';

LM2= 'MOTS' 'SCAL' 'SCAL';

LM3= 'MOTS' 'SCAL' 'SCAL';

GRAPTX = MODL1 GRAPX * GRATX LM1 LM2 LM3;

GRAPTY = MODL1 GRAPY * GRATY LM1 LM2 LM3;

GRAPTXY = GRAPTX + GRAPTY;

ZZZZ3 = 'CHAN' 'NOEUD' MODL1 GRAPTXY;

GRAPTCXY = 'CHAN' 'CHPO' MODL1 ZZZZ3 ;

*---> - cw * a/g * grad p * grad t

.....

'FINPROC' TAV1;

PARTE II:


INTRODUZIONE ALLE PROBLEMATICHE TERMOMECCANICHE E ALL'UTILIZZO DEL SISTEMA DI CALCOLO AGLI ELEMENTI FINITI CAST3M

Sommario

Tra le attività iserite, nel nuovo accordo di cooperazione tra CEA ed ENEA relativo al sistema di calcolo CAST3M si prevede la diffusione del sistema sia all'interno dell'ente che al suo indotto esterno. Ciò non costituisce solo un ritorno d'immagine per il CEA, ma è essenziale per la crescita dello strumento sia in termini di affidabilità che di sviluppo di potenzialità di analisi, cosa che il solo uso diffuso su problematiche e settori differenziati può garantire. Si riporta di seguito il materiale appositamente presentato nel recente corso di formazione tenutosi presso il centro ENEA della Casaccia nel giugno 2010. Tale materiale è stato opportunamente ampliato e rivisto in modo da costituire un documento base per un primo approccio al Sistema CAST3M.

Il corso è articolato come segue:

- Nozioni di meccanica del continuo: relazione spostamenti-deformazione, stato tensionale, equazioni del problema termoelastico disaccoppiato, principio dei lavori virtuali.
- Proprietà fisiche AISI-316SS secondo ASME Sez. III, Div.1-NH, origine degli stresses termici, shock e fatica termica, effetti termo-meccanici nella rifusione di tappi di sali a base di nitrati in piping.
- Nozioni sul metodo degli Elementi Finiti in campo termico e meccanico: definizione degli operatori base per il calcolo delle rigidità vincolari e del materiale, valutazione dei carichi equivalenti.
- Schema generale di un'applicazione del f.e.m., organizzazione del processo di calcolo, linee guida generali per la conduzione di analisi f.e.m..
- Introduzione al sistema di calcolo CAST3M, campi di applicazione, il linguaggio GIBIANE, struttura degli oggetti e degli operatori, operatori per il controllo dei cicli e dei salti condizionati, costruzione di algoritmi complessi (procedure).
- Esempi applicativi: generazione di magliature e visualizzazioni grafiche, barre con differente profilo termico, effetto dell'infittimento della maglia (test NAFEMS), riscaldamento formazione petrolifera (transitorio termico), configurazione al montaggio linea ricevitore di un collettore solare parabolico (non linearità geometrica), transitorio termomeccanico con defocalizzazione naturale e arresto di portata sali fusi nel ricevitore solare.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP1 - 010	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 28	di 122
--	---	------------------	----------------------	-------------------	------------------

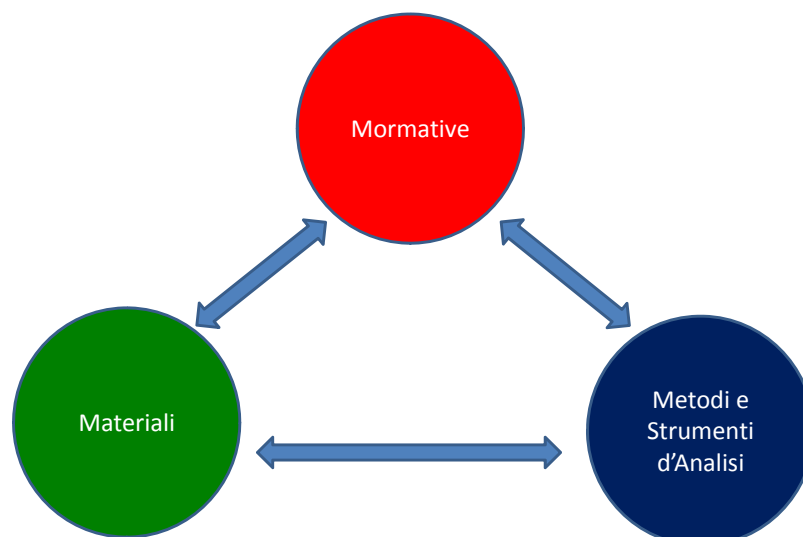
Materiale oggetto del corso

TERMOMECCANICA parte I

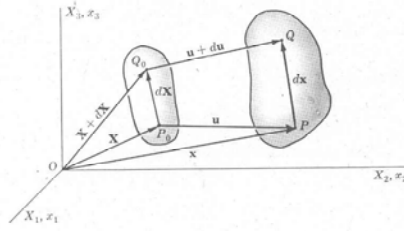
Aspetti generali di meccanica del continuo
finalizzati alla progettazione
termomeccanica

Ing. G.M. Giannuzzi
 ENEA –UTRINN-PCI
 C.R. Casaccia (Roma)

Conoscenze di base nella progettazione
termomeccanica



Relazione deformazione – spostamento



$x = x(X, t)$ formulazione lagrangiana

$X = X(x, t)$ formulazione euleriana

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ z \end{bmatrix}$$

$$(dx)^2 - (dX)^2 = \begin{matrix} \nearrow 2L_{ij}dX_i dX_j \\ \searrow 2E_{ij}dx_i dx_j \end{matrix}$$

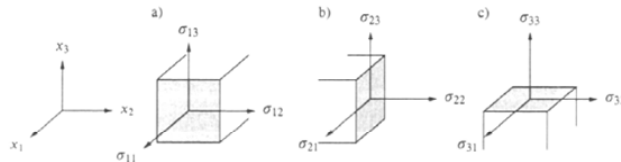
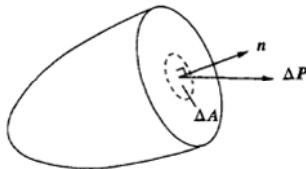
$$L_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)$$

Per spostamenti e gradienti
abbastanza piccoli

$$l_{ij} = e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Stato tensionale



$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} i_1^T \\ i_2^T \\ i_3^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Sim.

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} - \sigma & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma \end{vmatrix} = 0$$

$$\sigma_{e-TR} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \sigma_{e-VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$$

Termo-elasticità Lineare

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(m)} + \varepsilon_{ij}^{(th)} \quad \text{Deformazione totale}$$

$$\varepsilon_{ij}^{(th)} = \alpha(T - T_0) \delta_{ij} \quad \text{Deformazione termica}$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2\mu} \left(\sigma_{ij} - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right) + \alpha(T - T_0) \delta_{ij} \\ \sigma_{ij} &= \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\varepsilon_{ij} - (3\lambda + 2\mu) \alpha(T - T_0) \delta_{ij} \end{aligned} \right\} \text{Legge di Hooke}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{E}{2(1 + \nu)} \\ \lambda &= \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \end{aligned} \right\} \text{Costanti Lamé}$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{c}} : \underline{\underline{\varepsilon}} \quad \sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Stiffness tensor

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{s}} : \underline{\underline{\sigma}} \quad \varepsilon_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl}$$

Compliance tensor

Termo-elasticità Lineare Equazione del moto e del calore

Problema termoelastico generale isotropo accoppiato

Problema dissociato quasi statico termoelastico

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + \rho b_i &= \rho \dot{v}_i \\ kT_{,ii} &= \rho c \dot{T} + (3\lambda + 2\mu) \alpha T_0 \varepsilon_{ii} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + \rho b_i &= 0 \\ kT_{,ii} &= \rho c \dot{T} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + f_x^B &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + f_y^B &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + f_z^B &= 0 \end{aligned} \right.$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial T}{\partial z} + Q$$

Strong form

Fourier heat conduction equation

Weak Formulation – Principio dei lavori virtuali

We multiply the equations of motion (3.29) by an arbitrary vector v_i - the *weight vector* - and integrate over the volume to obtain

$$\int_V v_i (\sigma_{ij,j} + b_i - \rho \ddot{u}_i) dV = 0$$

This equation may be written as

$$\int_V [(\sigma_{ij} v_i)_j - \sigma_{ij} v_{i,j}] dV + \int_V (v_i b_i - \rho v_i \ddot{u}_i) dV = 0 \quad (3.30)$$

From the divergence theorem (3.27) and (3.7) we have

$$\int_V (\sigma_{ij} v_i)_j dV = \int_S \sigma_{ij} v_i n_j dS = \int_S v_i t_i dS$$

Use of this expression in (3.30) gives

$$\int_V \rho v_i \ddot{u}_i dV + \int_V v_{i,j} \sigma_{ij} dV = \int_S v_i t_i dS + \int_V v_i b_i dV \quad (3.31)$$

Weak Formulation – Principio dei lavori virtuali

This is the result aimed at, but we may occasionally use a slight reformulation. We recall that v_i is an arbitrary vector which, in general, has nothing to do with the displacement vector u_i . However, we may determine a quantity ϵ_{ij}^v defined by

$$\epsilon_{ij}^v = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3.32)$$

i.e. the tensor ϵ_{ij}^v is related to the arbitrary vector v_i in the same manner as the strain tensor ϵ_{ij} is related to the displacement vector u_i ; therefore ϵ_{ij}^v is the 'strain' associated with v_i . Moreover, due to the symmetry of σ_{ij} we have

$$v_{i,j} \sigma_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} \sigma_{ij} + v_{j,i} \sigma_{ji}) = \frac{1}{2} (v_{i,j} \sigma_{ij} + v_{j,i} \sigma_{ij}) = \epsilon_{ij}^v \sigma_{ij}$$

With this result, we may write (3.31) as

$$\int_V \rho v_i \ddot{u}_i dV + \int_V \epsilon_{ij}^v \sigma_{ij} dV = \int_S v_i t_i dS + \int_V v_i b_i dV \quad (3.33)$$

Bibliografia Essenziale

- G. Mase-Meccanica dei Continui.
- N. Ottosen, m. Ristinmaa-The Mechanics of Constitutive Modelling.
- J. Lemaitre-J.L. Chaboche-Mecanique des materiaux solides.
- J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V-A Heat Transfer Textbook.
- R.B. Bird, W.E.Stewart- Fenomeni di Trasporto.
- F. Kreith-Principi di trasmissione del Calore

TERMOMECCANICA parte II

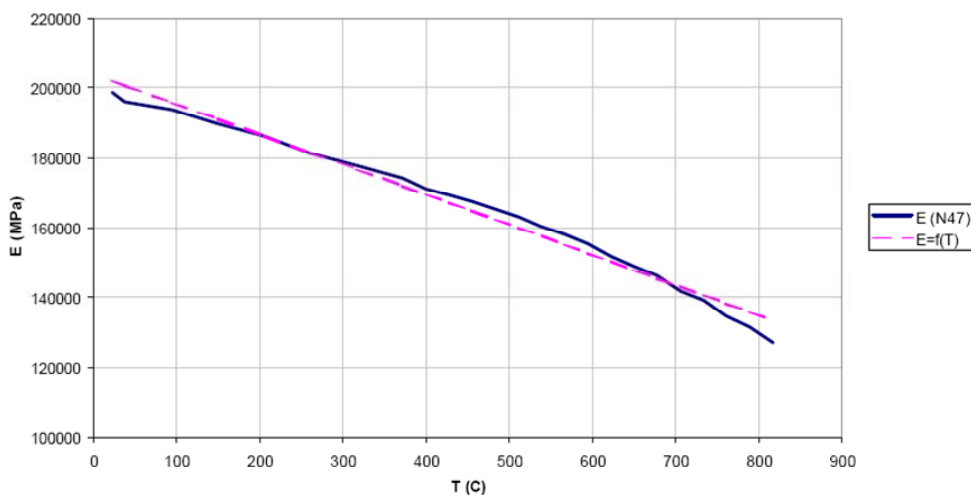
Proprietà fisiche dell'acciaio austenitico 316ss.
Origine degli stresses termici.
Shock e fatica termica.

Ing. G.M. Giannuzzi
ENEA-UTRINN-PCI
C.R. Casaccia (Roma)

Dati Termo-Elastici AISI 316SS

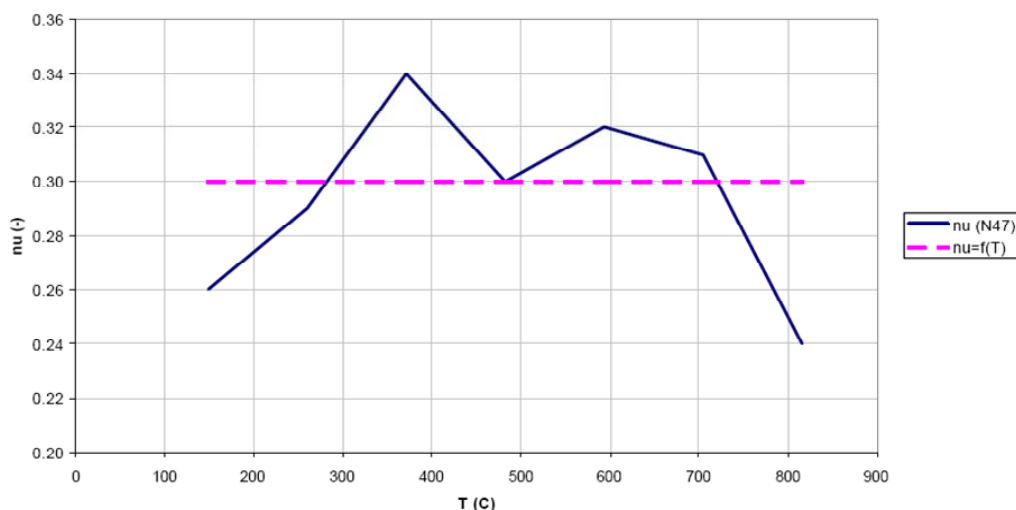
(ASME Sez.III,Div.1-NH)

Modulo di Young => $E \text{ (MPa)} = -86.208 * T(^{\circ}\text{C}) + 203901.0$



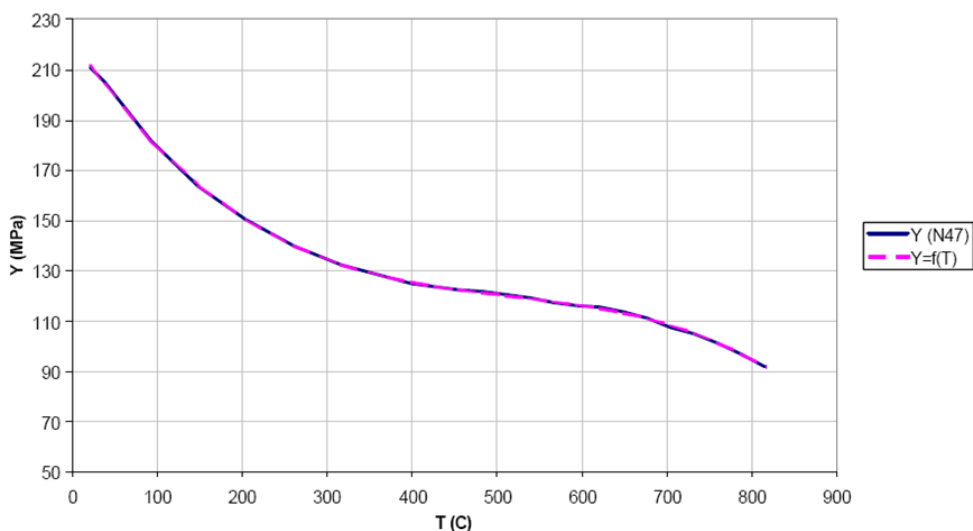
Dati Termo-Elastici AISI 316SS

Modulo di Poisson => $\nu = 0.30$



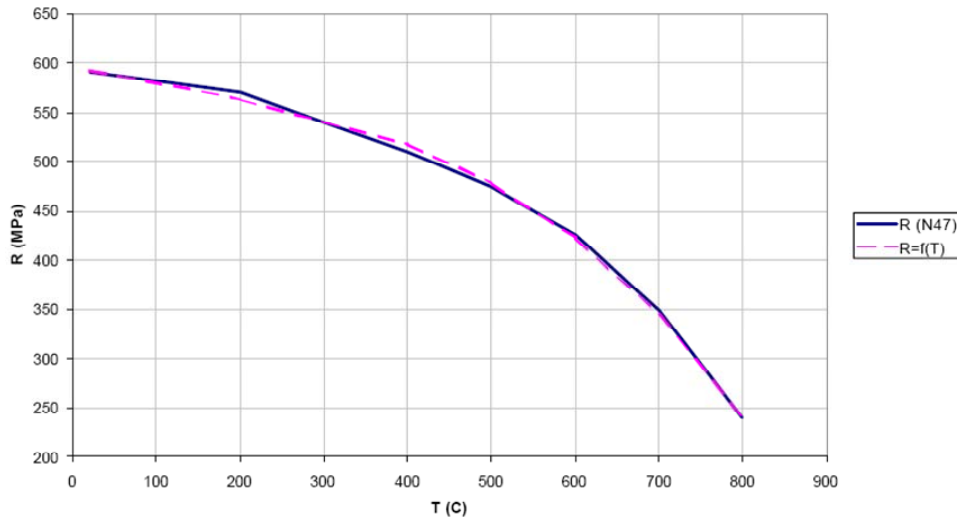
Dati Termo-Elastici AISI 316SS

Limite Elastico => $Y(\text{MPa}) = -6.005\text{E-}07 * T(^{\circ}\text{C})^3 + 9.283\text{E-}04 * T(^{\circ}\text{C})^2 - 0.5178 * T(^{\circ}\text{C}) + 222.37$

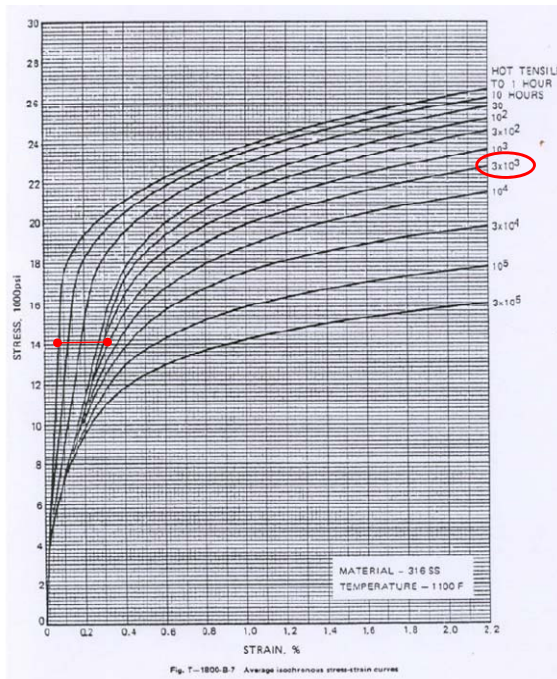


Dati Termo-Elastici AISI 316SS

Resistenza a Trazione => $R(\text{MPa}) = -7.664\text{E-}07 * T(^{\circ}\text{C})^3 + 3.008\text{E-}04 * T(^{\circ}\text{C})^2 - 0.1951 * T(^{\circ}\text{C}) + 596.1$



Dati Termo-Elastici AISI 316SS



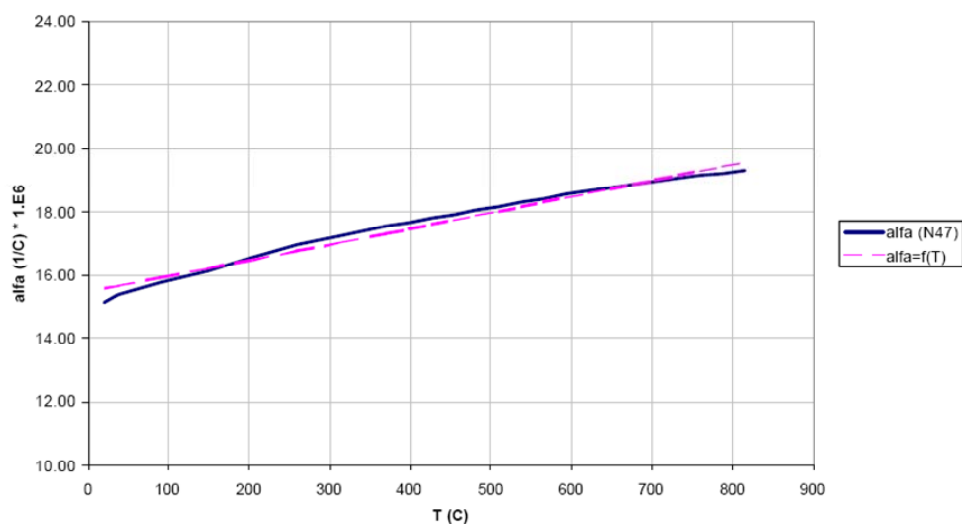
Curve isocrone
1100 °F – 593 °C

$$C = (F - 32) 5/9$$

$$1\text{Ksi} = 6.895 \text{MPa}$$

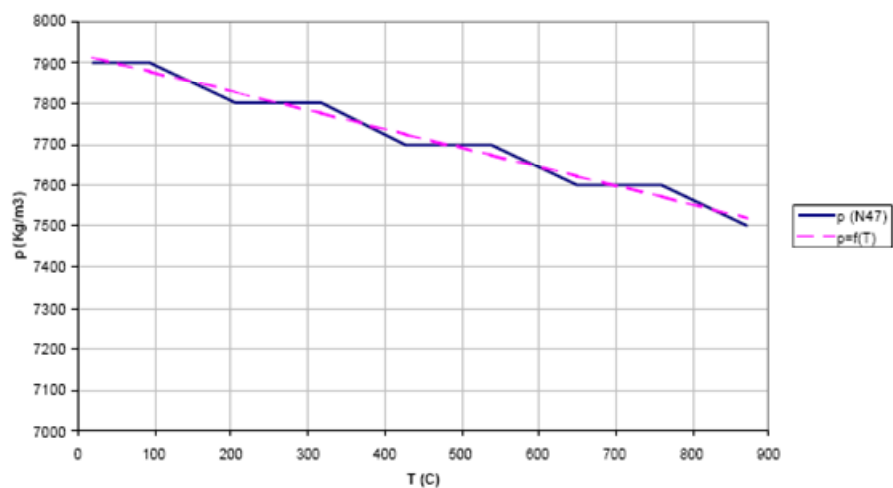
Dati Termo-Elastici AISI 316SS

Alfa-medio => $\alpha (1/^\circ\text{C}) = [0.005 * T(^\circ\text{C}) + 15.462] * 10^{-6}$



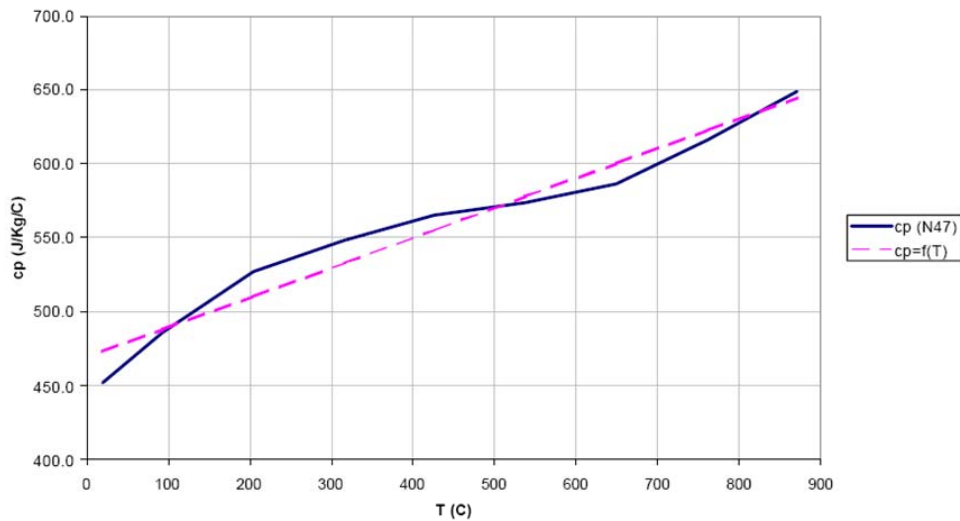
Dati Termo-Elastici AISI 316SS

Densità => $\rho (\text{kg/m}^3) = -0.4609 * T(^\circ\text{C}) + 7920.8$



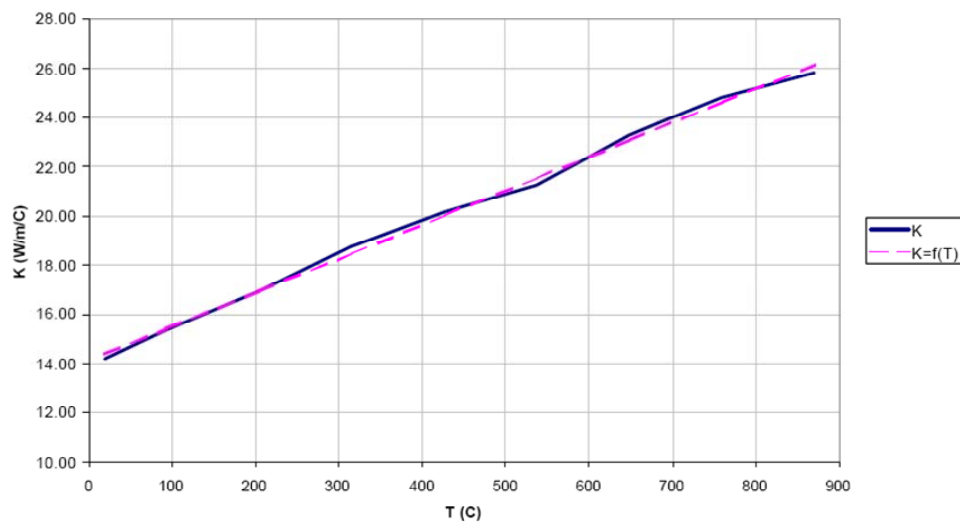
Dati Termo-Elastici AISI 316SS

Calore Specifico => $cp(J/kg.^{\circ}C) = 0.2013 * T(^{\circ}C) + 469.19$



Dati Termo-Elastici AISI 316SS

Canducibilità Termica => $K(W/m.^{\circ}C) = 0.0138 * T(^{\circ}C) + 14.106$



Dilatazione Termica

Mean coefficient of thermal expansion:

$$\alpha_m = \left\{ \frac{L(T_1) - L(T_0)}{L(T_0)} \right\} / (T_1 - T_0)$$

The value of the mean coefficient must be accompanied by the values of the two temperatures

Instantaneous coefficient of thermal expansion:

$$\alpha_i = \frac{1}{L(T)} \frac{dL(T)}{dT}$$

The value of the instantaneous coefficient must be accompanied by the temperature at which it is determined

Dilatazione Termica

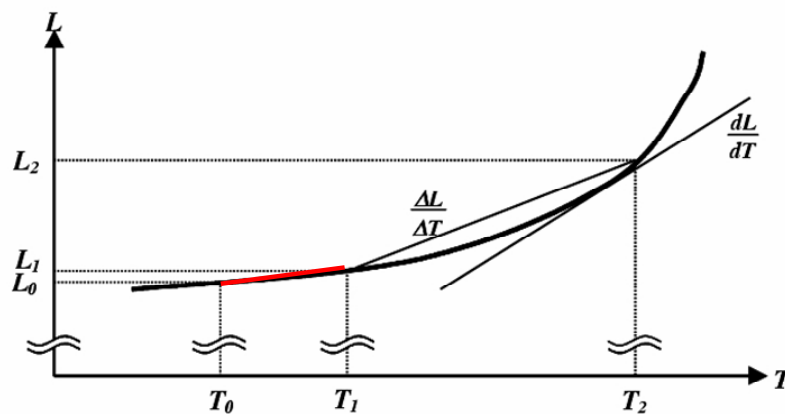
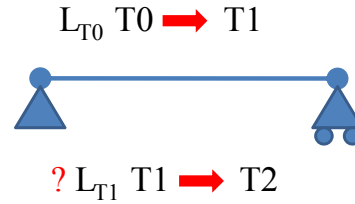


Figure 1. Change in length, L , of a sample of material as a function of temperature, T .

Dilatazione Termica

$$L_{T_1} = L_{T_0} [1 + \alpha_{T_0} (T_1 - T_0)]$$

$$L_{T_2} = L_{T_0} [1 + \alpha_{T_0} (T_2 - T_0)]$$



$$\alpha_{T_1}(T_2) = \frac{[\alpha_{T_0}(T_2)(T_2 - T_0) - \alpha_{T_0}(T_1)(T_1 - T_0)]}{1 + \alpha_{T_0}(T_1)(T_1 - T_0)} \cdot \frac{1}{(T_2 - T_1)}$$

$$\alpha_{T_1}(T_0) = \frac{\alpha_{T_0}(T_1)}{1 + \alpha_{T_0}(T_1)(T_1 - T_0)} \quad \text{per } T_2 = T_0$$

Stress dovuto a dilatazione differenziale

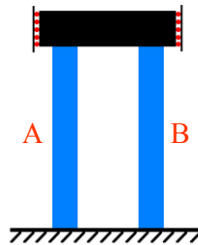
Caso I

$$E_A = E_B = E$$

$$S_A = S_B = S$$

$$\Delta T_A = \Delta T_B = \Delta T$$

$$\alpha_A > \alpha_B$$



Caso II

$$E_A = E_B = E$$

$$S_A = S_B = S$$

$$\Delta T_A > \Delta T_B$$

$$\alpha_A = \alpha_B = \alpha$$

$$S_A = -(\alpha_A - \alpha_B) \Delta T E / 2$$

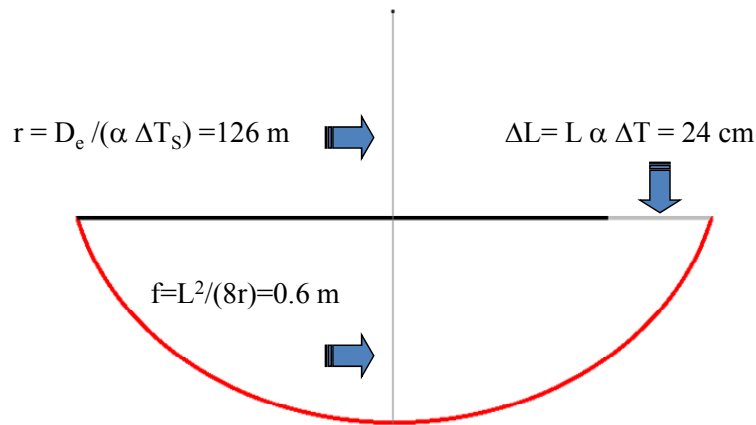
$$S_B = -S_A$$

$$S_A = -\alpha (\Delta T_A - \Delta T_B) E / 2$$

$$S_B = -S_A$$

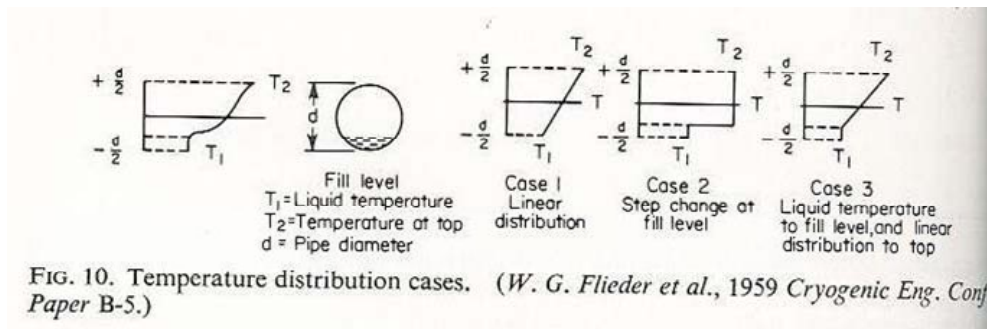
Effetto gradiente trasversale nei tubi

$$T_0=20 \quad \Delta T_s = 30 \text{ C} \quad \Delta T = 530 \text{ C}$$

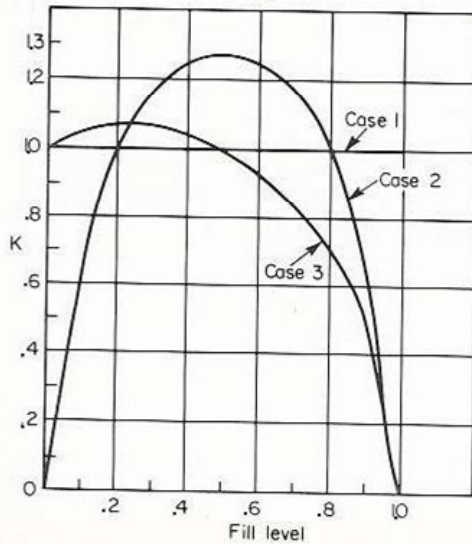


$$M_{th} = E J_x / r = E J_x \alpha \cdot \Delta T_{cf} / D_e \quad \Rightarrow \quad \sigma_{th-max} = E R_e / r = \frac{1}{2} E \alpha \cdot \Delta T_{cf}$$

Effetto gradiente trasversale nei tubi



R radius of pipe curvature-K factor



$$r = D / Ke$$

$$e = \int_{T_1}^{T_2} \alpha dT \Rightarrow e = \alpha (T_2 - T_1)$$

FIG. 9. K factor. (W. G. Flieder et al., 1959 Cryogenic Eng. Conf. Paper B-5.)

Ancoraggi del piping in presenza di dilatazioni termiche

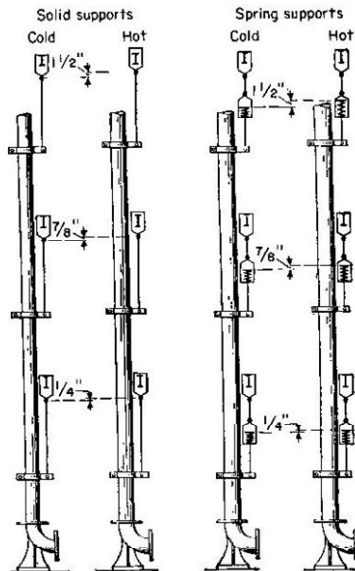
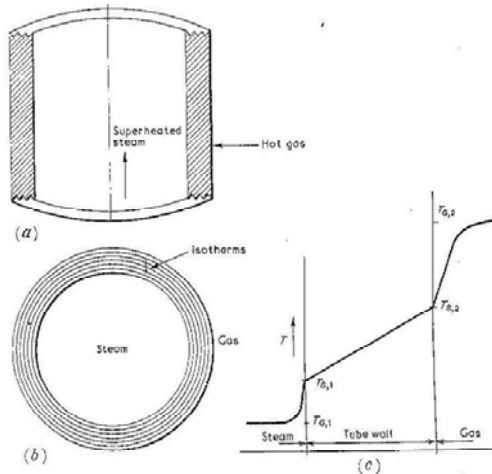


FIG. 12. Action of vertical pipe with and without spring supports.

Conduzione Calore Stazionaria



$$\frac{T_{S,2} - T_{S,1}}{T_{G,2} - T_{G,1}} = 1 \left/ \left[1 + \frac{1}{h_1 l / k} + \frac{1}{h_2 l / k} \right] \right.$$

FIG. 1.1. ILLUSTRATING THE IDEAL TEMPERATURE DISTRIBUTION IN AN ELEMENT OF SUPERHEATER TUBING
(a) Axial section, (b) Cross-section, (c) Temperature profile.

Numero di Biot

$$Bi = \frac{hl}{k}$$

$$Q = h(T_S - T_G) \quad Q = k \text{ grad } T$$

$$Bi = \left(\frac{Ql}{k} \right) \left/ \left(\frac{Q}{h} \right) \right.$$

Più **Bi** è grande più grandi sono gli **stress**

Numero di Biot

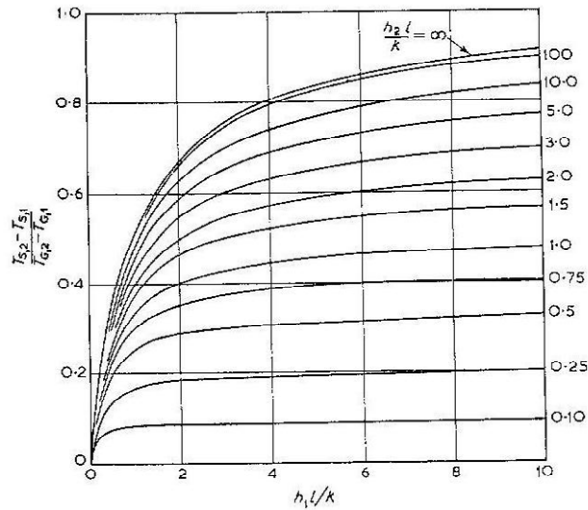
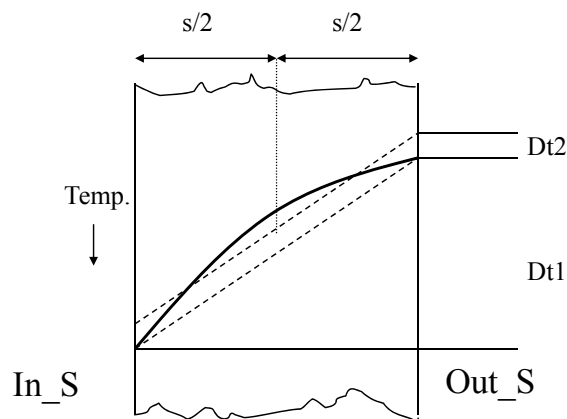


FIG. 1.2. THE TEMPERATURE DIFFERENCE ACROSS THE TUBE WALL OF FIG. 1.1

Shock Termico in tubazioni



$$\frac{T(x,t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} C_j \cos(m_j x / \delta) \exp(-m_j^2 N_{Fo})$$

$$m_j \text{ radice } m \tan(m) = N_{Bi}$$

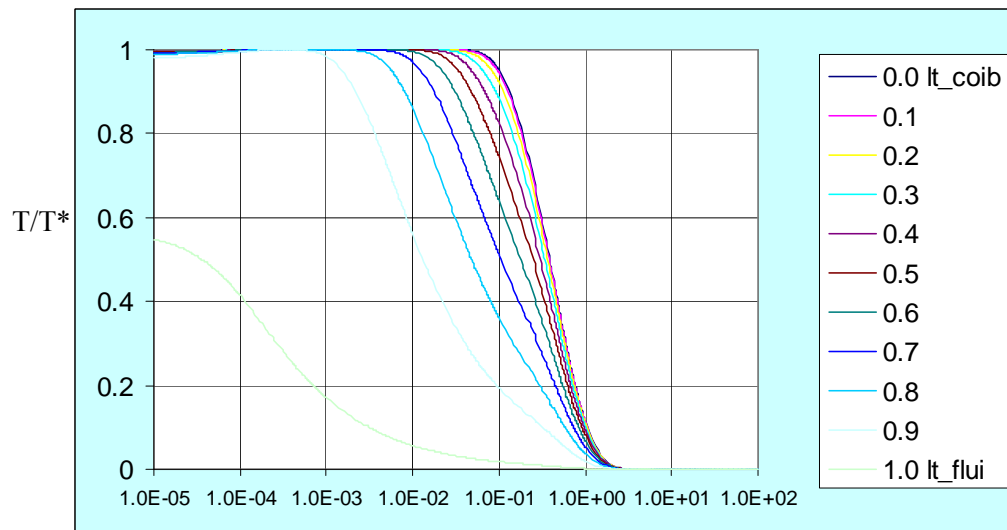
$$C_j = 4 \sin(m_j) / [2m_j + \sin(2m_j)]$$

$$\Delta T_1(t) = T(\delta, t) - T(0, t)$$

$$\Delta T_2(t) = (1/\delta) \int_0^\delta T(x, t) dx - \frac{1}{2} [T(\delta, t) + T(0, t)]$$

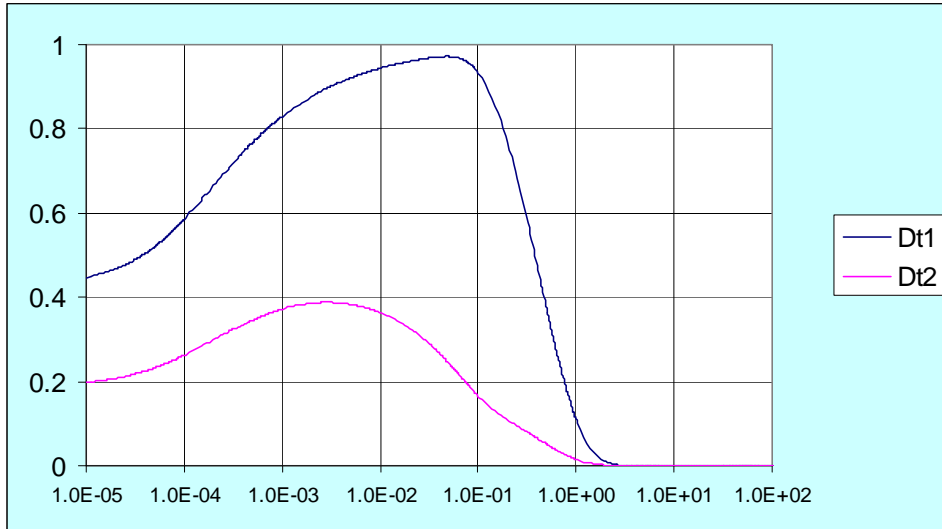
Soluzione dell'equazione dell'energia per una parete piana rapidamente soggetta ad una condizione al contorno convettiva

Distribuzione Spazio-Temporale Temperatura Normalizzata



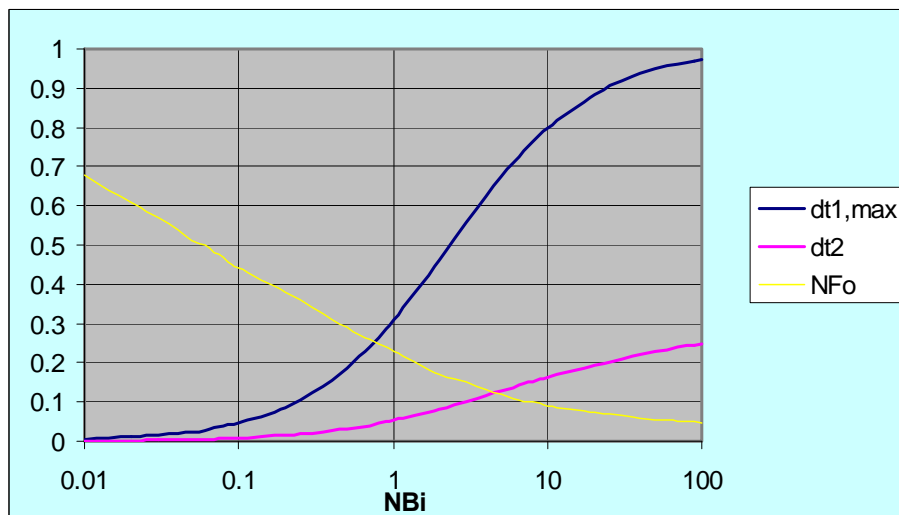
$$N_{Fo} = a.t/s^2$$

Andamento Temporale Dt1 Dt2



$$N_{Fo} = a.t/s^2$$

Dt1_max, Dt2 e N_Fo in funzione del numero di Biot N_Bi



Logiche di verifica

dati (P,Mi,Dt1,Dt2) =>

- Sp- Sforzi di Picco
per Escludere Fatica
- Sn- Sforzi Primari+Secondari
per Escludere Deformazione Incrementale

Proprietà Sali e valutazione num. ad. Pr-Re-Nu-Bi

PROPRIETA DEI SALI											
DA GR14											
TEMPERATURA										T- bulk	T- wall
°C	250	300	350	400	450	500	550	600	600	400	280
DENSITA											
kg/m3	1931	1899.2	1867.4	1835.6	1803.8	1772	1740.2	1708.4		1835.6	1911.92
CALORE SPECIFICO											
J/kg-°C	1486	1494.6	1503.2	1511.8	1520.4	1529	1537.6	1546.2		1511.8	1491.16
VISCOSITA ASSOLUTA											
mPa-sec	4.667125	3.2632	2.336475	1.7764	1.472425	1.314	1.190575	0.9916		1.7764	3.761315
CONDUTTIVITA TERMICA											
W/m-°C	0.4905	0.5	0.5095	0.519	0.5285	0.538	0.5475	0.557		0.519	0.4962
CONDUTTIVITA TERMICA 316SS											
W/m-°C	18.0265	18.608	19.1895	19.771	20.3525	20.934	21.5155	22.097		19.771	18.3754
Diametro idraulico											
m	0.0525018		Area interna			Spessore					ri/ro
			m2	0.002164902		m	0.003912			2"sch40	0.930662
Portata											
kg/sec	5.01651122	4.933899	4.851286	4.768673221	4.686061	4.603448	4.520835	4.438223		4.768673	4.966944
Velocita media											
m/sec	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2		1.2	1.2
TEMP-iniz.-tubo											
Pr			20 °C								
cp μ / k	14.139343	9.754357	6.893404	5.174492331	4.235903	3.734398	3.343613	2.752625		5.174492	11.30335
Re											
d u ρ / μ	26066.8336	36667.6	50353.73	65101.75912	77181.04	84961.82	92086.9	108544.7		65101.76	32024.73
Nu											
h d / k	173.67097	204.1331	237.0736	267.1544049	288.2838	299.7596	309.2793	332.7658		267.1544	191.4601
h d / k	269.711576	297.362	325.2631	348.776755	363.4449	369.5709	373.8728	388.8304		348.7768	286.0805
h	1622.52743	1944.058	2300.664	2640.921571	2901.957	3071.716	3225.231	3530.366		2640.922	1809.51
h	2519.79033	2831.922	3156.493	3447.78914	3658.553	3787.092	3898.826	4125.164		3447.789	2703.776
Bi											
h s / k	0.35207491	0.408662	0.468969	0.522493997	0.557735	0.573962	0.586359	0.624944		0.522494	0.385193
h s / k	0.54677346	0.5953	0.643422	0.682128977	0.703147	0.707633	0.708821	0.730235		0.682129	0.575557

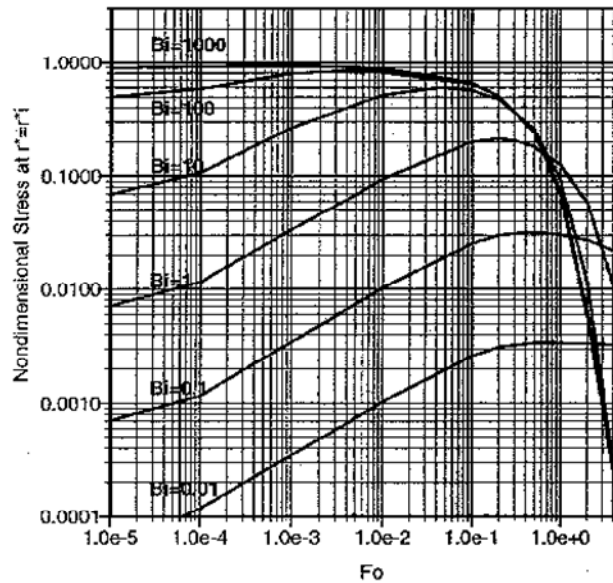


Figure 7. Nondimensional thermal (circumferential or axial) stress at the inner surface of the pipe undergoing thermal shock as a function of time (Fo) for several Biot numbers using 30 terms of the series in the transient conduction equation (Eq. 1) for $r_i/r_o=0.8$.

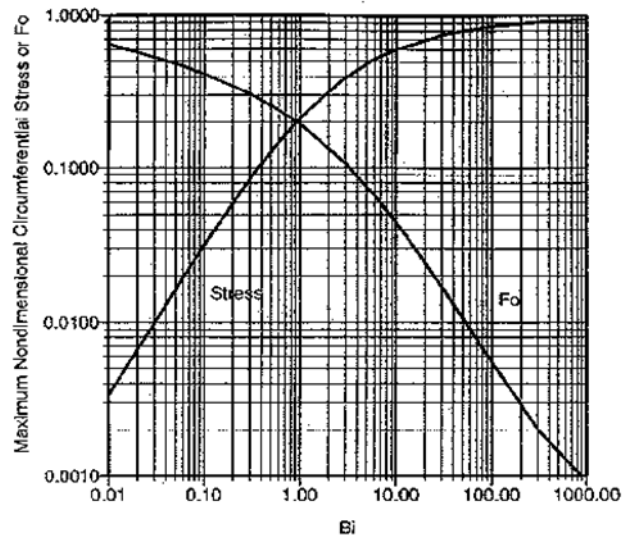


Figure 8. The maximum nondimensional thermal stress, σ , and time (Fo) when maximum stress occurs as a function of the Biot number for a pipe undergoing thermal shock for $r_i/r_o=0.8$. These are the maxima of Figure 7.

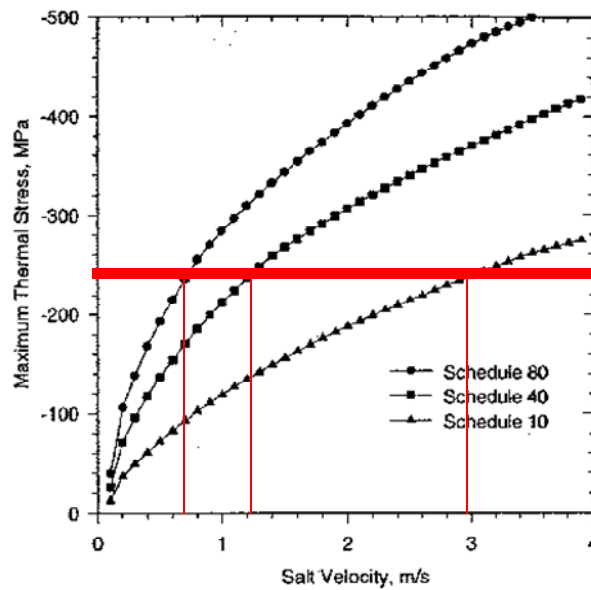
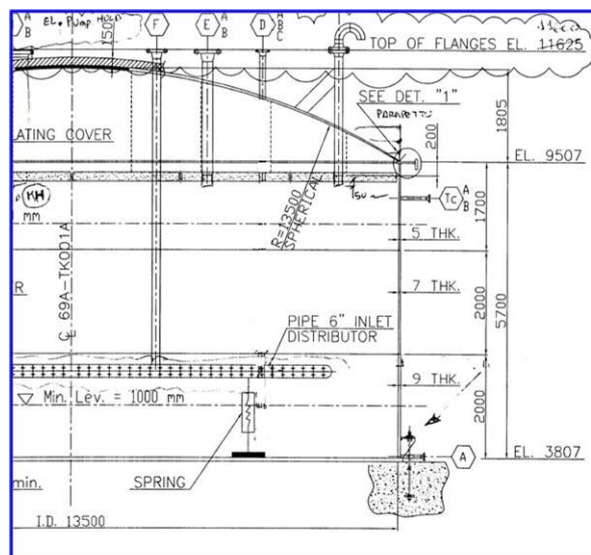
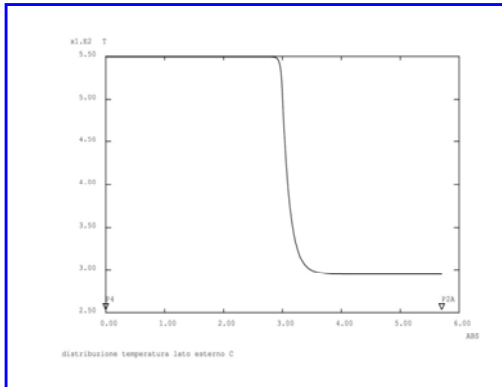


Figure 9. Maximum stress at the inside wall as a function of velocity for stainless steel 6 inch pipe during thermal shock. Initial temperature is 25°C and salt temperature is 288°C.

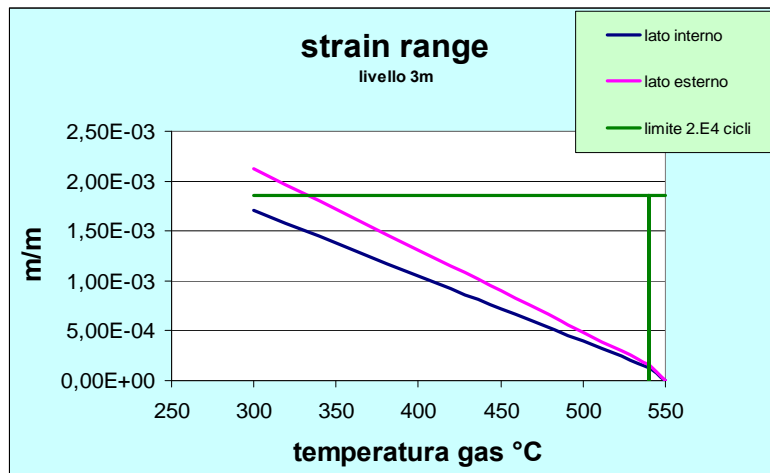
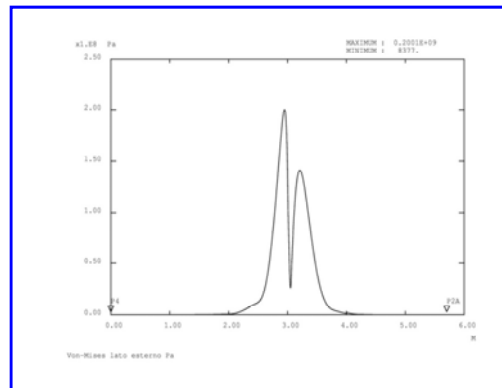
Fatica Fasciame Serbatoio (ASME III NH T-1400)





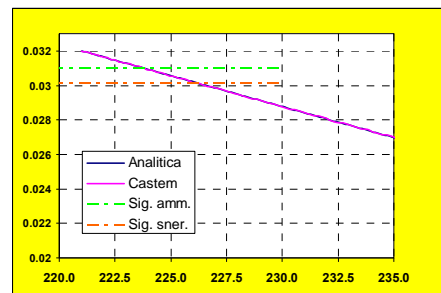
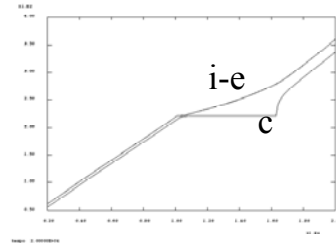
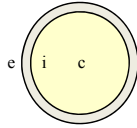
<= Dis.Temperatura

Dis.Von-Mises =>



Effetto delle rifusione di tappi di sale nel piping

Re=35 mm
Ri=32 mm
S =3 mm



Relazione tra Pressione e Frazione Massica del Liquido

Caso incomprimibile

$$f_l = \left[\frac{V_l}{M} - \frac{1}{\rho_{s,0}} \right] \frac{\rho_{s,0} \rho_{l,0}}{\rho_{s,0} - \rho_{l,0}}$$

Caso comprimibile

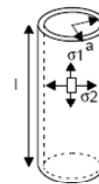
$$f_l = \left[\frac{V_l}{M} - \frac{g_s}{\rho_{s,0}} \right] \frac{\rho_{s,0}}{\alpha g_l - g_s} \quad g_s = 1 - \frac{P}{k_s} \quad e \quad g_s = 1 - \frac{P}{k_s} ; \quad \alpha = \frac{\bar{V}_l}{V_s}$$

Table G-1. Effect of Thawing on Stress in Tube

Stress During Thawing

Tube Dimensions

OD=	0.75 in	0.0191 m
Wall Thickness, t=	0.109 in	0.0028 m
ID=	0.532 in	0.0135 m
Length, l=	39.37 in	1.0000 m
Outer Radius, a=	0.375 in	0.0095 m
Inner Radius, b=	0.266 in	0.0068 m



Tube Properties, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section 8, Div 1

Material: 2.25 Cr 1 Mo, ASME SA213, Grade T22 @ T=

σ , allow=	15000 psi	103.4 MPa	-20F to 650 F
σ , yield=	27000 psi	186.2 MPa	430 F
σ , ultimate=	53000 psi	365.4 MPa	430 F
E=	2.87E+07 psi	197532 MPa	430 F
v=	0.293	0.293	430 F

Total Mass/Length
salt, kg/m
0.2924

Effect of Thawing on Stress

Pressure at Allowable Stress=	4958 psi	34.2 MPa
Pressure at Yield Stress=	8924 psi	61.5 MPa

Δb , in	Δl , in	Δv , in ³
0.00014	0.00206	0.0104
0.00025	0.00514	0.0188

Mass liquid salt, kg/m	Mass fraction x _{liquid}
0.0513	0.175
0.0929	0.318

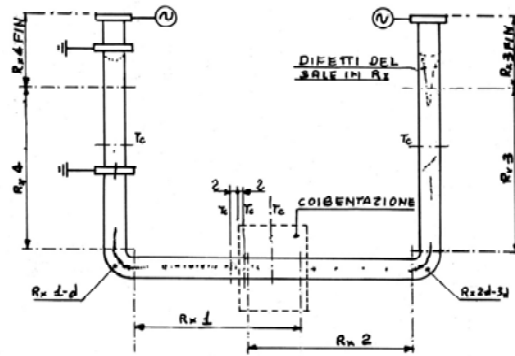
Stress components at Allowable Pressure @ r=b

Pressure=	4958 psi	34 MPa
σ 1, axial=	5021 psi	35 MPa
σ 2, circumferential=	15000 psi	103 MPa
σ 3, radial=	-4958 psi	-34 MPa

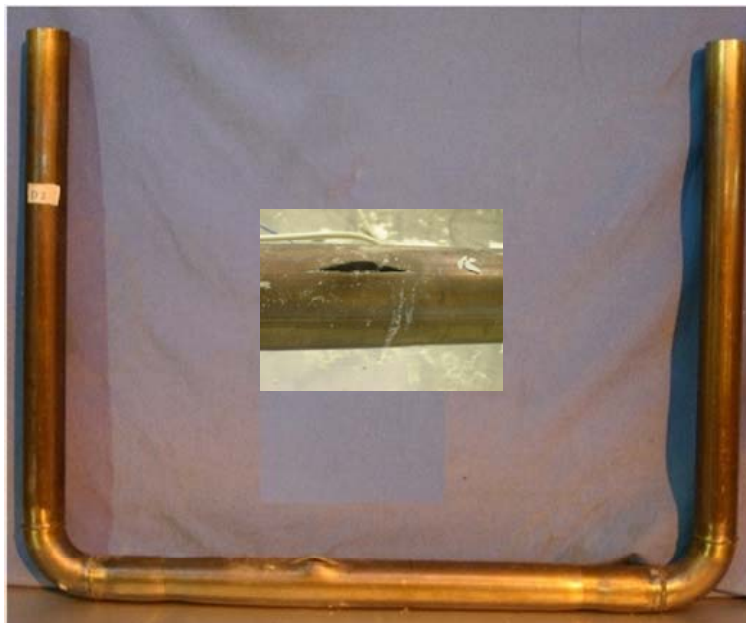
Stress components at Yield Pressure @ r=b

Pressure=	8924 psi	62 MPa
σ 1, axial=	9038 psi	62 MPa
σ 2, circumferential=	27000 psi	186 MPa
σ 3, radial=	-8924 psi	-62 MPa

PRIMA SEZ. DI TUBO AD U CON SALI NA-K



Tc = TERMOCOPPIE K
Rn = RADIOGRAFIE
⊗ = TENSIONE



Rottura dopo 7 cicli

Dimensionamento cilindro con pressione interna

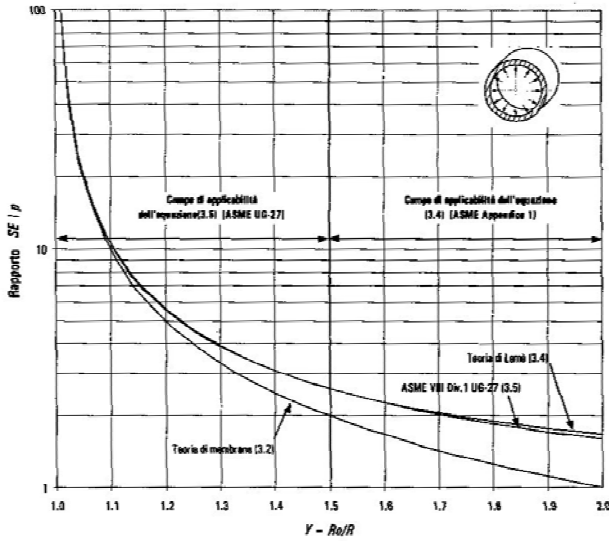


Figura 3.2 Confronto fra alcune teorie relative alla massima tensione principale in un cilindro.

$$Y = \frac{R_0}{R}$$

Membranale

$$t = \frac{pR}{SE}$$

Lamè

$$t = R \left(\sqrt{\frac{SE + p}{SE - p}} - 1 \right)$$

ASME VIII Div.1 UG-27

$$t = \frac{pR}{SE - 0.6p}$$

Stefan problem

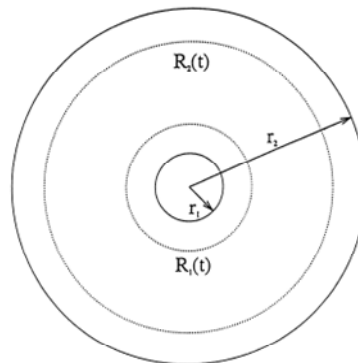


Figure 1. Freezing vessel in the shape of an annulus.

Formulation of the problem

Consider a freezing vessel in the shape of an annulus, which contains liquid initially at its freezing temperature T_f . The configuration is shown in Figure 1. The two surfaces of the annulus are maintained at a temperature T_s which is lower than the freezing temperature for $t > 0$. If the density change from liquid to solid is neglected, the system is governed by the equations,

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\kappa}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), & r_1 < r < R_1(t) \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \frac{\kappa}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), & R_2(t) < r < r_2 \end{aligned} \quad (1)$$

where κ is the thermal diffusivity, $R_1(t)$ and $R_2(t)$ are positions of phase boundaries, where $R_i(0) = r_i$. The initial and boundary conditions are

$$\begin{aligned} T &= T_f, & r_1 \leq r \leq r_2, & t = 0 \\ T_i(r_i, t) &= T_s, & t > 0, & i = 1, 2 \end{aligned}$$

and at the solid–liquid interfaces

$$K \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{R_i(t)} = L \rho \frac{dR_i(t)}{dt}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

where we have assumed that the physical properties of the material remain constant throughout the process. The constants K, ρ and L are thermal conductivity, density and latent heat of freezing, respectively.

TERMOMECCANICA parte IIIa

Nozioni sul Metodo degli Elementi Finiti per applicazioni in campo termico-meccanico.

Ing. G.M. Giannuzzi
ENEA -UTRINN-PCI
C.R. Casaccia (Roma)

MECCANICA

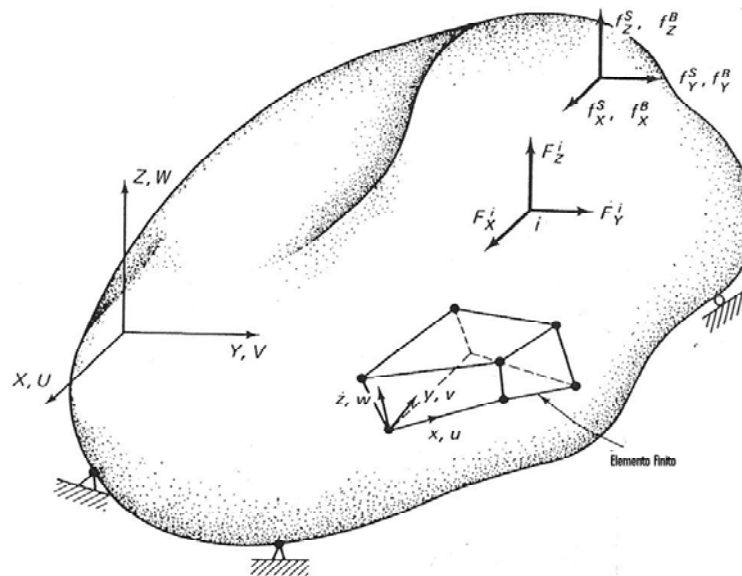
Derivazione delle equazioni risolutive del F.E.M. mediante Principio Lavori Virtuali

$$\tau^{(m)} = C^{(m)} \varepsilon^{(m)} + \tau^{I(m)}$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T C \varepsilon \, dV - \int_V U^T f^B \, dV - \int_V U^{ST} f^S \, dS - \sum_i U^{iT} F^i$$

$$\delta \Pi = \int_V \delta \varepsilon^T C \varepsilon \, dV - \int_V \delta U^T f^B \, dV - \int_V \delta U^{ST} f^S \, dS - \sum_i \delta U^{iT} F^i = 0$$

Discretizzazione del dominio mediante f.e.m



Principio lavori virtuali sui singoli elementi

$$\sum_m \int_{V^{(m)}} \bar{\mathcal{E}}^{(m)} \tau^{(m)} dV^{(m)} = \sum_m \int_{V^{(m)}} \bar{U}^{(m)T} f^{B(m)} dV^{(m)} + \sum_m \int_{V^{(m)}} \bar{U}^{S(m)T} f^{S(m)} dS^{(m)} + \sum_i \bar{U}^{iT} F^i$$

Incognite nodali ed interpolazione nell'elemento

$$\hat{U}_T = \left[U_1 V_1 W_1 \quad U_2 V_2 W_2 \dots U_N V_N W_N \right] \quad ?$$

$$u^{(m)}(x, y, z) = H^{(m)}(x, y, z) \hat{U}$$

$$\mathcal{E}^{(m)}(x, y, z) = B^{(m)}(x, y, z) \hat{U}$$

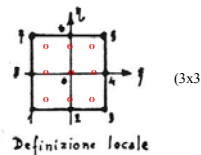
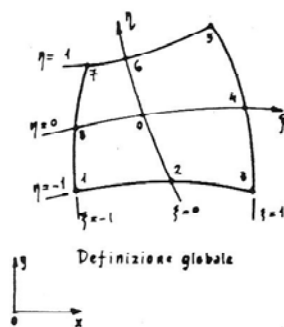
Principio lavori virtuali

$$\overline{\hat{U}}^T \left[\sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} C^{(m)} B^{(m)} dV^{(m)} \right] \hat{U} = \overline{\hat{U}}^T \left\{ \left[\sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} f^{B(m)} dV^{(m)} \right] + \left[\sum_m \int_{S^{(m)}} H^{S(m)T} f^{S(m)} dS^{(m)} \right] - \left[\sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} \tau^{I(m)} dV^{(m)} \right] + F \right\}$$

$$R = R_B + R_S - R_I + R_C$$

$$KU = R$$

Funzioni di forma elemento quadrangolare ad 8 nodi



$$N_1 = \frac{1}{4} (1-\xi) (1-\eta) (\xi+\eta+1)$$

$$N_2 = \frac{1}{4} (1-\xi^2) (1-\eta)$$

$$N_3 = \frac{1}{4} (1+\xi) (1-\eta) (\xi-\eta-1)$$

$$N_4 = \frac{1}{4} (1+\xi) (1-\eta^2)$$

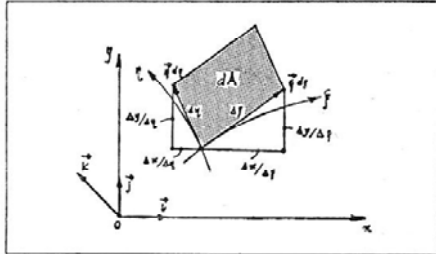
$$N_5 = \frac{1}{4} (1+\xi) (1+\eta) (\xi+\eta-1)$$

$$N_6 = \frac{1}{4} (1-\xi^2) (1+\eta)$$

$$N_7 = \frac{1}{4} (1-\xi) (1+\eta) (-\xi+\eta-1)$$

$$N_8 = \frac{1}{4} (1-\xi) (1-\eta^2)$$

Integrazione su sistema locale



Relazione tra l'elemento di area in coordinate globali e locali.

$$\begin{aligned} x &= x(\xi, \eta, \zeta) \\ y &= y(\xi, \eta, \zeta) \\ z &= z(\xi, \eta, \zeta) \end{aligned}$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix}$$

$dA = \det[J] d\xi d\eta$

$$\begin{aligned} [K] &= \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [B]^T [D] [B] \det |J| d\xi d\eta = \\ &= \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [G(\xi, \eta)] d\xi d\eta \end{aligned}$$

Integrazione numerica di Gauss

Ascisse e fattori peso per l'integrazione mediante i punti di Gauss.

$$\int_{-1}^1 G(\xi) d\xi = \sum_{i=1}^n H_i G(\xi_i)$$

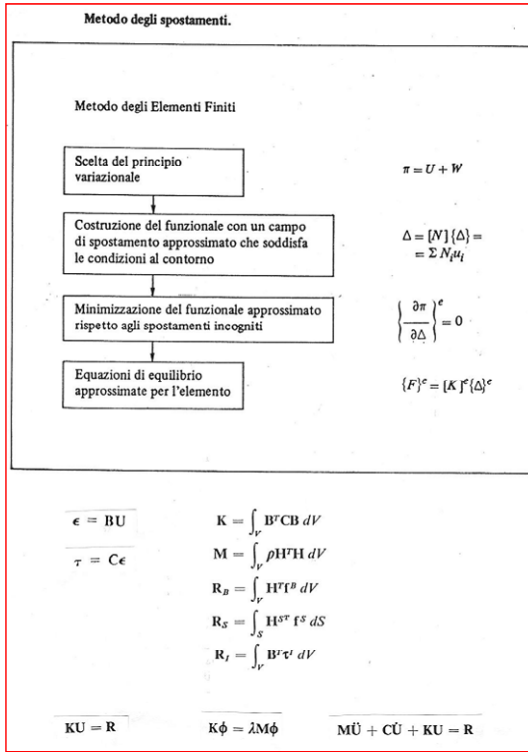
Le ascisse sono $\pm \xi_i$

I fattori peso H_i

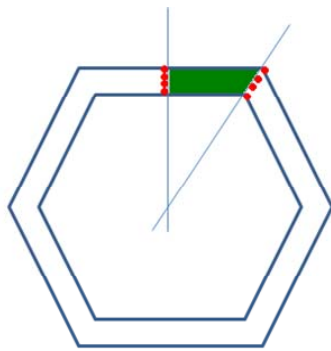
$\pm \xi_i$	H_i
$n = 2$	
0.57735	1.00000
$n = 3$	
0.00000	0.88888
0.77459	0.55555
$n = 4$	
0.33998	0.65214
0.86113	0.34785

$$[K] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [G(\xi, \eta)] d\xi d\eta \approx \sum_{i,j} H_{ij} [G(\xi_i, \eta_j)]$$

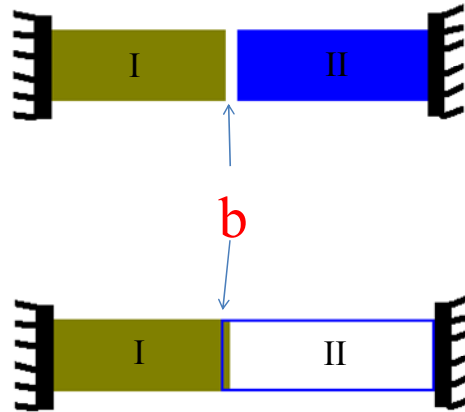
Quadro riassuntivo



Relazione imposta tra gradi di libertà



$$\frac{u_x}{u_y} = \tan \theta \quad \cos \theta u_x - \sin \theta u_y = 0$$



$$u_x^I - u_x^{II} = \pm b$$

Relazione imposta tra gradi di libertà

$$C(u) \Rightarrow \sum_i^n u_i a_i - b = 0$$

$$\Pi = \frac{1}{2} U^T K U - U^T F + (\lambda' + \lambda'') \left(\sum_i^n u_i a_i - b \right) - \frac{1}{2} (\lambda' - \lambda'')^2$$

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_i \\ \lambda' \\ \lambda'' \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial u_p} = K U - F = 0 \text{ per } u_p \neq u_i \\ \frac{\partial \Pi}{\partial u_i} = K_i U - F_i + (\lambda' + \lambda'') a_i = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \lambda'} = \sum_i u_i a_i - b - (\lambda' - \lambda'') = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \lambda''} = \sum_i u_i a_i - b + (\lambda' - \lambda'') = 0 \end{cases} \quad \lambda' = \lambda''$$

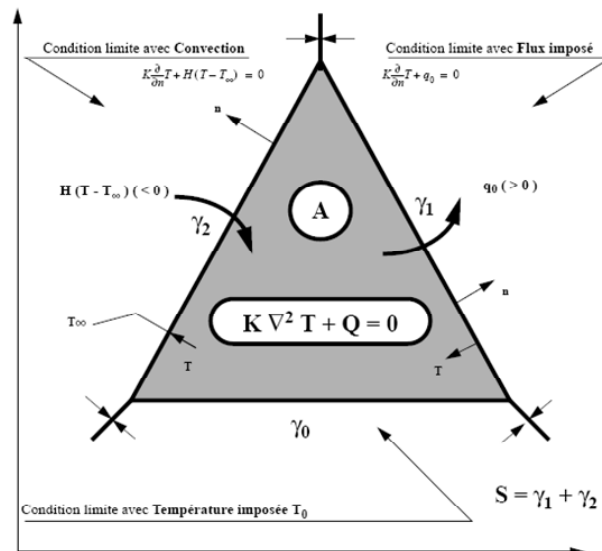
Relazione imposta tra gradi di libertà

$$K_r \Rightarrow \begin{bmatrix} \lambda' & \lambda'' & u_1 & u_2 & \dots & u_n \\ -1 & +1 & a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ +1 & -1 & a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_1 & a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_n & a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

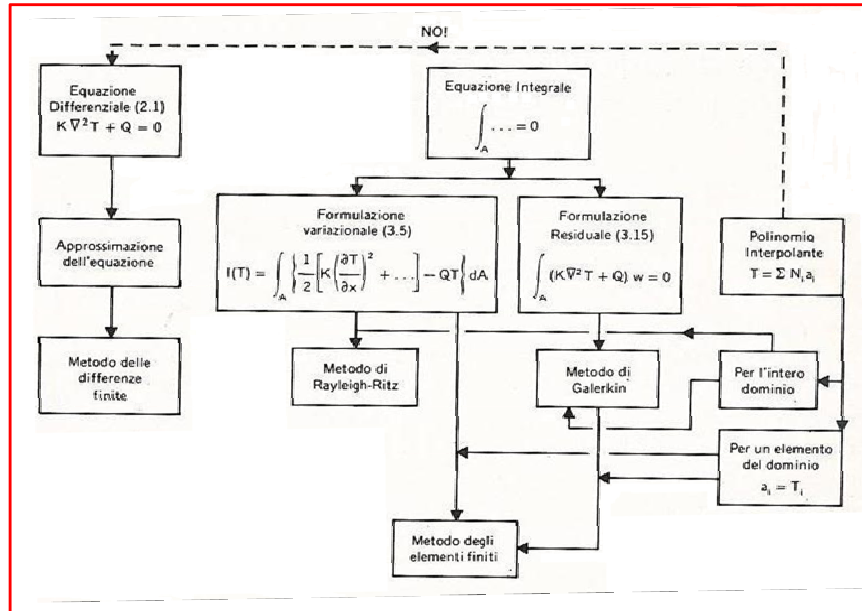
$$(K + K_r) \begin{bmatrix} U \\ \lambda \end{bmatrix} = F + F_R$$

TERMICA

Equazione di Fourier per la trasmissione del calore nei solidi



Soluzione problemi termici stazionari con metodi di calcolo approssimati



Termica secondo Formulazione Variazionale

$$I(T) = \int_V \left\{ \frac{1}{2} \left[K_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \dots \right] - \left[Q(x, y, z) - \mu \frac{\partial T}{\partial t} \right] T \right\} dV + \int_S \left(\bar{q} T + \frac{1}{2} h T^2 \right) dS$$

$$\bar{q} = q_0 - h T_\infty$$

$$\mu = \rho c$$

$$T^{(m)}(x, y, z, t) = N^{(m)T}(x, y, z) T^{(m)}(t) \quad \text{m.e.f.}$$

$$\frac{\partial I(T)}{\partial T_i} = \sum_m \frac{\partial I(T)^{(m)}}{\partial T_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, P$$

$$\frac{\partial I(T)^{(m)}}{\partial T_i} = \int_{V^{(m)}} \left[\left(k_x \frac{\partial T^{(m)}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T^{(m)}}{\partial x} \right) + \dots \right) - \left(Q - \mu \frac{\partial T^{(m)}}{\partial t} \right) \frac{\partial T^{(m)}}{\partial T_i} \right] dV + \int_S \left[\bar{q} + h T^{(m)} \right] \frac{\partial T^{(m)}}{\partial T_i} dS = 0$$

Termica Secondo Formulazione Variazionale

$$\mathbf{K}^{(m)}\mathbf{T}^{(m)} + \mathbf{C}^{(m)}\dot{\mathbf{T}}^{(m)} - \mathbf{F}^{(m)} = \mathbf{0}$$

Matrice di Conducibilità Termica

$$K_{i,j}^{(m)} = \int_{V^{(m)}} \left[k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \dots \right] dV$$

Matrice di Conducibilità Convettiva

$$H_{i,j}^{(m)} = \int_S h N_i N_j dS$$

Matrice di Capacità Termica

$$C_{i,j}^{(m)} = \int_{V^{(m)}} \mu N_i N_j dV$$

Vettore Carichi Termici

$$F_i^{(m)} = \int_{V^{(m)}} Q N_i dV - \int_{S^{(m)}} \bar{q} N_i dS$$

Bibliografia

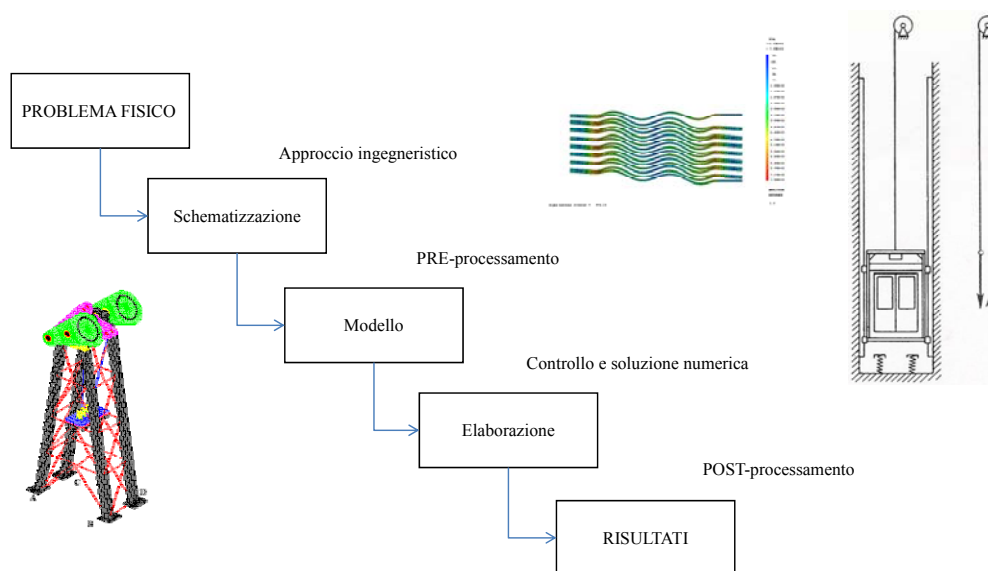
- Singiresu S. Rao-The Finite Element Method in Engineering
- J.E. Akin-Finite Element Analysis (with error estimators)
- Klaus-Jurgen Bathe-Finite Element Procedures in Engineering Analysis
- O.C. Zienkiewicz & R.L.Taylor-Finite Element Method for solid and structural mechanics
- O.C. Zienkiewicz , R.L.Taylor & J.Z. Zhu-Finite Element Method its basis & fundamentals
- I.M. Smith & D.V. Griffiths-Programming the Finite Element Method
- Davide Martini-Calcolo automatico di Recipienti in Pressione

TERMOMECCANICA parte IIIb

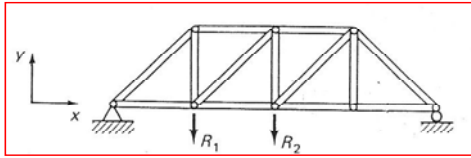
Cosigli sull'utilizzo del Metodo degli Elementi Finiti.

Ing. G.M. Giannuzzi, Ing. A. Miliozzi
 ENEA -UTRINN-PCI
 C.R. Casaccia (Roma)

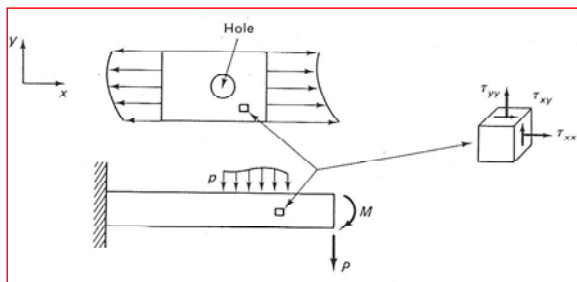
Schema Generale di Applicazione del f.e.m.



Categorie Strutturali

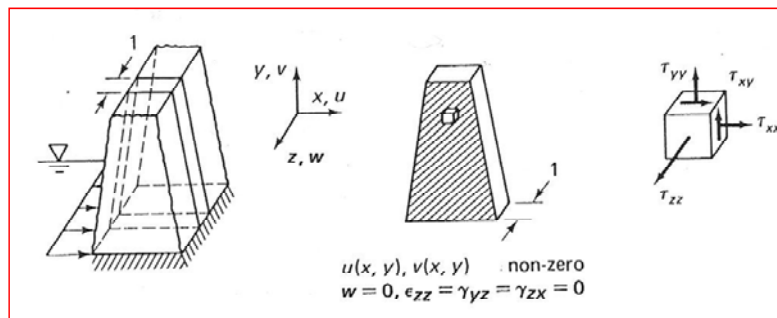


Strutture reticolari a carichi concentrati
 t_{xx} uniforme nulle altre componenti



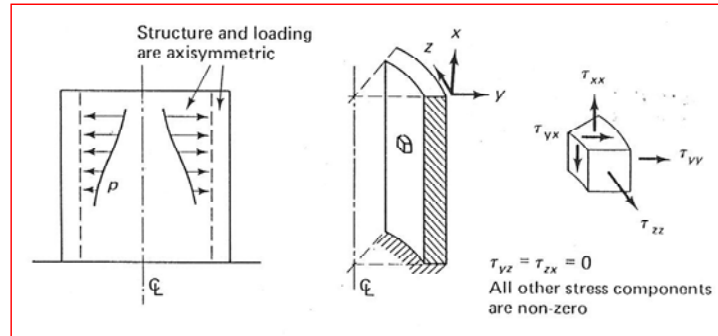
Tensioni piane
 t_{xx}, t_{xy} uniformi
nello spessore, nulle altre
componenti

Categorie Strutturali



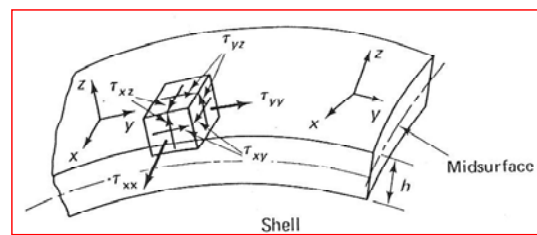
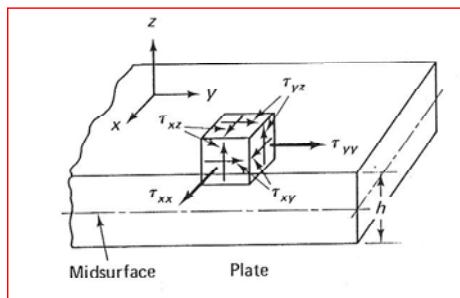
Deformazioni piane

Categorie Strutturali



Geometria e carichi assialsimmetrici

Categorie Strutturali



Piastre

e

Gusci

$t_{zz}=0$ le altre componenti non zero

Variabili cinematiche e statiche corrispondenti alle varie categorie

<i>Problem</i>	<i>Displacement Components</i>	<i>Strain Vector ϵ^T</i>	<i>Stress Vector τ^T</i>
Bar	u	$[\epsilon_{xx}]$	$[\tau_{xx}]$
Beam	w	$[\kappa_{xx}]$	$[M_{xx}]$
Plane stress	u, v	$[\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \gamma_{xy}]$	$[\tau_{xx} \ \tau_{yy} \ \tau_{xy}]$
Plane strain	u, v	$[\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \gamma_{xy}]$	$[\tau_{xx} \ \tau_{yy} \ \tau_{xy}]$
Axisymmetric	u, v	$[\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \gamma_{xy} \ \epsilon_{zz}]$	$[\tau_{xx} \ \tau_{yy} \ \tau_{xy} \ \tau_{zz}]$
Three-dimensional	u, v, w	$[\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \epsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]$	$[\tau_{xx} \ \tau_{yy} \ \tau_{zz} \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]$
Plate Bending	w	$[\kappa_{xx} \ \kappa_{yy} \ \kappa_{xy}]$	$[M_{xx} \ M_{yy} \ M_{xy}]$

Notation: $\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$, $\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$, $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$, ..., $\kappa_{xx} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $\kappa_{yy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$, $\kappa_{xy} = 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$

Matrici tensione-deformazione per materiali isotropici

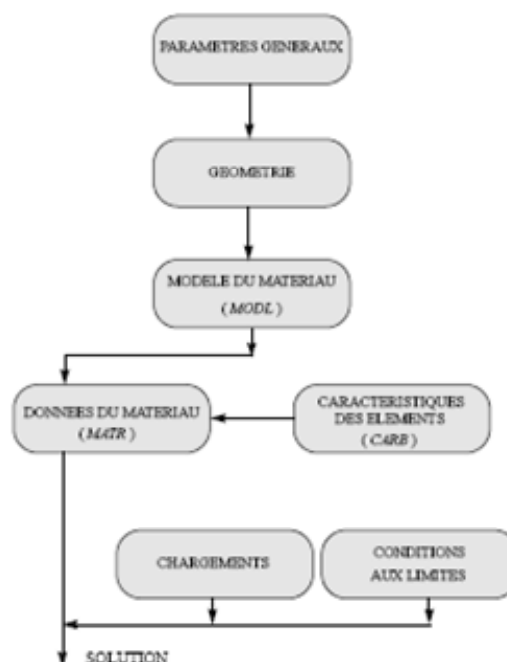
<i>Problem</i>	<i>Material Matrix C</i>	$\tau = C\epsilon$
Bar	E	
Beam	EI	
Plane stress	$\frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$	
Plane strain	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$	
Axisymmetric	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
Three-dimensional	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$ elements not shown are zeros	
Plate bending	$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$	

Notation: E = Young's modulus, ν = Poisson's ratio, h = thickness of plate, I = moment of inertia

Organizzazione del processo di calcolo agli E.F.

- **FASE 1**: DEFINIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO
- **FASE 2**. RISOLUZIONE DEL PROBLEMA DISCRETIZZATO
- **FASE 3**. ANALISI E POST-PROCESSAMENTO DEI RISULTATI

Fasi di un modello di calcolo



DEFINIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

- Discretizzazione geometrica del dominio
- Definizione del modello:
 - tipo di analisi (tensioni o deformazioni piane, simmetria assiale, ecc...)
 - tipo di elemento (barre, travi, piastre, ecc...)
 - proprietà del materiale
 - caratteristiche geometriche aggiuntive

[manuale](#)

RISOLUZIONE DEL PROBLEMA DISCRETIZZATO

- Calcolo della rigidezza e della matrice di massa per ogni elemento finito;
- Applicazione delle condizioni al contorno;
- Applicazione dei carichi esterni;
- Assemblaggio della rigidezza e della matrice di massa per la struttura completa;
- Risoluzione del sistema di equazioni di equilibrio lineari.

ANALISI E POST-PROCESSAMENTO DEI RISULTATI

Massima libertà di scelta su **cosa** e su **dove**

- Quantità locali** (spostamenti, tensioni o sforzi)
- Quantità globali** (deformazione massima od energia)
- Quantità primarie** (tensioni, deformazioni)
- Quantità derivate** (ad esempio, tensioni equivalenti, distribuzione di un parametro di danno che sia funzione della tensione e/o della deformazione)

Unità di misura

CAST3M non necessita di alcun particolare
sistema di unità di misura

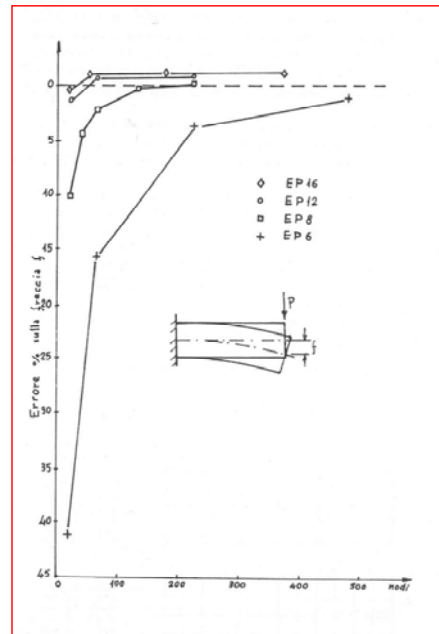
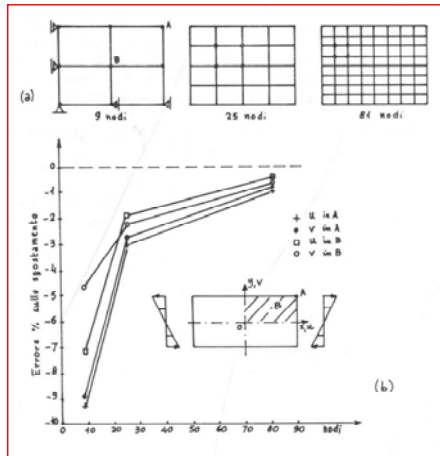
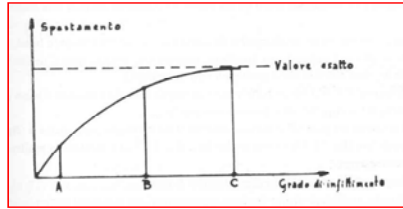
I dati debbono essere integrati in un sistema che abbia le dimensioni adatte.

Verifica di coerenza: **F=mg**.

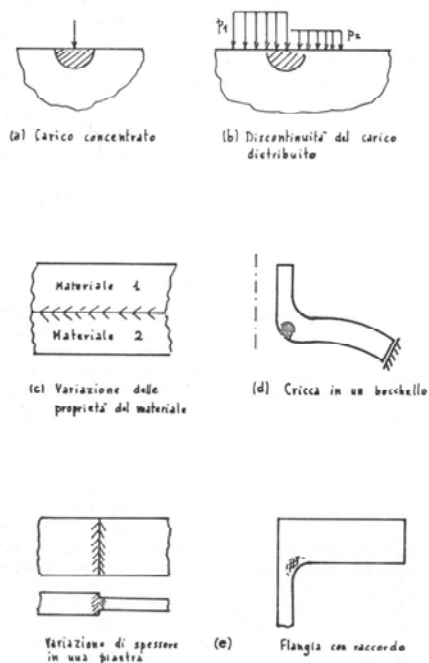
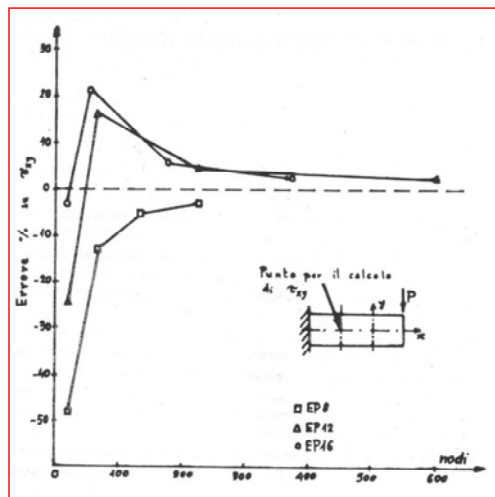
Eccezioni :

- gli angoli debbono essere sempre espresse in gradi
- i valori di temperatura e del coefficiente di dilatazione termica debbono essere espressi in unità coerenti

Linee Guida Generali per la conduzione di analisi FEM



Linee Guida Generali per la conduzione di analisi FEM



Linee Guida Generali per la conduzione di analisi FEM

- Prima di eseguire una analisi con un programma FEM non familiare, eseguire uno o più semplici test per guadagnare confidenza sull'uso e sulla correttezza dei risultati.
- Iniziare l'esame di un nuovo problema utilizzando una magliatura molto semplice con pochi elementi in modo da avere delle esecuzioni più veloci.
- Numerare i nodi in modo ordinato e consecutivo attraverso la magliatura.
- Disporre gli elementi in modo tale che le eventuali discontinuità, geometriche o del materiale, siano localizzate sul contorno e non all'interno dell'elemento.

Linee Guida Generali per la conduzione di analisi FEM

- Dopo aver eseguito una o due analisi con una magliatura rarefatta risulterà chiaro quali sono le zone meno accurate. Procedere allora a realizzare una magliatura maggiormente rifinita in quelle zone.
- Ogni una o due magliature differenti eseguire una stima di errore confrontando le due soluzioni e/o esaminando le discontinuità sui flussi.
- Alla fine della analisi si deve essere sempre in grado di dare una coerente spiegazione/interpretazione dei risultati.



Un codice di calcolo agli Elementi Finiti per
l'analisi meccanica e fluidodinamica di
strutture e componenti
Parte Generale

Ing. A. Miliozzi - G.M. Giannuzzi
ENEA UT-RINN-PCI
C.R. Casaccia (Roma)

Campi di applicabilità di
CAST3M

Elasticità lineare

Analisi meccaniche non lineari

Dinamica

Analisi della Frattura

Instabilità

Termica

Magnetostatica

Fluidodinamica

Info-generalì su CAST3M

CAST3M è un codice di calcolo per l'analisi di strutture e la fluidodinamica basato sul metodo degli elementi finiti (FEM).

ORIGINE: *Departement de Mecanique et de Technologie* (DMT) del *Commissariat à l'Energie Atomique* francese (CEA), in continua evoluzione dal 1984 .

ATTIVITA': ricerca nel campo della meccanica dei solidi e fluidi, con sviluppo di modelli e validazione sperimentali.

OBIETTIVO: costruire uno strumento di alto livello per la progettazione, il dimensionamento e l'analisi di strutture e componenti tipici del settore nucleare ma estendibile ai settori tradizionali dell'industria.

Info-generalì su CAST3M

CAST3M è un codice per risolvere problemi di multifisica, progettato e sviluppato per oltrepassare i limiti di adattabilità offerti dai codici convenzionali.

GIBIANE: macro linguaggio che descrive “facilmente” ogni operazione delle varie fasi di una analisi, attraverso istruzioni semplici; consente una programmazione ad alto livello di propri algoritmi risolutivi in tempi ridotti e con affidabilità.

I **files di input** sono caratterizzati da sequenze di istruzione parametrizzabili che attivando funzioni operative (**Operatori**) manipolano strutture dati (**Oggetti**) producendone di nuove più complesse o semplicemente recuperando informazione dagli oggetti in input.

Info-generalì su CAST3M

Caratteristiche

personalizzazione ed estensione

interazione con il problema

CAST3M è un programma che l'utente può

adattare alle sue necessità

Info-generalì: elementi costituenti

CAST3M si presenta come un sistema completo

costruzione del modello (pre processore)

+

calcolo

+

trattamento dei risultati (post processore).

CAST3M è un programma
potente, flessibile ed ottimizzato

Info-general: gli OGGETTI

Una informazione od un gruppo di informazioni costituiscono ciò che è definito come un " **OBJECT** ”

Tutti gli oggetti sono caratterizzati da:

- un nome fornito dall'utilizzatore per identificarli
- un tipo, che permette al programma di trovare le strutture dei dati associati.

Il nome rappresenta la caratteristica più importante; il tipo è una necessità per il processamento dei dati, permettendo la conduzione di utili verifiche sintattiche dei dati.

Info-general: gli Operatori

Il programma consiste di una serie di
operatori

Ogni operatore esegue una o più operazioni.

Un operatore è invocato con una opportuna istruzione.

L'esecuzione dell'operazione è seguita immediatamente al
verifica sintattica e semanticadell'istruzione.



L'utilizzatore può definire od adattare
la sequenza di risoluzione ad ogni tipo di problema.

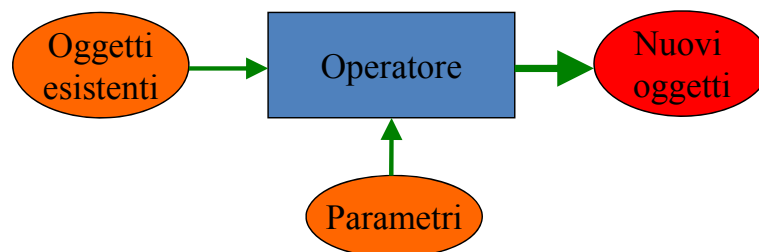


Linguaggio di alto livello: *GIBIANE*
facile scambio di informazioni tra utente e programma e
coll'esterno.

Il linguaggio GIBIANE

GIBIANE : linguaggio di alto livello che rende possibile all'utente la comunicazione diretta con il programma attraverso lo scambio dei dati.

Operazioni con GIBIANE: maneggiare attraverso *operatori* degli **oggetti** esistenti per modificarli o crearne dei nuovi .



GIBIANE: la sintassi

Creazione di uno o più nuovi oggetti:

RISULTATI = OPERATORE OPERANDI;

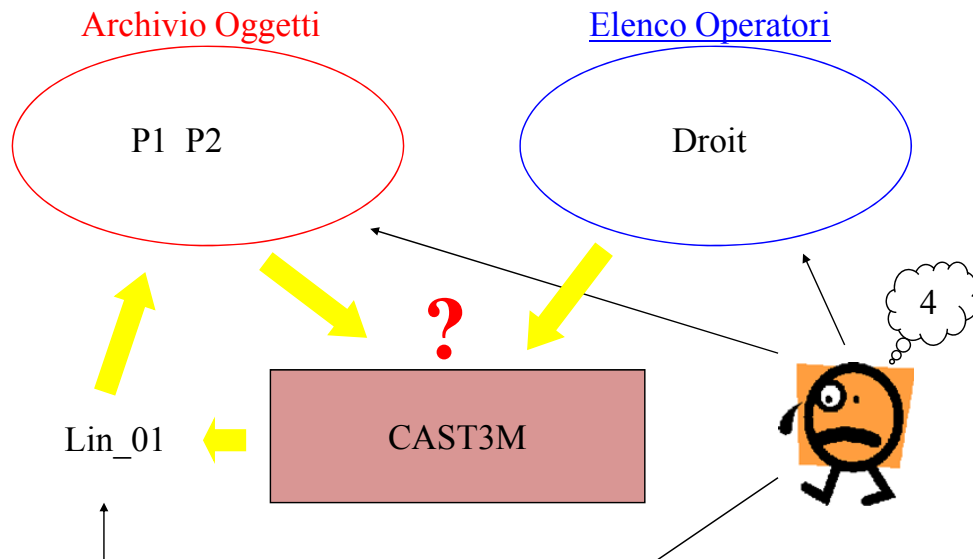
Esempio: " *LIN_01 = DROI P1 P2 4;* "

Modifica di uno o più oggetti esistenti

DIRETTIVA OPERANDI;

Esempio: " *ELIM 0.001 GEOM;* "

Fasi della generazione di un'istruzione



Oggetti Gibiane Elementari

Type of the object	CASTEM 2000 type	Examples of commands
Integer	Entier	I1 = 3; I2 = (3 + 2)/4; I3 = ENTIER 3.1415926;
Real	Flottant	X1 = 1.4142; X2 = (SIN 45)**0.5; X3 = FLOTTANT I3;
List of integers	Listenti	LIST1 = LECT 1 3 PAS 1 10;
List of reals	Listreel	LIST3 = PROG 0. PAS 0.2. ; LIST4 = X2 * LIST3;
Discrete function	Evolution	EVOL1 = EVOL MANU 'x' LIST3 'F(x)' LIST4;
Table	Table	TAB1 = TABLE; TAB1.1 = X1; TAB1.'EVOLUTION' = EVOL1;

Progressioni

```
t_pr = prog 20. pas 10. 300. ;
t_un = prog (dime t_pr)*1. ;
p1_pr = ( (1.8*t_pr) - (20.*t_un)**.5;
titr 'andamento proprietà con temperatura';
evo1 = evol manu t_pr p1_pr;
p2_pr = ( t_pr - (20.*t_un)**.8;
evo2 = evol manu t_pr p2_pr;
dess (evo1 et evo2);
opti donn 5;
```

[Esegui-progressioni](#)

Tavole (Oggetti-utente)

```
elenco1 = table;
elenco1 . 1 = table;
elenco1 . 1 . 'cognome_nome' = 'GIANNUZZI Giuseppe Mauro'
;
elenco1 . 1 . 'e-mail' = 'giannuzzi@enea.it';
elenco1 . 2 = table;
* .....
list elenco1;
list elenco1 . 1;
mess (elenco1 . 1 . 'cognome_nome');
mess (dime elenco1);
opti donn 5;
```

[Esegui-tavole](#)

Cicli

```

nc1=6;
nc2=6;
repe cl1 nc1;
  mess 'ciclo1 ' &c11;
  repe cl2 nc2;
    mess (&c11*&c12);
  fin cl2;
fin cl1;
opti donn 5;
  
```

[Esegui-cicli1](#)

Cicli-Test-Salto

```

repe cl1 ;
  si ( &c11 > 10);
    quitter cl1;
  fin si;
  si (ega &c11 3);
    mess 'salta';
    iterer cl1;
  fin si;
  si (mult &c11 2);
    mess &c11 'numero pari';
  sinon;
    mess &c11 'numero dispari';
  fin si;
fin cl1;
opti donn 5;
  
```

[Esegui-cicli2](#)

Possibilità offerte da CAST3M Le PROCEDURE

Concetto di procedure:

operatori di alto livello, che chiamano al loro interno gli operatori elementari.

Utilità delle procedure:

- Permette operazioni standardizzate per problemi complessi e ripetitivi.
- Permette di ritornare ad un uso del programma in modalità "black box".
- Utilizzare gli stessi dati per diversi operatori.

Possibilità offerte da CAST3M Le PROCEDURE

Caratteristiche delle procedure :

- Possono essere usate come operatori elementari.
- Una procedura può chiamarne altre ed anche se stessa.
- Una procedura può essere composta da diverse procedure.
- La sequenza degli operatori elementari contenuti in una procedura è sempre visibile.

PROCEDURE

```

DEBPROC FATT_LE I*ENTIER ;
mess 'IN I=' i;
  SI (I <EG 0) ;
    VAL1=1;
  SINON;
    VAL1= FATT_LE(I-1)*I;
  FINSI;
mess 'OUT I=' i;
FINPROC VAL1;
*-----
h=4;
mess 'Fattoriale di' h '=' (fatt_le h);

```

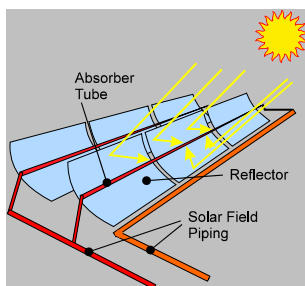
[Esegui-procedura](#)



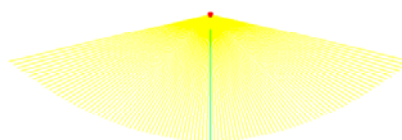
Un codice di calcolo agli Elementi Finiti per
l'analisi meccanica e fluidodinamica di
strutture e componenti

Ing. A. Miliozzi - G.M. Giannuzzi
ENEA UT-RINN-PCI
C.R. Casaccia (Roma)

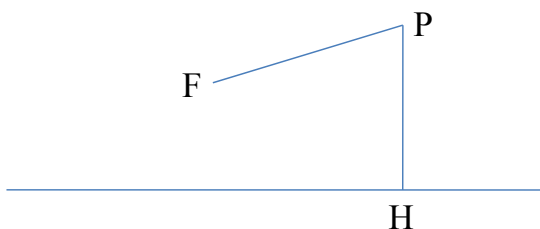
Parabola distorta (grafica e magliatura)



Parabolic Trough



$PH=K*FP$



[Esegui-Par-dis](#)

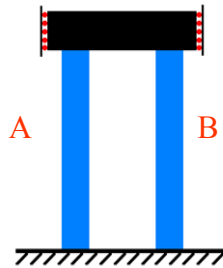
```

*Visualizzazione errore captazione connesso a
*distorsione profilo parabolico
*=====
debp par_deg x*flottant k*flottant f*flottant;
k2= k * k;
a1= k2 - 1.;
b1=-2.* f * k * (k + 1.);
c1= k2 * x * x ;
*
de1=(b1 * b1) - (4.* a1 * c1);
de2= de1 ** 0.5;
y1= ((-1. * b1) - de2)/(2. * a1);
*y2= ((-1. * b1) + de2)/(2. * a1);
*
m1 = ( k2*x )/((f*(k2 + k)) - ( a1 * y1));
finproc y1 m1;
*=====
opti dime 2 elem seg2;
r=0.035;
xc=2.85;
k1=1.1 ;
f1=1.81 ;
et1=+0.;
n1=100 ;
opti donn 5;
dp1=xc/(flottant n1);
p_x=prog 0. pas dp1 xc;
p_y=prog;
p_y3=prog;
p_alf=prog;
n2=dime p_x;
*
repe c11 n2 ;
  x1 = extr p_x &c11;
  y1 m1 = par_deg x1 k1 f1;
  y3 =(x1*x1)/(4.* f1);
  alf=(2.*(atg 1 m1))+ 90.+ et1;
  p_alf=p_alf et (prog alf);
  p_y   = p_y   et (prog y1);
  p_y3  = p_y3  et (prog y3);
  * mess &c11 'x1' x1 'y1' y1 'alf' alf 'y3' y3 (y3 -y1);
fin c11;
opti donn 5;
*
repe c12 n2;
  x1 =extr p_x &c12;
  y1 =extr p_y &c12;
  alf=extr p_alf &c12;
  *
  y2 = ((sin alf)/(cos alf) * x1) + y1;
  y3 = extr p_y3 &c12;
  si (&c12 ega 1);
  f_rag = d 1 (x1 y1) (0. y2) ;
  sinon ;
  si (&c12 ega 2);
  par   = d 1 (0 0) (x1 y3) coul roug;
  par_d= d 1 (0 0) (x1 y1) coul vert;
  sinon;
  x0=extr p_x (&c12 - 1);

```

```
    y0=extr p_y3 (&c12 - 1);
    yd=extr p_y  (&c12 - 1);
    par=par et (d 1 (x0 y0) (x1 y3) coul roug);
    par_d= par_d et (d 1 (x0 yd) (x1 y1) coul vert);
    finsi;
    f_rag = f_rag et (d 1 (x1 y1) (0. y2) );
    finsi;
*
fin c12;
opti donn 5;
ric=(c 5 (0 (f1+r)) (0 f1) (r f1)) et
    (c 5 (r f1) (0 f1) (0 (f1-r)));
ric=ric coul jaun;
trac (f_rag et par et par_d et ric);
FIN;
*=====
```

Barre a differenti temperature (caso elastico con carico termico)



Caso II

$$E_A = E_B = E$$

$$S_A = S_B = S$$

$$\Delta T_A > \Delta T_B$$

$$\alpha_A = \alpha_B = \alpha$$

[Esegui-barrel](#)

```

*=====
* Comportamento termoelastico di due barre
* con stesso alfa e diversa temperatura
*=====
opti echo 1 dime 2 elem qua4 mode plan cont ;
opti donn 5;
s=10.;
l=30.;
a1=10.e-6;
a2=10.e-6;
e1=200000.;
e2=200000.;
dt1=20.;
dt2=40.;
*ss1=(a2-a1)*dt1*e1/2;
*ss2=-1.*ss1;
ss1=a1*(dt2-dt1)*e1/2.;
ss2=-1.*ss1;
mess 'sig1' ss1 'sig2' ss2;
opti donn 5;
*
p11= 0 0;
p12= s 0;
lb1= d 2 p11 p12;
b1 = lb1 trans (0 1) 5;
la1= cote 3 b1;

```



```

trac b1 qual;
*
dd = 3./2.*s;
p21= dd 0;
p22= (s+dd) 0;
lb2= d 2 p21 p22;
b2 = lb2 trans (0 1) 5;
la2= cote 3 b2;
trac b2 qual;
*
b_t=b1 et b2;
trac b_t qual;
*
*Vincoli
vly=bloq uy lb1;
vlx=bloq ux p11;
*
v2y=bloq uy lb2;
v2x=bloq ux p21;
v12=rela uy la1 - uy la2;
opti donn 5;
*
ob1=mode b1 mecanique elastique qua4;
ob2=mode b2 mecanique elastique qua4;
ob_t=ob1 et ob2;
mb1=mate ob1 young e1 nu 0.3 alph a1;
mb2=mate ob2 young e2 nu 0.3 alph a2;
opti donn 5;
*
*Rigidezza materiale
rb1=rigi ob1 mb1;
rb2=rigi ob2 mb2;
*Rigidezza totale
r_t=(rb1 et vly et vlx) et
      (rb2 et v2y et v2x) et
      v12;
opti donn 5;
*
*Carico termico
tb1=manu chpo b1 1 T dt1;
tb2=manu chpo b2 1 T dt2;
stb1=thet ob1 mb1 tb1;
stb2=thet ob2 mb2 tb2;
fb1=bsig ob1 stb1;
fb2=bsig ob2 stb2;
f_t=fb1 et fb2;
opti donn 5;
*
*Risoluzione
dp1=reso r_t f_t;
opti donn 5;
*Deformate
def1= defo b_t dp1 500. roug;
def0= defo b_t dp1 0.;
trac (def1 et def0);
*
*Tensioni meccaniche
sb1=(sigma ob1 mb1 dp1) - stb1;
sb2=(sigma ob2 mb2 dp1) - stb2;

```



```
sb_t= sb1 et sb2 ;
*
trac ob_t (exco smyy sb_t) b_t;
trac ob_t (exco smxx sb_t) b_t;
trac ob_t (exco smzz sb_t) b_t;
*
fin;
*=====
```

Esempio

Test NAFEMS LE11
Solido Cilindro/Cono/Sfera
(Calcolo 3D)

Contentitore spesso costituito da una parte sferica sormontata da una parte conica ed ancora da una parte cilindrica.

Gradiente lineare di temperatura sia radiale che assiale :

$$T(x,y,z) = 10. [(x**2 + y**2)**.5 + z] + 20.$$

Obiettivo : confrontare la tensione verticale calcolata nel punto A con un valore teorico di riferimento.

Creazione punti e linee

OPTI DIME 3 ELEM CU20;

* Dimensioni in metri

* Punti

PO = 0. 0. 0.; P1 = 0. 0. 1.;

PA = 1. 0. 0.; PB = 1.4 0. 0.;

PE = (1. * (COS 30)) 0. (1. * (SIN 30));

PD = (1.4 * (COS 30)) 0. 0.7;

PC = (COS 30) 0. (SIN 30);

PE = (COS 45) 0. (SIN 45);

PH = 0.7071 0. 1.79;

PI = 1. 0. 1.79 ; PG = 1. 0. 1.39;

* Linee e cerchi

K = 2;

N1 = 1 * K; AB = PA DROI N1 PB;

GI = PG DROI N1 PI; IH = PI DROI N1 PH;

EC = PE CERC N1 PO PC;

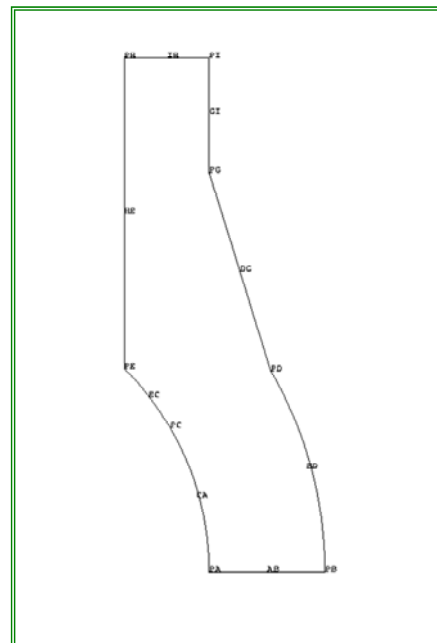
N2 = 2 * K; BD = PB CERC N2 PO PD;

DG = PD DROI N2 PG; HE = PH DROI N2 PE;

CA = PC CERC N2 PO PA;

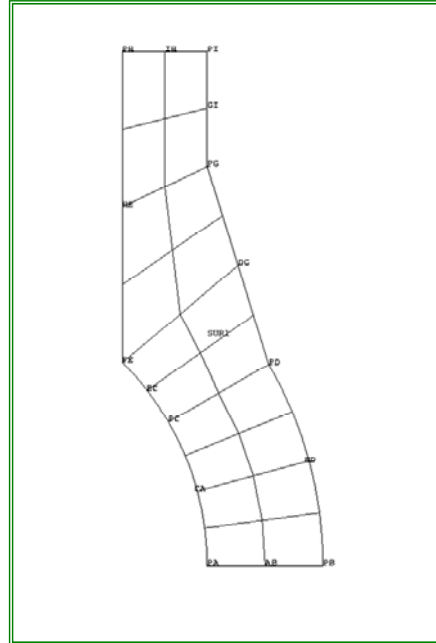
trac (0 -1000 0) (AB et BD ET DG ET GI et IH

et HE ET EC ET CA) ;



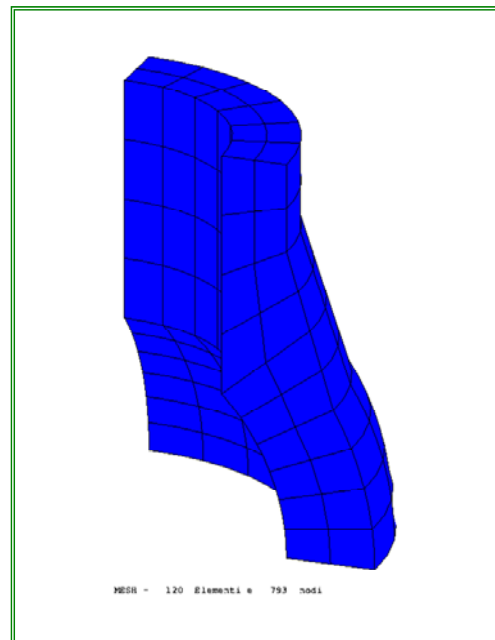
Creazione superficie

* Superficie laterale
*
SUR1 = DALL AB (BD ET DG ET GI)
IH (HE ET EC ET CA) PLAN;
*
trac (0 -1000 0) sur1 ;



Creazione volume

* Volume
N3 = 3 * K ;
VOL1 = SUR1 VOLU N3
ROTA 90 PO P1;
*
ELVOL1 = NBEL VOL1 ;
NOVOL1 = NBNO VOL1;
*
TITR 'MESH - '
elvol1 ' Elementi e '
novol1 ' nodi ' ;
TRAC (1000 1000 1000) FACE
(COUL VOL1 BLEU);
*

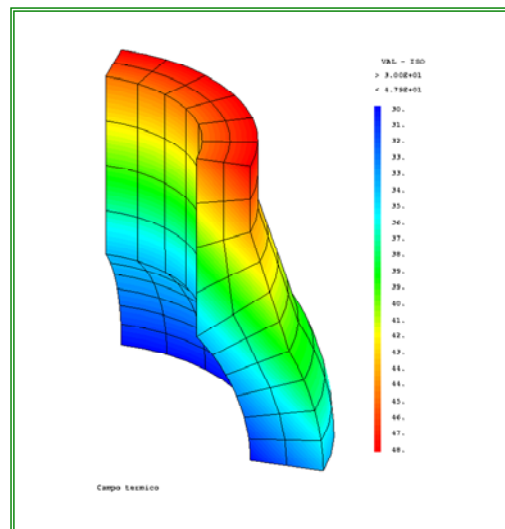


Modello, materiale e rigidezza

* Modello - Materiale - Caratteristiche - rigidezza
 MODL1 = MODL VOL1 MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE CU20;
 MATR1 = MATR MODL1 YOUN 210E9 NU 0.3 ALPH 2.3E-5;
 RI1 = RIGI MODL1 MATR1;
 * Condizioni al contorno
 * - simmetria rispetto ai piani xz e yz,
 * - spostamenti verticali nulli per le facce superiore e inferiore.
 CL1 = BLOQ UY (FACE 1 VOL1);
 CL2 = BLOQ UX (FACE 2 VOL1);
 SURINF = AB ROTA N3 90 PO P1;
 SURSUP = IH ROTA N3 90 PO P1;
 ELIM (VOL1 ET SURINF ET SURSUP) 0.0001;
 CL3 = BLOQ UZ (SURINF ET SURSUP);
 CL4 = BLOQ RY (SURINF ET SURSUP);
 CL5 = BLOQ RX (SURINF ET SURSUP);
 * rigidezza complessiva
 RIG1 = RI1 ET CL1 ET CL2 ET CL3 ET CL4 ET CL5;

Carico termico

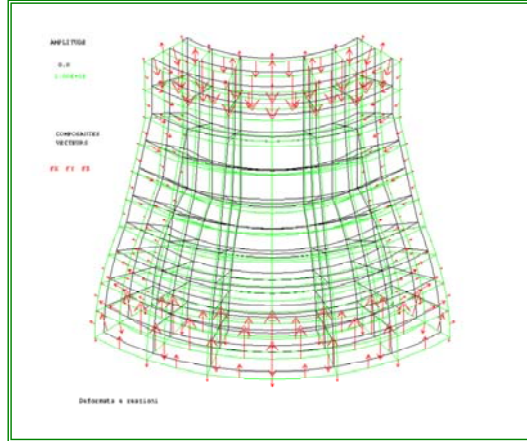
* Carico termico
 * $T(x,y,z) = 10((x^{**2} + y^{**2})^{**}.5 + z) + 20.$
 * Creazione del campo di temperatura
 CHPX = COOR 1 VOL1;
 CHPY = COOR 2 VOL1;
 CHPZ = COOR 3 VOL1;
 CHP1 = CHPX ** 2; CHP2 = CHPY ** 2;
 CHP3 = (CHP1 + CHP2)**.5;
 CHP4 = 10. * (CHP3 + CHPZ) + 20. ;
 CHP5 = NOMC 'T' chp4 ;
 titr 'Campo termico ' ;
 trac (1000 1000 1000) vol1 chp5 ;
 * Tensioni equivalenti
 CHREF= MANU CHPO VOL1 1 'T' 20. ;
 CHAM10 = THET MODL1 MATR1
 (CHP5 - chref);
 * Forze equivalenti
 CHAR1 = BSIG MODL1 CHAM10;



Risoluzione

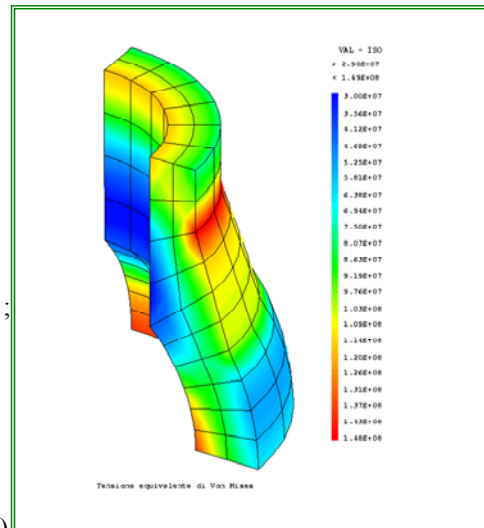
* Risoluzione: campo di spostamenti
DEP1 = RESO RIG1 CHAR1;

* Deformata e reazioni
AMPVEC = 1.E-7;
REA1 = REAC DEP1 RIG1;
VECT1= VECT REA1 AMPVEC
FX FY FZ ROUGE;
DEFO = DEFO 0. DEP1 VOL1;
DEF1 = DEFO 100. DEP1 VOL1
VECT1 VERT;
TITR 'Deformata e reazioni';
TRAC (1000 1000 1000) VOL1
(DEF0 ET DEF1);



Calcolo tensioni

* Calcolo delle tensioni totali.
CHAM1 = SIGM MODL1 MATR1 DEP1;
* Depurazione tensioni di origine termica
CHAM1 = CHAM1 - CHAM10;
* Tensione di Von Mises
vm1 = vmis cham1 modl1 matr1 ;
vm1 = CHAN CHPO MODL1 vm1;
titr 'Tensione equivalente di Von Mises' ;
trac (1000 1000 1000) vol1 vm1 ;
* Interpolazione tensioni ai nodi del mesh
CHAM2 = CHAN NOEUD MODL1 CHAM1;
CHPO10 = CHAN CHPO MODL1 CHAM2;
* Estrazione del valore cercato.
SMZZA = EXTR CHPO10 SMZZ PA;
SMZZA = SMZZA / 1.E6;
SMZZA1 = -105;
* Calcolo dello scarto dal valere di riferimento
ERGZZA = 100 * (ABS ((SMZZA - SMZZA1)
/ SMZZA1));

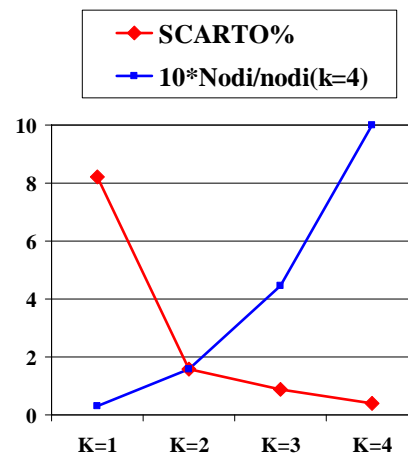


Risultati

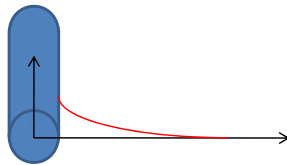
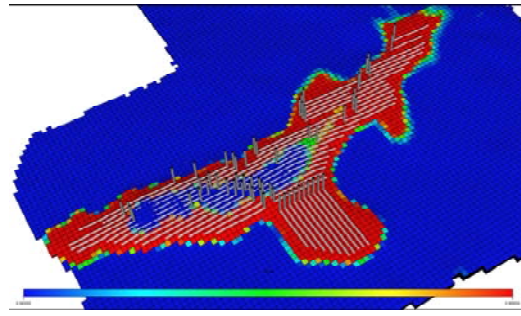
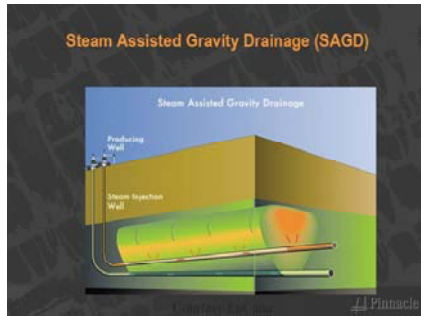
K	Elementi	Nodi	Tensione calcolata (Mpa)	Tensione riferim. (Mpa)	Scarto (%)
1	15	148	-96.39		8.2
2	120	793	-103.35	-105	1.57
4	960	5017	-104.59		0.4

Osservazioni

- L'errore diminuisce aumentando il numero di nodi
- Al crescere del numero di nodi diminuisce l'incremento di precisione
- Al crescere del numero di nodi aumenta fortemente il tempo di calcolo



Riscaldamento formazione petrolifera



[Esegui-eni-di-tem](#)

```

*=====
*Transitorio termico per lo studio del riscaldamento di un
* pozzo petrolifero con sali fusi
*=====
debp and_temp x1*flottant s1*maillage tav1*table p_tem*listreel;
pp1=x1 0.;
pp2= s1 point proc pp1;
x2=coor 1 pp2;
mess 'distanza da asse m' x1 x2;
n_p1=dime tav1 . 'TEMPERATURES';
p_val=prog;
repe cl01 n_p1;
clm1=&cl01 - 1;
vall = extr (tav1 . 'TEMPERATURES' . clm1 ) 'T' pp2;
p_val=p_val et (prog vall);
fin cl01;
titr 'andamento temperatura a ' x2 'm da asse tubo';
ev1 = evol manu p_tem p_val;
dess ev1;
finprog ev1;
*=====
opti echo 1 dime 2 mode axis elem qua8;
r1=0.327/2.;
r2=80.;
l_att=1000.;
*
p01=r1 0.;
p02=r2 0.;
p11=r1 1.;
p12=r2 1.;
    
```



```

v1 =0. 1.;
*
l1= d p01 p02 dini 0.1 dfin 2.;
s1= l1 tran v1 1;
l4= cote s1 4;
trac s1;
*
h1=2000.;
k1=8.5;
rh1=2100.;
*J/Kg-C
cp1=0.44*4186.;
mess cp1;
*
o_s1=mode s1 thermique isotrope qua8;
m_s1=mate o_s1 'K' k1 'RHO' rh1 'C' cp1;
*
Tini= 100.;
Tsal= 435.;
*
o_l4=mode l4 convection ;
m_l4=mate o_l4 'H' h1;
*
c_os=3600.;
c_go=24.;
c_ag=365.;
c_gs=c_go*c_os;
c_as=c_ag*c_gs;
mess c_as;
*
annil=5.;
ev1 = evol manu (prog 0. (annil*c_ag*c_go*c_os))
          (prog 1. 1.);
t_l4=manu chpo l4 nature diffus 1 'T' Tsal;
cl_h=char 'TECO' ev1 t_l4;
*
tab0 = table;
tab0.'TEMPERATURES' = table ;
tab0.'TEMPERATURES'. 0 = manu chpo s1 nature diffus 1 'T' Tini;
tab0.'MODELE'=' o_s1 et o_l4;
tab0.'CARACTERISTIQUES'=' m_s1 et m_l4;
tab0.'PROCEDURE_THERMIQUE'='DUPONT';
tab0.'CRITERE'=1.E-4;
tab0.'CHARGEMENT' = cl_h;
*
T_p1= prog 0. pas 60. (1.*c_os)
          pas (1.*c_os) (1.*c_go*c_os)
          pas (1.*c_go*c_os) (30.*c_go*c_os)
          pas (30.*c_go*c_os) (annil*c_as);
n_p1=dime T_p1;
mess 'Numero passi' n_p1 'Anni' annil ;
*opti donn 5;
tab0.'TEMPS_CALCULES' = T_p1;
*
PASAPAS TAB0 ;
*
n_p2=dime tab0. 'TEMPERATURES';
p_tempo=prog;
p_flux =prog;

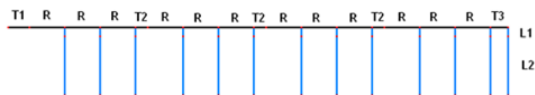
```

```

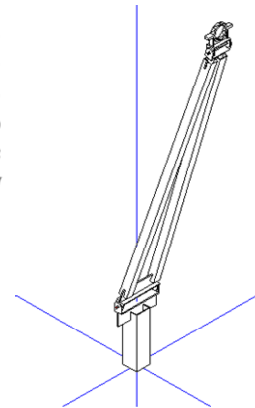
p_ptot =prog;
repe cl1 n_p2 ;
  clm1 = &cl1 - 1;
  mess &cl1;
  tt1=tab0. 'TEMPERATURES' . clm1 ;
  tempo=tab0.'TEMPS'. CLM1;
  p_tempo=p_tempo et (prog tempo);
*potenza ceduta dal sale KW/m
  flux1=(2.*pi*r1)*h1*(Tsal-(maxi tt1))/1000.;
  p_flux=p_flux et (prog flux1);
* trac  s1 tt1;
  ev_tt1=evol chpo l1 tt1;
  si (&cl1 ega 1);
  ev_tot=ev_tt1;
  sinon;
  ev_tot=ev_tot et ev_tt1;
  fin;
fin cl1;
dess ev_tot titr 'distribuzione temperature a vari istanti';
titr 'Potenza ceduta dal sale KW/m nel tempo -giorni-';
dess (evol manu (p_tempo/c_gs) p_flux);
titr 'Potenza ceduta dal sale KW nel tempo -giorni- lung. att.' l_att;
dess (evol manu (p_tempo/c_gs) (p_flux*l_att));
*
ev1 =and_temp r1  s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev2 =and_temp 1.  s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev3 =and_temp 2.  s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev4 =and_temp 3.  s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev5 =and_temp 4.  s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev6 =and_temp 5.  s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev7 =and_temp 10. s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev8 =and_temp 20. s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev9 =and_temp 30. s1 tab0 (p_tempo/c_as);
ev10=and_temp r2 s1 tab0 (p_tempo/c_as);
dess (ev1 et ev2 et ev3 et ev4 et ev5 et
      ev6 et ev7 et ev8 et ev9 et ev10);
fin;
*=====

```

Linea ricevitore al montaggio



T1- 335
T2- 155
T3- 550
R- 4060
L1- 92
L2- 1557



[Esegui-linea-100m](#)

```

=====
* SIMULAZIONE INGOMBAMENTO RICEVITORE-100m
* POSIZIONE A 425 C VERTICALE
* CALCOLO POSIZIONE DI RITORNO E STRESS
* IN CONFIGURAZIONE DI MONTAGGIO A 20 C
=====
* D A T I=====
=====
OPTI DIME 3 ELEM SEG2 MODE TRID echo 1;
=====
*LUNGHEZZE in M
*STRESS in Pa
*TEMPERATURE in °C
*FORZE in N
=====
OPTI ECHO 1;
*OPTI IMPR 'ric_100_NL_L_20.TXT';
*TEMPERATURA MONTAGGIO VIRTUALE
*CALDO CON CAVALLETTI AD ANGOLO RETTO
*-----
*TUBO RICEVITORE E TRONCHETTI
LR20 = 4.06;
LRTMGB = 4.09;
*tronchetto motore
LTM20 = 0.335;
*tronchetto intermedio
LTI20 = 0.155;
*tronchetto finale
LTF20 = 0.550;
*

```

```
ALUN=(LRTMGB - LR20)/LR20;
*
TR= 20.;
*
*DILATAZIONE TERMICA SECONDO interpolante MA
*a TM
aa=15.462E-6;bb=0.005E-6;
aaa=bb;bbb=aa-(tr*bb);ccc=-1.*((aa*tr)+alun);
*
tm1=(-1.*bbb)+(((bbb**2)-(4.*aaa*ccc))**0.5)/(2.*aaa);
tm2=(-1.*bbb)-(((bbb**2)-(4.*aaa*ccc))**0.5)/(2.*aaa);
*
TM=tm1;
DTFC=TM-TR;
A20TM= aa+(bb*TM);
*per ritorno a 20 C
ATM20 = A20TM / (1. + (A20TM * DTFC));
*verifica
*lr20b=lrtmgb*(1 + (atm20 * (tr - tm)));
*mess lr20b;
*opti donn 5;
*
*TRONCHETTO MOTORE
LTM20=0.335;
*
*CAVALLETTO
*distanza vertice parabola cenniera bassa cavalletto
DVC=0.161;
*distanza cerniera bassa cerniera alta cavalletto
DCC=1.557;
*distanza cerniera alta centro tubo ricevitore
DCF=0.092;
*distanza vertice parabola centro tubo ricevitore (fuoco)
HFU=1.81;
HCB=DVC;
HCA=DVC + DCC ;
VCA=0. (-1.*DCF) 0.;
VCB=0. (-1.*(DCF+DCC)) 0.;
*=====
* D A T I=====FINE===
*=====
*
*DILATAZIONE RICEVITORI E TRONCHETTI
LRTM  = LR20  * (1. +(A20TM * DTFC));
LTITM = LTI20 * (1. +(A20TM * DTFC));
LTFTM = LTF20 * (1. +(A20TM * DTFC));
LTMTM = LTM20 * (1. +(A20TM * DTFC));
*
opti echo 0;
MESS '  ' ;
MESS 'TR      ' TR;
MESS 'TM      ' TM;
MESS 'LR20    ' LR20;
MESS 'LRTM    ' LRTM;
MESS 'LRTMGB  ' LRTMGB;
MESS 'LTM20   ' LTM20;
MESS 'LTMTM   ' LTMTM;
MESS 'LTI20   ' LTI20;
MESS 'LTITM   ' LTITM;
```

```
MESS 'LTF20 ' LTF20;
MESS 'LTFTM ' LTFTM;
MESS 'ALLUNGAMENTO UNITARIO A CALDO ' ALUN;
MESS 'ALFA A CALDO MA ' A20TM;
MESS 'ALFA PER RITORNO A FREDDO ' ATM20;
MESS ' ';
OPTI ECHO 1;
*
OPTI DONN 5;
*
ZERO = 0. 0. 0.;
DENS 0.05;
LRICF=0.;
LRICC=0.;
P1M =LRICC HFU 0.;
  LRICF=LRICF + LTM20;
  LRICC=LRICC + LTMTM;
P2M =LRICC HFU 0.;
  LRICF=LRICF + LR20;
  LRICC=LRICC + LRTM;
P3R =LRICC HFU 0.;
P3CAA =P3R PLUS ZERO;
P3CAB =P3R PLUS VCA;
P3CBA =P3R PLUS VCA;
P3CBB =P3R PLUS VCB;
  LRICF=LRICF + LR20;
  LRICC=LRICC + LRTM;
P4R =LRICC HFU 0.;
P4CAA =P4R PLUS ZERO;
P4CAB =P4R PLUS VCA;
P4CBA =P4R PLUS VCA;
P4CBB =P4R PLUS VCB;
  LRICF=LRICF + LR20;
  LRICC=LRICC + LRTM;
P5R =LRICC HFU 0.;
P5CAA =P5R PLUS ZERO;
P5CAB =P5R PLUS VCA;
P5CBA =P5R PLUS VCA;
P5CBB =P5R PLUS VCB;
  LRICF=LRICF + LTI20;
  LRICC=LRICC + LTITM;
P6T =LRICC HFU 0.;
  LRICF=LRICF + LR20;
  LRICC=LRICC + LRTM;
P7R =LRICC HFU 0.;
P7CAA =P7R PLUS ZERO;
P7CAB =P7R PLUS VCA;
P7CBA =P7R PLUS VCA;
P7CBB =P7R PLUS VCB;
  LRICF=LRICF + LR20;
  LRICC=LRICC + LRTM;
P8R =LRICC HFU 0.;
P8CAA =P8R PLUS ZERO;
P8CAB =P8R PLUS VCA;
P8CBA =P8R PLUS VCA;
P8CBB =P8R PLUS VCB;
  LRICF=LRICF + LR20;
  LRICC=LRICC + LRTM;
P9R =LRICC HFU 0.;
```

P9CAA =P9R PLUS ZERO;
P9CAB =P9R PLUS VCA;
P9CBA =P9R PLUS VCA;
P9CBB =P9R PLUS VCB;
LRICF=LRICF + LTI20;
LRICC=LRICC + LTITM;
P10T =LRICC HFU 0.;
LRICF=LRICF + LR20;
LRICC=LRICC + LRTM;
P11R =LRICC HFU 0.;
P11CAA =P11R PLUS ZERO;
P11CAB =P11R PLUS VCA;
P11CBA =P11R PLUS VCA;
P11CBB =P11R PLUS VCB;
LRICF=LRICF + LR20;
LRICC=LRICC + LRTM;
P12R =LRICC HFU 0.;
P12CAA =P12R PLUS ZERO;
P12CAB =P12R PLUS VCA;
P12CBA =P12R PLUS VCA;
P12CBB =P12R PLUS VCB;
LRICF=LRICF + LR20;
LRICC=LRICC + LRTM;
P13R =LRICC HFU 0.;
P13CAA =P13R PLUS ZERO;
P13CAB =P13R PLUS VCA;
P13CBA =P13R PLUS VCA;
P13CBB =P13R PLUS VCB;
LRICF=LRICF + LTI20;
LRICC=LRICC + LTITM;
P14T =LRICC HFU 0.;
LRICF=LRICF + LR20;
LRICC=LRICC + LRTM;
P15R =LRICC HFU 0.;
P15CAA =P15R PLUS ZERO;
P15CAB =P15R PLUS VCA;
P15CBA =P15R PLUS VCA;
P15CBB =P15R PLUS VCB;
LRICF=LRICF + LR20;
LRICC=LRICC + LRTM;
P16R =LRICC HFU 0.;
P16CAA =P16R PLUS ZERO;
P16CAB =P16R PLUS VCA;
P16CBA =P16R PLUS VCA;
P16CBB =P16R PLUS VCB;
LRICF=LRICF + LR20;
LRICC=LRICC + LRTM;
P17R =LRICC HFU 0.;
P17CAA =P17R PLUS ZERO;
P17CAB =P17R PLUS VCA;
P17CBA =P17R PLUS VCA;
P17CBB =P17R PLUS VCB;
LRICF=LRICF + LTF20;
LRICC=LRICC + LTFTM;
P18T =LRICC HFU 0.;
P18CAA =P18T PLUS ZERO;
P18CAB =P18T PLUS VCA;
P18CBA =P18T PLUS VCA;
P18CBB =P18T PLUS VCB;

*

T1 =D P1M P2M;
R1 =D P2M P3R;
R2 =D P3R P4R;
R3 =D P4R P5R;
T2 =D P5R P6T;
R4 =D P6T P7R;
R5 =D P7R P8R;
R6 =D P8R P9R;
T3 =D P9R P10T;
R7 =D P10T P11R;
R8 =D P11R P12R;
R9 =D P12R P13R;
T4 =D P13R P14T;
R10=D P14T P15R;
R11=D P15R P16R;
R12=D P16R P17R;
T5 =D P17R P18T;

*

C1B =D P3CBA P3CBB;
C1A =D 3 P3CAA P3CAB;
C2B =D P4CBA P4CBB;
C2A =D 3 P4CAA P4CAB;
C3B =D P5CBA P5CBB;
C3A =D 3 P5CAA P5CAB;
C4B =D P7CBA P7CBB;
C4A =D 3 P7CAA P7CAB;
C5B =D P8CBA P8CBB;
C5A =D 3 P8CAA P8CAB;
C6B =D P9CBA P9CBB;
C6A =D 3 P9CAA P9CAB;
C7B =D P11CBA P11CBB;
C7A =D 3 P11CAA P11CAB;
C8B =D P12CBA P12CBB;
C8A =D 3 P12CAA P12CAB;
C9B =D P13CBA P13CBB;
C9A =D 3 P13CAA P13CAB;
C10B=D P15CBA P15CBB;
C10A=D 3 P15CAA P15CAB;
C11B=D P16CBA P16CBB;
C11A=D 3 P16CAA P16CAB;
C12B=D P17CBA P17CBB;
C12A=D 3 P17CAA P17CAB;
C13B=D P18CBA P18CBB;
C13A=D 3 P18CAA P18CAB;

*

LIN_RIC= T1 ET R1 ET R2 ET R3 ET T2 ET R4 ET R5 ET R6 ET
T3 ET R7 ET R8 ET R9 ET T4 ET R10 ET R11 ET R12 ET T5;
ELIM LIN_RIC 0.00001;
CAV= C1B ET C2B ET C3B ET C4B ET C5B ET C6B ET C7B ET
C8B ET C9B ET C10B ET C11B ET C12B ET C13B;
PST= C1A ET C2A ET C3A ET C4A ET C5A ET C6A ET C7A ET
C8A ET C9A ET C10A ET C11A ET C12A ET C13A;
INS_CAV=CAV ET PST;
*TRAC LIN_RIC;
*TRAC INS_CAV;
SIST_RIC =(LIN_RIC coul roug) ET INS_CAV;
OCCHIO1= 0. .0 10000.;
TRAC SIST_RIC OCCHIO1;

```

MESS 'LUNGHEZZA LINEA FREDDA ' LRICF;
MESS 'LUNGHEZZA LINEA CALDA ' LRICC;
OPTI DONN 5;
*
*TUBO RICEVITORE
*
DE =0.070 ;
SP =0.003 ;
DI =DE - (2.*SP);
RE = DE / 2.;
RI = DI / 2.;
*modulo elastico a 20 C B.31 Pa
ER20=195000.E+6;
NU1=0.3;
DACC=7800.;
J1 = PI/4. * ((RE**4)-(RI**4));
AR = PI * ((RE**2)-(RI**2));
*
*PESI ACCIAIO VETRO SALI
vde=0.115; vsp=0.003;
dl_v=pi*(((vde/2.)**2)-(((vde/2)- vsp)**2))*2000.;
dl_a=pi*(((de/2.)**2)-(((de/2)- sp)**2))*7800.;
dl_s=pi*(((de/2)- sp)**2)*1900.;
dl_tot=dl_v + dl_s + dl_a;
d_eq=dl_tot/(pi*(((de/2.)**2)-(((de/2)- sp)**2)));
mess 'area sez m' ar;
mess 'mom iner m4' j1;
mess 'massa per unt lun Kg/m' dl_tot;
mess d_eq;
*opti donn 5;
*
TBR_O = MODE LIN_RIC MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE POUTRE;
TBR_M = MATE TBR_O YOUN ER20 NU NU1 'ALPHA' ATM20 RHO d_eq
          SECT AR INRY J1 INRZ J1 TORS (2.*J1)
          DZ RE DY 0. VECT (0 0 1);
*
*PIASTRINA
EP1=205000.E+6;
NP1=0.3;
B1 = 0.07;
H1 = 0.004;
AP1= B1*H1;
JP1= B1*H1*H1*H1/12.;
JP2= H1*B1*B1*B1/12.;
JP3= 1.;
PST_O = MODE PST MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE POUTRE;
PST_M = MATE PST_O YOUN EP1 NU NP1 'ALPHA' 0.
          SECT AP1 INRY JP1 INRZ JP2 TORS JP3 VECT (0 0 1);
*
*CAVALLETTO
EC1=205000.*1.E+6;
AC1=0.000290;
NC1=0.3;
JC1=0.0000000680*2.;
JC2=JC1*20.;
*11.3 TOR CM4
JC3=1.;
CAV_O = MODE CAV MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE POUTRE;
CAV_M = MATE CAV_O YOUN EC1 NU NC1 'ALPHA' 0.

```


SECT AC1 INRY JC1 INRZ JC2 TORS JC3 VECT (0 0 1);

*

OPTI DONN 5;

*VINCOLI

CLM1 = BLOQ DEPL ROTA P1M;

*

CLC1 = (BLOQ DEPL P3CBB) ET (BLOQ RY P3CBB) ET (BLOQ RX P3CBB);
 CLC2 = (BLOQ DEPL P4CBB) ET (BLOQ RY P4CBB) ET (BLOQ RX P4CBB);
 CLC3 = (BLOQ DEPL P5CBB) ET (BLOQ RY P5CBB) ET (BLOQ RX P5CBB);
 CLC4 = (BLOQ DEPL P7CBB) ET (BLOQ RY P7CBB) ET (BLOQ RX P7CBB);
 CLC5 = (BLOQ DEPL P8CBB) ET (BLOQ RY P8CBB) ET (BLOQ RX P8CBB);
 CLC6 = (BLOQ DEPL P9CBB) ET (BLOQ RY P9CBB) ET (BLOQ RX P9CBB);
 CLC7 = (BLOQ DEPL P11CBB) ET (BLOQ RY P11CBB) ET (BLOQ RX P11CBB);
 CLC8 = (BLOQ DEPL P12CBB) ET (BLOQ RY P12CBB) ET (BLOQ RX P12CBB);
 CLC9 = (BLOQ DEPL P13CBB) ET (BLOQ RY P13CBB) ET (BLOQ RX P13CBB);
 CLC10 = (BLOQ DEPL P15CBB) ET (BLOQ RY P15CBB) ET (BLOQ RX P15CBB);
 CLC11 = (BLOQ DEPL P16CBB) ET (BLOQ RY P16CBB) ET (BLOQ RX P16CBB);
 CLC12 = (BLOQ DEPL P17CBB) ET (BLOQ RY P17CBB) ET (BLOQ RX P17CBB);
 CLC13 = (BLOQ DEPL P18CBB) ET (BLOQ RY P18CBB) ET (BLOQ RX P18CBB);

*

RL1A = (RELA RX P3CAB - RX P3CBA) ET (RELA RY P3CAB - RY P3CBA)
 ET (RELA UX P3CAB - UX P3CBA) ET (RELA UY P3CAB - UY P3CBA)
 ET (RELA UZ P3CAB - UZ P3CBA);
 RL2A = (RELA RX P4CAB - RX P4CBA) ET (RELA RY P4CAB - RY P4CBA)
 ET (RELA UX P4CAB - UX P4CBA) ET (RELA UY P4CAB - UY P4CBA)
 ET (RELA UZ P4CAB - UZ P4CBA);
 RL3A = (RELA RX P5CAB - RX P5CBA) ET (RELA RY P5CAB - RY P5CBA)
 ET (RELA UX P5CAB - UX P5CBA) ET (RELA UY P5CAB - UY P5CBA)
 ET (RELA UZ P5CAB - UZ P5CBA);
 RL4A = (RELA RX P7CAB - RX P7CBA) ET (RELA RY P7CAB - RY P7CBA)
 ET (RELA UX P7CAB - UX P7CBA) ET (RELA UY P7CAB - UY P7CBA)
 ET (RELA UZ P7CAB - UZ P7CBA);
 RL5A = (RELA RX P8CAB - RX P8CBA) ET (RELA RY P8CAB - RY P8CBA)
 ET (RELA UX P8CAB - UX P8CBA) ET (RELA UY P8CAB - UY P8CBA)
 ET (RELA UZ P8CAB - UZ P8CBA);
 RL6A = (RELA RX P9CAB - RX P9CBA) ET (RELA RY P9CAB - RY P9CBA)
 ET (RELA UX P9CAB - UX P9CBA) ET (RELA UY P9CAB - UY P9CBA)
 ET (RELA UZ P9CAB - UZ P9CBA);
 RL7A = (RELA RX P11CAB - RX P11CBA) ET (RELA RY P11CAB - RY P11CBA)
 ET (RELA UX P11CAB - UX P11CBA) ET (RELA UY P11CAB - UY P11CBA)
 ET (RELA UZ P11CAB - UZ P11CBA);
 RL8A = (RELA RX P12CAB - RX P12CBA) ET (RELA RY P12CAB - RY P12CBA)
 ET (RELA UX P12CAB - UX P12CBA) ET (RELA UY P12CAB - UY P12CBA)
 ET (RELA UZ P12CAB - UZ P12CBA);
 RL9A = (RELA RX P13CAB - RX P13CBA) ET (RELA RY P13CAB - RY P13CBA)
 ET (RELA UX P13CAB - UX P13CBA) ET (RELA UY P13CAB - UY P13CBA)
 ET (RELA UZ P13CAB - UZ P13CBA);
 RL10A = (RELA RX P15CAB - RX P15CBA) ET (RELA RY P15CAB - RY P15CBA)
 ET (RELA UX P15CAB - UX P15CBA) ET (RELA UY P15CAB - UY P15CBA)
 ET (RELA UZ P15CAB - UZ P15CBA);
 RL11A = (RELA RX P16CAB - RX P16CBA) ET (RELA RY P16CAB - RY P16CBA)
 ET (RELA UX P16CAB - UX P16CBA) ET (RELA UY P16CAB - UY P16CBA)
 ET (RELA UZ P16CAB - UZ P16CBA);
 RL12A = (RELA RX P17CAB - RX P17CBA) ET (RELA RY P17CAB - RY P17CBA)
 ET (RELA UX P17CAB - UX P17CBA) ET (RELA UY P17CAB - UY P17CBA)
 ET (RELA UZ P17CAB - UZ P17CBA);
 RL13A = (RELA RX P18CAB - RX P18CBA) ET (RELA RY P18CAB - RY P18CBA)
 ET (RELA UX P18CAB - UX P18CBA) ET (RELA UY P18CAB - UY P18CBA)
 ET (RELA UZ P18CAB - UZ P18CBA);

*

```

RL1B = (RELA RX P3R - RX P3CAA) ET (RELA RY P3R - RY P3CAA)
      ET (RELA RZ P3R - RZ P3CAA)
      ET (RELA UX P3R - UX P3CAA) ET (RELA UY P3R - UY P3CAA)
      ET (RELA UZ P3R - UZ P3CAA);
RL2B = (RELA RX P4R - RX P4CAA) ET (RELA RY P4R - RY P4CAA)
      ET (RELA RZ P4R - RZ P4CAA)
      ET (RELA UX P4R - UX P4CAA) ET (RELA UY P4R - UY P4CAA)
      ET (RELA UZ P4R - UZ P4CAA);
RL3B = (RELA RX P5R - RX P5CAA) ET (RELA RY P5R - RY P5CAA)
      ET (RELA RZ P5R - RZ P5CAA)
      ET (RELA UX P5R - UX P5CAA) ET (RELA UY P5R - UY P5CAA)
      ET (RELA UZ P5R - UZ P5CAA);
RL4B = (RELA RX P7R - RX P7CAA) ET (RELA RY P7R - RY P7CAA)
      ET (RELA RZ P7R - RZ P7CAA)
      ET (RELA UX P7R - UX P7CAA) ET (RELA UY P7R - UY P7CAA)
      ET (RELA UZ P7R - UZ P7CAA);
RL5B = (RELA RX P8R - RX P8CAA) ET (RELA RY P8R - RY P8CAA)
      ET (RELA RZ P8R - RZ P8CAA)
      ET (RELA UX P8R - UX P8CAA) ET (RELA UY P8R - UY P8CAA)
      ET (RELA UZ P8R - UZ P8CAA);
RL6B = (RELA RX P9R - RX P9CAA) ET (RELA RY P9R - RY P9CAA)
      ET (RELA RZ P9R - RZ P9CAA)
      ET (RELA UX P9R - UX P9CAA) ET (RELA UY P9R - UY P9CAA)
      ET (RELA UZ P9R - UZ P9CAA);
RL7B = (RELA RX P11R - RX P11CAA) ET (RELA RY P11R - RY P11CAA)
      ET (RELA RZ P11R - RZ P11CAA)
      ET (RELA UX P11R - UX P11CAA) ET (RELA UY P11R - UY P11CAA)
      ET (RELA UZ P11R - UZ P11CAA);
RL8B = (RELA RX P12R - RX P12CAA) ET (RELA RY P12R - RY P12CAA)
      ET (RELA RZ P12R - RZ P12CAA)
      ET (RELA UX P12R - UX P12CAA) ET (RELA UY P12R - UY P12CAA)
      ET (RELA UZ P12R - UZ P12CAA);
RL9B = (RELA RX P13R - RX P13CAA) ET (RELA RY P13R - RY P13CAA)
      ET (RELA RZ P13R - RZ P13CAA)
      ET (RELA UX P13R - UX P13CAA) ET (RELA UY P13R - UY P13CAA)
      ET (RELA UZ P13R - UZ P13CAA);
RL10B = (RELA RX P15R - RX P15CAA) ET (RELA RY P15R - RY P15CAA)
      ET (RELA RZ P15R - RZ P15CAA)
      ET (RELA UX P15R - UX P15CAA) ET (RELA UY P15R - UY P15CAA)
      ET (RELA UZ P15R - UZ P15CAA);
RL11B = (RELA RX P16R - RX P16CAA) ET (RELA RY P16R - RY P16CAA)
      ET (RELA RZ P16R - RZ P16CAA)
      ET (RELA UX P16R - UX P16CAA) ET (RELA UY P16R - UY P16CAA)
      ET (RELA UZ P16R - UZ P16CAA);
RL12B = (RELA RX P17R - RX P17CAA) ET (RELA RY P17R - RY P17CAA)
      ET (RELA RZ P17R - RZ P17CAA)
      ET (RELA UX P17R - UX P17CAA) ET (RELA UY P17R - UY P17CAA)
      ET (RELA UZ P17R - UZ P17CAA);
RL13B = (RELA RX P18T - RX P18CAA) ET (RELA RY P18T - RY P18CAA)
      ET (RELA RZ P18T - RZ P18CAA)
      ET (RELA UX P18T - UX P18CAA) ET (RELA UY P18T - UY P18CAA)
      ET (RELA UZ P18T - UZ P18CAA);

```

*

```

CL_T =CLM1 ET
      CLC1 ET CLC2 ET CLC3 ET CLC4 ET CLC5 ET CLC6 ET CLC7
      ET CLC8 ET CLC9 ET CLC10 ET CLC11 ET CLC12 ET CLC13
      ET RL1A ET RL2A ET RL3A ET RL4A ET RL5A ET RL6A ET RL7A
      ET RL8A ET RL9A ET RL10A ET RL11A ET RL12A ET RL13A

```

```

ET RL1B   ET RL2B   ET RL3B   ET RL4B   ET RL5B   ET RL6B   ET RL7B
ET RL8B   ET RL9B   ET RL10B  ET RL11B  ET RL12B  ET RL13B
ET (BLOQ UZ SIST_RIC) ET (BLOQ RY SIST_RIC) ET (BLOQ RX SIST_RIC) ;
*rotazioni libere
*CARICO RITIRO RICEVITORE DA TM
TTF= (manu chpo LIN_RIC 1 'T' 20.)
+ (manu chpo PST      1 'T' 20.)
+ (manu chpo CAV      1 'T' 20.);
TTC= (manu chpo LIN_RIC 1 'T' TM)
+ (manu chpo PST      1 'T' 20.)
+ (manu chpo CAV      1 'T' 20.);
TEMP=TABLE; TEMP. 0 = 0.; TEMP. 1 = 1. ;
CTER=TABLE; CTER. 0= TTC; CTER. 1 = TTF;
CHATER= CHAR 'T' TEMP CTER;
*
mas1= masse tbr_o tbr_m ;
accg= manu chpo lin_ric 1 'UY' -9.81 ;
CHPO1 = mas1 * accg ;
*
*FOR1   = FORCE FX .001 P1M;
*CHPO1  = RESU FOR1;
EVOL1   = EVOL MANU
          TEMPS (PROG 0.      1.)
          FORCE (PROG 1.      1.);
*        FORCE (PROG 0.0001 0.0001);
CFPESO= CHAR 'MECA' CHPO1 EVOL1;
*
MO_T = TBR_O ET CAV_O ET PST_O;
MA_T = TBR_M ET CAV_M ET PST_M;
*****
*tav1 . 'GRANDES_ROTATIONS' = VRAI ;
*****
PCL = prog 0. PAS .05 1. ;
*****
*OPTI ECHO 0;
tav1=table;
tav1 . 'BLOCAGES_MECANIQUES' = CL_T ;
tav1 . 'GRANDS_DEPLACEMENTS' = VRAI ;
tav1 . 'K_SIGMA'              = VRAI ;
TAV1 . 'CHARGEMENT'          = (CFPESO ET CHATER);
tav1 . 'MODELE'              = MO_T ;
tav1 . 'CARACTERISTIQUES'    = MA_T ;
tav1 . 'TEMPS_CALCULES'      = PCL ;
*
opti donn 5;
*****
pasapas tav1;
*****
OPTI DONN 5;
*
*POST TRATTAMENTO
*
DEP1 = TAV1 . DEPLACEMENTS . 0;
def0 = defo SIST_RIC dep1 0. roug;
NET= DIME (TAV1 . TEMPS);
REPE CL1 (NET - 1);
SI (&CL1 EGA (NET - 1));
*
DEP1 = TAV1 . DEPLACEMENTS . &CL1;

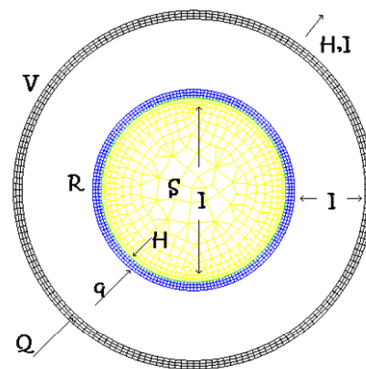
```

```

SG_T = TAV1 . CONTRAINTES . &CL1;
TBR_S= REDU SG_T TBR_O;
TRAC TBR_S TBR_O TBR_M;
*
titr 'Ricevitore UX -M-' ;
ev1 = evol chpo dep1 uX LIN_RIC;
dess ev1 titx 'M' tity 'M';
titr 'Ricevitore UY -M- ' ;
ev2 = evol chpo dep1 uy LIN_RIC;
dess ev2 titx 'M' tity 'M';
def1 = defo SIST_RIC dep1 1. bleu ;
titr ' SISTEMA RICEVITORE deformata PASSO ' &CL1;
trac (def0 et def1) ;
FINSI;
FIN CL1;
*
real= react cl_t dep1;
*
titr 'REAZIONI FY amp. .005 /';
rea2= REDU REA1 LIN_RIC;
MESS 'reaz fy max N      ' (maxi (exco rea2 FY));
MESS 'reaz fx max N      ' (maxi (exco rea2 FX));
MESS 'reaz fx max N P1M' (extr rea2 FX P1M);
MESS 'reaz fy max N P1M' (extr rea2 FY P1M);
vec2= vect (exco FY rea2 FY) .005 fx fy fz  vert;
TRAC OCCHIO1 LIN_RIC VEC2;
TRAC OCCHIO1 SIST_RIC VEC2;
titr 'REAZIONI FX amp. .005 /';
vec3= vect (exco FX rea2 FX) .005 fx fy fz  vert;
TRAC OCCHIO1 LIN_RIC VEC3;
TRAC OCCHIO1 SIST_RIC VEC3;
MESS 'VMIS MAX' (MAXI (VMIS TBR_O TBR_S TBR_M));
MESS 'P18T UX ' (EXTR DEP1 UX P18T);
MESS 'P18T UY ' (EXTR DEP1 UY P18T);
sg_tbr=redu tbr_o sg_t;
seffx=(exco effx sg_tbr scal)/AR;
titr '(Pa) sig-normale';
eveffx=evol chpo (chan chpo tbr_o seffx ) LIN_RIC;
dess eveffx;
seffz=(exco effz sg_tbr scal)/AR;
titr '(Pa) sig-taglio ';
eveffz=evol chpo (chan chpo tbr_o seffz) LIN_RIC;
dess eveffz;
smomy= (exco momy sg_tbr scal)*RE/J1;
titr '(Pa) sig-flessionale';
evmomy=evol chpo (chan chpo tbr_o smomy ) LIN_RIC;
dess evmomy;
stni=(seffx + smomy)*1.e-6;
stns=(seffx - smomy)*1.e-6;
titr '(MPa) sigma norm+fles';
evns=evol chpo (chan chpo tbr_o stns) LIN_RIC;
evni=evol chpo (chan chpo tbr_o stni) LIN_RIC;
dess (evns et evni);
*
fin;
*=====

```

Arresto portata e movimentazione



Fasi dell'analisi:

- Lettura dati su radiazione incidenti su ricevitore ed assorbita dal vetro D
- Calcolo temperature in fase di inseguimento.
- Distribuzione Temperature nel fluido temovettore.
- Calcolo del transitorio con arresto di portata e movimentazione.
- Calcolo stato tensionale per gli istanti più sollecitati termicamente.
- Post trattamento termico e meccanico. T M

```

*=====
*FASE relativa allo stato stazionario prima dell'arresto circolazione,
*e transitorio in defocalizzazione naturale senza portata sali fusi
*=====
debp perso2 tav;
*list tav;
*list tav . 'TEMPERATURES';
*list tav.MAT_RAY;
np=(dime tav . 'TEMPERATURES' ) - 1;
mess 'perso2 passo ' np;
*scambio radiativo vetro->ambiente
ev_e_v = tav . 'GGM' . 'E_VE';
or_le_v = tav . 'GGM' . 'OB_VA';
le_v = tav . 'GGM' . 'MG_VA';
em_VA0= vari ev_e_v (redu (tav . 'TEMPERATURES'. np) le_v) ;
em_VA1= chan 'CHAM' em_VA0 or_le_v 'RIGIDITE';
m_VA = mate or_le_v 'EMIS' em_VA1;
*scambio radiativo vetro->coating
ev_e_v = tav . 'GGM' . 'E_VE';
or_li_v = tav . 'GGM' . 'OB_VC';
li_v = tav . 'GGM' . 'MG_VC';
em_VC0= vari ev_e_v (redu (tav . 'TEMPERATURES'. np) li_v) ;
em_VC1= chan 'CHAM' em_VC0 or_li_v 'RIGIDITE';
m_VC = mate or_li_v 'EMIS' em_VC1;
*scambio radiativo coating->vetro
ev_e_c = tav . 'GGM' . 'E_C';
or_le_c = tav . 'GGM' . 'OB_CV';
le_r = tav . 'GGM' . 'MG_CV';
em_CV0= vari ev_e_c (redu (tav . 'TEMPERATURES'. np) le_r) ;
em_CV1= chan 'CHAM' em_CV0 or_le_c 'RIGIDITE';
m_CV = mate or_le_c 'EMIS' em_CV1;
*scambio radiativo ricevitore
ev_e_r = tav . 'GGM' . 'E_R';
or_li_r = tav . 'GGM' . 'OB_R';
li_r = tav . 'GGM' . 'MG_R';
em_R0 = vari ev_e_r (redu (tav . 'TEMPERATURES'. np) li_r) ;
em_R1 = chan 'CHAM' em_R0 or_li_r 'RIGIDITE';
m_R = mate or_li_r 'EMIS' em_R1;
tav . 'MAT_RAY' =m_VA et m_VC et m_CV et m_R;
finproc tav;
*234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
*lettura dati 08-01-10 18.40
*=====
opti rest format 'grenal.sauve';
rest format;
*
*list tav1;
*opti donn 5;
*=====
*
opti dime 2 elem qua8;
*
*geometria
*
de_r=0.070;
re_r=de_r/2.;
s_r =0.003;
ri_r=re_r-s_r;

```

```

de_v=0.125;
re_v=de_v/2.;
s_v =0.003;
*
pfe_r=0. re_r;
pfi_r=0. (re_r-s_r);
pfe_v=0. re_v;
pfi_v=0. (re_v-s_v);
*
l1_r=d 3 pfi_r pfe_r;
l1_v=d 3 pfi_v pfe_v;
*
mg_r = l1_r rota 180 -360. (0 0) coul bleu;
mg_v = l1_v rota 180 -360. (0 0);
mg_tot= mg_r et mg_v;
li_r = cote 4 mg_r;
le_r = cote 2 mg_r;
li_v = cote 4 mg_v;
le_v = cote 2 mg_v;
*l_vr = li_v et le_r;
*
elim (mg_tot et li_r et le_r et li_v et le_r) 0.00001;
*trac mg_tot qual;
mg_s=li_r surf plan;
ddd1=(ri_r-(((coor 1 mg_s)**2)+(coor 2 mg_s)**2)**0.5))
/ri_r/10.;
mg_s=li_r surf ddd1 plan coul jaun;
mg_tot1=mg_s et mg_tot;
trac mg_tot1;
opti donn 5;
*=====
*
*coating ricevitore
*-----
*tc = 500.;
*e_c =(4.188+(7.54e-3*tc)+(2.278e-5*tc*tc))/100.;
p_t_c=prog 20. pas 20. 800.;
p_t_k=prog (20.+273.) pas 20. (800.+273.);
titr 'emissivita coating ';
ev_e_c = evol manu 'T' p_t_k
'EMIS' (((prog (dime p_t_c)*4.188)
+(7.54e-3*p_t_c)
+(2.278e-5*p_t_c*p_t_c))/100.);

*dess ev_e_c ;
*opti donn 5;
*
*acciaio tubo ricevitore
*-----
*ta = 600.;
*k_r = 14.106 + (0.0138*ta);
titr 'conducibilita acciaio';
ev_k_r = evol manu 'T' p_t_k
'K' ((prog (dime p_t_c)*14.106)
+(0.0138*p_t_c));

*dess ev_k_r;
*rho_r = 7920.8 - (0.4609*ta);
titr 'densita acciaio';
ev_rho_r = evol manu 'T' p_t_k
'RHO' ((prog (dime p_t_c)*7920.8)

```

```

                                -(0.4609*p_t_c));
*dess ev_rho_r;
*c_r  = 469.19 + (0.2013*ta);
titr 'capacita termica acciaio';
ev_c_r = evol manu 'T'  p_t_k
                'C' ((prog (dime p_t_c)*469.19)
                    +(0.2013*p_t_c));
*dess ev_c_r;
*e_r  = -0.0434 + (0.1062*(log ta));
titr 'emissivita acciaio ';
ev_e_r = evol manu 'T'  p_t_k
                'EMIS' ((prog (dime p_t_c)*(-0.0434))
                    +(0.1062*(log p_t_c)));
*dess ev_e_r;
*
*coefficiente scambio sali-ricevitore
h_r  = 3000.;
*
*
ob_r=mode mg_r thermique qua8;
ma_r=mate ob_r 'K' ev_k_r 'RHO' ev_rho_r 'C' ev_c_r;
*
*vetro tubo
*-----
*tv  = 100.;
*e_v = 0.89 + (2.76e-5*tv) + (2.12e-7*tv*tv);
p_t1_c=prog 20. pas 20. 300.;
p_t1_k=prog (20.+273.) pas 20. (300.+273.);
k_v  = 0.8;
ev_k_v=evol manu 'T'  p_t1_k
                'K' (prog (dime p_t1_c)*k_v);
rho_v= 2200.;
ev_rho_v=evol manu 'T'  p_t1_k
                'RHO' (prog (dime p_t1_c)*rho_v);
c_v  = 840.;
ev_c_v=evol manu 'T'  p_t1_k
                'C' (prog (dime p_t1_c)*c_v);

titr 'emissivita vetro';
ev_e_v=evol manu 'T'  p_t1_k
                'EMIS' ((prog (dime p_t1_c)*0.89)
                    +(2.76e-5*p_t1_c)
                    +(2.12e-7*p_t1_c*p_t1_c));
*dess ev_e_v;
*
h_v  = 10.;
*
ob_v=mode mg_v thermique qua8;
ma_v=mate ob_v 'K' ev_k_v 'RHO' ev_rho_v 'C' ev_c_v;
*
*sali
*-----
ts=550.;
k_s=0.443+(1.9e-4*ts);
p_t2_c=prog 240. pas 20. 800.;
p_t2_k=prog (240.+273.) pas 20. (800.+273.);
titr 'conducibilita sale';
ev_k_s=evol manu 'T'  p_t2_k
                'K' ((prog (dime p_t2_c)*(0.443))

```



```

      +(1.9e-4*p_t2_c));
rho_s=2090. - (0.636*ts);
titr 'densita sale';
ev_rho_s=evol manu 'T'      p_t2_k
          'RHO' ((prog (dime p_t2_c)*2090.)
                -(0.636*p_t2_c));

c_s=1443.+ (0.172*ts);
titr 'capacita termica sale';
ev_c_s=evol manu 'T'      p_t2_k
          'C' ((prog (dime p_t2_c)*1443.)
               +(0.172*p_t2_c));

*
*condizione su vetro esterno
*
t_est=(20.+273.);
ev1 = evol manu (prog 0. 2000.) (prog 1. 1.);
*
oc_le_v=mode le_v convection cons 'CCONV';
mc_le_v=mate oc_le_v 'H' h_v;
ccl_t = manu chpo le_v nature diffus 1 'T' t_est;
ccl_ch=char 'TECO' ev1 ccl_t;
*
or_le_v=mode le_v rayonnement cons 'CRAYO';
*mr_le_v=mate or_le_v 'EMIS' ev_e_v;
crl_t = manu chpo le_v nature diffus 1 'T' t_est;
crl_ch= char 'TERA' ev1 crl_t;
*
*condizione dentro il tubo ricevitore
*
or_li_r=mode li_r rayonnement cons 'CRAYO';
*mr_li_r=mate or_li_r 'EMIS' ev_e_r;
*
tsk=550. + 273.;
oc_li_r=mode li_r convection cons 'CCONV';
mc_li_r=mate oc_li_r 'H' h_r;
cc0_t=manu chpo li_r nature diffus 1 'T' tsk;
ev0=evol manu (prog 0. 2000.) (prog 1. 1.);
cc0_ch=char 'TECO' ev0 cc0_t;
*
*condizione cavita ricevitore-vetro
*
or_li_v=mode li_v rayonnement;
or_le_c=mode le_r rayonnement;
or_l_cv=or_li_v et or_le_c;
*mr_li_v=mate or_li_v 'EMIS' ev_e_v;
*mr_le_c=mate or_le_c 'EMIS' ev_e_c;
*opti donn 5;
*=====STAMPE=====
*opti echo 0;
*mess ' ';
*mess 'temperatura coating      tc' tc;
*mess 'emissivita coating       e_c' e_c;
*mess 'temperatura vetro        tv' tv;
*mess 'conducibilita termica k_v' k_v;
*mess 'densita                  rho_v' rho_v;
*mess 'calore specifico         c_v' c_v;
*mess 'emissivita              e_v' e_v;
*mess 'temperatura acciaio      ta' ta;
*mess 'conducibilita termica k_r' k_r;

```

```

*mess 'densita          rho_r' rho_r;
*mess 'calore specifico  c_r' c_r;
*mess 'emissivita       e_r' e_r;
*mess 'temperatura sale  ts' ts;
*mess 'conducibilita termica k_s' k_s;
*mess 'densita          rho_s' rho_s;
*mess 'calore specifico  c_s' c_s;
*mess ' ';
*opti echo 1;
*opti donn 5;
*=====
*
*costruzione tavole
*per sorgente nel vetro e flusso su ricevitore
*
x_le_r=-1.*(coor 1 le_r);
y_le_r=-1.*(coor 2 le_r);
a_le_r=atg x_le_r y_le_r;
a_le_r= (-1.*a_le_r) + 180.;
*trac le_r a_le_r;
x_mg_v=-1.*(coor 1 mg_v);
y_mg_v=-1.*(coor 2 mg_v);
a_mg_v=atg x_mg_v y_mg_v;
a_mg_v= (-1.*a_mg_v) + 180.;
*trac mg_v a_mg_v;
*
*=====
*in fase di inseguimento
*
tav0_tm=table;tav0_fr=table;tav0_sv=table;
*
evl0_fr=tav1. 1 . 'FL_TUBO';
evl0_sv=tav1. 1 . 'SO_VETRO';
tav0_tm. 0 = 0. ;
tav0_fr. 0 = flux ob_r (vari a_le_r evl0_fr 'NOEUD');
tav0_sv. 0 = sour ob_v (vari a_mg_v evl0_sv 'NOEUD');
tav0_tm. 1 = 1000.;
tav0_fr. 1 = tav0_fr. 0 ;
tav0_sv. 1 = tav0_sv. 0 ;
*=====
*nel transitorio di defocalizzazione
*
tav_tm=table;tav_fr=table;tav_sv=table;
ntempi= dime tav1;mess ntempi;
*
repe cll ntempi;
tm      =tav1. &c11 . 'TEMPO';
evl_fr=tav1. &c11 . 'FL_TUBO';
evl_sv=tav1. &c11 . 'SO_VETRO';
tav_tm. (&c11 - 1) = tm;
tav_fr. (&c11 - 1) = flux ob_r (vari a_le_r evl_fr 'NOEUD');
tav_sv. (&c11 - 1) = sour ob_v (vari a_mg_v evl_sv 'NOEUD');
si (&c11 ega 1);
*  dess evl_fr;
*  dess evl_sv;
*  trac le_r (vari a_le_r evl_fr 'NOEUD');
*  trac mg_v (vari a_mg_v evl_sv 'NOEUD');
finsi;
J_c11=&c11;

```

```

fin cl1;
*prolunga per fase di raffreddamento
tm1=tav_tm . (J_cl1 - 1);
tm2=tm1 * 3.;
mess 'tempo defocalizzazione completa' tm1;
mess 'tempo stabilizzazione          ' tm2;
tav_tm. J_cl1 = tm2;
tav_fr. J_cl1 = tav_fr . (J_cl1 - 1);
tav_sv. J_cl1 = tav_sv . (J_cl1 - 1);
*=====
*
* sorgente imposta su vetro
*
ch_s_v = char 'Q' tav_tm  tav_sv;
ch0_s_v= char 'Q' tav0_tm tav0_sv;
*
*flusso imposto su ricevitore
*
ch_f_r = char 'Q' tav_tm  tav_fr;
ch0_f_r= char 'Q' tav0_tm tav0_fr;
*=====
*
* calcolo temperature stazionare
* in inseguimento
*
*=====
Tvini= (100.+273.);
Taini= (550.+273.);
tab0 = table;
tab0.'TEMPERATURES' = table ;
tab0.'TEMPERATURES'. 0 =(manu chpo mg_v nature diffus 1 'T' Tvini) et
                        (manu chpo mg_r nature diffus 1 'T' Taini) ;
tab0.'MODELE'=' ob_r et ob_v et oc_le_v et oc_li_r;
*-----
*scambio radiativo vetro->ambiente
em_VA0= vari ev_e_v (redu (tab0 . 'TEMPERATURES'. 0) le_v) ;
em_VA1= chan 'CHAM' em_VA0 or_le_v 'RIGIDITE';
mr_le_v = mate or_le_v 'EMIS'  em_VA1;
*scambio radiativo vetro->coating
em_VC0= vari ev_e_v (redu (tab0 . 'TEMPERATURES'. 0) li_v) ;
em_VC1= chan 'CHAM' em_VC0 or_li_v 'RIGIDITE';
mr_li_v = mate or_li_v 'EMIS'  em_VC1;
*scambio radiativo coating->vetro
em_CV0= vari ev_e_c (redu (tab0 . 'TEMPERATURES'. 0) le_r) ;
em_CV1= chan 'CHAM' em_CV0 or_le_c 'RIGIDITE';
mr_le_c = mate or_le_c 'EMIS'  em_CV1;
*scambio radiativo ricevitore
em_R0 = vari ev_e_r (redu (tab0 . 'TEMPERATURES'. 0) li_r) ;
em_R1 = chan 'CHAM' em_R0 or_li_r 'RIGIDITE';
mr_li_r = mate or_li_r 'EMIS'  em_R1;
*
ma_tot0=ma_r et ma_v et
        mr_le_v et mr_li_v et mr_le_c et mr_li_r et
        mc_le_v et mc_li_r;
*
*caricamento tavola ausiliaria
tab0 . 'GGM' = table;
*scambio radiativo vetro->ambiente
tab0 . 'GGM' . 'E_VE' =ev_e_v ;

```

```

tab0 . 'GGM' . 'OB_VA'=or_le_v ;
tab0 . 'GGM' . 'MG_VA' =le_v;
*scambio radiativo vetro->coating
tab0 . 'GGM' . 'E_VE' =ev_e_v;
tab0 . 'GGM' . 'OB_VC'=or_li_v;
tab0 . 'GGM' . 'MG_VC' =li_v;
*scambio radiativo coating->vetro
tab0 . 'GGM' . 'E_C' =ev_e_c;
tab0 . 'GGM' . 'OB_CV'=or_le_c;
tab0 . 'GGM' . 'MG_CV' =le_r;
*scambio radiativo ricevitore
tab0 . 'GGM' . 'E_R' =ev_e_r;
tab0 . 'GGM' . 'OB_R' =or_li_r;
tab0 . 'GGM' . 'MG_R' =li_r;
*opti donn 5;
*-----
*
tab0.'CARACTERISTIQUES'= ma_tot0;
*tab0.'PROCEDURE_THERMIQUE'=NONLINEAIRE;
tab0.'PROCEDURE_THERMIQUE'='DUPONT';
tab0.'PROCEDURE_PERSO2'=vrai;
tab0.'PAS_MAX'=10.;
tab0.'CRITERE'=1.E-4;
*
tab0.'RAYONNEMENT'=table;
tab0.'RAYONNEMENT'. 1 = table;
tab0.'RAYONNEMENT'. 1 . 'TYPE' = 'INFINI' ;
tab0.'RAYONNEMENT'. 1 . 'MODELE' = or_le_v ;
*
tab0.'RAYONNEMENT'. 2 = table;
tab0.'RAYONNEMENT'. 2 . 'TYPE' = 'CAVITE';
tab0.'RAYONNEMENT'. 2 . 'MODELE' = or_l_cv ;
tab0.'RAYONNEMENT'. 2 . 'CONVEXE' = faux;
tab0.'RAYONNEMENT'. 2 . 'FERME' = vrai;
tab0.'RAYONNEMENT'. 2 . 'CABSO' = 0.;
*
tab0.'RAYONNEMENT'. 3 = table;
tab0.'RAYONNEMENT'. 3 . 'TYPE' = 'CAVITE';
tab0.'RAYONNEMENT'. 3 . 'MODELE' = or_li_r ;
tab0.'RAYONNEMENT'. 3 . 'CONVEXE' = vrai;
tab0.'RAYONNEMENT'. 3 . 'FERME' = vrai;
tab0.'RAYONNEMENT'. 3 . 'CABSO' = 0.;
*
tab0.'CTE_STEFAN_BOLTZMANN'= 5.673E-8;
tab0.'CELSIUS' = faux;
tab0.'CHARGEMENT' = cc1_ch et cr1_ch et
ch0_f_r et ch0_s_v et
cc0_ch;
*tab0.'CHARGEMENT' = cc1_ch et cr1_ch et
*
* ch0_f_r et
* cc0_ch;
*
*tab0.'TEMPS_CALCULES' = prog 0. pas 4. 8.;
tab0.'TEMPS_CALCULES' = prog 0. pas 1. 20.
pas 4. 100.
pas 10. 800.;
*
PASAPAS TAB0 ;
*
```

```

* list TAB0.'TEMPERATURES';
  iii=(dime TAB0.'TEMPERATURES') - 1;
  tt_staz0= TAB0.'TEMPERATURES'. iii;
  tt_staz= tt_staz0 - 273.;
* trac tt_staz mg_v;
* trac tt_staz mg_r;
  tt_li_r=redu tt_staz0 li_r;
opti sauv format 'caso_09_1a.sauve';
sauv format tab0;
*opti donn 5;
*=====
*temperatura nei sali
ob_s=mode mg_s thermique qua8 tri6;
ma_s0=mate ob_s 'K' k_s 'RHO' rho_s 'C' c_s;
rg_s=cond ob_s ma_s0;
bl_s=bloq li_r T;
ft_s=depi bl_s tt_li_r;
rgt_s=bl_s et rg_s;
tt_s=reso rgt_s ft_s;
*trac tt_s mg_s;
*opti donn 5;
*
*=====
*transitorio defocalizzazione
tab1=table;
tab1.'TEMPERATURES' = table ;
tab1.'TEMPERATURES'. 0 = (tt_staz0 et tt_s);
*trac (mg_s et mg_r) (tab1.'TEMPERATURES'. 0);
tab1.'MODELE'=ob_r et ob_v et ob_s et oc_le_v;
ma_sl=mate ob_s 'K' ev_k_s 'RHO' ev_rho_s 'C' ev_c_s;
*
*-----
*scambio radiativo vetro->ambiente
em_VA0= vari ev_e_v (redu (tab1 . 'TEMPERATURES'. 0) le_v) ;
em_VA1= chan 'CHAM' em_VA0 or_le_v 'RIGIDITE';
mr_le_v = mate or_le_v 'EMIS' em_VA1;
*scambio radiativo vetro->coating
em_VC0= vari ev_e_v (redu (tab1 . 'TEMPERATURES'. 0) li_v) ;
em_VC1= chan 'CHAM' em_VC0 or_li_v 'RIGIDITE';
mr_li_v = mate or_li_v 'EMIS' em_VC1;
*scambio radiativo coating->vetro
em_CV0= vari ev_e_c (redu (tab1 . 'TEMPERATURES'. 0) le_r) ;
em_CV1= chan 'CHAM' em_CV0 or_le_c 'RIGIDITE';
mr_le_c = mate or_le_c 'EMIS' em_CV1;
*scambio radiativo ricevitore
em_R0 = vari ev_e_r (redu (tab1 . 'TEMPERATURES'. 0) li_r) ;
em_R1 = chan 'CHAM' em_R0 or_li_r 'RIGIDITE';
mr_li_r = mate or_li_r 'EMIS' em_R1;
*
ma_tot1=ma_r et ma_v et ma_sl et
          mr_le_v et mr_li_v et mr_le_c et mr_li_r et
          mc_le_v;
*
*caricamento tavola ausiliaria
tab1 . 'GGM' = tab0 . 'GGM';
*opti donn 5;
*
tab1.'CARACTERISTIQUES'= ma_tot1 ;
*tab1.'PROCEDURE_THERMIQUE'=NONLINEAIRE;

```

```

tab1.'PROCEDURE_THERMIQUE'='DUPONT';
tab1.'PROCEDURE_PERSO2'=vrai;
tab1.'PAS_MAX'=5.;
tab1.'CRITERE'=1.E-4;
*
tab1.'RAYONNEMENT'=table;
tab1.'RAYONNEMENT'. 1          = table;
tab1.'RAYONNEMENT'. 1 . 'TYPE'  = 'INFINI' ;
tab1.'RAYONNEMENT'. 1 . 'MODELE' = or_le_v ;
*
tab1.'RAYONNEMENT'. 2          = table;
tab1.'RAYONNEMENT'. 2 . 'TYPE'  = 'CAVITE';
tab1.'RAYONNEMENT'. 2 . 'MODELE' = or_l_cv ;
tab1.'RAYONNEMENT'. 2 . 'CONVEXE' = faux;
tab1.'RAYONNEMENT'. 2 . 'FERME'  = vrai;
tab1.'RAYONNEMENT'. 2 . 'CABSO'  = 0.;
*
tab1.'RAYONNEMENT'. 3          = table;
tab1.'RAYONNEMENT'. 3 . 'TYPE'  = 'CAVITE';
tab1.'RAYONNEMENT'. 3 . 'MODELE' = or_li_r ;
tab1.'RAYONNEMENT'. 3 . 'CONVEXE' = vrai;
tab1.'RAYONNEMENT'. 3 . 'FERME'  = vrai;
tab1.'RAYONNEMENT'. 3 . 'CABSO'  = 0.;
*
tab1.'CTE_STEFAN_BOLTZMANN'= 5.673E-8;
tab1.'CELSIUS'              = faux;
tab1.'CHARGEMENT'           = cc1_ch et cr1_ch et ch_f_r et ch_s_v;
*
*tab1.'TEMPS_CALCULES' = prog 0. pas 4. 8.;
tab1.'TEMPS_CALCULES' = prog 0. pas 4. 300.
                           pas 4. (tav_tm. J_cl1) ;

pasapas tab1;
*
*
list tab1;
opti sauv format 'caso_09_1b.sauve';
sauv format tab1;
mess 'sono qui';
*opti donn 5;
fin;
*=====

*=====
*FASE meccanica stazionaria per gli istanti più sollecitati termicamente
*mediante modellizzazione in deformazioni piane generalizzate
*=====

opti rest format 'caso_09_1b.sauve';
rest format;
*list tab1;
*list tab1 . temps;
*=====
* acciaio ricevitore
*=====

CLM1=26;
tempo_r= TAB1.'TEMPS'. CLM1;
ttl=tab1 . 'TEMPERATURES' . CLM1;
titr 'Temperature: Istante ' tempo_r ',Passo ' CLM1;
tt_r_ac=(redu ttl mg_r)- 273.;
trac tt_r_ac mg_r;

```

```

tt_ri=manu chpo mg_r 1 'T' 20.;
*
pg=0 0 ;
opti mode plan gene pg;
*
mo_r=mode mg_r mecanique elastique qua8 tri6 dpge pg;
*
y_r=150000.;
nu_r=0.3;
alfa_r=16.e-6;
*
ma_r=mate mo_r young y_r nu nu_r alph alfa_r;
*
rig_r=rigi mo_r ma_r;
*
s_ter_r=thet mo_r ma_r (tt_r_ac - tt_ri);
f_ter_r=bsig mo_r s_ter_r ;
*
f1_r=forc fz 0. pg;
b2_r=bloq rx pg;
b3_r=bloq ry pg;
*b4_r=bloq depl pg;
f_tot_r=f1_r et f_ter_r;
*
rig_t_r=rig_r et b2_r et b3_r;
*
dpl_r=reso rig_t_r f_tot_r;
*
*list dpl_r;
s_tot_r=sigma mo_r ma_r dpl_r;
s_mec_r=s_tot_r - s_ter_r;
e_tot_r=epsi mo_r dpl_r;
e_ter_r=elas mo_r s_ter_r ma_r ;
e_mec_r=e_tot_r - e_ter_r;
titr 'Tensioni: Istante ' tempo_r ',Passo ' CLM1;
trac mo_r s_mec_r;
titr 'Deformazioni: Istante ' tempo_r ',Passo ' CLM1;
trac mo_r e_mec_r;
*trac mo_r e_tot_r;
*=====
*      vetro
*=====

CLM2=53;
tempo_v= TAB1.'TEMPS'. CLM2;
tt2=tab1 . 'TEMPERATURES' . CLM2;
titr 'Temperature: Istante ' tempo_v ',Passo ' CLM2;
tt_v_ac=(redu tt2 mg_v)- 273.;
trac tt_v_ac mg_v;
tt_vi=manu chpo mg_v 1 'T' 20.;
*
mo_v=mode mg_v mecanique elastique qua8 tri6 dpge pg;
*
y_v=70000.;
nu_v=0.2;
alfa_v=4.e-6;
*
ma_v=mate mo_v young y_v nu nu_v alph alfa_v;
*

```

```

rig_v=rigi mo_v ma_v;
*
s_ter_v=thet mo_v ma_v (tt_v_ac - tt_vi);
f_ter_v=bsig mo_v s_ter_v ;
*
f1_v=forc fz 0. pg;
b2_v=bloq rx pg;
b3_v=bloq ry pg;
*b4=bloq depl pg;
f_tot_v=f1_v et f_ter_v;
*
rig_t_v=rig_v et b2_v et b3_v;
*
dpl_v=reso rig_t_v f_tot_v;
*
*list dpl_v;
s_tot_v=sigma mo_v ma_v dpl_v;
s_mec_v=s_tot_v - s_ter_v;
e_tot_v=epsi mo_v dpl_v;
e_ter_v=elas mo_v s_ter_v ma_v ;
e_mec_v=e_tot_v - e_ter_v;
titr 'Tensioni: Istante ' tempo_v ',Passo ' CLM2;
trac mo_v s_mec_v;
titr 'Deformazioni: Istante ' tempo_v ',Passo ' CLM2;
trac mo_v e_mec_v;
*trac mo_v e_tot_v;
fin;
*=====

```

Conclusione Generale

Nel presente rapporto si sono evidenziate le attività svolte nel primo periodo di consuntivazione delle attività svolte nell'ambito dell'accordo ENEA-CEA relativamente all'STC-n° 1-CAST3M.

Tali attività hanno riguardato:

- Corsi termo-meccanica delle strutture orientata all'impiego di CAST3M tenuti a personale ENEA in formazione e neoassunto.
- Riattivazione della procedura HTCTRAN-1998 di CAST3M.
- Stato dell'arte sulla struttura dei calcestruzzi con particolare riferimento agli aspetti connessi con il trasferimento del calore, finalizzato all'adeguamento della procedura HTCTRAN.



