RIVESTIMENTI IN ANELLI DI CONCI PREFABBRICATI DI GALLERIE REALIZZATE CON TBM

Brescia, 23 Giugno 2022

Aula Magna Ingegneria - Università di Brescia (UniBs)

ORGANIZZATORI

Collegio dei tecnici della Industrializzazione Edilizia

Società Italiana Gallerie
Italian Tunnelling Society

CON IL PATROCINIO DI

Ordine Ingegneri della provincia di Brescia

Università degli Studi di Brescia

fib CEB-FIP Fédération Internationale du Béton

MEDIA PARTNER

ingenio

SAIE Bologna, 19/22 ottobre 2022

PRESENTAZIONE

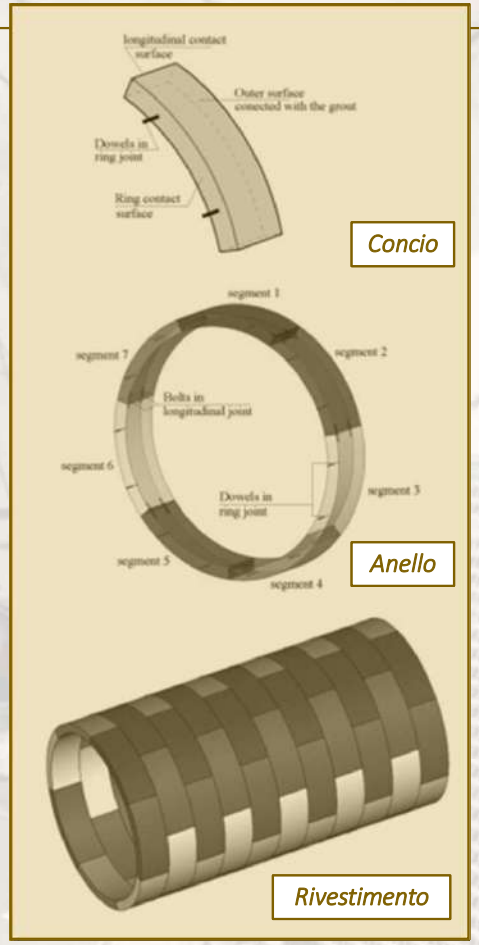
Giovanna Cassani
Rocksoil S.p.A.
Direttore Tecnico
giovanna.cassani@rocksoil.com

Progettazione strutturale: Condizioni di carico, SLU, SLE, comportamento globale, comportamento locale, carichi eccezionali (fuoco, sisma, urti), by-pass. Dimensionamento e verifiche connettori e giunti.

INTRODUZIONE

1. Definizione dei carichi
   a) carichi transitori
   b) carichi permanenti (terreno, acqua, influenza su fondazioni esistenti, ecc.)
   c) carichi sismici
   d) carichi eccezionali (fuoco)
2. Stato limite di esercizio e stato limite ultimo
3. Comportamento globale
4. Comportamento locale
5. Sistemi di connessione

CONCLUSIONI



INTRODUZIONE

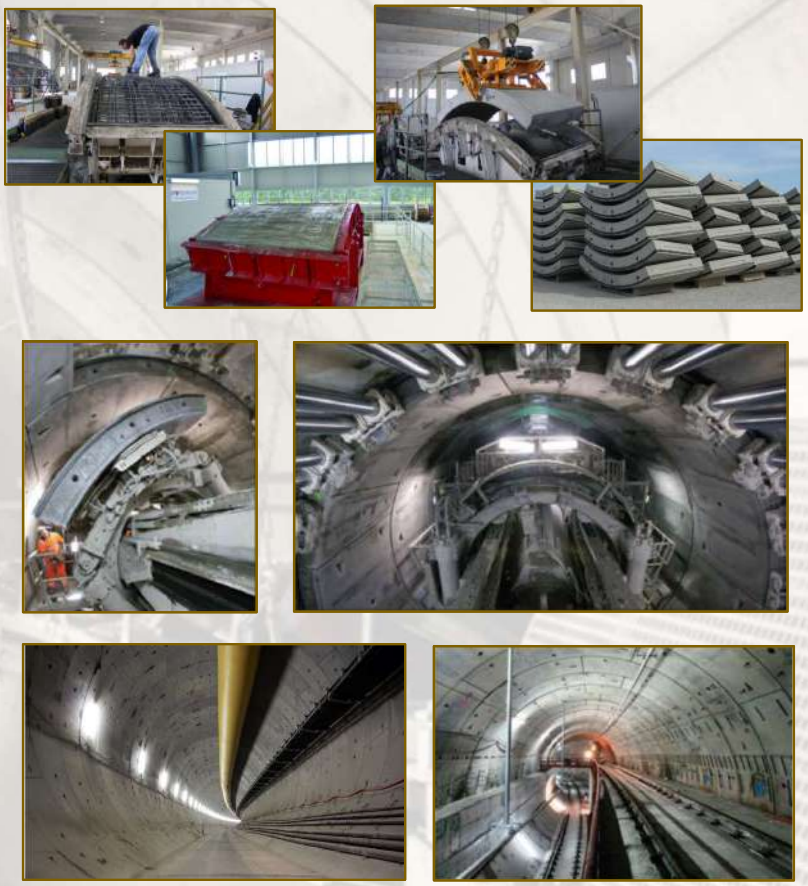
PROGETTAZIONE STRUTTURALE

↓

Produzione, installazione, anello del rivestimento definitivo

↓

SPECIFICHE CONDIZIONI DI CARICO E VINCOLO



INTRODUZIONE

PARAMETRI DI PROGETTO DEI CARICHI

FASE DI VERIFICA		Coefficiente dinamico $W_{dyn} = (\alpha_d - 1) \cdot W_{static}$ $W_{tot} = W_{dyn} + W_{static}$	Eccentricità e (m)	Coefficiente parziale SLE $N_{Ed} = \gamma_F \times N$ $M_{Ed} = \gamma_F \times M$	Coefficiente parziale SLU $N_{Ed} = \gamma_F \times N$ $M_{Ed} = \gamma_F \times M$	
					G carichi permanenti[1]	Q carichi variabili[1]
Scassero		1,10	-	1,00[2]	1,30	-
Prima Movimentazione		1,10	-	1,00[2]	1,30	-
Stoccaggio stabilimento	Operativa	1,10	-	1,00[2]	1,30	-
	Accidentale		0,1	1,00[2]	1,30	-
Trasporto in cantiere		2,00 gomma 1,50 rotaia	0,1	1,00[2]	1,30	-
Stoccaggio cantiere	Operativa	1,50	-	1,00[2]	1,30	-
	Accidentale		0,1	1,00[2]	1,30	-
Movimentazione con erettore TBM		1,60	-	1,00[2]	1,30	-
Spinta dei martinetti	Ordinaria	-	0,01	1,00[2]	1,30	-
	Eccezionale			-	1,00	-
Fase operativa		-	-	1,00[3]	1,30	1,50

PARAMETRI DI PROGETTO DEI MATERIALI

FASE DI VERIFICA		CALCESTRUZZO			
		Maturazione del materiale	Coefficiente parziali sul materiale: Compressione[1] $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck,0.05} / \gamma$		Resistenza a trazione flessionale[2] $\sigma_t = f_{ctm,j} / \gamma$
			α_{cc}	γ	
Scassero		5-7 ore 7-10 ore	1,00	1,50	1,20
Prima Movimentazione		5-7 ore 7-10 ore	1,00	1,50	1,20
Stoccaggio stabilimento	Operativa	5-7 ore 7-10 ore	1,00	1,50	1,20
	Accidentale			1,50	
Trasporto in cantiere		28 gg	1,00	1,50	1,20
Stoccaggio cantiere	Operativa	28 gg	1,00	1,50	1,20
	Accidentale			1,50	
Movimentazione con erettore TBM		28 gg	1,00	1,50	1,20
Spinta dei martinetti	Operativa	28 gg	1,00	1,50	1,20
	Eccezionale			1,20	
Fase operativa		28 gg	0,85	1,50	1,20

Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: Carichi durante la fase di produzione

VERIFICA ALLO SCASSERO

SLE + SLU

- Proprietà del materiale a breve termine
- Schema statico → tipo di sollevamento
- Carichi di Progetto
  - ✓ Peso proprio del concio P_p
  - ✓ Incremento dovuto all'adesione pari a 3,0 kN/m^2
  - ✓ Incremento dinamico con coefficiente pari a 1,10

Tipologico di movimentazione

VACUUM

PINZA MECCANICA

1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: Carichi durante la fase di produzione

PRIMA MOVIMENTAZIONE IN STABILIMENTO

SLE + SLU

- Proprietà del materiale a breve termine
- Schema statico → tipo di sollevamento
- Carichi di Progetto
  - ✓ Peso proprio del concio Pp
  - ✓ Incremento dinamico con coefficiente pari a 1,10

Tipologico di movimentazione

VACUUM

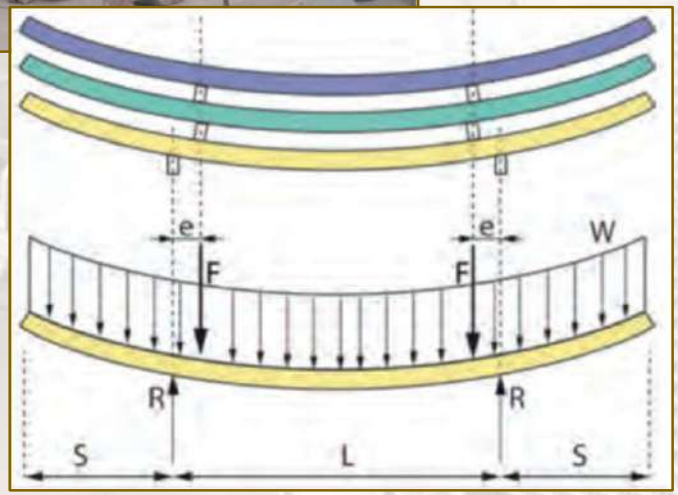
PINZA MECCANICA

1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: Carichi durante la fase di produzione

STOCCAGGIO IN STABILIMENTO

SLE + SLU
OPERATIVA e
ACCIDENTALE (eccentricità dei supporti in legno in entrambe le direzioni)

- Proprietà del materiale a breve termine
- Accatastamento → mezzo anello (variabile in funzione delle condizioni di produzione)
- Carichi di Progetto – verifica sul concio alla base
  - ✓Peso proprio
  - ✓Peso dei conci superiori
  - ✓Incremento dinamico con coefficiente pari a 1,10



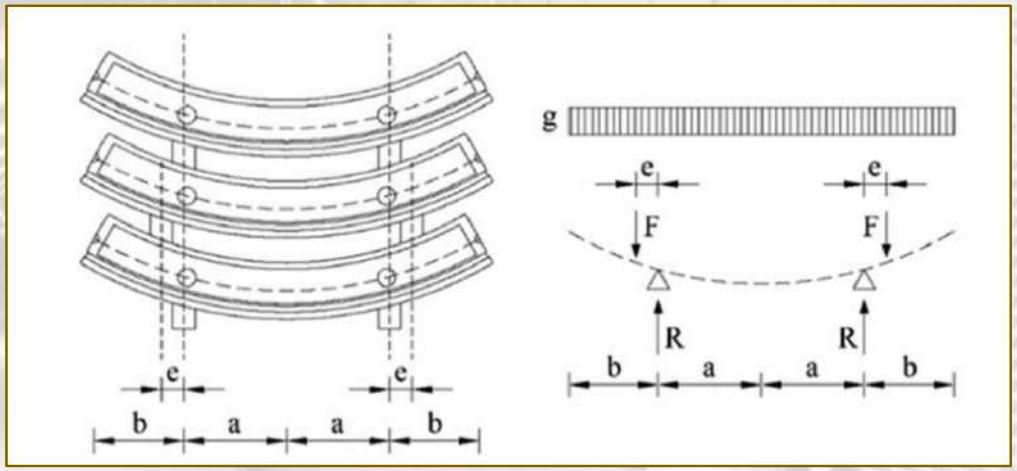
1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: Carichi durante il trasporto

TRASPORTO IN CANTIERE

Su gomma fino al cantiere e
su rotaia per l'installazione

SLE + SLU

- Proprietà del materiale a lungo termine termine (28 giorni)
- Carichi di Progetto
  - ✓ Peso proprio; Incremento con coefficiente di amplificazione dinamico (pari a 2 su gomma e 1,5 su rotaia

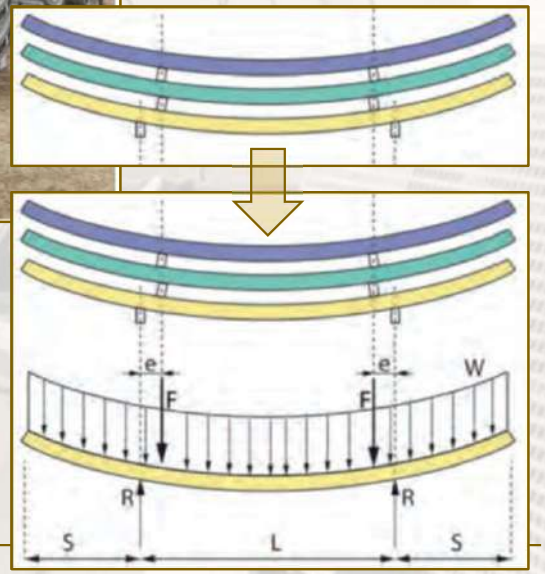


1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: in cantiere

STOCCAGGIO IN CANTIERE
≈ STOCCAGGIO IN STABILIMENTO

SLE + SLU
OPERATIVA e
ACCIDENTALE (eccentricità dei supporti in legno in entrambe le direzioni)

- Proprietà **lungo termine** (28 giorni)
- Accatastamento → **un anello**
- Carichi di Progetto – verifica sul concio alla base
  - ✓ Peso proprio;
  - ✓ Peso dei conci superiori
  - ✓ Incremento dinamico pari a **1,50**



1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: in cantiere

MOBILITAZIONE CON ERETTORE

SLE + SLU

- Proprietà **lungo termine** (28 giorni)
- Accatastamento → **un anello**
- Carichi di Progetto
  - ✓ Peso proprio;
  - ✓ Incremento dinamico pari a **1,60**

erettori disponibili

MECCANICI

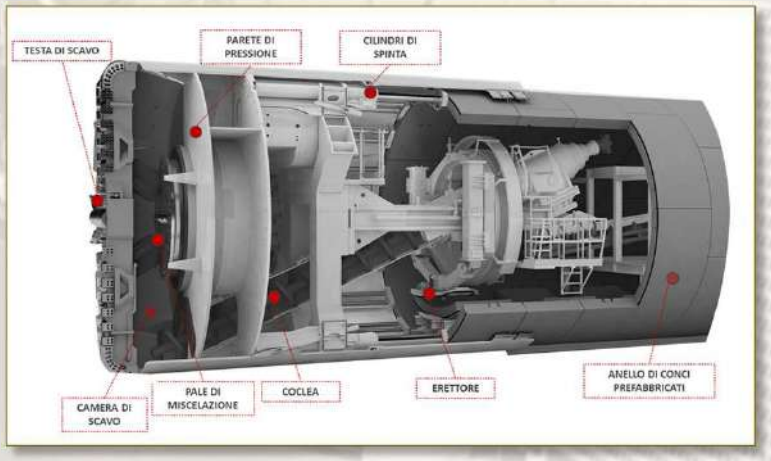
VACUUM

1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: fase di spinta → *spinta dei martinetti*

A seconda delle condizioni di scavo, devono essere identificati due valori di spinta:

- **Spinta operativa:** valore ordinario (copre 100 % del tracciato nelle ipotesi di progetto)
- **Spinta eccezionale:** valore in condizioni non ordinarie definite da Analisi di Rischi

- Centro di gravità governato dal peso della testa tagliante della macchina→
- Le forze di spinta dei martinetti saranno quindi maggiori nella parte inferiore della testa e minori nella parte superiore.



1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: fase di spinta → *spinta dei martinetti*

SPINTA DEI MARTINETTI

OPERATIVA E ORDINARIA
SLE + SLU

ECCEZIONALI E SBLOCCAGGIO TBM
SLU

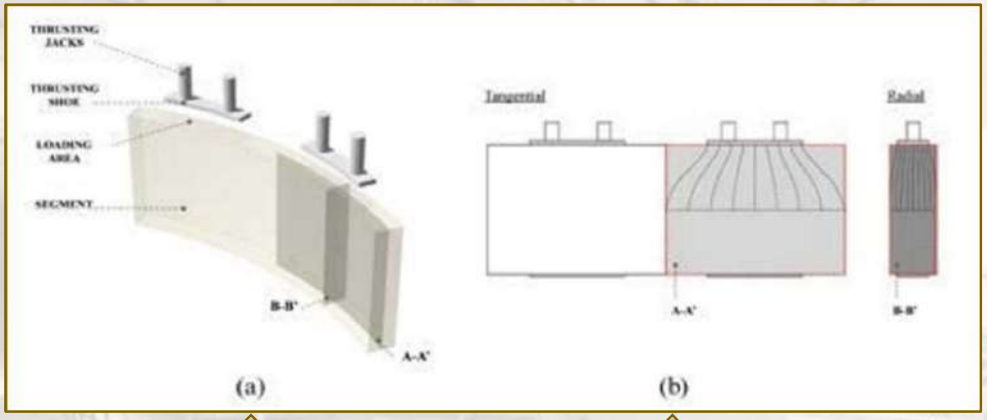
La verifica deve essere eseguita considerando il valore maggiore tra la spinta in condizioni ordinarie amplificata dal coefficiente parziale e la spinta in condizioni eccezionali, previo controllo che tale valore risulti comunque inferiore alla capacità massima di spinta del singolo martinetto.

DUE LIVELLI DI INDAGINE
- comportamento dei segmenti locale: concentrazione degli sforzi al disotto o fra i pistoni;
- comportamento del segmento globale: distribuzione dei carichi applicati altamente concentrati in tutto il piano medio del segmento.

1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: fase di spinta → *spinta dei martinetti*

- Durante il processo di scavo della galleria, a causa dell'applicazione dei martinetti della TBM, è noto che la regione del segmento sotto i martinetti può essere considerata perturbata.
- Possono verificarsi "spalling stresses" tra i martinetti di spinta.

Dovrebbero essere considerati i seguenti problemi:
→ pressioni di contatto sotto le piastre e i ripartitori dei martinetti di spinta;
→ sollecitazioni di trazione indotte in direzione radiale;
→ sollecitazioni di trazione indotte in direzione circonferenziale.



sistemi di riferimento assunti per indagare localmente il comportamento del segmento durante la fase di spinta

traiettorie tipiche delle sollecitazioni di compressione attese

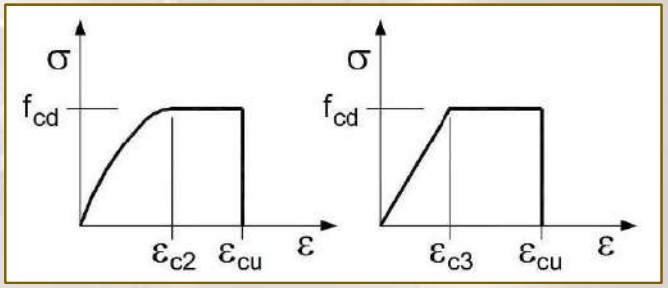
CARICHI DURANTE LA FASE DI SPINTA – Comportamento del segmento locale

1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: fase di spinta → *comportamento del segmento locale*

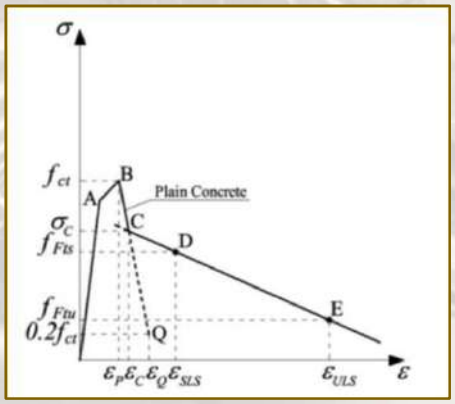
Determinazione sforzi indotti dai martinetti idraulici e stato tensionale sui singoli conci:

- Modelli analitici semplificati - fib Bulletin 83
- Modellazione FEM (Finite Element Method) adottando un modello bidimensionale
  - → Combinare condizioni di carico e di appoggio diverse per riprodurre valori di carico differenti tra i vari gruppi di spinta
  - → Combinare condizioni di vincoli, sul lato opposto alla spinta, in grado di simulare condizioni di appoggio non continuo sull'anello precedente ed eventuali tolleranze costruttive.

Le condizioni di analisi scelte in funzione del layout dell'anello e della geometria dei conci.



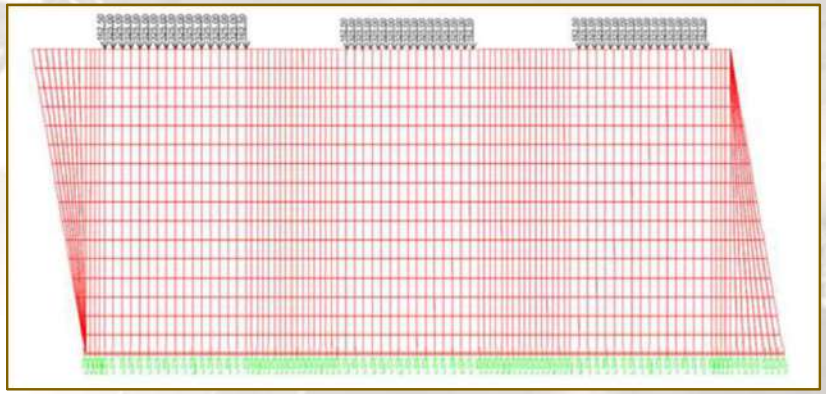
Legame costitutivo del calcestruzzo a compressione NTC 2018



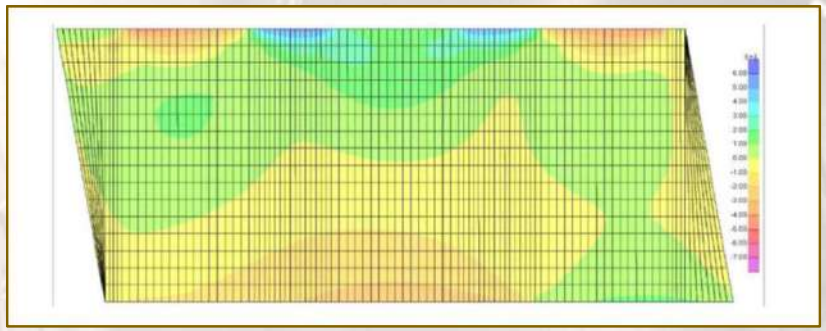
Legame costitutivo del calcestruzzo a trazione

In fase di progettazione, se non sono disponibili prove sperimentali che definiscono il comportamento del calcestruzzo a trazione si sceglie di adottare un legame costitutivo degradante, essendo quest'ultimo a favore di sicurezza

1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: fase di spinta → *comportamento del segmento locale*

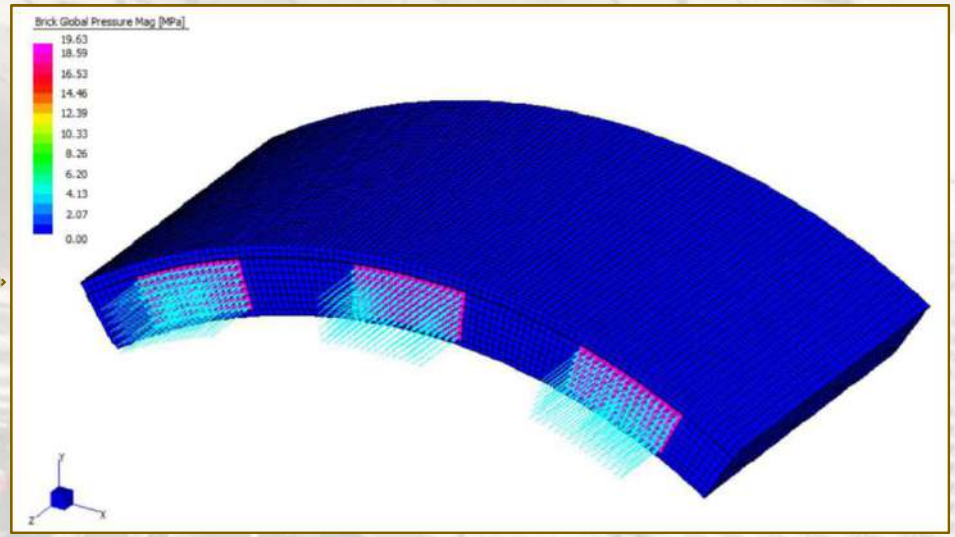


Modello FEM 2D di un concio sottoposto alla spinta dei martinetti



Esempio di andamento delle tensioni in direzione circonferenziale

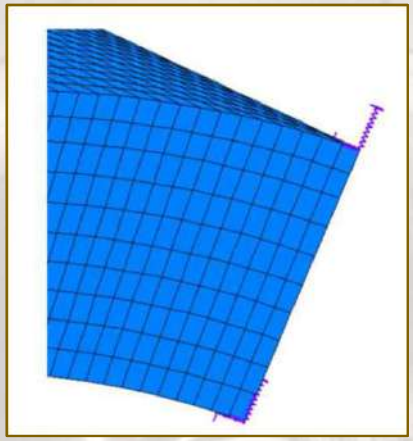
*Se **2D** non soddisfacente approfondimento a **3D***



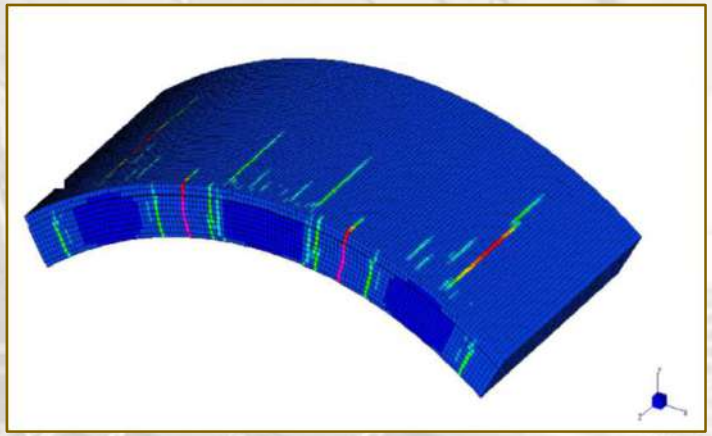
Modello FEM 3D di un concio sottoposto alla spinta dei martinetti

1. Definizione dei Carichi - a) Carichi transitori: fase di spinta → *comportamento del segmento locale*

Vincoli del lato posteriore del concio analizzato – carrelli (DZ)



Dettaglio delle molle utili alla convergenza del solutore



Cedimento strutturale del concio

→ il grado di libertà longitudinale (DZ) è considerato fisso per tutti i nodi della faccia del concio a contatto con l'anello precedente già installato (tale superficie di contatto deve essere valutata caso per caso in relazione all'effettiva geometria)

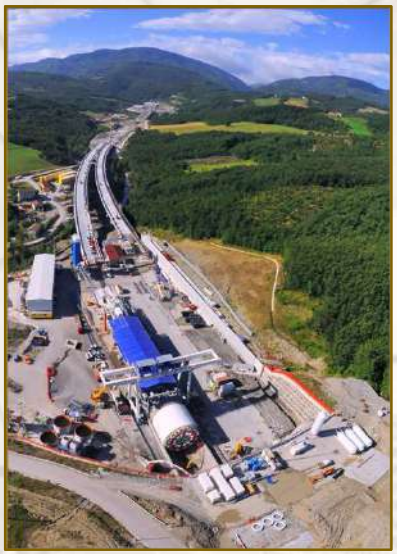
→ Trascurato a favore di sicurezza l'effetto di confinamento dovuto alla presenza dei conci adiacenti

vengono aggiunti nei nodi di estremità delle molle dalla rigidezza trascurabile, utili solamente a garantire la convergenza del solutore.

una modellazione di questo tipo può cogliere l'apertura delle fessure dovute ad effetti di bursting e spalling

Segmento libero di deformare in direzione circonferenziale

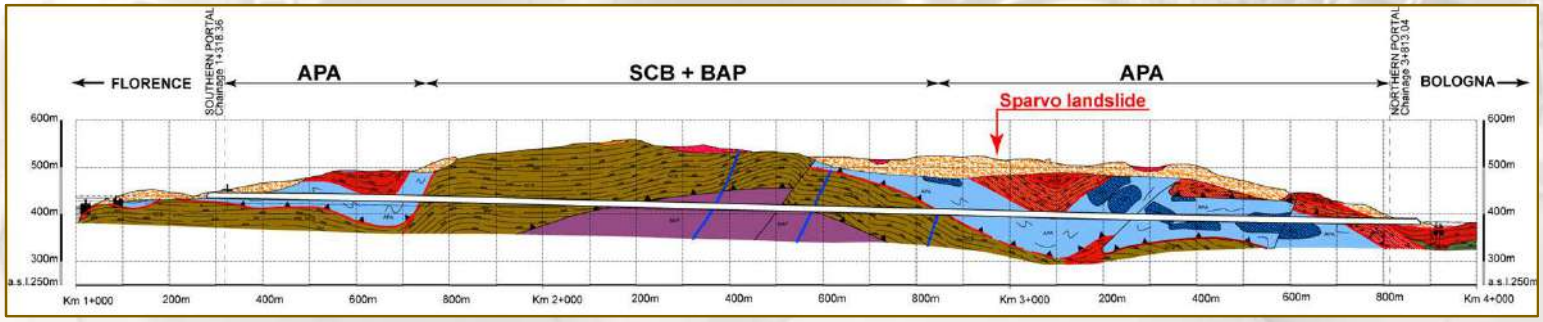
1. Definizione dei Carichi - b) Carichi permanenti



Si definiscono carichi permanenti quei carichi che agiranno sull'anello durante la sua vita utile o, in alternativa, quei carichi che dovranno essere valutati se verranno modificate le condizioni attorno all'anello, per esempio l'esecuzione di fondazioni interferenti con la galleria di progetto.

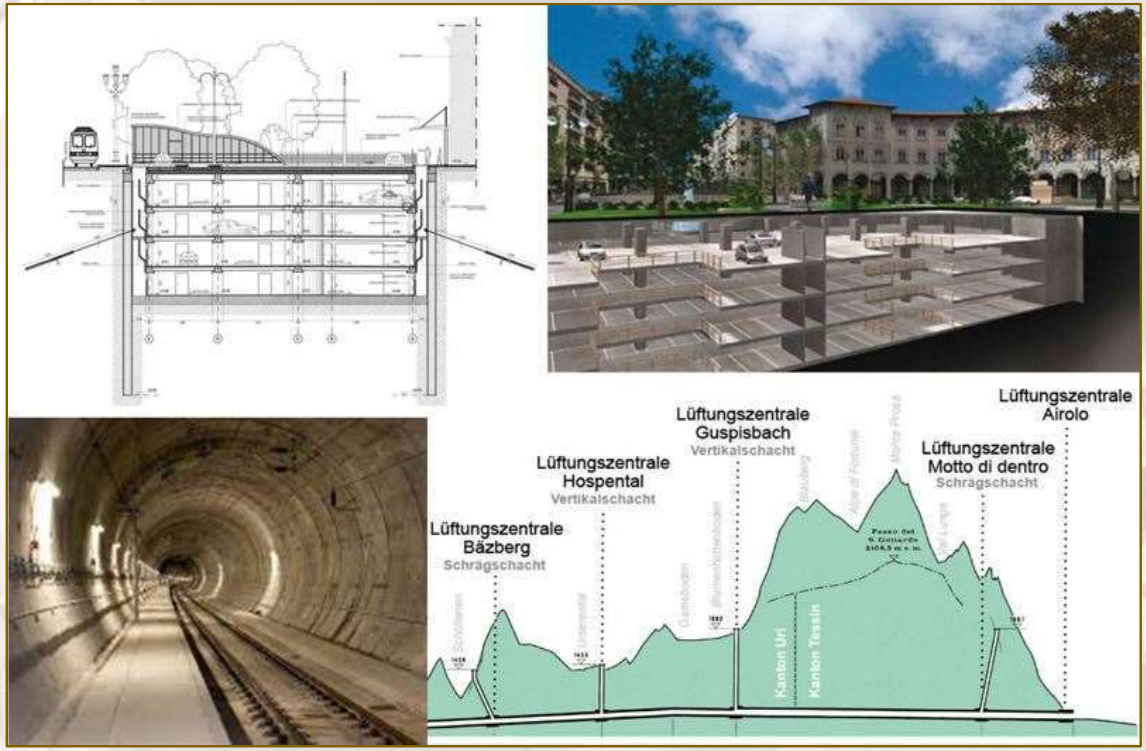
a) carichi geostatici
b) carichi idraulici
c) carichi derivanti da altre configurazioni intese come agenti sulla struttura (carichi appesi, edifici, fondazioni di opere d'arte quali viadotti, altre opere interrate in prossimità del cavo)
d) carichi dovuti alle variazioni termiche stagionali (zone di imbocco)

I carichi permanenti devono essere analizzati secondo la normativa vigente sia allo SLE sia allo SLU.



1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici: *Premessa*

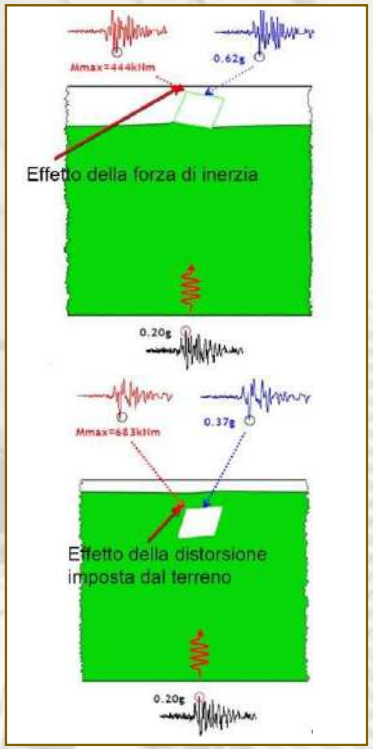
SOLLECITAZIONI SISMICHE OPERE IN SOTTERRANEO



Prevalenza componenti INERZIALI

Prevalenza componenti CINEMATICHE

INERZIALI



1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici: *Premessa*

SOLLECITAZIONI SISMICHE IN GALLERIA

INERZIALI

trascurabili dato l'elevato grado di confinamento dell'opera

CINEMATICHE

deformazioni indotte dal moto sismico nel terreno e della sua interazione con la struttura

- Frane indotte dal sisma la cui superficie di scivolamento interseca l'allineamento della galleria
- Zone di imbocco
- Liquefazione dei terreno al contorno della galleria
- Intersezione di faglie
- Distorsioni indotte dal sisma nel sottosuolo
- Strati litologici con differente rigidezza

Galleria Forca Canapine – Terremoto Amatrice 24 agosto 2016

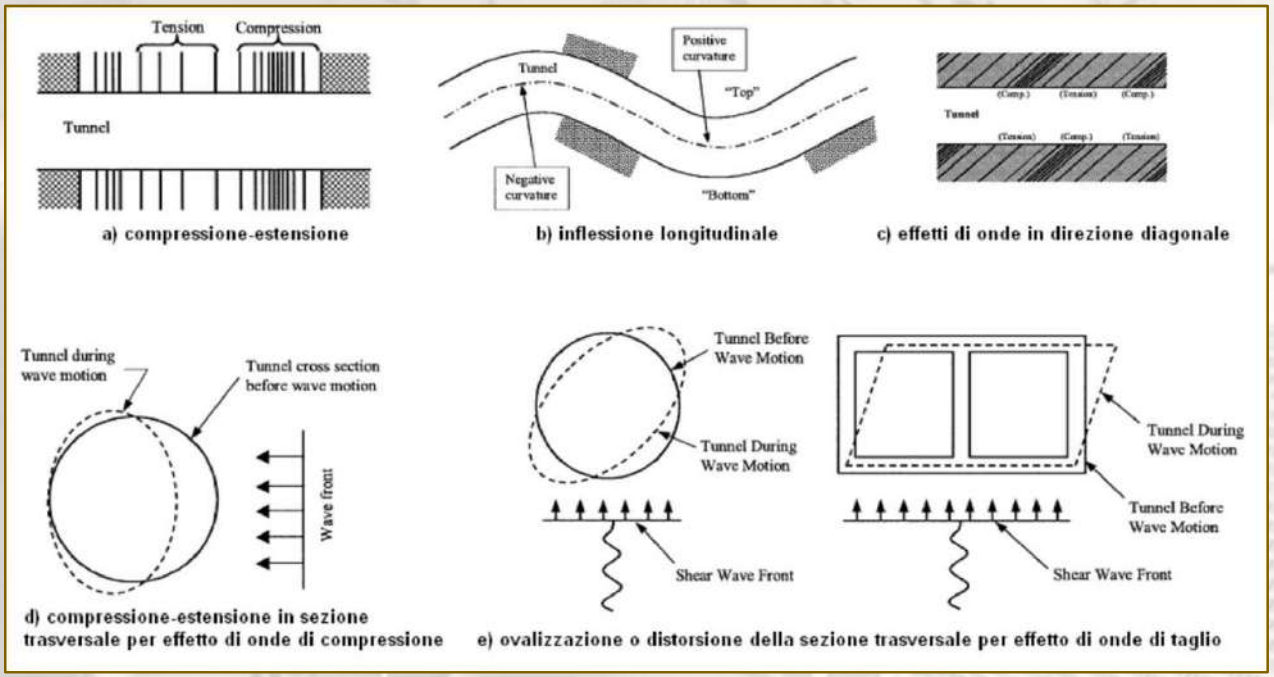
1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici: *Premessa*

Meccanismi deformativi di un'opera sotterranea investita da onde sismiche:

- Sezione trasversale: condotta ipotesi di deformazione piana
- Sviluppo longitudinale: condotta lungo l'asse schematizzando la galleria come una trave di lunghezza infinita o finita

ANALISI

- pseudo-statica
- dinamica semplificata
- dinamica completa



Meccanismi di deformazione di una galleria in presenza di sisma (da Owen e Scholl, 1981)

1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici

Definizione dell'azione sismica:

- risposta sismica locale può essere valutato con approccio semplificato (cfr. § 3.2.2 del DM 17/01/2018) basato sulla classificazione del sottosuolo in base ai valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni risultino chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.3.II del DM 17/01/2018
- l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi nelle quali l'azione sismica è definita in termini di storia temporale di accelerazione (cfr. § 7.11.3.1 del DM 17/01/2018).

→ una volta definita l'azione sismica di progetto, è possibile stimare gli effetti indotti mediante un ***approccio di tipo pseudo-statico.***

→ per le opere in sotterraneo, gli ***effetti indotti dal sisma*** sono riprodotti sotto forma di una ***deformazione di taglio*** massima, agente alla quota della galleria, ricavata a partire dall'azione sismica di progetto

Per le azioni sismiche si potrà procedere con analisi pseudostatiche. Alle sollecitazioni ottenute in fase statica con un modello bidimensionale è possibile aggiungere o sottrarre gli incrementi di azione assiale e momento flettente derivanti da un'analisi sismica pseudostatica.

1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici

La valutazione del livello di deformazione indotta dal sisma e del corrispondente modulo di deformazione al taglio mobilitato è condotta adottando un modello costitutivo di tipo iperbolico in accordo alla formulazione di Hardin & Drnevich (Hardin, B.O., and Drnevich, V.P. (1972) - *Shear modulus and damping in soils: design equations and curves*) riportata nel seguito:

$$G/G_{max} = 1 / (1+\gamma_h) \qquad (1)$$

dove $\gamma_h = \gamma / \gamma_{ref} \cdot [k_1 + a \cdot e^{(-b \cdot (\gamma/\gamma ref))}]$

con:

$\gamma_{ref} = \tau_{max} / G_{max}$	deformazione di riferimento;
G_{max}	modulo di deformazione al taglio iniziale $G_{max} = \rho \cdot V_s^2$
τ_{max}	tensione tangenziale massima;
γ	livello di deformazione corrente;
k_1, a, b	parametri di forma del modello adottato.

Il modello iperbolico, caratterizzato nel piano τ - γ dai parametri pendenza iniziale (G_{max}) e asintoto (τ_{max}), consente con un approccio semplificato di tenere conto del comportamento non lineare del terreno. Il modello è calibrato con curve di decadimento attraverso il parametro γ_h. I parametri k_1, a, b, sono parametri di forma attraverso i quali adattare il modello non lineare alle curve di letteratura o, qualora disponibili, curve di decadimento derivanti da specifiche prove di laboratorio.

1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici

Il valore della resistenza massima del terreno è calcolato alla quota del piano dei centri secondo il criterio di Mohr-Coulomb:

$$\tau_{max} = c' + \sigma'_v \cdot \tan(\varphi')$$

Il metodo proposto è basato sulla stima delle deformazioni $\gamma(z)$ indotte dal sisma nel sottosuolo, valutando in maniera statica la distribuzione delle accelerazioni, delle tensioni tangenziali e quindi della deformazione ad una generica profondità *z*, tenendo in conto il decadimento del modulo di taglio.

Il valore della tensione tangenziale corrispondente al livello di deformazione corrente è pari a:

$$\tau = G_{max} \cdot (1 / (1+\gamma_h)) \cdot \gamma \qquad < \tau_{max} \qquad (2)$$

Il valore della tensione tangenziale massima indotta dal sisma alla profondità *z* viene valutata attraverso la seguente relazione, basata sull'equilibrio di una colonna di terreno sottoposta ad un'accelerazione sismica $a_{max,s}$ (in cui le forze di inerzia sono bilanciate dalla risultante delle tensioni tangenziali alla base):

$$\tau_{max,sis}(z) = r_d(z) \cdot a_{max} / g \cdot \sigma_v(z)$$

dove:

1. $r_d(z)$ fattore di attenuazione con la profondità assunto pari a $r_d(z) = 1-0.015 \cdot z$ (Iwasaki et al. 1978), che tiene in conto del sincronismo del moto sismico;
2. a_{max} accelerazione massima a piano campagna;
3. $s_v(z)$ tensione geostatica verticale totale.

Il livello di deformazione indotto dal sisma è quello associato al valore di $t_{max,sis}$ letto nel legame costitutivo (2).

1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici: *Analisi sismica pseudo-statica*

Gli incrementi di sollecitazione mediante soluzioni analitiche in forma chiusa nelle ipotesi di galleria circolare in semispazio lineare ed isotropo sono stimati a partire dalla deformazione di taglio massima stimata (Wang J.N. (1993) - Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach).

Di seguito si riporta formulazione di Wang (Wang J.N. (1993) - Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach) per la forza circonferenziale massima ed il momento massimo che agiscono nella sezione trasversale della galleria nell'ipotesi di perfetta aderenza al contatto terreno-rivestimento:

$$M_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} r^2 \gamma_{max}$$

$$N_{max} = \pm K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} r \gamma_{max}$$

dove:

$$K_1 = \frac{12(1-\nu_m)}{2F+5-6\nu_m}$$

$$K_2 = 1 + \frac{F\left[(1-2\nu_m)-(1-2\nu_m)C\right] - \frac{1}{2}(1-\nu_m)^2 + 2}{F\left[(3-2\nu_m)+(1-2\nu_m)C\right] + C\left[\frac{5}{2} - 8\nu_m + 6\nu_m^2\right] + 6 - 8\nu_m}$$

C e F sono rispettivamente le rigidezze relative a compressione e a flessione:

$$C = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r}{E_l t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)}$$

$$F = \frac{E_m(1-\nu_l^2)r^3}{6E_l I(1+\nu_m)}$$

L'effetto del sisma tende a smorzarsi all'aumentare della profondità dell'opera (trascurabile quando la galleria ha almeno 50m di copertura) le sezioni di verifica a bassa copertura risultano generalmente le più gravose nell'analisi sismica

1. Definizione dei Carichi - c) Carichi sismici: *Analisi sismica pseudo-statica. Esempio*

Le analisi sismiche pseudo-statiche in direzione trasversale sono svolte in riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV) e allo stato limite di danno (SLD), valutando la compatibilità delle sollecitazioni con i domini di resistenza delle sezioni.

Peso specifico	γ	[kN/m^3]	20
Coeff. Poisson terreno	ν	[-]	0.3
Densità	ρ	[kN s^2/m^4]	2.04
Profondità	z	[m]	30
Coefficiente di riduzione	-	[-]	5
Modulo elastico statico	E_0	[MPa]	225
Modulo elastico dinamico	E_m dinamico	[MPa]	1125

Parametri geotecnici e sismici

Vita nominale della costruzione	V_N	[anni]	75
Coefficiente d'uso	c_U	-	1.5
Periodo di riferimento	V_R	[anni]	112.5
Accelerazione di progetto	a_g	[g]	0.381
Fattore amplificazione spettrale massima	F0	-	2.287
Categoria di sottosuolo	-	-	B
Amplificazione classe di suolo	S_S	-	1.051
Categoria topografica	-	-	T1
Amplificazione topografica	S_T	-	1.0
Accelerazione di progetto max	a_{max}	[g]	0.401
Fattore di attenuazione con la profondità	r_d	[-]	0.55
τ_{max} sisma	τ_{max}	[-]	132.2
G_{max} da V_s	G_{max}	[kPa]	432692
Vel app. propagazione onde taglio	C_m	[m/s]	461
Max deformazione taglio	γ_{max}	[-]	0.000306

Parametri SLV sismici

Diametro	D	[m]	12.1
Spessore rivestimento	t	[m]	0.55
E cls	E_c	[MPa]	34000
Coeff. Poisson cls	ν_{cls}	[-]	0.2
Defomaz amissibile cls	ε	[-]	0.003
Inerzia	I_c	[m^4]	0.0139
Area per unità di larghezza	A	[m^2]	0.55

Parametri strutturali sismici della galleria

C	[-]	0.672
F	[-]	65.044
K1	[-]	0.063
K2	[-]	1.059
± Nmax	[kN]	667.25
± Mmax	[kNm]	101.65

Rigidezze relative, coefficienti di risposta e sollecitazioni sismiche massime secondo Wang J.N. (1993)

In relazione allo specifico caso di analisi e al livello di approfondimento della specifica fase di progettazione, in alternativa il progettista valuterà se adottare un approccio con analisi FEM simulando i carichi mediante un valore di accelerazione pseudo-statica oppure mediante analisi dinamiche nel tempo.

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Premessa*

Il **D.Lgs. n. 264 del 05/10/2006** ha lo scopo di garantire un livello minimo sufficiente di sicurezza → **misure di prevenzione e protezione**

Esso si applica a tutte le gallerie situate nel territorio italiano appartenenti alla rete stradale transeuropea, di lunghezza superiore a cinquecento metri già in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progetto.

Veicolo coinvolto nell'incidente nel Traforo del Monte Bianco nel 1999

Fenomenologia dell'incendio in galleria

Carico di incendio→ veicoli coinvolti nell'incendio.

- Materiali costitutivi del veicolo stradale: sedili, pneumatici e materiali plastici (ingente quantità di fumi densi)
- carburante contenuto nel serbatoio dei veicoli
- carico dei veicoli

Potenza termica → natura e quantità del carburante fuoriuscito,
→ superficie coperta dal materiale combustibile
→ disponibilità locale di comburente.

In sotterraneo lo sviluppo di incendio risente dello spazio confinato e dalla velocità longitudinale dell'aria.

Innesco → veicolo completo in fiamme ("flash over") 7-10 minuti

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco)

Il rivestimento definitivo della galleria, ad esclusione dell'arco rovescio, può essere esposto ad un incendio durante la sua vita d'esercizio e deve assicurare il necessario livello di sicurezza in questa combinazione di carico eccezionale.

UNI EN 1992-1-2:2019

Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio

paragrafo 5.4.2 →

- rivestimento definitivo della galleria → struttura a comportamento a parete portante,
- REI120 nelle condizioni peggiori applicato ad un solo lato → spessore parete almeno pari a 16cm e copriferro > 3.5cm

Table 5.4: Minimum dimensions and axis distances for load-bearing reinforced concrete walls

Standard fire resistance	Minimum dimensions (mm) Wall thickness/axis distance for			
	μ_{fi} = 0,35		μ_{fi} = 0,7	
	wall exposed on one side	wall exposed on two sides	wall exposed on one side	wall exposed on two sides
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60

* Normally the cover required by EN 1992-1-1 will control.

Note: For the definition of μ_{fi} see 5.3.2 (3).

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco)

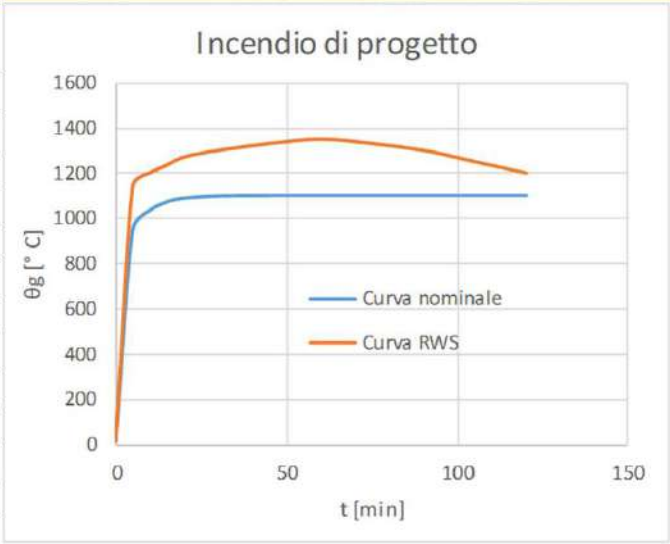
NTC 2018 – par 3.6.1.5.1→ curva nominale degli idrocarburi (1100°)

Per le verifica al fuoco di una galleria, si deve però considera anche la **curva di incendio RWS** definita nella **UNI 11076 "Modalità di prova per la valutazione del comportamento di protettivi applicati a soffitti di opere sotterranee in condizioni di incendio"**

Curva di incendio da idrocarburi di un serbatoio di 45000 litri di petrolio all'interno di una galleria.

*Rapido incremento delle temperature fino ai **1200°C a 10 minuti**, un massimo di **1350 °C a 60 minuti** e un ritorno a **1200°C a 120 minuti***

	Curva nominale	Curva RWS
t [min]	θ_g [° C]	θ_g [° C]
0	20	20
5	948	1140
10	1034	1200
15	1071	1235
20	1088	1270
30	1098	1300
45	1100	1330
60	1100	1350
75	1100	1330
90	1100	1300
105	1100	1250
120	1100	1200



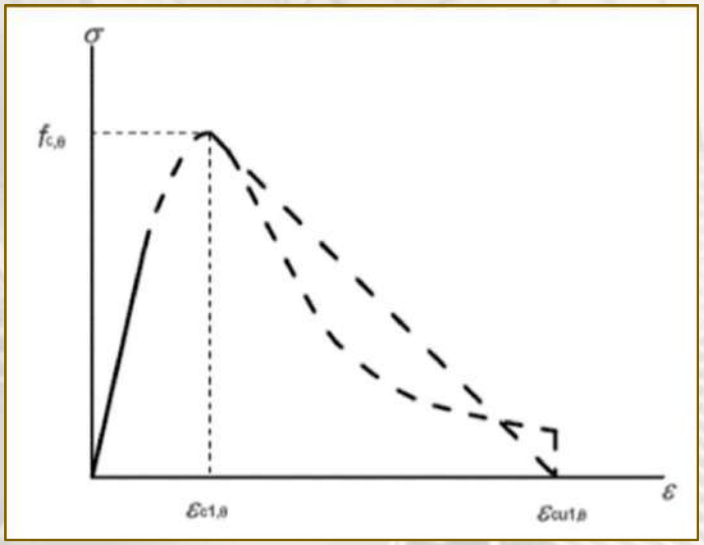
Considerando che la curva RWS raggiunge temperature più elevate, per la verifica si considererà solo quest'ultima, controllando quindi che i rivestimenti definitivi siano REI120

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco)

SPECIFICHE DELL'ANALISI ACCOPPIATA (TERMICA + MECCANICA) IN FLAC

- Analisi termo-meccanica → parte dalle condizioni tenso-deformative ottenute al termine dell'analisi "a freddo" (t=0)
- Accoppiamento termo-meccanico è governato dalla dipendenza dalla temperatura nel calcestruzzo di:
  - densità del calcestruzzo
  - modulo elastico
  - Coesione
  - resistenza a trazione
  - coefficiente di espansione termica α
  - variazione della conduttività termica
  - calore specifico del calcestruzzo in funzione della temperatura.

Salvataggio" completo dello stato del modello a 10min, 60min e 120min per la curva RWS



Legame tensioni-deformazioni del calcestruzzo ad elevate temperature

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Parametri CLS (T°) R_{ck}=45MPa*

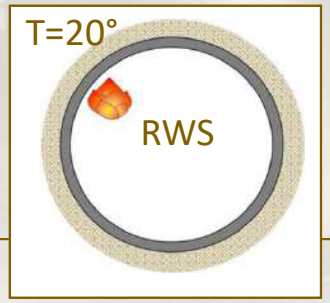
CLS → rottura alla Tresca

- angolo di attrito nullo
- coesione pari a metà della resistenza ultima CLS ad una data temperatura.
- i parametri meccanici, una volta decaduti, non si ristabilisco

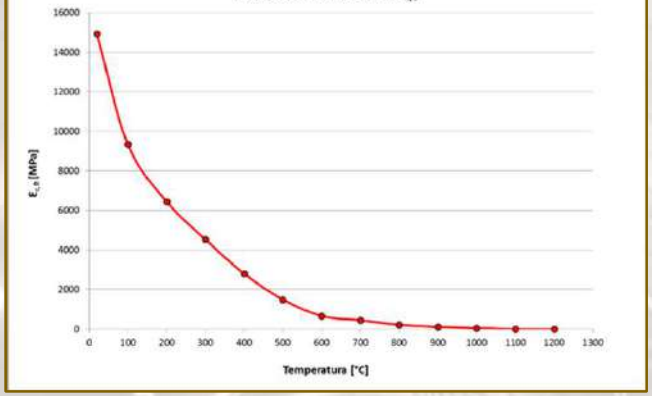
legame sforzi deformazioni → andamento lineare

- modulo elastico secante del calcestruzzo E_c. grandezza variabile nel tempo e nello spazio (lungo la sezione in direzione radiale) a causa dell'evoluzione della temperatura nel rivestimento stesso.

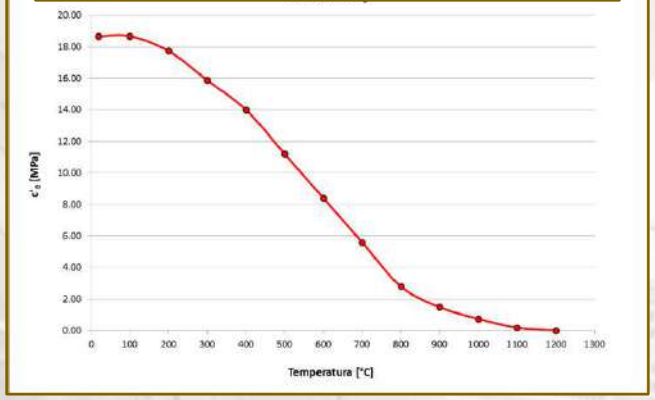
Modellazione dell'azione termica



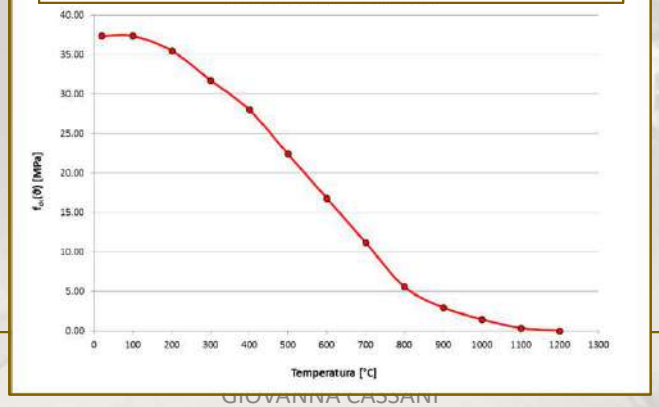
Modulo elastico secante R_{ck}=45MPa



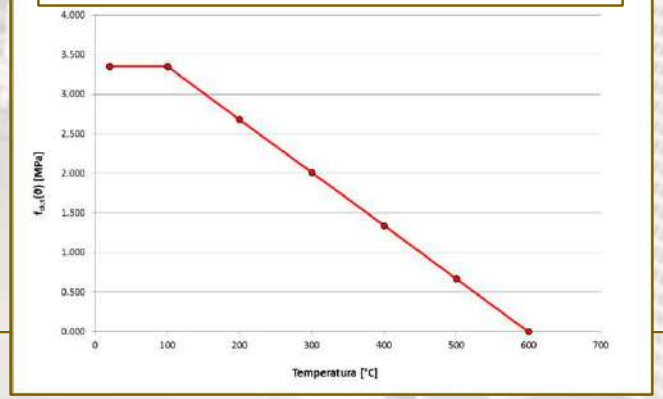
Coesione R_{ck}=45MPa



Resistenza a compressione R_{ck}=45MPa



Resistenza a trazione R_{ck}=45MPa



1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Parametri Acciaio (T°)*

Variazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio in funzione della temperatura:

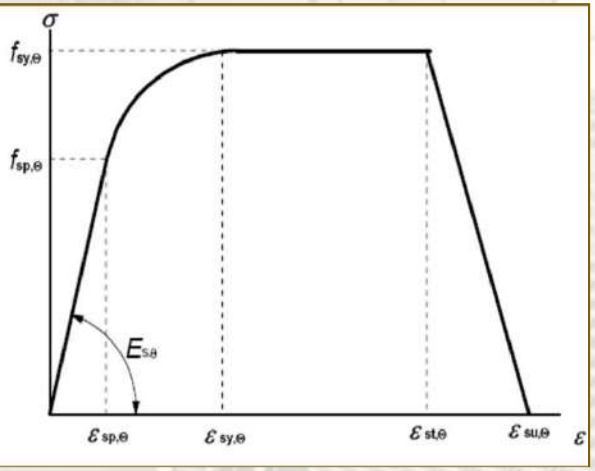
- tipo di acciaio
- tipo di lavorazione.

EN 1992-1-2 → paragrafo 3.2.3 → acciaio N laminato a caldo

Steel Temperature θ [°C]	$f_{sy,\theta}/f_{yk}$ hot rolled	$f_{sy,\theta}/f_{yk}$ cold worked	$f_{sp,\theta}/f_{yk}$ hot rolled	$f_{sp,\theta}/f_{yk}$ cold worked	$E_{s,\theta}/E_s$ hot rolled	$E_{s,\theta}/E_s$ cold worked
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Caratteristiche dell'acciaio in funzione della temperatura

Range	Stress $\sigma(\theta)$	Tangent modulus
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \le \varepsilon \le \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a\left[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2\right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \le \varepsilon \le \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} \le \varepsilon \le \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta}\,[1-(\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta})/(\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	-
Parameter *)	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ Class A reinforcement: $\varepsilon_{st,\theta} = 0,05$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Functions	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c\,(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})\,E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	



Legame tensioni-deformazioni nell'acciaio

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Proprietà termiche*

Governano la propagazione del calore all'interno della sezione

- presenza delle armature ordinarie → trascurata
- CLS con aggregati silicei → conducibilità termica, calore specifico, densità, coefficiente di espansione termica

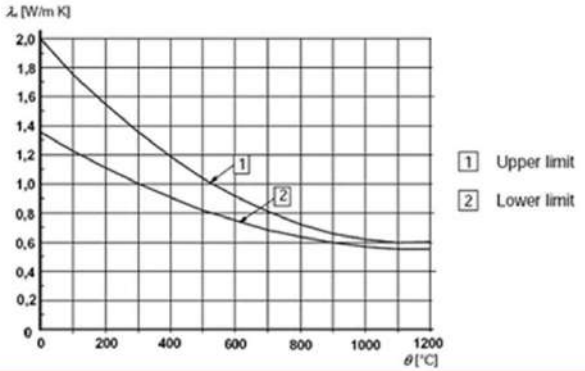
EN 1992-1-2 → paragrafo 3.3

Legge di variazione della conducibilità termica di progetto

T [°C]	0	200	400	600	800	1000	1200
λ_c [W/mK]	1.61	1.29	1.04	0.84	0.69	0.61	0.57

$$\lambda_c = 2 - 0.2451\ (\theta/100) + 0.0107\ (\theta/100)^2 \text{ W/m K} \quad \text{for } 20°C \le \theta \le 1200°C$$

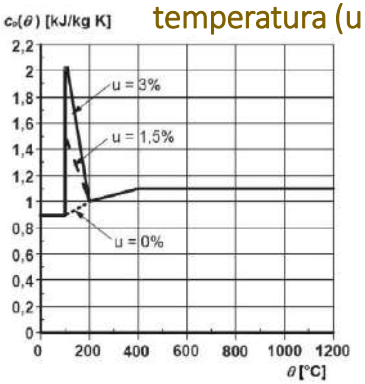
$$\lambda_c = 1.36 - 0.136\ (\theta/100) + 0.0057\ (\theta/100)^2 \text{ W/m K} \quad \text{for } 20°C \le \theta \le 1200°C$$



Calore specifico di progetto

T [°C]	20	100	101	115	200	300	120
c_p [J/kg K]	900	900	901	915	1000	1050	1100

Calore specifico del calcestruzzo, con additivo siliceo cp(θ) in funzione della temperatura (umidità u = 0 Gew.-% viene applicata)



$c_p(\theta) = 900$ (J/kg K) — $20°C \le \theta \le 100°C$

$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100)$ (J/kg K) — for $100°C < \theta \le 200°C$

$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2$ (J/kg K) — for $200°C < \theta \le 400°C$

$c_p(\theta) = 1100$ (J/kg K) — for $400°C < \theta \le 1200°C$

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Proprietà termiche*

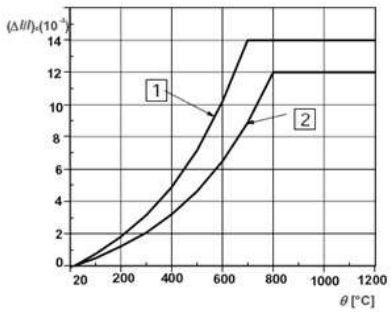
Legge di variazione della densità secondo normativa

$\rho(\theta) = \rho(20°C)$ for $20°C \le \theta \le 115°C$
$\rho(\theta) = \rho(20°C)\cdot(1 - 0{,}02(\theta - 115)/85)$ for $115°C < \theta \le 200°C$
$\rho(\theta) = \rho(20°C)\cdot(0{,}98 - 0{,}03(\theta - 200)/200)$ for $200°C < \theta \le 400°C$
$\rho(\theta) = \rho(20°C)\cdot(0{,}95 - 0{,}07(\theta - 400)/800)$ for $400°C < \theta \le 1200°C$

COEFFICIENTE DI ESPANSIONE TERMICA

Legge di variazione della deformazione termica secondo normativa

Siliceous aggregates:
$\varepsilon_c(\theta) = -1{,}8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6}\theta + 2{,}3 \times 10^{-11}\theta^3$ for $20°C \le \theta \le 700°C$
$\varepsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3}$ for $700°C < \theta \le 1200°C$



Curve 1: Siliceous aggregate
Curve 2: Calcareous aggregate

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l}\cdot\frac{1}{\Delta T} = \frac{\varepsilon c(T)}{\Delta T}$$

Valori della deformazione termica e del coefficiente alfa per calcestruzzi silicei

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
ε_c	7.43E-04	1.80E-03	3.14E-03	4.89E-03	7.20E-03	1.02E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02
α [1/°C]	9.29E-06	1.00E-05	1.12E-05	1.29E-05	1.50E-05	1.76E-05	2.06E-05	1.79E-05	1.59E-05	1.43E-05	1.30E-05	1.19E-05

Propagazione del calore nella sezione di tipo **conduttivo**

Equazione di Fourier

$$\lambda_c \cdot \left(\frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2}\right) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t}$$

variazione spazio tempo della temperatura

T è la temperatura, t è il tempo, λ_c è la conducibilità termica, ρ è la massa volumica e c_p è il calore specifico

Condizione Spaziale

$$T(x,y,\ t=0) = T_0 = 20\ °C$$

Condizione Temporale

$$div(\lambda_c \cdot gradT)_n = h_{net}$$

Calore Netto trasmesso per convezione e irraggiamento

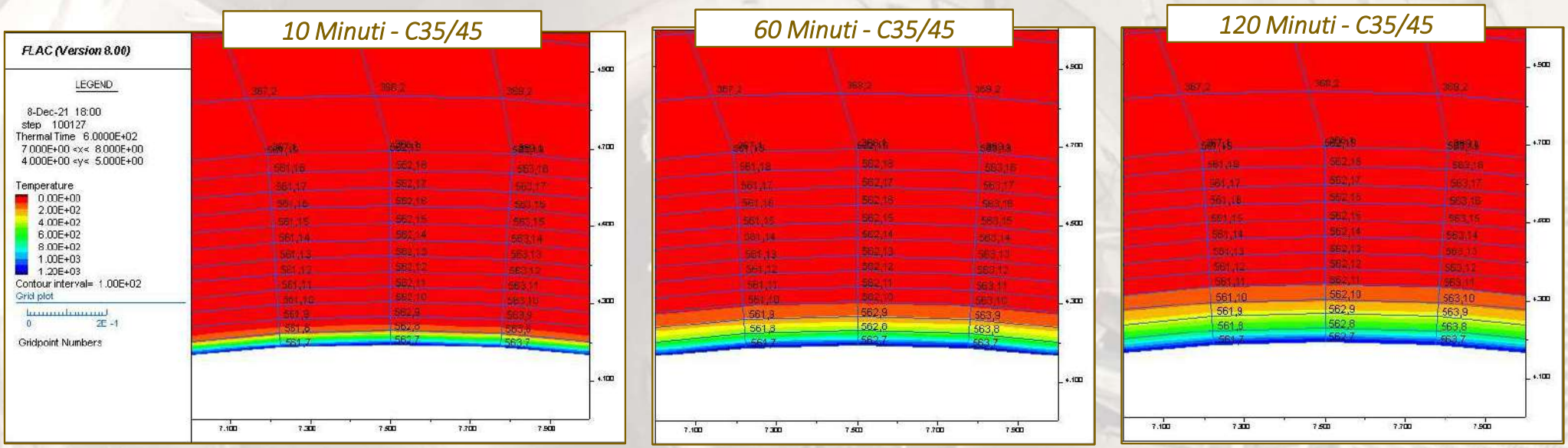
$$h_{net} = \alpha_c \cdot (T_g - T_m) + \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[(T_g + 273)^4 - (T_m + 273)^4\right]$$

α_c = 25 W/(m2°C) coeff. scambio calore per convenzione
T_m temperatura del gas; T_g temperatura superficie esposta,
Φ = 1 fattore di configurazione, ε= 0,8 coefficiente di
σ = 5,7x10^{-8} W/(m^{2}K^4) costante di Stefan-Boltzmann

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Analisi termica a caldo*

Distribuzione di temperatura Andamento della temperatura nello spessore del rivestimento della galleria

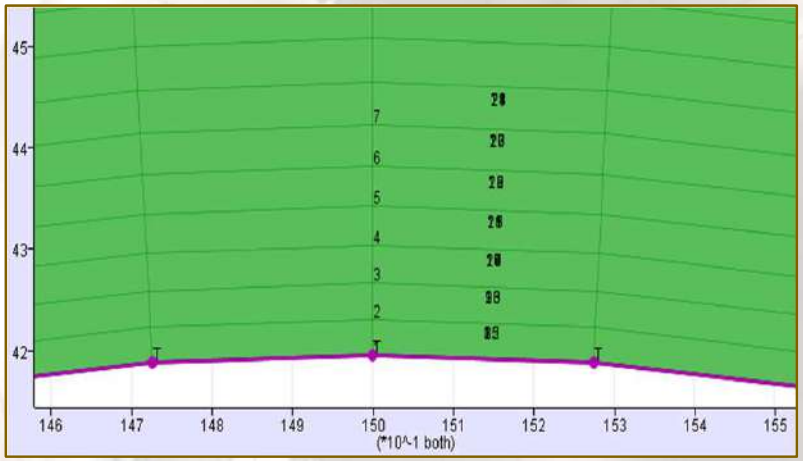
sezione di controllo in chiave calotta



all'interno della sezione la temperatura subisce una evoluzione crescente nel tempo anche superata la soglia dei 60 minuti (Tmax = 1350°C – Curva RWS)

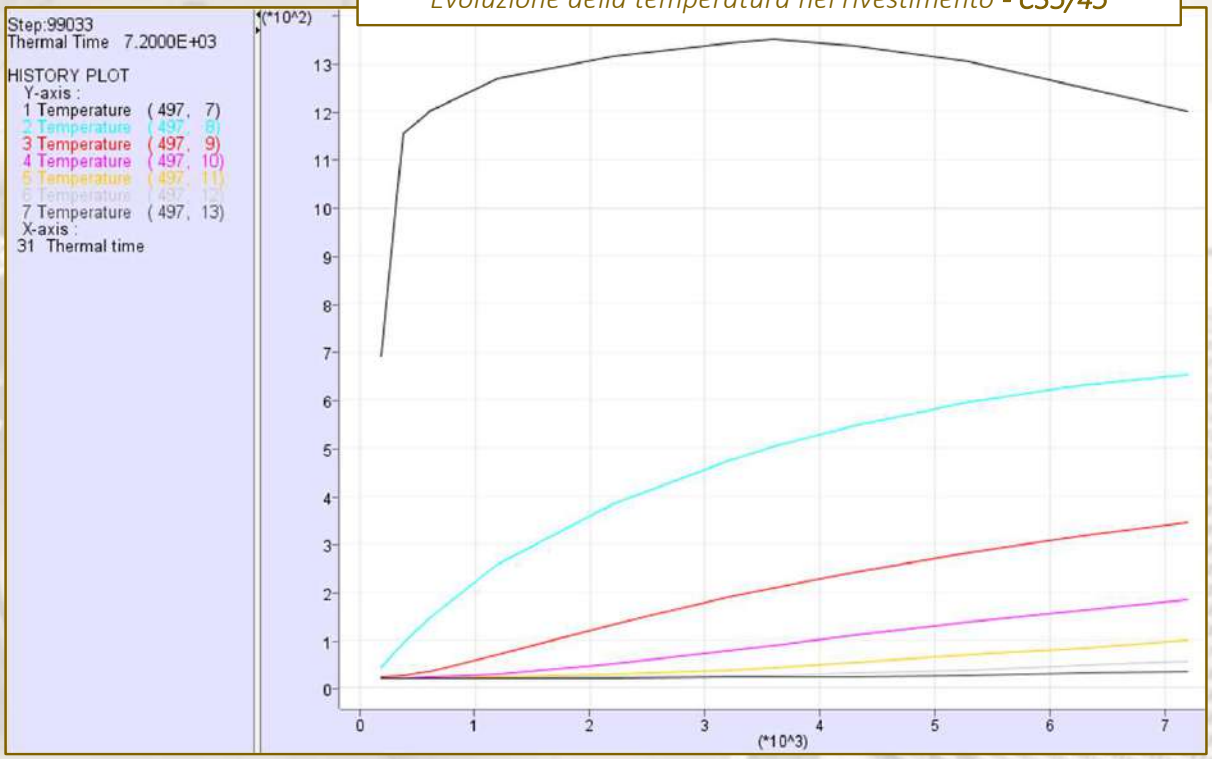
1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Analisi termica a caldo*

Distribuzione di temperatura nel rivestimento



Nodi di Controllo

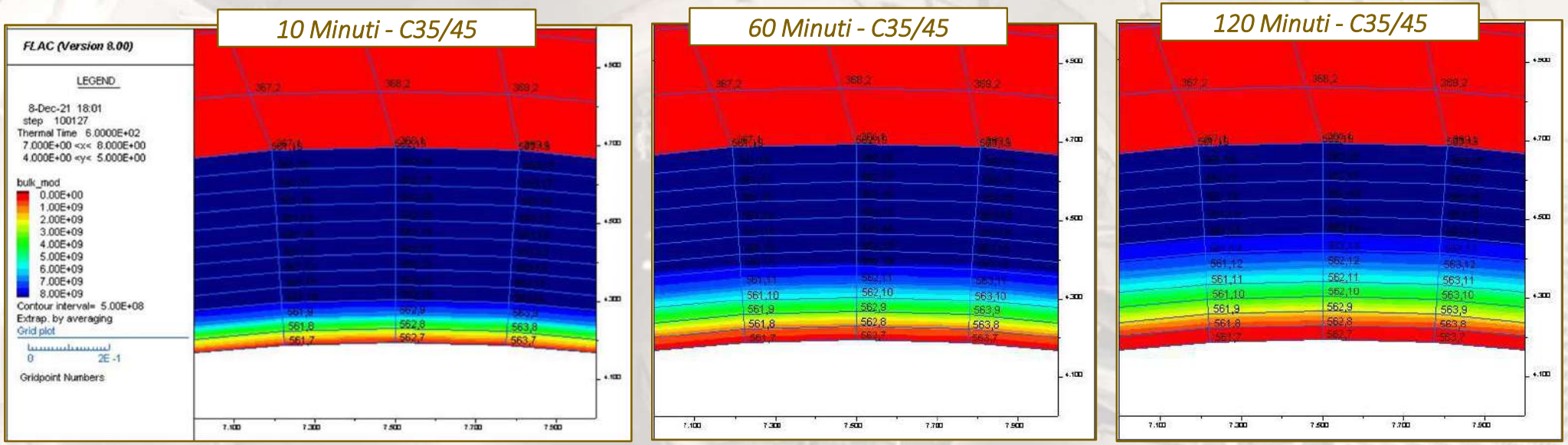
*Evoluzione della temperatura nel rivestimento - **C35/45***



1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Analisi termica a caldo*

Evoluzione del modulo elastico $K = \frac{E}{3(1-2\upsilon)}$

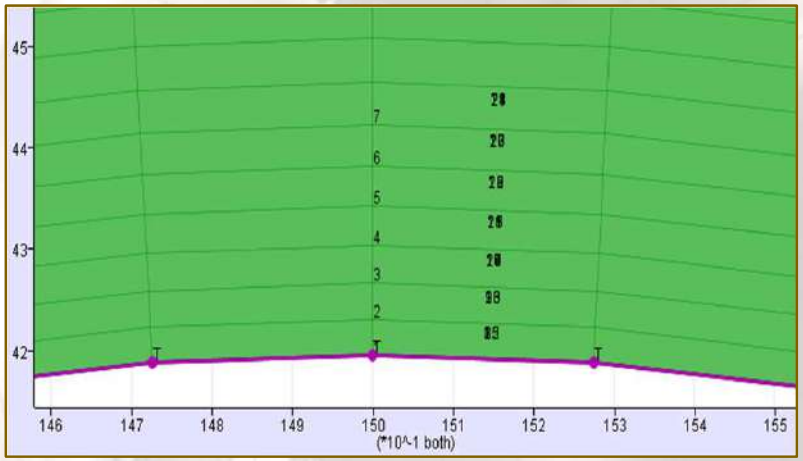
Andamento dei moduli con la temperatura
sezione di controllo in chiave calotta



Il decadimento del modulo elastico rispecchia la variazione della temperatura nella sezione nei diversi istanti temporali considerati: l'aumento della temperatura nel tempo comporta una diminuzione del modulo

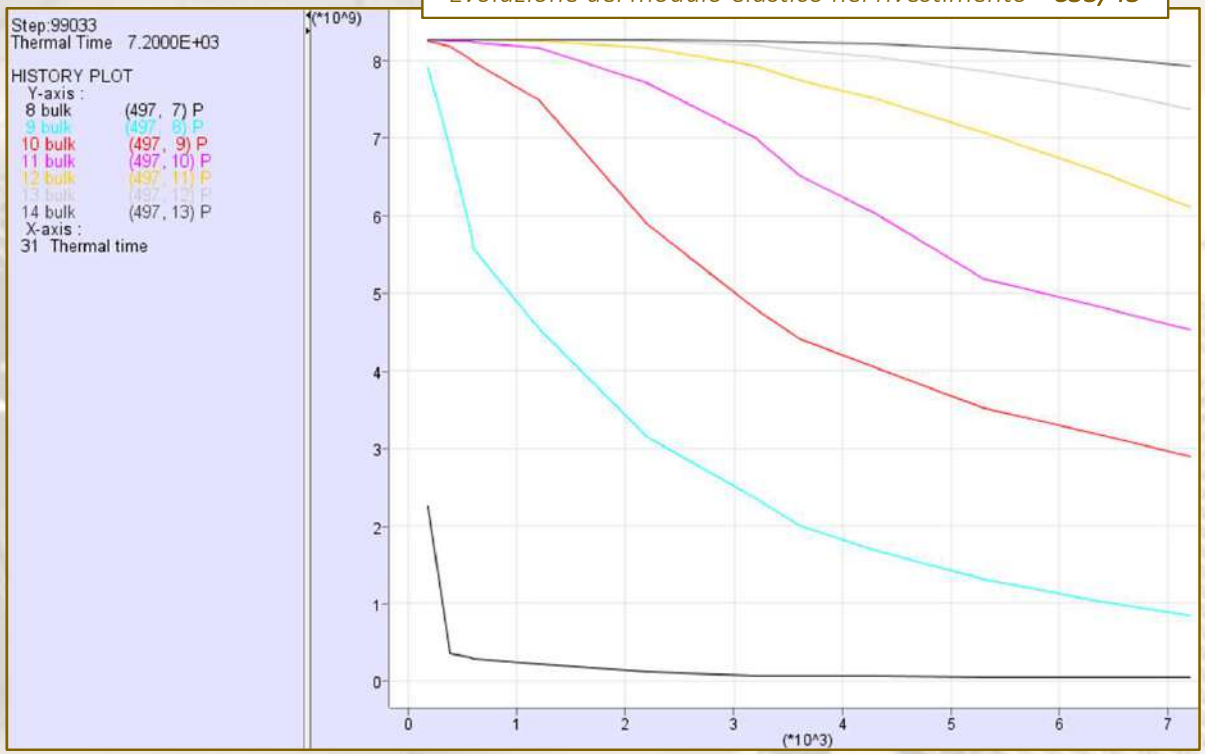
1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Analisi termica a caldo*

Evoluzione del modulo elastico nel rivestimento



Nodi di Controllo

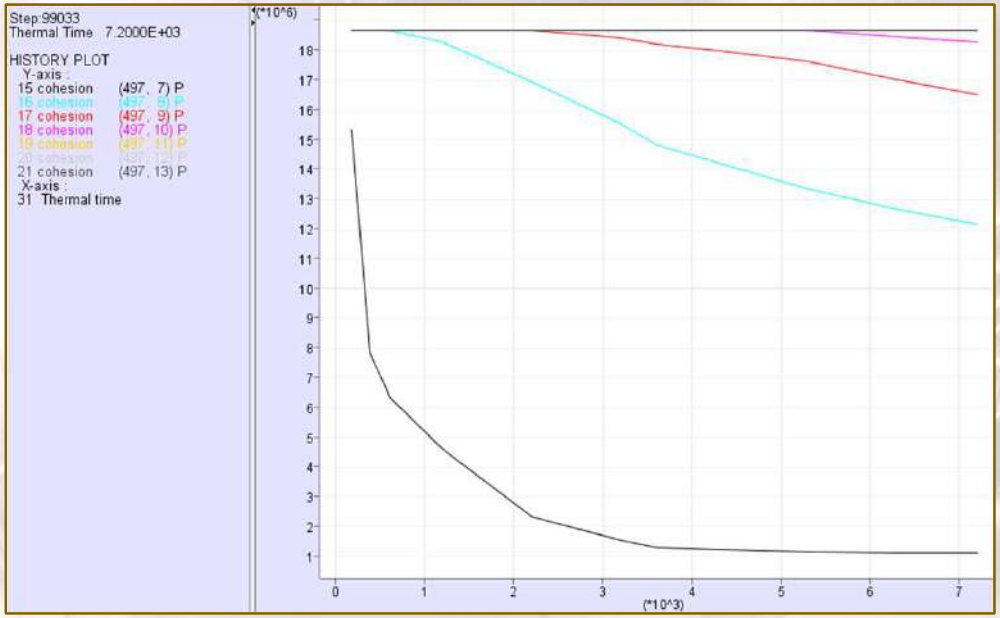
Evoluzione del modulo elastico nel rivestimento - C35/45



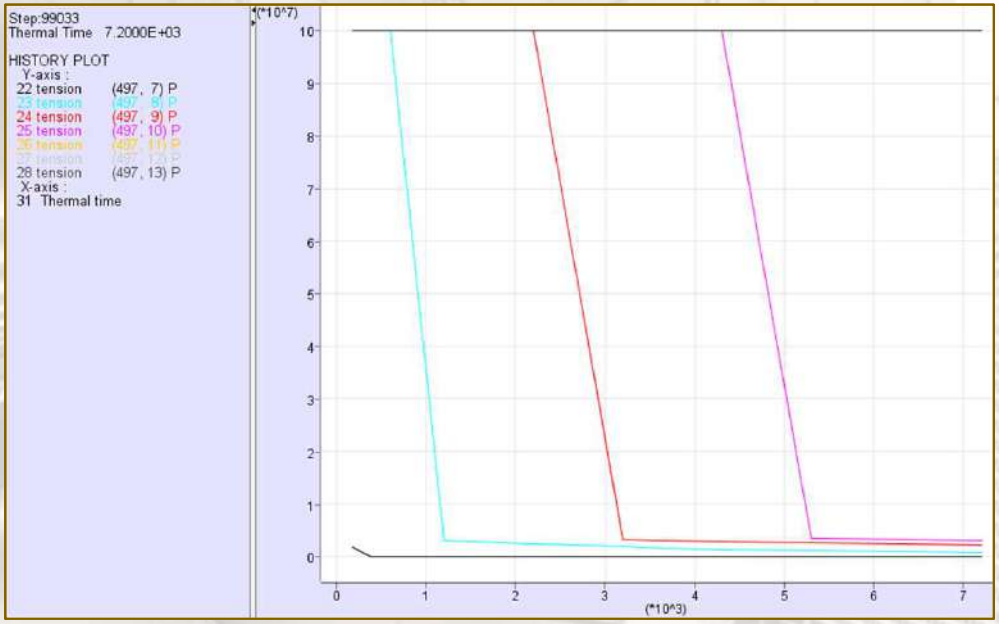
1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Analisi termica a caldo*

Evoluzione dei parametri di resistenza

Evoluzione della coesione nel CLS - ***C35/45***

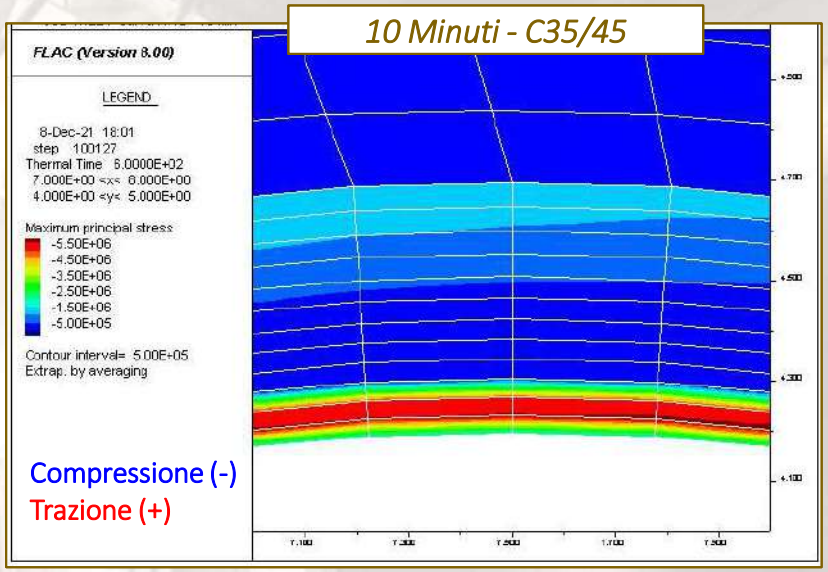


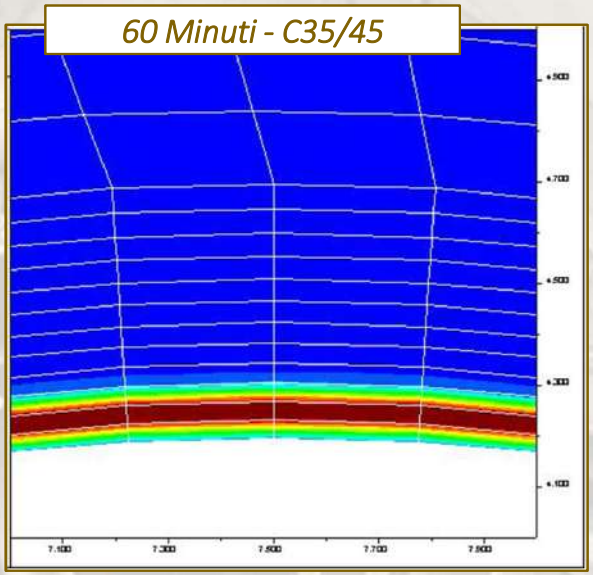
Evoluzione della resistenza a trazione nel CLS - ***C35/45***

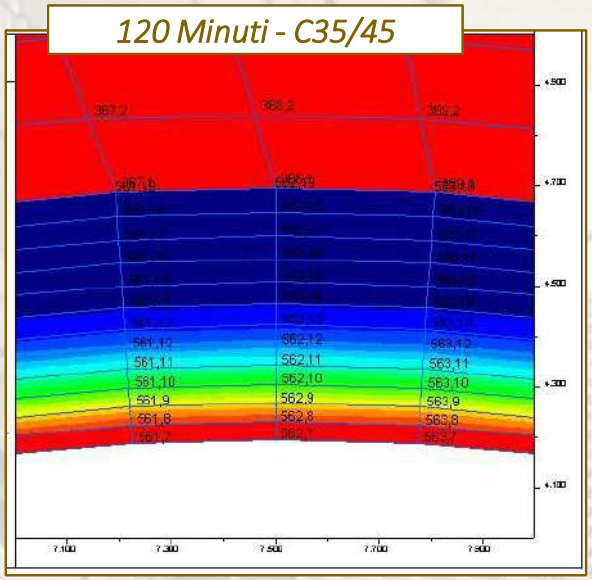


1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Analisi termica a caldo*

Stati tensionali e deformativi sostanziale variazione dello stato tensionale rispetto alle condizioni a freddo d'esercizio.







- zona di estradosso → una riduzione delle azioni di compressione espansione termica combinata alle azioni geostatiche dovute alla copertura della galleria
- Zona di intradosso → redistribuzione degli sforzi di compressione nei primi strati in intradosso, dovuti sia all'azione termica sia alla diminuzione delle caratteristiche meccaniche del materiale

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Analisi termica a caldo*

Evoluzione tensionale nell'analisi a caldo Le azioni dimensionanti per il concio verranno poi considerate nella verifica strutturale nel dominio MN a caldo, a 60min e 120min.

60 Minuti

SEZIONE di CALCOLO	ZONA					
	lato_sn		calotta		lato_dx	
	N_{sd} [kN]	M_{sd} [kNm]	N_{sd} [kN]	M_{sd} [kNm]	N_{sd} [kN]	M_{sd} [kNm]
FAEam_4 - pk 48850	-10377	483	-10443	571	-10376	501
FAEma_7 - pk 43123	-10209	514	-10054	544	-10212	494
FAEc_4 - pk 48700	-11822	470	-10430	460	-11571	517
BVNb_5 - pk 43665	-10490	532	-10342	613	-10487	526
TPC_2 - pk 47385	-10522	537	-10449	533	-10525	523
CTLa_1 - pk 56110	-10250	498	-10140	493	-10245	520
APC_3 - pk 53725	-7802	596	-7675	598	-7777	613
STF2_3 - pk 57300	-9794	573	-9797	580	-9893	572
BNA2_4 - pk 61700	-10492	501	-10364	677	-10498	494
ANZ2_1 - pk 64250	-10126	510	-10014	769	-10124	498
TFR_2 - pk 65450	-10006	544	-9847	593	-9999	523

120 Minuti

SEZIONE di CALCOLO	ZONA					
	lato_sn		calotta		lato_dx	
	N_{sd} [kN]	M_{sd} [kNm]	N_{sd} [kN]	M_{sd} [kNm]	N_{sd} [kN]	M_{sd} [kNm]
FAEam_4 - pk 48850	-10439	707	-10468	788	-10433	728
FAEma_7 - pk 43123	-10264	730	-10142	771	-10264	714
FAEc_4 - pk 48700	-12766	598	-11511	625	-12518	641
BVNb_5 - pk 43665	-10529	737	-10409	816	-10528	731
TPC_2 - pk 47385	-10562	743	-10508	752	-10568	734
CTLa_1 - pk 56110	-10287	721	-10192	734	-10283	749
APC_3 - pk 53725	-7722	822	-7732	842	-7847	857
STF2_3 - pk 57300	-9884	797	-9854	802	-9965	802
BNA2_4 - pk 61700	-10534	708	-10405	857	-10539	703
ANZ2_1 - pk 64250	-10177	723	-10055	941	-10183	711
TFR_2 - pk 65450	-10053	759	-9926	813	-10049	743

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Verifiche a caldo*

- Analisi sezionale in condizioni di incendio → condizione eccezionale
- Azioni non amplificate
- S.L.U. > 1
- Coefficienti di sicurezza materiali = 1
- analizzare l'effetto di una curva d'incendio agente sui lati di una generica sezione in c.a.
- La diffusione del calore nella sezione → analisi non lineare agli elementi finiti considerando i fenomeni di conduzione, convenzione ed irraggiamento

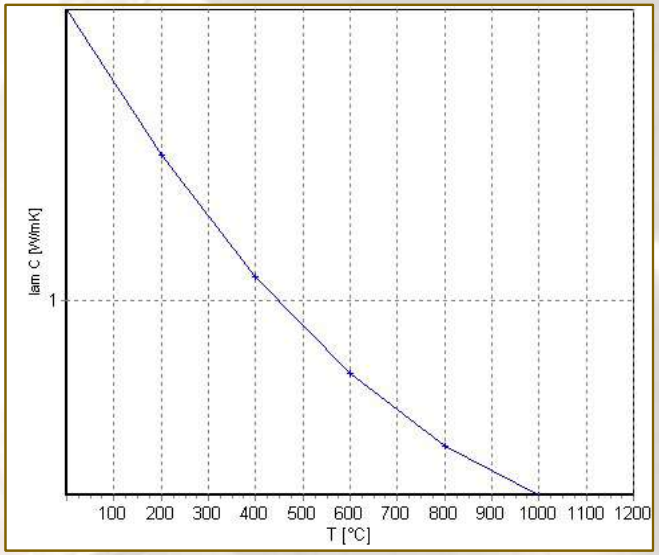
I FASE: distribuzione del calore per differenti step temporali definiti dall'utente.

II FASE: resistenza della sezione nei vari intervalli di tempo considerando la riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali.

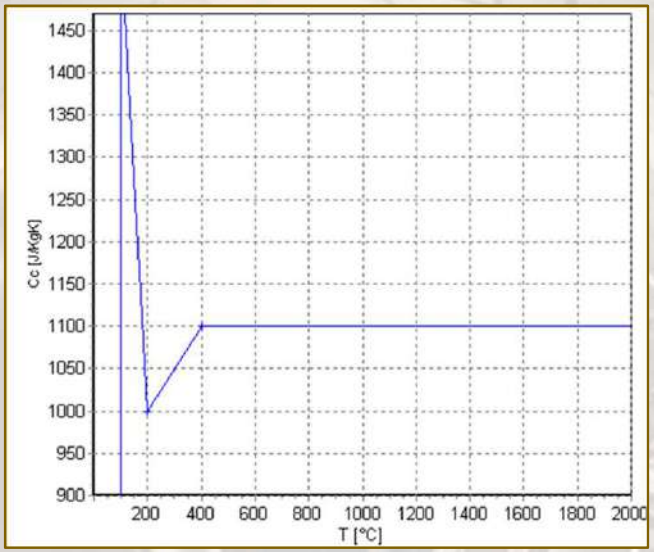
Calcola riduzione del dominio di resistenza M-N

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Verifiche a caldo*

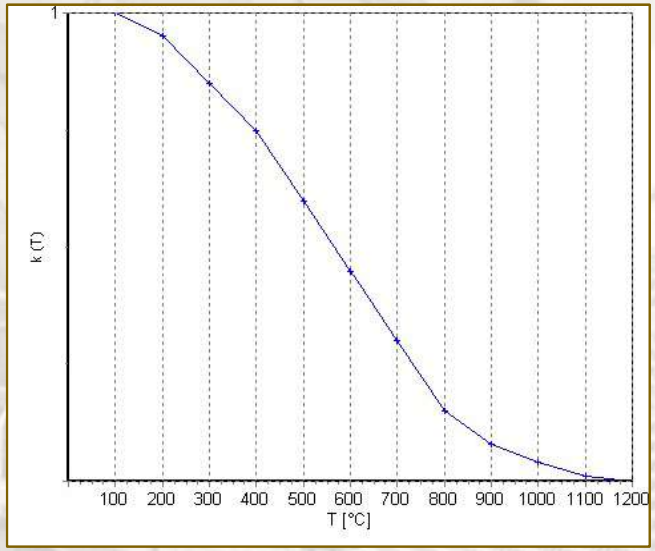
Caratteristiche termiche dei materiali



Conduttività termica del calcestruzzo
EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7



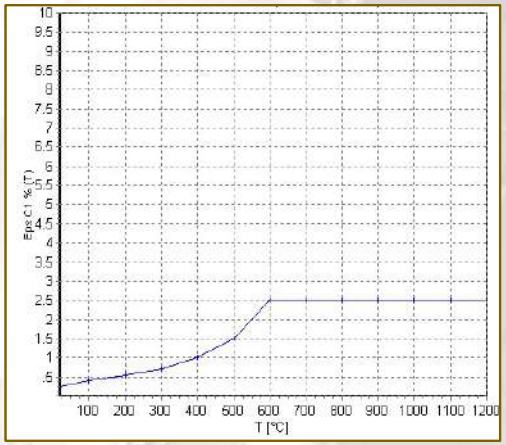
Calore specifico per il calcestruzzo
EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a



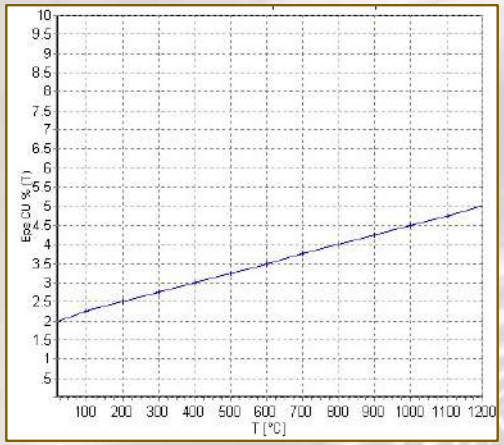
Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{ck} per il calcestruzzo
EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Verifiche a caldo*

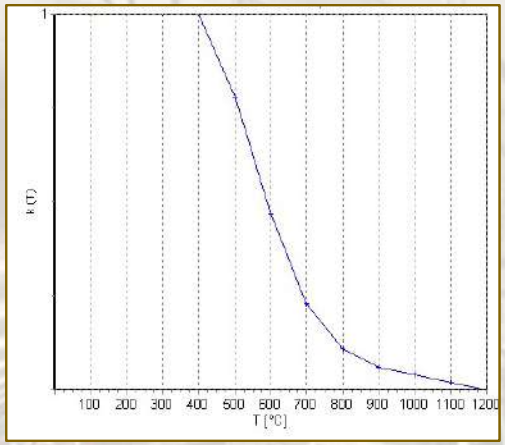
Caratteristiche termiche dei materiali



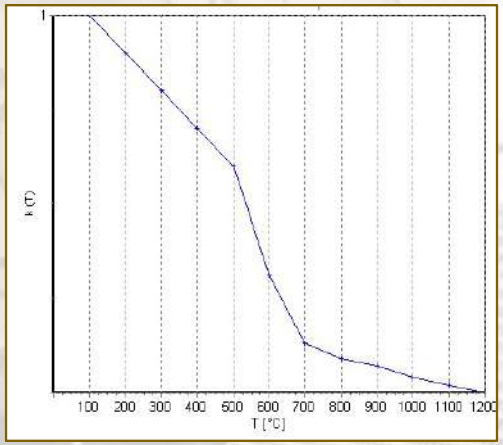
Fattore di riduzione del valore di ε_{c1} per il calcestruzzo
EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1



Fattore di riduzione del valore di ε_{cu} per il calcestruzzo
EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1



Fattore di riduzione del valore di resistenza f_{yk} per le barre d'armatura
EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a



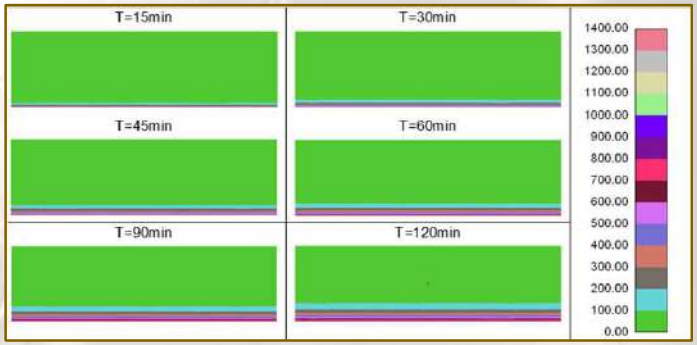
Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d'armatura
EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a

1. Definizione dei Carichi - d) Carichi eccezionali (fuoco): *Verifiche a caldo*

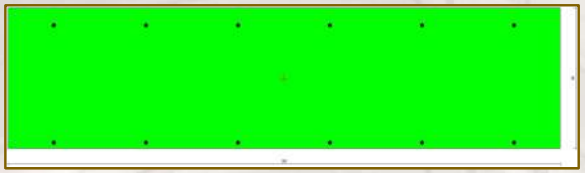
CARICO D'INCENDIO

SLU
Eccezionale

- ✓ Azioni ricavate dalle modellazioni numeriche non amplificate
- ✓ Coefficienti di dei materiali = 1
- ✓ S.L.U. > 1



Distribuzione della temperatura all'interno della sezione di calcolo Concio da 50cm



Sezione di calcolo – Concio da 50cm di spessore

Mesh di calcolo: 150 elementi triangolari a 6 nodi

CONDIZIONI AL CONTORNO:

- Lato inferiore: scambio, convenzione e irraggiamento considerando agente la curva d'incendio
- Lato destro: Nessun flusso di calore
- Lato sinistro: Nessun flusso di calore
- Lato superiore: Scambio termico considerando un ambiente di contatto a temperatura uniforme pari a 20°.

60 Minuti

SEZIONE di CALCOLO	N_{ed}	M_{ed}	M_{rd}	ε_{cls}	ε_{acc}	FS
ANZ2_1 - pk 64250	-10014	769	-1530.65	0.007454	-0.008078	1.99

120 Minuti

SEZIONE di CALCOLO	N_{ed}	M_{ed}	M_{rd}	ε_{cls}	ε_{acc}	FS
ANZ2_1 - pk 64250	-10055	941	-1389.45	0.009379	-0.008871	1.48

2. Stato limite di esercizio e stato limite ultimo

PARAMETRI DI PROGETTO DEI CARICHI

FASE DI VERIFICA		Coefficiente dinamico $W_{dyn} = (\alpha_d - 1) \cdot W_{static}$ $W_{tot} = W_{dyn} + W_{static}$	Eccentricità e (m)	Coefficiente parziale SLE $N_{Ed} = \gamma_F \times N$ $M_{Ed} = \gamma_F \times M$	Coefficiente parziale SLU $N_{Ed} = \gamma_F \times N$ $M_{Ed} = \gamma_F \times M$	
					G carichi permanenti[1]	Q carichi variabili[1]
Scassero		1,10	-	1,00[2]	1,30	-
Prima Movimentazione		1,10	-	1,00[2]	1,30	-
Stoccaggio stabilimento	Operativa	1,10	-	1,00[2]	1,30	-
	Accidentale		0,1	1,00[2]	1,30	-
Trasporto in cantiere		2,00 gomma 1,50 rotaia	0,1	1,00[2]	1,30	-
Stoccaggio cantiere	Operativa	1,50	-	1,00[2]	1,30	-
	Accidentale		0,1	1,00[2]	1,30	-
Movimentazione con erettore TBM		1,60	-	1,00[2]	1,30	-
Spinta dei martinetti	Ordinaria	-	0,01	1,00[2]	1,30	-
	Eccezionale			-	1,00	-
Fase operativa		-	-	1,00[3]	1,30	1,50

PARAMETRI DI PROGETTO DEI MATERIALI

FASE DI VERIFICA		CALCESTRUZZO			
		Maturazione del materiale	Coefficiente parziali sul materiale: Compressione[1] $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck,0,05} / \gamma$		Resistenza a trazione flessionale[2] $\sigma_t = f_{ctm,i} / \gamma$
			α_{cc}	γ	
Scassero		5-7 ore 7-10 ore	1,00	1,50	1,20
Prima Movimentazione		5-7 ore 7-10 ore	1,00	1,50	1,20
Stoccaggio stabilimento	Operativa	5-7 ore 7-10 ore	1,00	1,50	1,20
	Accidentale			1,50	
Trasporto in cantiere		28 gg	1,00	1,50	1,20
Stoccaggio cantiere	Operativa	28 gg	1,00	1,50	1,20
	Accidentale			1,50	
Movimentazione con erettore TBM		28 gg	1,00	1,50	1,20
Spinta dei martinetti	Operativa	28 gg	1,00	1,50	1,20
	Eccezionale			1,20	
Fase operativa		28 gg	0,85	1,50	1,20

CARICHI TRANSITORI

CARICHI PERMANENTI

CARICHI SISMICI
SLV

CARICHI ECCEZIONALI (FUOCO)
SLU
Eccezionale

3. Comportamento globale - Anello di Rivestimento

Determinazione delle sollecitazioni

analisi 2D condizione assialsimmetrica

Permette di definire forze e spostamenti al contorno dello scavo

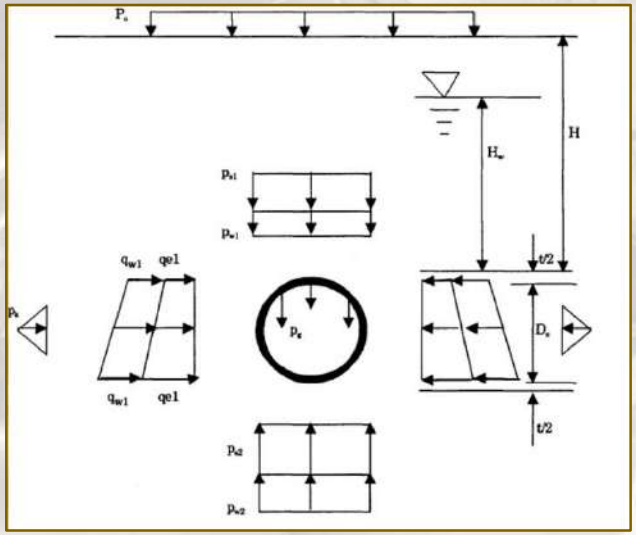
SPINTA TBM

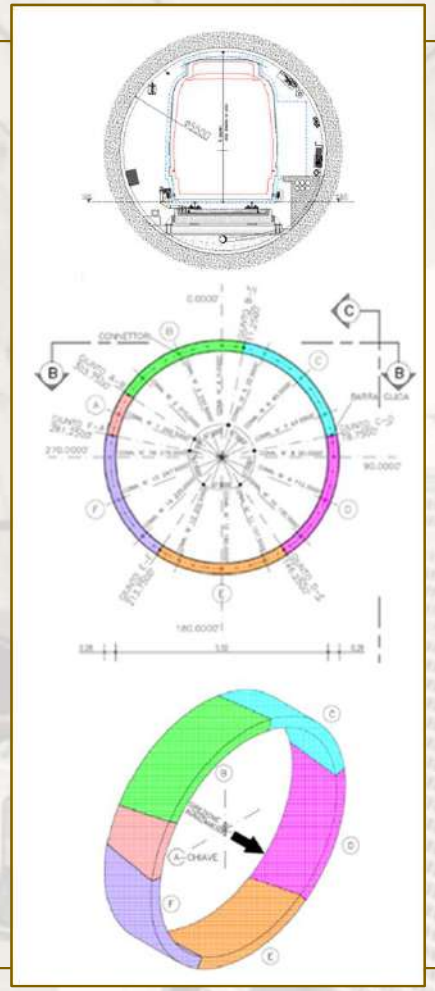
DIMENSIONAMENTO E VERIFICA RIVESTIMENTI

Anello di conci → struttura labile

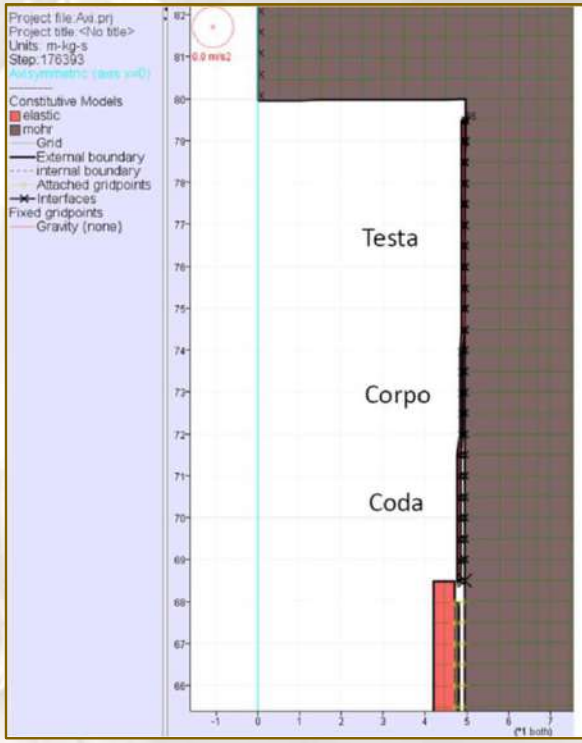
unioni tra i conci

Struttura iperstatica



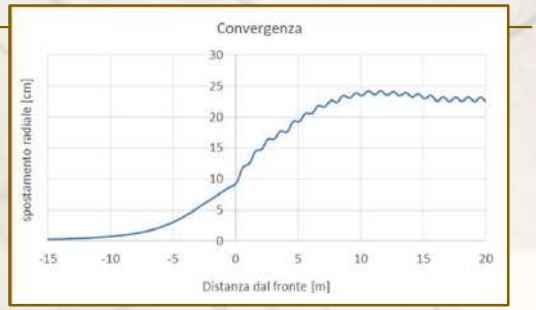


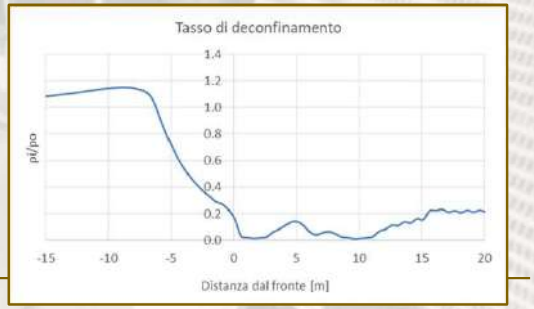
3. Comportamento globale - Anello di Rivestimento



Scavo			
R_{nom} [m]	4.91		
ϕ_{nom} [m]	9.82		
Scudo (L_{tot} =11.5m)			
Testa			
R [m]	**4.89**	*0.02*	*0.02*
ϕ [m]	9.78	*gap parte precedente*	*gap tot*
L [m]	5.5		
Corpo			
R [m]	**4.865**	*0.025*	*0.045*
ϕ [m]	9.73	*gap parte precedente*	*gap tot*
L [m]	2.5		
Coda			
R [m]	**4.84**	*0.025*	*0.07*
ϕ [m]	9.68	*gap parte precedente*	*gap tot*
L [m]	3.5		
Anello			
R_{ext} [m]	**4.7**	*0.14*	*0.21*
ϕ_{ext} [m]	9.4	*gap parte precedente*	*gap tot*
Sp [m]	0.5		
R_{int} [m]	**4.2**		
ϕ_{int} [m]	8.4		

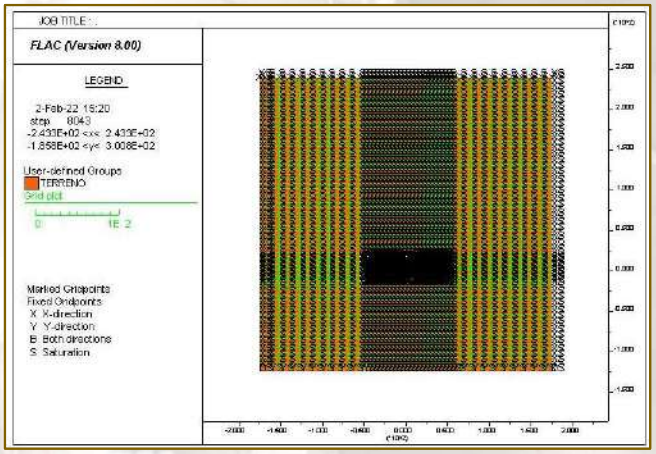
Fase	Descrizione
0	Creazione della geometria del modello
1	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni elastiche
2	Inizializzazione dello stato tensionale geostatico in condizioni plastiche (modello costitutivo di M-C)
3	Scavo iniziale corrispondente allo scudo TBM, posto a 15m dalla base del modello
4	Simulazione dello scavo in tensioni efficaci per sfondi limitati di 1m (con eventuale sovrascavo), avanzamento scudo metallico, applicazione della pressione al fronte (se presente) e installazione del rivestimento definitivo e della miscela bicomponente
5	Scavo per una lunghezza totale finale di 80m (inclusi i primi 15m), superando il centro della mesh; si valutano le pressioni sullo scudo e il profilo di convergenza.



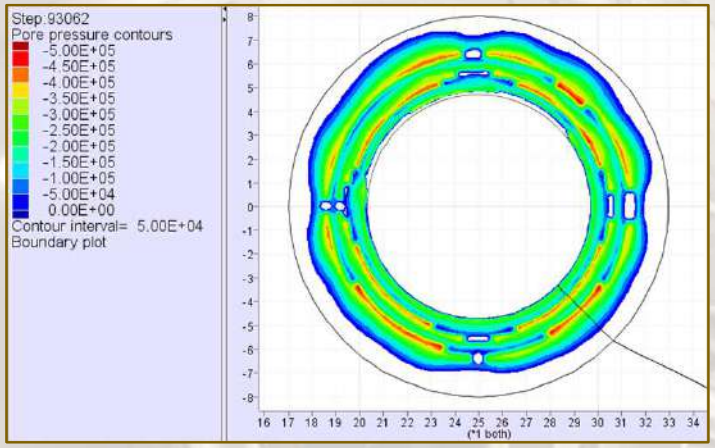


3. Comportamento globale - Anello di Rivestimento

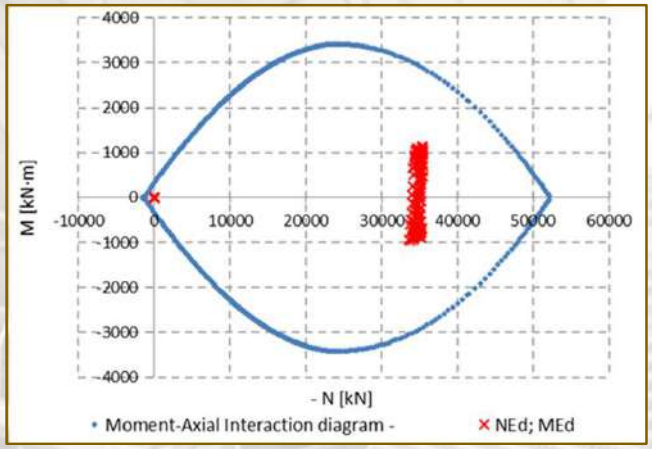
Determinazione delle sollecitazioni globali.



Mesh di calcolo



Analisi 2D



Verifica grafica a pressoflessione allo SLU

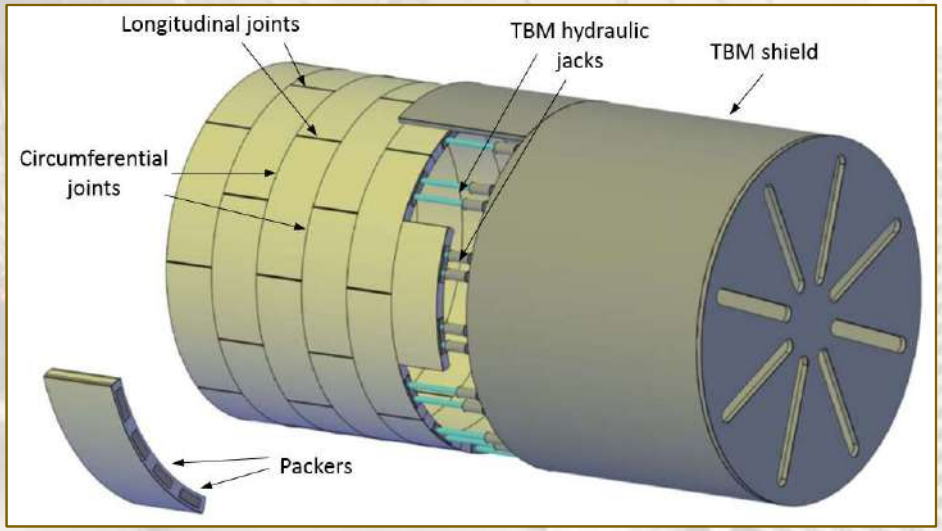
4. Comportamento locale - Concio

Verifiche locali per introduzione di forze concentrate su superfici di contatto

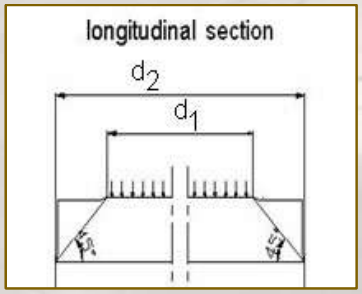
FASE DI SPINTA (già trattata nei carichi)

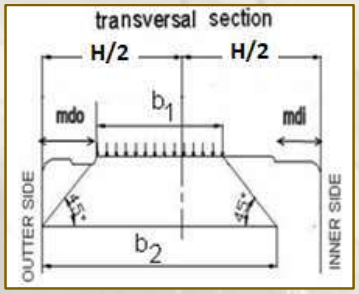
VERIFICHE DEI GIUNTI

- verifiche per pressione di contatto (verifica tensione sul cls) *Formulazioni di Eurocodice per le forze di contatto – cono di diffusione*
- verifiche di trazioni indotte (dimensionamento dell'armatura di frettaggio). *Abachi del Leonhardt per la definizione delle trazioni indotte - dettagli di posizionamento armature*

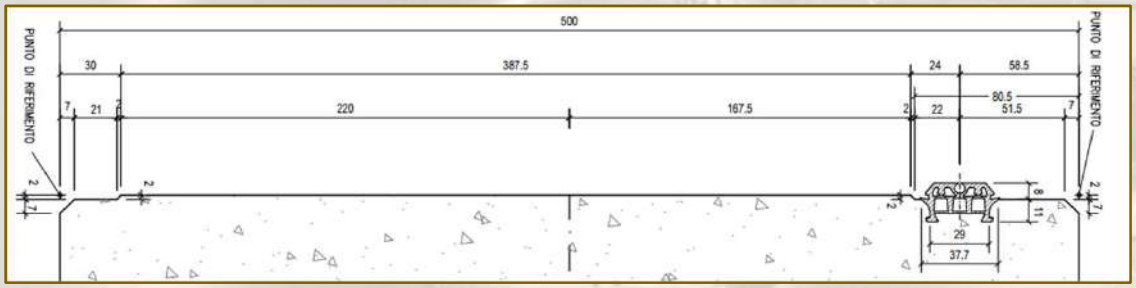


4. Comportamento locale - Concio: *Verifiche dei giunti*





Schema di riferimento per il calcolo delle pressioni di contatto



Geometria del giunto radiale

4. Comportamento locale - Concio: *Verifiche dei giunti*

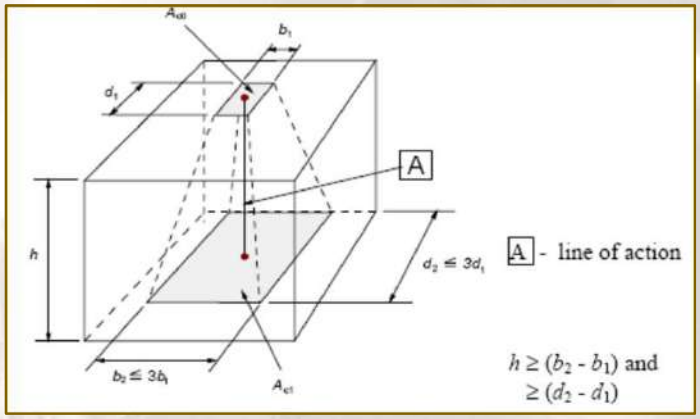
Pressione di contatto La **verifica SLU**, condotta in base al punto 5.4.8.1 dell'Eurocodice 2, è soddisfatta se $N_d < F_{rdu} \leq F_{max}$

dove $F_{rd} = A_{c0} * f_{cd} * (A_{c1}/A_{c0})^{0.5}$

$A_{c0} = b_1 * d_1$

$A_{c1} = b_2 * d_2$

$F_{max} = 3.0 * f_{cd} * A_{c0}$



Diffusione del carico per aree parzialmente caricate

Eurocodice 2 – par 6.7, figure 6.29

d_1 = larghezza della superficie di contatto;

d_2 = larghezza del concio;

b_1 = altezza effettiva della superficie di contatto;

b_2 = parametro geometrico che dipende dal livello di eccentricità dell'azione assiale;

la verifica tiene conto di un angolo di diffusione della pressione nel calcestruzzo pari a 45°.

In particolare risulta:

- M>0 (compr. all'intradosso) → $b_2 = b_1 + 2*mdi$ (ecc. sia ≤H/6 or >H/6, essendo mdi<mdo);
- M<0 (compr. all'estradosso) → ecc.≤ H/6 → $b_2 = b_1 + 2*mdi$;
  ecc.> H/6 → $mdi+H-b_1>mdo$ → $b_2 = b_1 + 2*mdo$;
  → $mdi+H-b_1<mdo$ → $b_2 = b_1 + 2*(mdi+H-b_1)$.

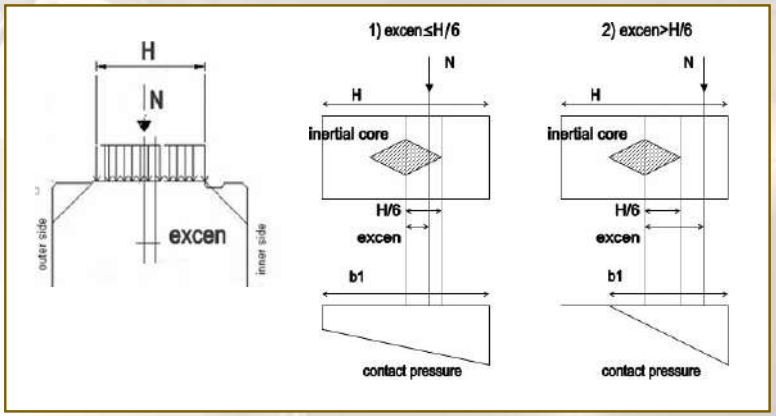
A_{c0} = area caricata = $b_1 * d_1$;

A_{c1} = area massima di distribuzione del carico = $b_2 * d_2$;

F_{rdu} = forza concentrate resistente = $A_{c0} \times f_{cd} \times (Ac_1/A_{c0})^{0.5}$;

F_{max} = massima forza resistente = $3.0 \times f_{cd} \times A_{c0}$.

4. Comportamento locale - Concio: *Verifiche dei giunti*



Eccentricità dell'azione assiale (a sinistra) e altezza di contatto effettiva (a destra)

N = azione assiale agente su un singolo concio;

M = momento flettente agente su un singolo concio;

M_{joint} = momento flettente agente sul giunto, preso pari a quello agente sul concio, cautelativamente non ridotto;

N_d = 1.3 * N = azione assiale allo SLU;

excen = eccentricità dell'azione assiale dovuta alla tolleranza costruttiva sul montaggio dei conci; si ipotizza un disassamento conci che porta ad incrementare l'eccentricità M_{joint}/N di 5mm (la presenza dei bulloni e della barra guida tra conci dello stesso anello limita il disallineamento delle facce).

H = altezza della superficie di contatto massima;

H/6 = 1/6 dell'altezza della superficie di contatto massima;

b_1 = altezza effectiva della superficie di contatto, dipendente dall'eccentricità:

- eccentricità ≤ H/6 → b_1 = altezza della superficie di contatto pari alla massima; in questo caso l'azione assiale cade nel nocciolo centrale di inerzia dell'area di contatto e tutta l'area è compressa (caso 1);
- eccentricità > H/6 → b_1 = 3(H/2-eccentricità) = riduzione dell'altezza della superficie di contatto; in questo caso l'azione assiale cade al di fuori del nocciolo centrale di inerzia dell'area di contatto e solo parte dell'area viene compressa (caso 2).

4. Comportamento locale - Concio: *Verifiche dei giunti*

Trazioni indotte Il carico concentrato determina inoltre una forza di divaricamento sul concio in direzione radiale che può essere stimata secondo la **formula** proposta da **Leonhardt**: $F_t = 0.3 \times (N_d) \times (1-a/d)$

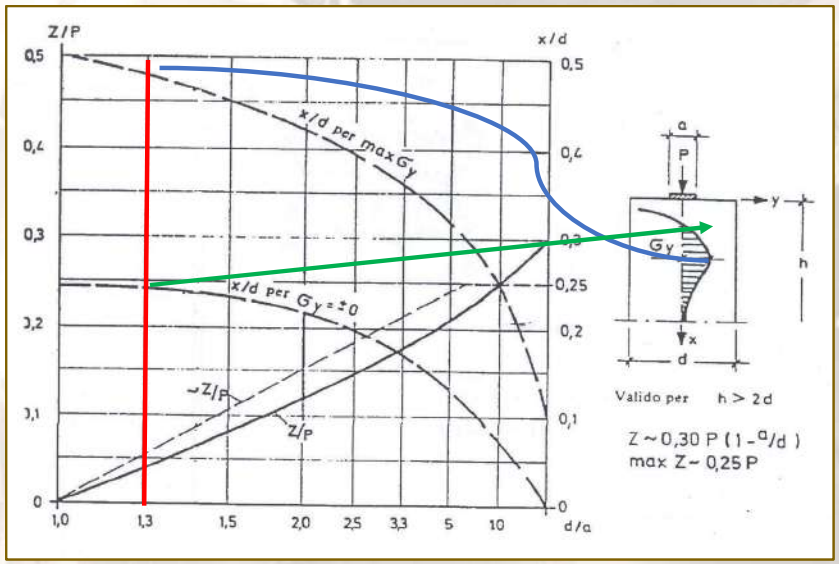


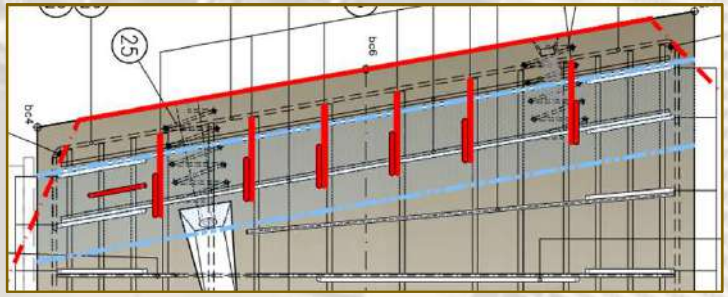
Diagramma dell'andamento delle forze di trazione

a = b_1 l'altezza della superficie di contatto

d = b_2 dimensione del prisma sostitutivo per carico eccentrico nel caso di bassa eccentricità.

Essendo il rapporto d/a crescente per eccentricità di carico oltre H/6) la forza di trazione massima si ha a circa x/d dal bordo

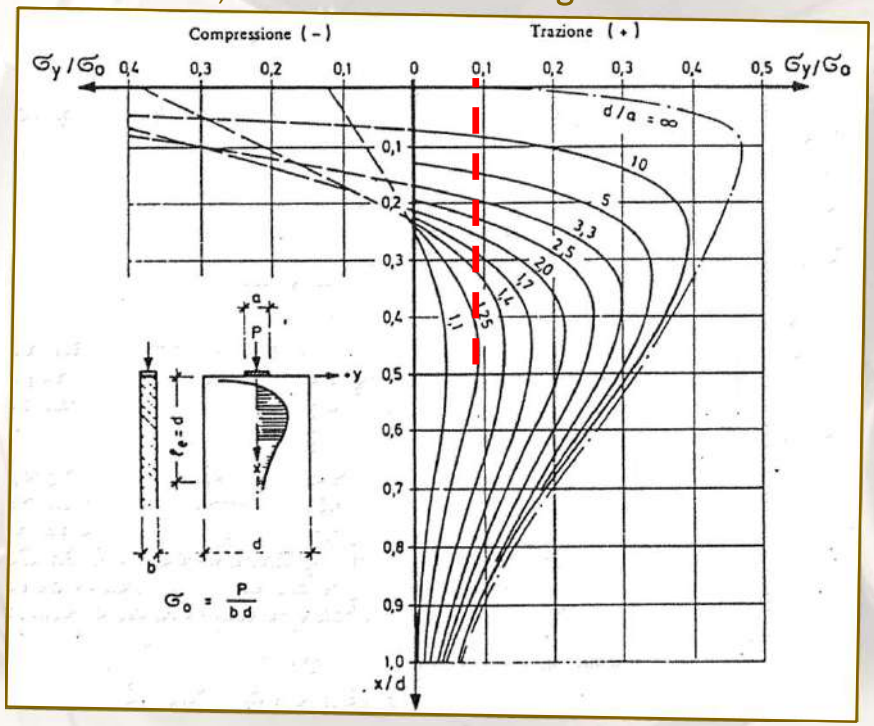
Lo sforzo di trazione è contrastato da una specifica armatura di frettaggio, posizionata considerando un andamento triangolare dello sforzo di trazione



Esempio di armatura di frettaggio sui giunti radiali

4. Comportamento locale - Concio: *Verifiche dei giunti*

Per quanto riguarda la **verifica in corrispondenza del giunto allo SLE**, in fase di verifica si valuta il **massimo sforzo di trazione nel calcestruzzo**, calcolato secondo il **grafico del Leonhardt**.

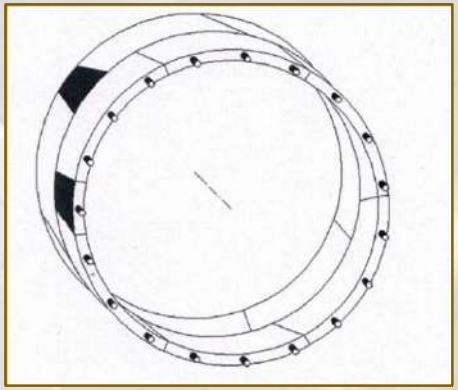


Noto $\sigma_0 = P/(b \cdot d)$ con le dimensioni b_2 e d_2 di diffusione del carico, in funzione del rapporto d/a si ricava il valore σ_y/σ_0 dall'abaco, da cui è possibile quindi ricavare σ_y:

d/a	<1.25	<1.9	<3.3	<10	>10
σ_y/σ_0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

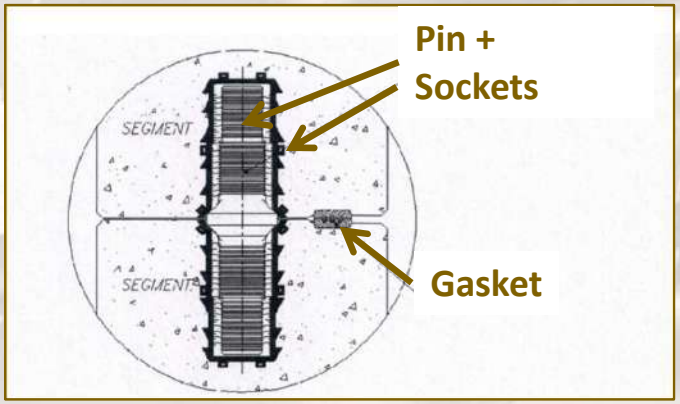
Il valore σ_y deve risultare inferiore al valore di tensione di trazione limite σ_t per l'apertura delle fessure, pari a f_{ctm} / 1.2del CLS.

5. Sistemi di connessione e accessori *Verifiche dei connettori*

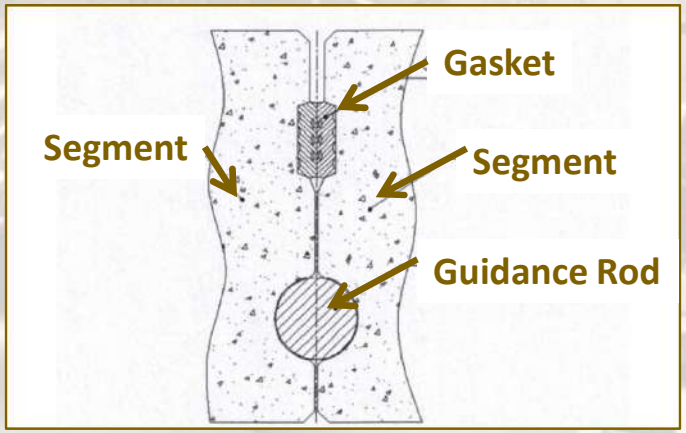


Longitudinal connection of rings ⇦ **Pin + Sockets**

Circumferential centering of segments ⇦ **Guidance Rod**



Section of installed longitudinal connection system



Section of installed guidance rod

5. Sistemi di connessione e accessori

I connettori hanno una funzione principalmente costruttiva di centraggio degli anelli in fase di costruzione.

Le verifiche strutturali da sviluppare per i connettori riguardano le seguenti verifiche:

- Verifica delle sollecitazione di flessione e taglio dovute ad un'errata manovra dell'erettore. Il concio rimane fissato all'anello retrostante per mezzo dei connettori.
- Verifica dell'azione di contrasto offerta dal connettore alla deformazione per isteresi del gasket.

CONCLUSIONI

COMPORTAMENTO LOCALE

VERIFICHE DEI GIUNTI ⇔ FASE DI SPINTA

COMPORTAMENTO GLOBALE

DIMENSIONAMENTO E VERIFICA RIVESTIMENTI ⇔ SPINTA TBM

Produzione

- ✓ VERIFICA ALLO SCASSERO: **SLE + SLU**
- ✓ PRIMA MOVIMENTAZIONE IN STABILIMENTO: **SLE + SLU**
- ✓ STOCCAGGIO IN STABILIMENTO: **SLE + SLU** - ***Operativa*** *e* ***accidentale***

Installazione

- ✓ TRASPORTO IN CANTIERE (gomma + rotaia): **SLE + SLU**
- ✓ STOCCAGGIO IN CANTIERE: **SLE + SLU** - ***Operativa*** *e* ***accidentale***
- ✓ MOBILITAZIONE CON ERETTORE: **SLE + SLU**

Rivestimento definitivo

- ✓ SPINTA DEI MARTINETTI: **SLE + SLU** - ***Operativa e Ordinaria***
  SLU - Eccezionali e Sbloccaggio TBM
- ✓ CARICHI PERMANENTI: **SLE + SLU**
- ✓ CARICHI SISMICI: **SLV**
- ✓ CARICHI ECCEZIONALI (FUOCO): **SLU -Eccezionale**