

# LIATSON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne  
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese  
Sezione transfrontaliera

NOUVELLE LIGNE LYON TURIN – NUOVA LINEA TORINO LIONE  
PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE – PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE

PARTE IN TERRITORIO ITALIANO – PROGETTO IN VARIANTE  
(OTTEMPERANZA ALLA PRESCRIZIONE N. 235 DELLA DELIBERA CIPE 19/2015)

CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO

GENIE CIVIL – OPERE CIVILI

TUNNEL DE BASE – TUNNEL DI BASE

GALERIE DE LA MADDALENA – GALLERIA DELLA MADDALENA

GALERIE MADDALENA 2 – GENIE CIVIL – GALLERIA MADDALENA 2 – OPERE CIVILI

NOTE DE CALCUL DU REVETEMENT DEFINITIF – RELAZIONE DI CALCOLO DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	15/10/2016	Première diffusion PRV / Prima emissione PRV	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
A	27/01/2017	Révision suite aux commentaires TELT / Revisione a seguito commenti TELT	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
B	16/03/2017	Passage au statut AP / Passaggio allo stato AP	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI



CODE DOC	P	R	V	C	3	A	T	S	3	7	5	4	2	B
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

A	P	N	O	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	C3A	//	//	26	48	21	10	03
------------------------------	-----	----	----	----	----	----	----	----

ECHELLE / SCALA



TELT sas – Savoie Technolac - Bâtiment "Homère"  
13 allée du Lac de Constance – 73370 LE BOURGET DU LAC (France)  
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75  
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952  
Propriété TELT Tous droits réservés – Proprietà TELT Tutti i diritti riservati

Ce projet  
est cofinancé par  
l'Union européenne  
(DG-TREN)



Questo progetto  
è cofinanziato  
dall'Unione europea  
(TEN-T)

## SOMMAIRE / INDICE

1. INTRODUZIONE .....	8
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	8
3. QUADRO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMECCANICO .....	9
4. SEZIONI TIPO DI CARPENTERIA .....	10
4.1 Scavo tradizionale Maddalena 2 .....	10
4.2 Scavo meccanizzato Maddalena 2 .....	10
4.3 Sezioni di innesto.....	10
4.4 Galleria di connessione 2.....	10
4.5 Ramo RLS .....	10
5. CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI SULLA STRUTTURA .....	10
5.1 Sezioni di calcolo.....	10
5.2 Parametri geotecnici .....	12
5.2.1 Parametri dei depositi lacustri e glaciali (sezione tipo S2).....	12
5.2.2 Parametri dei micascisti di Clarea (sezione di innesto) .....	12
5.3 Falda .....	13
5.4 Calcolo dei carichi sui rivestimenti .....	13
5.4.1 Calcoli statici .....	13
5.4.2 Calcoli al fuoco .....	14
5.5 Caratteristiche dei materiali .....	14
6. VERIFICA STATICA DEI RIVESTIMENTI .....	15
6.1 Sezione tipo S2 .....	15
6.2 Modello di calcolo .....	15
6.2.1 Depositi fluvioglaciali.....	15
6.2.2 Depositi glaciali indifferenziati.....	20
6.3 Sezione di innesto .....	24
6.3.1 Modello di calcolo .....	24
6.3.2 Determinazione del tasso di deconfinamento dal modello 3D .....	28
6.3.3 Sollecitazioni nel rivestimento gettato in opera.....	30
6.3.4 Verifiche del rivestimento gettato in opera.....	31
6.3.5 Sollecitazioni sui conci prefabbricati.....	33
6.3.6 Verifica dei conci prefabbricati.....	34
7. VERIFICA DEI RIVESTIMENTI AL FUOCO .....	36
7.1 Metodologia.....	36
7.1.1 Spalling .....	37
7.1.2 Calcolo termico .....	37
7.1.3 Calcolo delle proprietà termiche nella sezione riscaldata.....	39
7.1.4 Sollecitazioni indirette legate all'incendio .....	40
7.1.5 Verifica delle sezioni riscaldate a SLU – combinazione eccezionale.....	45
7.2 Verifica della sezione tipo S2 .....	46
7.2.1 Calcolo dell'armatura minima .....	46
7.2.2 Calcolo termico e sollecitazioni legate all'incendio.....	46
7.2.3 Depositi fluvioglaciali.....	49

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

7.2.4	Depositi glaciali indifferenziati.....	50
7.2.5	Verifica in presenza di protezione termica .....	51
7.2.6	Sintesi delle armature necessarie .....	56
7.3	Sezione corrente con conci prefabbricati.....	57
7.4	Sezione di innesto .....	57
7.4.1	Calcolo dell'armatura minima .....	57
7.4.2	Calcolo termico e sollecitazioni legate all'incendio.....	57
7.4.3	Verifica in presenza dell'armatura minima .....	59
7.4.4	Verifica in presenza di protezione termica .....	60
7.4.5	Sintesi delle armature necessarie .....	64
7.4.6	Verifica dei conci .....	64
7.5	Galleria di connessione 2.....	65
7.5.1	Calcolo dell'armatura minima .....	65
7.5.2	Calcolo termico e sollecitazioni legate all'incendio.....	66
7.5.3	Verifica in presenza dell'armatura minima .....	68
7.5.4	Verifica in presenza di protezione termica .....	68
7.5.5	Sintesi delle armature necessarie .....	72
8.	DIMENSIONAMENTO DEL SETTO VERTICALE INTERNO.....	73
8.1	Generalità.....	73
8.2	Carichi agenti.....	74
8.3	Armature necessarie nel setto .....	74
8.3.1	Materiali e resistenze di calcolo statico .....	74
8.3.2	Verifica a SLU .....	75
8.3.3	Verifica al fuoco.....	77
8.3.4	Verifica a SLE.....	80
8.4	Passo degli spinotti tra setto e rivestimento.....	81
9.	CONCLUSIONI.....	81

**LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE**

Figura 1:	Sollecitazione al momento, S2, FG .....	16
Figura 2:	Sollecitazione allo sforzo normale, S2, FG .....	16
Figura 3:	Sollecitazione al taglio, S2, FG .....	17
Figura 4:	Diagramma di interazione M-N, S2, FG, calotta e piedritti 50 cm .....	18
Figura 5:	Schema per il calcolo della sollecitazione al taglio.....	18
Figura 6:	Diagramma di interazione M-N, S2, FG, arco rovescio 65 cm .....	19
Figura 7:	Diagramma di interazione M-N, S2, FG, arco rovescio 65 cm, senza riduzione della profondità della fessura .....	20
Figura 8:	Sollecitazione al momento, S2, GI .....	21
Figura 9:	Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GI.....	21
Figura 10:	Sollecitazione al taglio, S2, GI .....	22
Figura 11:	Diagramma di interazione M-N, S2, GI, calotta e piedritti 50 cm .....	23
Figura 12:	Diagramma di interazione M-N, S2, GI, arco rovescio 65cm .....	24
Figura 13:	Modello 2D: scavo della sezione corrente con TBM scudata e messa in opera dei conci .....	26
Figura 14:	Modello 2D: stabilizzazione dei conci rimasti con bullonature e scavo della parte da allargare senza rimozione dei conci .....	26

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Figura 15: Modello 2D: attivazione dei sostegni nell'allargamento.....	27
Figura 16: Modello 2D: rimozione dei conci lato allargamento .....	27
Figura 17: Modello 2D: attivazione del rivestimento definitivo e disattivazione dei sostegni sia lato allargamento che lato conci .....	28
Figura 18: Profilo di spostamento ottenuto nel modello 3D nella sezione di calcolo.....	28
Figura 19: Curva caratteristica ottenuta nel modello 3D nella sezione di calcolo.....	29
Figura 20: Sollecitazione a momento, rivestimento sezione di innesto .....	30
Figura 21: Sollecitazione a sforzo normale, rivestimento sezione di innesto .....	30
Figura 22: Sollecitazione a taglio, rivestimento sezione di innesto .....	31
Figura 23: Diagramma di interazione M-N, sezione di innesto, 50cm .....	32
Figura 24: Sollecitazione a momento, conci nella sezione di innesto.....	33
Figura 25: Sollecitazione a sforzo normale, conci nella sezione di innesto.....	33
Figura 26: Sollecitazione a taglio, conci nella sezione di innesto.....	34
<b>Figura 27: Verifica dei conci a pressoflessione .....</b>	<b>34</b>
Figura 28: Curve temperatura-tempo di incendio .....	36
Figura 29: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h.....	39
Figura 30: Dati di input e risultati .....	42
Figura 31: Dati di input per il calcolo delle sollecitazioni, S2, FG, curva ISO834 4h .....	43
Figura 32: Dati di input per il calcolo delle sollecitazioni, connessione 2, curva ISO834 4h .	44
Figura 33: Dati di input per il calcolo delle sollecitazioni, sezione di innesto, curva ISO834 4h .....	45
Figura 34: Andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4 ore.....	47
Figura 35: Andamento delle temperature nella sezione per la curva HC 2 ore.....	47
Figura 36: Andamento delle temperature nella sezione per la curva RWS 2 ore .....	48
Figura 32: Diagramma di interazione della sezione S2 FG per la curva di incendio ISO834 4h, armatura minima .....	50
Figura 38: Diagramma di interazione della sezione S2 GI per la curva di incendio ISO834 4h .....	51
Figura 39: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm .....	53
Figura 40: Caratteristiche della sezione riscaldata in presenza di Promatect-T 35mm .....	54
Figura 41: Diagramma di interazione della sezione S2 FG per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm .....	55
Figura 37: Andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4 ore.....	57
Figura 38: Andamento delle temperature nella sezione per la curva HC 2 ore.....	58
Figura 39: Andamento delle temperature nella sezione per la curva RWS 2 ore .....	58
Figura 45: Diagramma di interazione della sezione per la curva di incendio ISO834 4h.....	60
Figura 46: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm .....	61
Figura 47: Caratteristiche della sezione riscaldata in presenza di Promatect-T 35mm .....	62
Figura 48: Diagramma di interazione della sezione d'innesto per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm .....	63
Figura 48: Diagramma di interazione dei conci della sezione d'innesto per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm .....	65
Figura 50: Andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4 ore.....	66
Figura 51: Andamento delle temperature nella sezione per la curva HC 2 ore.....	67
Figura 52: Andamento delle temperature nella sezione per la curva RWS 2 ore .....	67
Figura 53: Diagramma di interazione della sezione per la curva di incendio ISO834 4h.....	68

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Figura 54: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm .....	70
Figura 55: Caratteristiche della sezione riscaldata in presenza di Promatect-T 35mm .....	71
Figura 56: Diagramma di interazione per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm.....	72
Figura 57: Schema statico del setto.....	75
Figura 58: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h.....	78
Figura 59: Caratteristiche della sezione riscaldata.....	79

**LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 1: Sollecitazioni per calotta e piedritti, S2, FG .....	17
Tabella 2: Verifica del rivestimento al taglio di calotta e piedritti, S2, FG .....	19
Tabella 3: Sollecitazioni per l'arco rovescio, S2, FG .....	19
Tabella 4: Verifica del rivestimento al taglio dell'arco rovescio, S2, FG .....	20
Tabella 5: Sollecitazioni per calotta e piedritti, S2, GI .....	22
Tabella 6: Verifica del rivestimento al taglio per calotta e piedritti, S2, GI .....	23
Tabella 7: Sollecitazioni per l'arco rovescio, S2, GI.....	23
Tabella 8: Verifica del rivestimento al taglio per l'arco rovescio, S2, FG .....	24
Tabella 9: Verifica del rivestimento al taglio per la sezione di innesto .....	32
Tabella 10: Proprietà termiche .....	38
Tabella 11: Rigidezza radiale degli appoggi per il metodo delle reazioni iperstatiche.....	43
Tabella 12: Caratteristiche della sezione riscaldata .....	48
Tabella 13: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG .....	48
Tabella 14: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG.....	49
Tabella 15: Coefficienti di riduzione della resistenza considerando lo spalling.....	49
Tabella 16: Coefficienti di riduzione della resistenza senza considerare lo spalling (uso di fibre di polipropilene).....	49
Tabella 17: Sforzi di dimensionamento, S2, FG .....	50
Tabella 18: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, GI.....	51
Tabella 19: Sforzi di dimensionamento, S2, GI.....	51
Tabella 20: Proprietà termiche di calcestruzzo e materiale isolante .....	52
Tabella 21: Coefficienti di riduzione delle resistenze, S2, FG, in presenza di Promatect-T ...	54
Tabella 22: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG, in presenza di Promatect-T.....	55
Tabella 23: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG, in presenza di Promatect-T.....	55
Tabella 24: Sforzi di dimensionamento, S2, FG, in presenza di Promatect-T.....	55
Tabella 25: Riassunto dei risultati della verifica.....	56
Tabella 26: Caratteristiche della sezione riscaldata .....	59
Tabella 27: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo.....	59
Tabella 28: Sforzi di dimensionamento .....	59
Tabella 29: Coefficienti di riduzione delle resistenze in presenza di Promatect-T.....	62
Tabella 30: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T.....	62
Tabella 31: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T .....	63
Tabella 32: Sforzi di dimensionamento in presenza di Promatect-T .....	63

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

---

Tabella 33: Riassunto dei risultati della verifica .....	64
Tabella 34: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T .....	64
Tabella 35: Sforzi di dimensionamento in presenza di Promatect-T .....	65
Tabella 36: Caratteristiche della sezione riscaldata .....	67
Tabella 37: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo.....	67
Tabella 38: Sforzi di dimensionamento .....	68
Tabella 39: Proprietà termiche di calcestruzzo e materiale isolante .....	69
Tabella 40: Coefficienti di riduzione delle resistenze in presenza di Promatect-T.....	71
Tabella 41: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T.....	71
Tabella 42: Sforzi di dimensionamento in presenza di Promatect-T .....	72
Tabella 43: Riassunto dei risultati della verifica.....	73
Tabella 44: Carichi dovuti alla pressione/depressione del setto .....	74
Tabella 45: Coefficienti di riduzione delle resistenze.....	79
Tabella 46: Caratteristiche dei rivestimenti definitivi.....	81

## RESUME / RIASSUNTO

La présente note décrit la vérification des revêtements des galeries Maddalena 2 et de connexion 2.

Les calculs ont été réalisés pour les sections courantes creusées en méthode traditionnelle et pour les entonnements entre Maddalena 2 et la galerie de connexion 2 ou le Tunnel de Base.

Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel Zsoil, en tenant compte du phasage de creusement.

De plus, les vérifications au feu ont été réalisées à l'aide du logiciel SCIA Engineer.

L'épaisseur minimale de 50 cm des revêtements est validée.

Le rapport présente également le dimensionnement de la cloison verticale qui sépare la zone pour l'extraction des fumées en cas d'incendie de la gaine de ventilation du site de sécurité.

La presente relazione descrive la verifica dei rivestimenti delle gallerie Maddalena 2 e di connessione 2.

I calcoli sono stati realizzati per le sezioni correnti scavate con metodo tradizionale e le sezioni di innesto tra Maddalena 2 e la galleria di connessione 2 o il Tunnel di Base.

I calcoli sono stati effettuati con l'ausilio del software Zsoil, tenendo conto del fasaggio di scavo.

Inoltre sono state condotte le verifiche al fuoco, con l'ausilio del software SCIA Engineer.

Lo spessore minimo di 50 cm dei rivestimenti è validato.

Inoltre si presenta il dimensionamento del setto verticale che separa la zona di estrazione dei fumi in caso di incendio dal condotto di ventilazione dell'area di sicurezza.



## 1. Introduzione

La variante progettuale a seguito della prescrizione n. 235 in fase di approvazione del Progetto Definitivo da parte del CIPE ha come conseguenze la sostituzione della galleria di ventilazione di Val Clarea prevista nel Progetto Definitivo Approvato con una nuova galleria denominata Maddalena 2 (con portale situato alla Maddalena, in comune di Chiomonte) e lo scavo di questa galleria con una TBM scudata che si innesta poi nel Tunnel di Base proseguendo sul Binario Pari dello stesso fino al portale di Susa.

Siccome la TBM si innesta sul Tunnel di Base alla pk 53+514 mentre l'area di sicurezza di Clarea è prevista più a monte, la galleria di connessione 2 permette di congiungere la galleria Maddalena 2 con la caverna tecnica dell'area di sicurezza.

Fino all'innesto con la galleria di connessione 2 (PM 2035), la galleria Maddalena 2 presenta la funzione di ventilazione dell'area di sicurezza di Clarea e di estrazione fumi del Tunnel di Base. Queste funzioni continuano con la galleria di connessione 2, mentre nella tratta rimasta di Maddalena 2 si effettua lo stoccaggio irreversibile delle rocce verdi e non sarà più accessibile in fase di esercizio.

L'obiettivo del presente documento è la verifica dei rivestimenti delle gallerie Maddalena 2 e di connessione 2. Il rivestimento in conci prefabbricati, presente su buona parte di Maddalena 2, funge anche da sostegno ed è quindi già trattato nella relazione relativa ai sostegni PRV\_C3A\_7541\_26-48-21.

Sono state eseguite le verifiche statiche e al fuoco.

Si è inoltre eseguita la verifica del setto interno di separazione tra il condotto di estrazione fumi del TdB in caso di incendio ed il condotto di ventilazione dell'area di sicurezza.

## 2. Documenti di riferimento

### 2.1 Quadro normativo di riferimento

Il quadro normativo di riferimento è trattato nell'allegato 4.1 del Dossier Preliminare della Sicurezza (documento PRF\_C1\_0003\_00-00-00\_10-03).

### 2.2 Documenti di progetto

- PRV\_C3A\_7540\_26-48-21 Relazione tecnica descrittiva
- PRV\_C3A\_7541\_26-48-21 Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni
- PRV\_C3A\_7550\_26-48-21 Carpenterie – sezione corrente TBM
- PRV\_C3A\_7551\_26-48-21 Carpenterie – sezioni correnti S1 e S2
- PRV\_C3A\_7552\_26-48-21 Carpenteria – zona di innesto con galleria di connessione 2 1/2
- PRV\_C3A\_7618\_26-48-21 Carpenteria – zona di innesto con galleria di connessione 2 2/2
- PRV\_C3A\_7553\_26-48-21 Carpenteria – zona di innesto con TdB 1/2
- PRV\_C3A\_7619\_26-48-21 Carpenteria – zona di innesto con TdB 2/2
- PRV\_C3A\_7556\_26-48-21 Carpenteria – ramo RLS
- PRV\_C3A\_7638\_26-48-23 Carpenterie – sezioni correnti
- PRV\_C3A\_3950\_26-19-00 Relazione di calcolo del rivestimento con conci prefabbricati.
- PRV\_C3A\_3731\_26-46-20 Relazione di calcolo del rivestimento definitivo.



### 3. Quadro geologico, idrogeologico e geomeccanico

#### 3.1 Galleria Maddalena 2

La galleria attraversa nei primi 127 m circa i depositi lacustri e glaciali (copertura quaternaria). Tali depositi si compongono in depositi glaciali di fondo o fluvioglaciali (*fg*), che si prevede di incontrare nei primi 52 m (con copertura massima di 19.5 m), e in depositi glaciali indifferenziati (*gi*), nei successivi 75 m (con copertura massima di 68 m). Il passaggio da una litologia e l'altra è considerato in maniera conservativa (ai fini dei calcoli) in calotta, quando la litologia sparisce completamente sulla sezione di scavo.

Successivamente si prevede di incontrare un orizzonte di scollamento per una lunghezza di circa 25 m. Tale orizzonte è composto da carniole e cataclasiti carbonatiche.

Seguono dei marmi dolomitici per una lunghezza di 35 m circa e dei micascisti e scisti carbonatici dell'unità d'Ambin per altrettanti 35 m. Tali litologie sono caratterizzate da un RMR di classe III (nel range 41-50) ed una copertura massima di 83 m.

A partire dal PM 215 circa lo scavo incontrerà il complesso d'Ambin, composto inizialmente dagli gneiss aplitici (fino al PM 1140 circa) e successivamente dagli gneiss albitici passanti a micascisti quarzosi (fino al PM 1340 circa). In questa tratta si ha un ammasso di buona qualità con indici RMR prevalenti di classe I a II ed indici GSI compresi in maggioranza nel range 60-90. In corrispondenza degli gneiss albitici si ha una leggera degradazione dei parametri con RMR prevalente di classe III e GSI nel range 45-70. La copertura massima in questa tratta è pari a 560 m.

Dopo il PM 1340 e fino alla fine della galleria, lo scavo avverrà nel complesso di Clarea composto da micascisti e gneiss minuti. Tale tratta è caratterizzata da un indice RMR in prevalenza di classe III (da 51 a 60) e da un indice GSI prevalente nel range 55-70. Il valore minimo dell'indice GSI previsto nella tratta è pari a 50 ed il valore massimo è pari a 85. La copertura massima è pari a 1210 m.

I fenomeni di rilascio in calotta osservati nel cunicolo potrebbero riprodursi, sebbene questi fenomeni non siano stati di grande entità nella tratta di cunicolo corrispondente alla galleria in oggetto ed inoltre l'impatto di tali fenomeni sullo scavo con TBM scudata è limitato (presenza dello scudo e dei conci immediatamente a tergo).

Dal punto di vista idrogeologico, si prevedono venute d'acqua superiori a 125 l/min / 10 m tunnel solo verso il PM 450 e verso il PM 950. Nei depositi lacustri e glaciali non si prevedono venute d'acqua.

Per maggiori dettagli si veda il profilo geologico-geomeccanico PRV\_C3B\_7207\_26-48-01.

#### 3.2 Galleria di connessione 2

Per quanto riguarda la galleria di connessione 2, si veda il profilo geomeccanico PRV\_C3B\_7208\_26-48-01. La galleria attraversa i micascisti e gneiss del complesso di Clarea. Si prevedono alcune zone con fratturazione spaziata ma persistente ma nessuna di faglia e/o tettonizzata.

L'ammasso si presenta di buona qualità, con indice GSI nel range 55-70 ed indice RMR che varia da II a III secondo le tratte (RMR da 51 a 70), con RMR III dominante.

I fenomeni di rilascio in calotta osservati nel cunicolo potrebbero riprodursi, sebbene questi fenomeni non siano stati di grande entità nella tratta di cunicolo corrispondente alla galleria in oggetto (si sono messi in opera dei centinini solo su circa 35% del lineare e non si sono mai messe in opera centine pesanti con pannellature) e considerando anche le differenze tra

metodo tradizionale e meccanizzato con TBM aperta descritte nella relazione dei sostegni dell'area di sicurezza di Clarea (documento PRV\_C3A\_3730\_26-46-20).

Dal punto di vista idrogeologico, si prevedono venute d'acqua superiori a 125 l/min su 10 m di tunnel solo per una tratta di circa 100 m.

La copertura della galleria varia da 740 a 1350 m.

## **4. Sezioni tipo di carpenteria**

### **4.1 Scavo tradizionale Maddalena 2**

Per i primi 160 m dall'imbocco lo scavo avverrà con metodo tradizionale. Le sezioni tipo di sostegno previste sono la S2 per i primi 130 m e la S1 per gli ulteriori 30 m. Per maggiori dettagli si veda la relazione PRV\_C3A\_7541\_26-48-21.

Il rivestimento definitivo presenta uno spessore minimo di 50 cm in calotta. Il getto dell'arco rovescio a breve distanza del fronte di scavo (20 m, ovvero circa 1.7 volte il diametro) permette di contenere i fenomeni deformativi che potrebbero generarsi al piede delle centine.

Il getto della volta avviene ad una distanza di 80 m dal fronte di scavo.

Dato che la sezione tipo S2 è troncoconica, il rivestimento presenta spessore variabile, con un minimo di 50 cm in calotta. La sezione tipo S1 è invece cilindrica, con rivestimento di spessore costante (pari a 50 cm) in senso longitudinale.

### **4.2 Scavo meccanizzato Maddalena 2**

Per la tratta di Maddalena 2 scavata con TBM scudata il sostegno/rivestimento è composto da conci prefabbricati.

### **4.3 Sezioni di innesto**

Nelle sezioni di innesto il rivestimento gettato in opera presenta uno spessore minimo di 50 cm. Nella porzione opposta all'allargamento si mantengono i conci prefabbricati.

### **4.4 Galleria di connessione 2**

La galleria viene scavata in tradizionale, quindi presenta un rivestimento in cls gettato in opera.

Lo spessore minimo del rivestimento (in calotta ed in corrispondenza dei dreni laterali) è pari a 50 cm.

### **4.5 Ramo RLS**

Il ramo RLS si trova nella tratta di stoccaggio delle rocce verdi. Il rivestimento è composto da uno strato di cls proiettato di spessore 5 cm. Ha il solo fine di proteggere l'impermeabilizzazione dalle operazioni interne di movimentazione e quindi non è considerato un rivestimento definitivo.

## **5. Calcolo delle sollecitazioni sulla struttura**

### **5.1 Sezioni di calcolo**

Galleria Maddalena 2 - sezione in tradizionale

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Si è eseguita la verifica per la sezione tipo S2 prevista per i depositi lacustri e glaciali nei primi 130 m circa dall'imbocco. La sezione è prevista sia per i depositi glaciali di fondo, che presentano parametri geotecnici più scadenti, ma minor copertura, sia per i depositi glaciali indifferenziati, con parametri geotecnici migliori, ma con maggior copertura. Si sono definite dunque due sezioni di calcolo, una al PM 52 (depositi fluvioglaciali) e l'altra al PM 127 (depositi glaciali indifferenziati).

La carpenteria della sezione tipo S1 coincide con quella della sezione tipo S2 nella sua configurazione minima (spessore di 50 cm in calotta). Inoltre è prevista per un ammasso roccioso più resistente e la copertura non varia nella relativa tratta di applicazione. La sezione tipo S2 viene verificata per la copertura massima, appena prima dell'applicazione della sezione tipo S1, e per lo spessore minimo (50 cm). Non sono quindi necessarie quindi verifiche specifiche per la sezione tipo S1.

#### Galleria Maddalena 2 – sezione con conci prefabbricati

Come già detto nella relazione PRV\_C3A\_7541\_26-48-21, si rimanda alle verifiche effettuate nella relazione PRV\_C3A\_3950\_26-19-00, comprese le verifiche al fuoco per la tratta utilizzata come galleria di ventilazione.

La tratta di stoccaggio delle rocce verdi viene poi ritombata completamente. Nel caso di venute d'acqua, l'assenza di drenaggio viene a creare una pressione idrostatica sui conci che si trasmette, data la chiusura completa degli interstizi con malta cementizia, su tutta la sezione. La sezione interna si compone di malta cementizia e di contenitori contenenti rocce verdi ed addensante (si veda la relazione PRV\_C3A\_7540\_26-48-21). Si sono definite le caratteristiche dei materiali in modo che la malta tra intradosso dei conci e contenitori abbia una resistenza a compressione di 20 MPa. Questo si traduce con un modulo elastico di circa 30 GPa, simile al modulo elastico dei conci prefabbricati (36 GPa) e a quello dell'ammasso roccioso (40 GPa nel caso di GSI 60). Nel caso di pressione idrostatica radiale, la sezione resistente è circolare, il che significa che non possono crearsi tensioni di taglio e quindi, ai sensi del criterio di Mohr-Coulomb, non si creano mai delle condizioni di rottura. Nel caso di pressione idrostatica localizzata in uno o più punti (situazione più probabile), la rigidità della sezione ritombata fa sì che la sollecitazione viene unicamente trasmessa all'interno della sezione fino a raggiungere l'estremità opposta e scaricarsi sull'ammasso roccioso che presenta rigidità (ovvero modulo elastico) generalmente superiore. La stabilità della sezione è quindi garantita.

#### Sezioni di innesto

Si è eseguita la verifica statica del rivestimento per la sezione di innesto con un modello 2D equivalente al modello 3D presentato nella relazione PRV\_C3A\_7541\_26-48-21. Si è inoltre eseguita la verifica al fuoco con un modello alle reazioni iperstatiche.

#### Galleria di connessione 2

Analogamente alle verifiche del sostegno, il rivestimento della sezione è verificato tramite la sezione E-E dell'area di sicurezza di Clarea e le sezioni tipo S1, S2 e S4, la cui verifica è presentata nella relazione PRV\_C3A\_3731\_26-46-20. Per la sezione E-E, non è stata eseguita verifica al fuoco, mentre questa galleria è prevista per l'estrazione dei fumi caldi provenienti dal TdB e quindi necessita una verifica al fuoco. Si esegue quindi la verifica al fuoco per questa sezione.

#### Ramo RLS

Dato il lasso di tempo limitato tra messa in opera del rivestimento in cls proiettato e le operazioni di stoccaggio e riempimento (vedere relazione PRV\_C3A\_7610\_33-02-02), il rivestimento non presenta un ruolo strutturale.

Al momento del degrado dei sostegni esistenti, la sezione sarà riempita di malta cementizia negli interstizi tra rivestimento e contenitori. Ciascun contenitore costituisce peraltro un blocco solido, composto da un conglomerato di smarino di rocce verdi ed addensante costituito da polimeri a catena lunga. Viene quindi a crearsi un confinamento radiale su tutto il contorno dello scavo che si oppone alla pressione dell'ammasso agente in precedenza sui sostegni, garantendone la stabilità.

Per quanto riguarda la pressione idrostatica, valgono le stesse considerazioni della sezione corrente di Maddalena 2.

In definitiva, saranno eseguite in questa relazione le verifiche seguenti:

- Verifica statica e al fuoco della sezione tipo S2 della galleria Maddalena 2, depositi fluvioglaciali;
- Verifica statica e al fuoco della sezione tipo S2 della galleria Maddalena, depositi glaciali indifferenziati;
- Verifica statica e al fuoco della sezione di innesto;
- Verifica al fuoco della galleria di connessione 2;
- Verifica del setto tra condotto di estrazione fumi e condotto di ventilazione area di sicurezza.

## 5.2 Parametri geotecnici

### 5.2.1 Parametri dei depositi lacustri e glaciali (sezione tipo S2)

Un'analisi interpretativa delle indagini realizzate nell'area di cantiere della Maddalena è presentata nella relazione MAD\_EXE\_0011\_01-00-00\_10-03 del Progetto Esecutivo della Maddalena. I parametri del terreno ottenuti sono stati utilizzati come parametri di calcolo per le verifiche dei sostegni e dei rivestimenti definitivi della sezione tipo T5 del cunicolo esplorativo della Maddalena (relazioni MAD\_EXE\_0269\_07-00-00\_10-04 e MAD\_EXE\_0261\_07-00-00\_10-03).

I parametri di calcolo sono descritti in dettaglio nella relazione PRV\_C3A\_7541\_26-48-21.

### 5.2.2 Parametri dei micascisti di Clarea (sezione di innesto)

Per quanto riguarda la sezione di innesto con il Tunnel di Base, le caratteristiche dell'ammasso roccioso, definite sulla base del profilo geologico-geomeccanico PRV\_C3B\_7207\_26-48-01 e nella relazione geomeccanica PRV\_C3B\_0100\_00-03-03 sono le seguenti:

#### Roccia intatta:

- Resistenza a compressione monoassiale: UCS = 97.9 MPa
- Geological Strength Index: GSI = 60
- Costante di Hoek-Brown:  $m_i = 10$
- Fattore di disturbo: D = 0 (utilizzo di esplosivo controllato con microritardi)
- Modulo elastico:  $E_i = 78$  GPa

### Ammasso roccioso:

- Coesione:  $c = 4335 \text{ kPa}$
- Angolo di attrito:  $\phi = 37.35^\circ$
- Modulo elastico:  $E_{rm} = 40.56 \text{ GPa}$

### Stato tensionale:

- Peso specifico:  $\gamma = 27.7 \text{ kN/m}^3$
- Copertura:  $H = 1050 \text{ m}$
- Coefficiente di spinta orizzontale:  $k_0 = 1.3$

## 5.3 Falda

La pressione idrostatica considerata per il calcolo della sezione tipo S2 è nulla in quanto non si sono registrate venute d'acqua nella corrispondente tratta di Maddalena 1 nelle stesse formazioni (a 30-40 m di distanza), come riportato nel profilo as built di Maddalena 1 PRV\_C3B\_7206\_26-48-01 e nel profilo previsionale di Maddalena 2 PRV\_C3B\_7207\_26-48-01.

Nelle altre opere oggetto di verifica (sezione di innesto, galleria di connessione 2), la galleria è drenata per cui il carico idraulico viene abbattuto.

## 5.4 Calcolo dei carichi sui rivestimenti

### 5.4.1 Calcoli statici

I calcoli statici sono eseguiti a partire dai risultati dei modelli numerici con il programma ZSoil nei quali vengono modellati sia i sostegni che i rivestimenti.

Gli sforzi nei rivestimenti sono analizzati dopo la disattivazione degli elementi di sostegno (degradazione totale del sostegno).

I carichi considerati sul rivestimento sono i seguenti:

- Peso proprio, con  $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$
- Pressione dell'ammasso roccioso.

Non si considera il carico idraulico per le ragioni esposte al § 5.3. Il carico al di sotto dei dreni non risulta dimensionante per la struttura.

I carichi risultanti dalle strutture interne (vi è solo il setto tra condotto di estrazione fumi e condotto di ventilazione area di sicurezza) sono trascurabili rispetto alla pressione dell'ammasso.

Conformemente alle NTC, la combinazione delle azioni impiegata per gli stati limite ultimi (SLU) è la seguente:

$$\gamma_{G1} G_1$$

Con:

$\gamma_{G1}$ : coefficiente parziale dei carichi permanenti, pari a 1.3;

$G_1$ : carichi permanenti, ovvero peso proprio del rivestimento definitivo e pressione dell'ammasso.

Non vi sono carichi variabili.

Il quadro normativo di riferimento ed in particolare le raccomandazioni AFTES GT7 e GT29 stabiliscono di applicare i coefficienti parziali sugli effetti delle azioni (sollecitazioni) anziché sulle azioni stesse. Questo permette di simulare in Zsoil la situazione effettiva, senza coefficienti moltiplicatori. La gravità e la pressione dell'ammasso roccioso sono considerate direttamente nella simulazione Zsoil. Le sollecitazioni sono in seguito moltiplicate per il coefficiente  $\gamma$  pari a 1.3.

Per la verifiche statiche, sulla base di quanto espresso nella raccomandazione dell'AFTES GT7, si esegue solo la verifica a SLU. La raccomandazione infatti dice che l'attitudine all'esercizio che corrisponde allo stato limite d'esercizio è generalmente garantita dalla concezione stessa del rivestimento: condizioni di messa in opera, geometria studiata per evitare problemi di instabilità di forma (cerchi o archi di cerchio), impermeabilizzazione. Inoltre, come descritto nel quadro normativo (allegato 4.1 del DPS), la limitazione della fessure a metà della profondità della sezione, considerata nei diagrammi di interazione, costituisce una verifica a fessurazione e quindi una verifica nelle condizioni di esercizio.

#### 5.4.2 Calcoli al fuoco

I calcoli al fuoco sono realizzati con un modello strutturale alle reazioni iperstatiche mediante il software SCIA Engineer. Per il modello numerico e la combinazione di carico utilizzata si veda il § 8.

### 5.5 Caratteristiche dei materiali

Calcestruzzo di classe C30/37 (rivestimento gettato in opera):

Resistenza cilindrica caratteristica:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Resistenza a compressione di calcolo per le verifiche a SLU:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = 17 \text{ MPa}$$

dove:

$\alpha_{cc} = 0.85$  coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata

$\gamma_c = 1.5$  coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo

Resistenza a trazione media:  $f_{ctm} = 2.9 \text{ N/mm}^2$

Conci prefabbricati C45/55, spessore 45 cm:

Resistenza cilindrica caratteristica:  $f_{ck} = 45 \text{ MPa}$

Resistenza a compressione di calcolo per le verifiche a SLU:

$$f_{cd} = 0.85 \frac{f_{ck}}{1.5} = 25.5 \text{ MPa}$$

dove:

$\alpha_{cc} = 0.85$  coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata

$\gamma_c = 1.5$  coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo

### Acciaio d'armatura B450C:

Resistenza caratteristica a snervamento:  $f_{yk} = 450 \text{ MPa}$

Resistenza a snervamento di calcolo:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391 \text{ MPa}$$

Dove:

$\gamma_s = 1.15$  coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio d'armatura

## **6. Verifica statica dei rivestimenti**

La verifica dei rivestimenti si effettua a pressoflessione e al taglio, per le seguenti sezioni determinanti:

- Momento flettente massimo/minimo e sforzo normale corrispondente
- Sforzo normale massimo, momento flettente e taglio corrispondenti
- Sforzo normale minimo, momento flettente e taglio corrispondenti
- Sforzo di taglio massimo e sforzo normale corrispondente.

### **6.1 Sezione tipo S2**

#### **6.2 Modello di calcolo**

Si utilizza il modello ad elementi finiti già realizzato per il calcolo dei sostegni (si veda la relazione PRV\_C3A\_7541\_26-48-21). Si rimanda a questo documento per le leggi costitutive ed i parametri utilizzati.

I rivestimenti sono modellati con elementi volumici del tipo "CONTINUUM FOR STRUCTURES" caratterizzati da un comportamento elastico con le proprietà del cls. Un'interfaccia è posta tra ammasso roccioso e rivestimento. Per maggiori dettagli si veda la relazione PRV\_C3A\_7541\_26-48-21.

#### **6.2.1 Depositi fluvioglaciali**

##### Sollecitazioni



Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

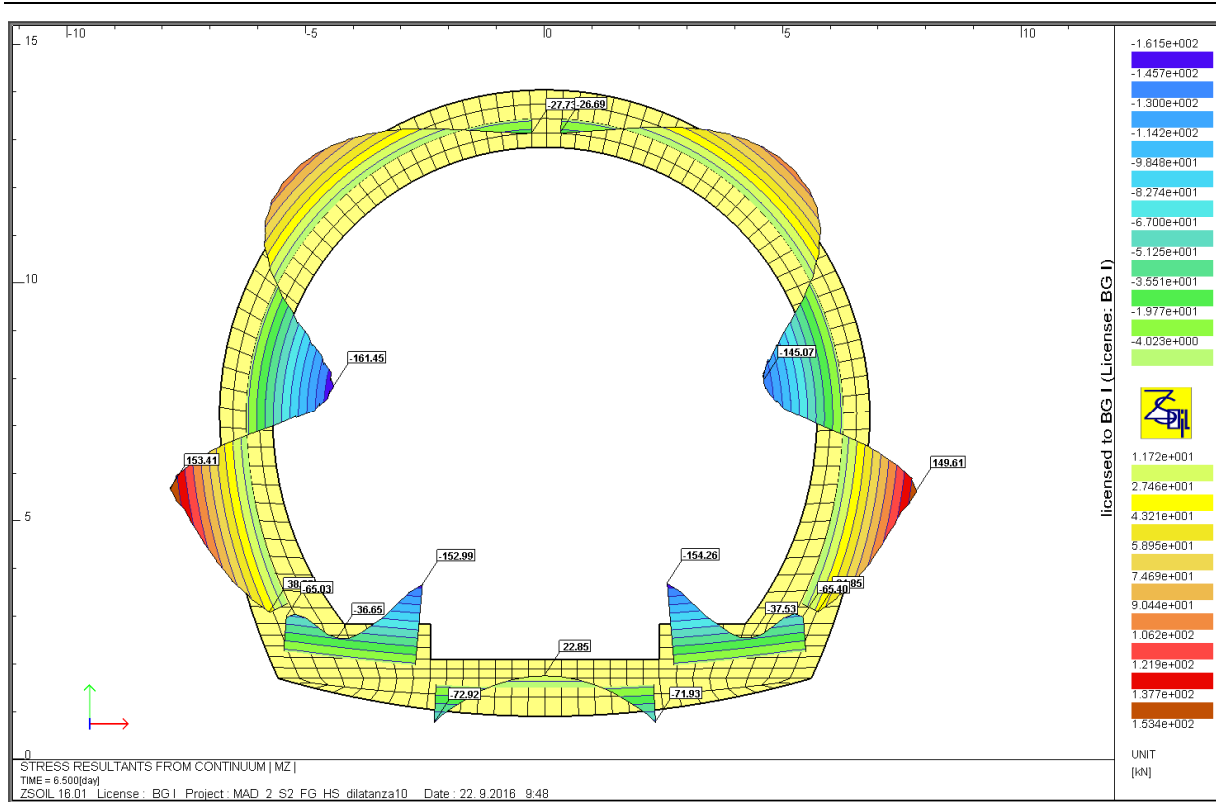


Figura 1: Sollecitazione al momento, S2, FG

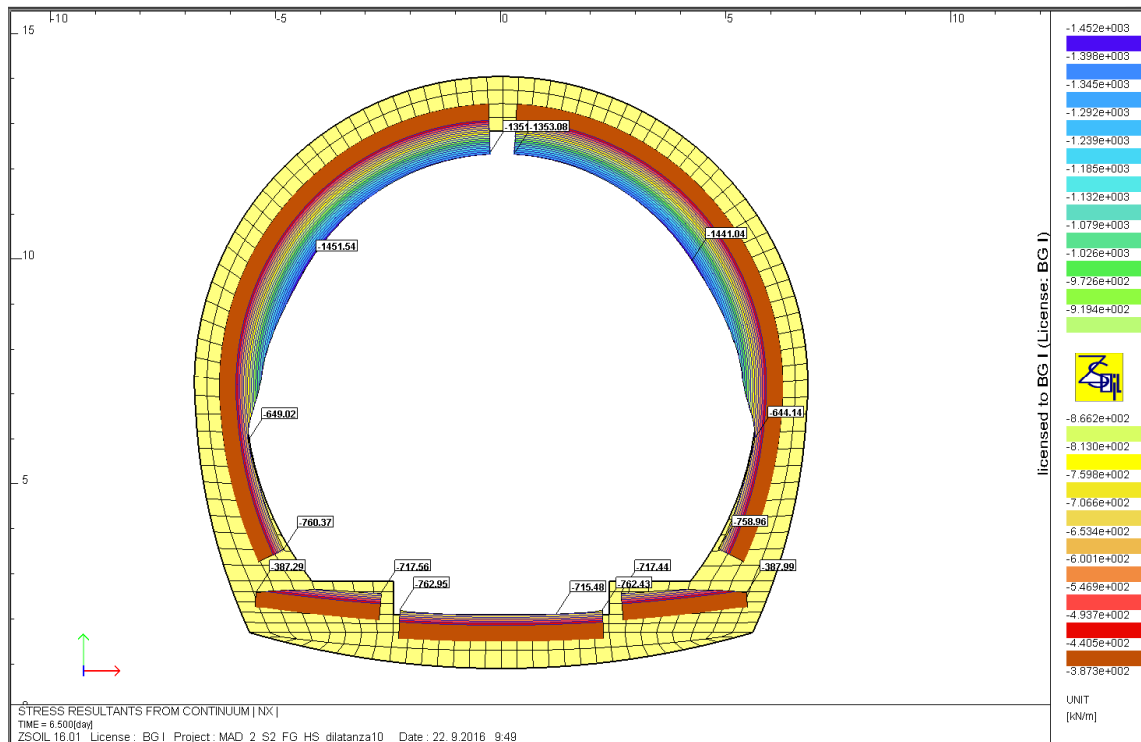


Figura 2: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, FG

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

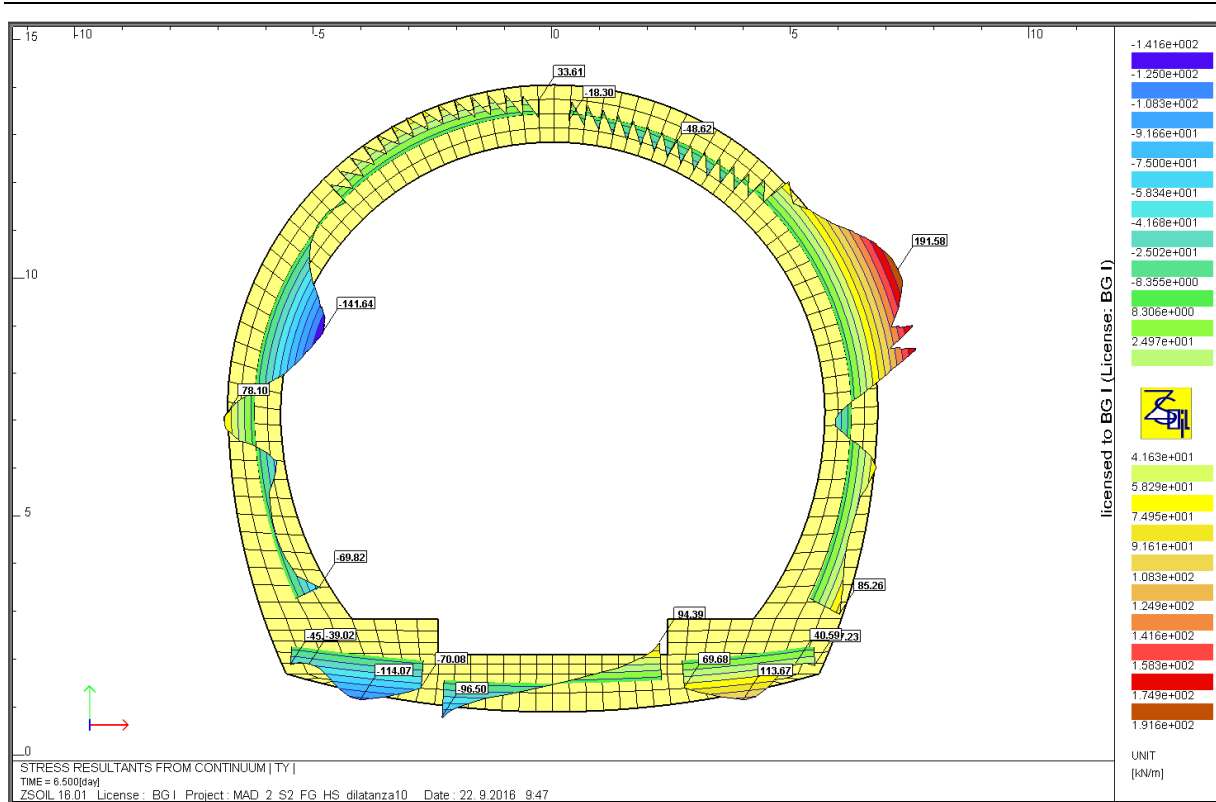


Figura 3: Sollecitazione al taglio, S2, FG

Per calotta e piedritti le sezioni determinanti presentano gli sforzi seguenti:

Combinazione	M <sub>SLS</sub> [kNm]	N <sub>SLS</sub> [kN]	V <sub>SLS</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	V <sub>SLU</sub> [kN]
M <sub>max</sub> , N, V <sub>max</sub>	161,4	1239,0	161,0	209,9	1610,7	209,3
M, N <sub>max</sub> , V	90,4	1451,5	0,0	117,6	1887,0	0,0
M, N <sub>min</sub> , V	38,9	759,0	85,3	50,5	986,6	110,8

Tabella 1: Sollecitazioni per calotta e piedritti, S2, FG

Verifica a pressoflessione

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

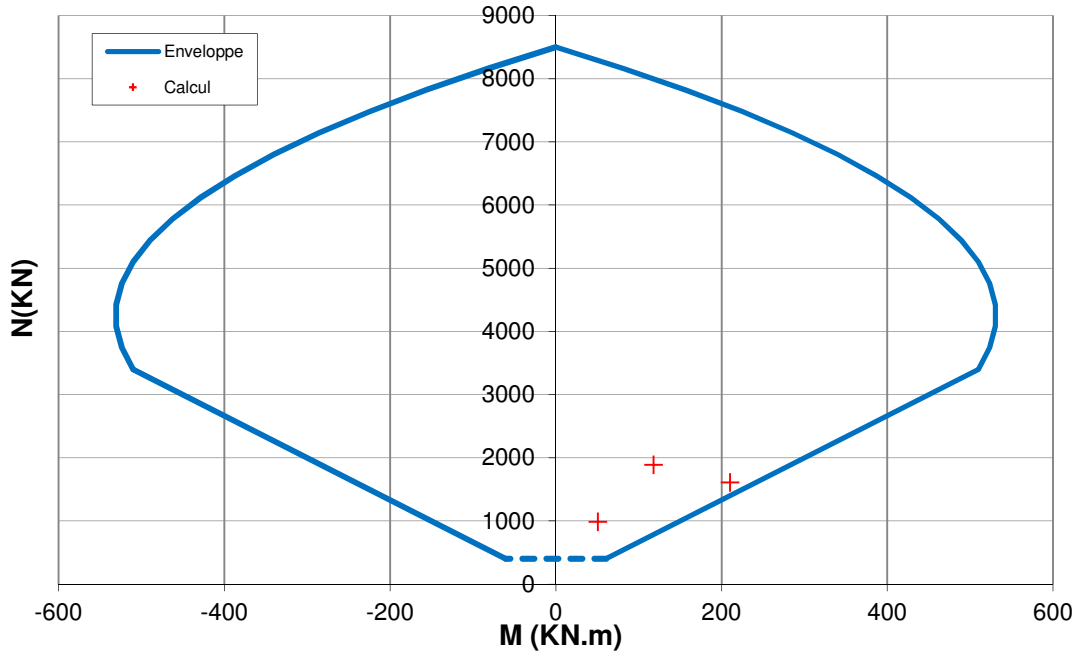


Figura 4: Diagramma di interazione M-N, S2, FG, calotta e piedritti 50 cm

La sezione non armata è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=2.5.

Verifica dell'interazione N+V

Per rivestimenti non armati, la resistenza al taglio si valuta secondo la raccomandazione AFTES GT29 con:

$$\tau_{cp} \leq f_{cvd}$$

- Sollecitazione

$$\tau_{cp} = 1.5 \frac{V_{Ed}}{A_{cc}}$$

$$A_{cc} = b \cdot x$$

x: spessore compresso secondo la figura 5

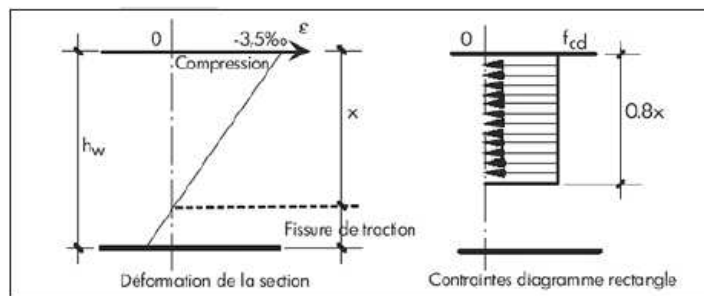


Figura 5: Schema per il calcolo della sollecitazione al taglio

- Resistenza

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd}}$$

se  $\sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim}$

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd} - \left(\frac{(\sigma_{cp} - \sigma_{clim})}{2}\right)^2} \quad \text{se} \quad \sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim}$$

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd} - 2\sqrt{f_{ctd}(f_{ctd} + f_{cd})}$$

V <sub>SLU</sub> [kN]	x [m]	τ <sub>cp</sub> [MPa]	σ <sub>cp</sub> [MPa]	f <sub>ctd</sub> [MPa]	σ <sub>clim</sub> [MPa]	f <sub>cvd</sub> [MPa]	Verifica	FS
209.3	0,30	1,05	5,38	1,15	7,87	2,74	OK	2,61
110.8	0,50	0,33	1,99	1,15	7,87	1,90	OK	5,67

Tabella 2: Verifica del rivestimento al taglio di calotta e piedritti, S2, FG

Per l'arco rovescio le sezioni determinanti presentano gli sforzi seguenti:

Combinazione	M <sub>SLS</sub> [kNm]	N <sub>SLS</sub> [kN]	V <sub>SLS</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	V <sub>SLU</sub> [kN]
M <sub>max</sub> ,N,V	-153,0	717,6	70,1	-198,9	932,8	91,1
M,N <sub>max</sub> ,V	72,9	763,0	96,5	94,8	991,8	125,5
M,N <sub>min</sub> ,V	65,0	387,3	45,2	84,5	503,5	58,8
M,N,V <sub>max</sub>	-36,7	600,1	114,1	-47,6	780,1	148,3

Tabella 3: Sollecitazioni per l'arco rovescio, S2, FG

Verifica a pressoflessione

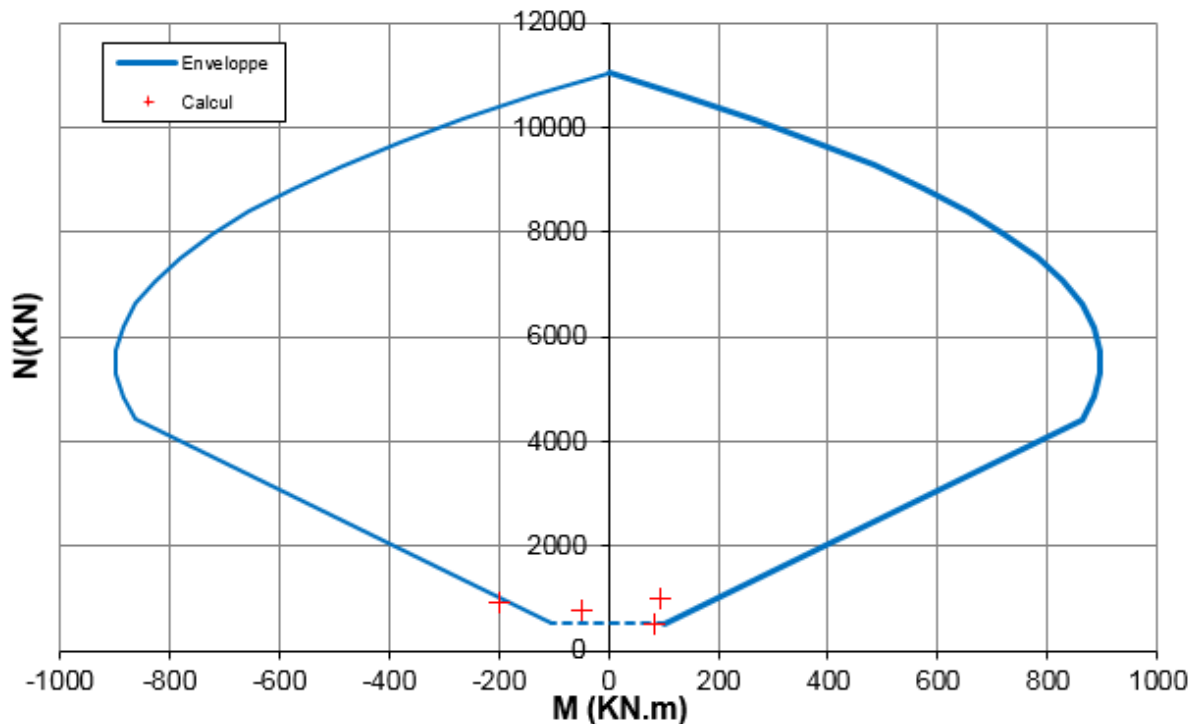


Figura 6: Diagramma di interazione M-N, S2, FG, arco rovescio 65 cm

Si vede che la sezione determinante M<sub>max</sub>, N, V esce leggermente dal diagramma di interazione. Tuttavia, come da raccomandazione AFTES sul cls non armato, il diagramma di interazione è ridotto per il criterio della profondità della fessura superiore alla metà dello

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

spessore del rivestimento ( $e > 0.3 h_w$ ). Nelle stesse raccomandazioni si dice che questo criterio può essere reso meno severo in caso di sezioni massive con spessore superiore a 50 cm, considerata anche la presenza della platea di riempimento di spessore notevole che non espone le fessure all'intradosso. Portando il criterio a  $e > 0.5 h_w$ , la verifica è soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a  $FS=4.5$ .

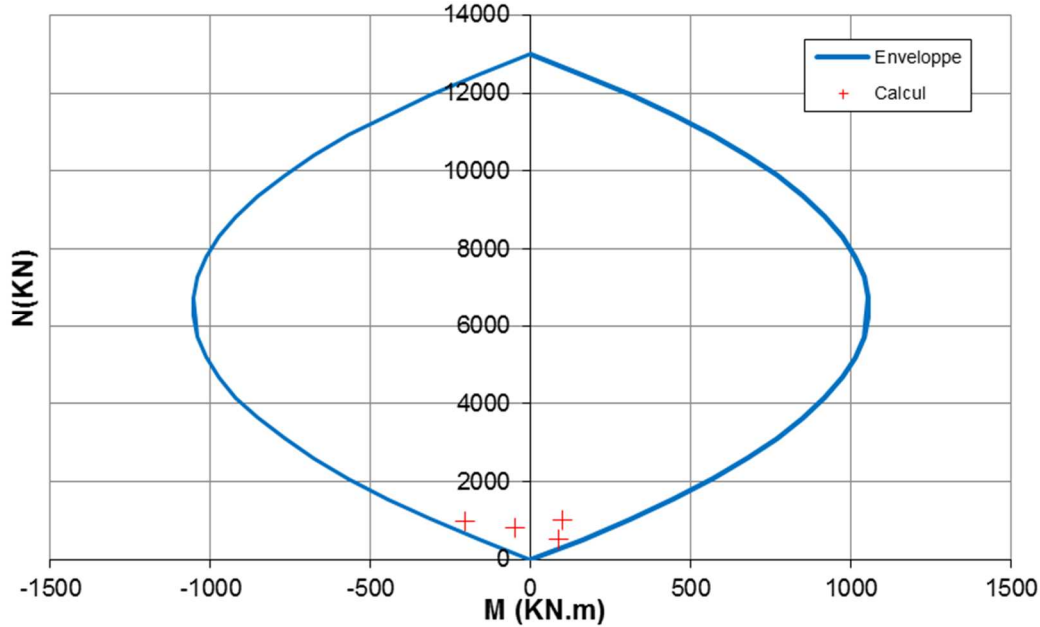


Figura 7: Diagramma di interazione M-N, S2, FG, arco rovescio 65 cm, senza riduzione della profondità della fessura

Verifica dell'interazione N+V

$V_{SLU}$ [kN]	x [m]	$\tau_{cp}$ [MPa]	$\sigma_{cp}$ [MPa]	$f_{ctd}$ [MPa]	$\sigma_{clim}$ [MPa]	$f_{cvd}$ [MPa]	Verifica	FS
91,1	0,49	3,34	1,15	7,87	2,27	OK	4,64	0,49
125,5	0,33	1,73	1,15	7,87	1,82	OK	5,54	0,33
58,8	0,22	1,28	1,15	7,87	1,67	OK	7,45	0,22
148,3	0,34	1,20	1,15	7,87	1,64	OK	4,80	0,34

Tabella 4: Verifica del rivestimento al taglio dell'arco rovescio, S2, FG

Conclusione

La sezione in calcestruzzo non armato è sufficiente a riprendere i carichi statici.

**6.2.2 Depositi glaciali indifferenziati**

Sollecitazioni:

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

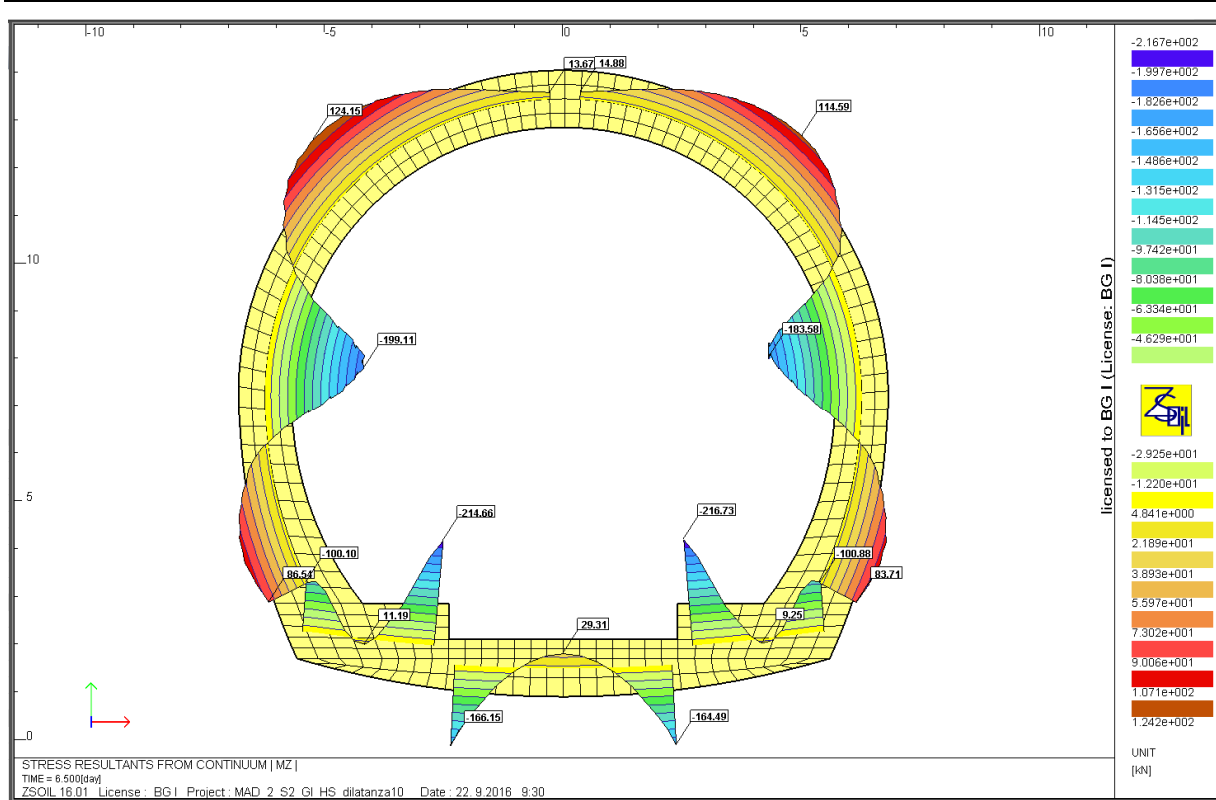


Figura 8: Sollecitazione al momento, S2, GI

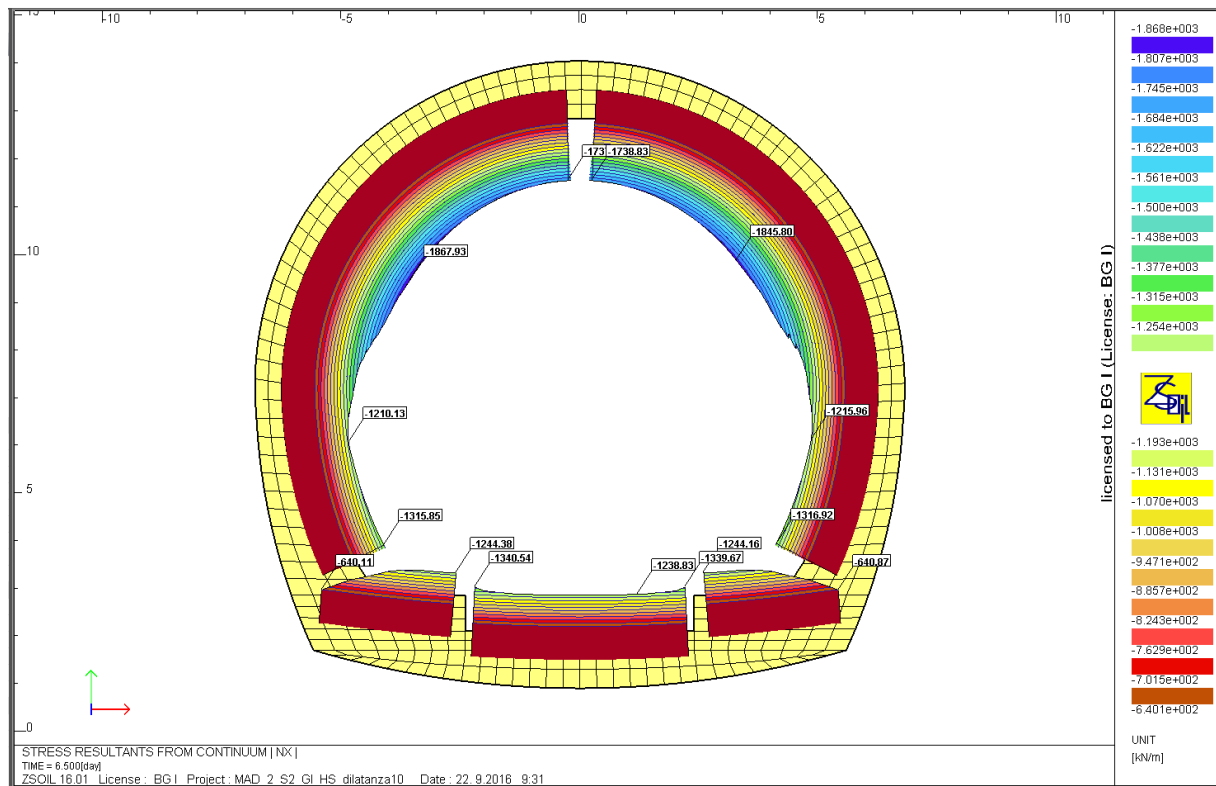


Figura 9: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GI

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

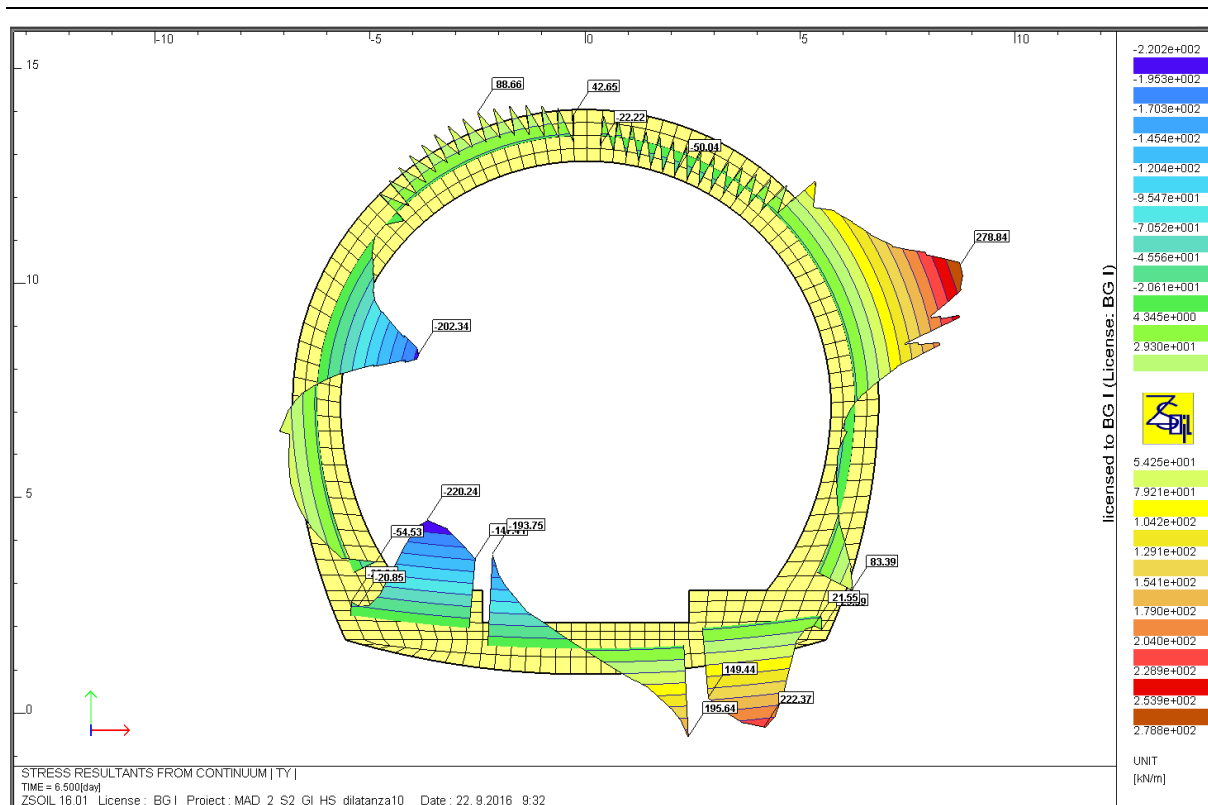


Figura 10: Sollecitazione al taglio, S2, GI

Per calotta e piedritti le sezioni determinanti presentano gli sforzi seguenti:

Combinazione	M <sub>SLS</sub> [kNm]	N <sub>SLS</sub> [kN]	V <sub>SLS</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	V <sub>SLU</sub> [kN]
M <sub>max</sub> ,N,V	-199,1	1500,0	0,0	-258,8	1950,0	0,00
M,N <sub>max</sub> ,V <sub>max</sub>	107,1	1867,9	202,3	139,2	2428,3	263,0
M,N <sub>min</sub> ,V	86,5	1315,9	54,5	112,5	1710,6	70,9

Tabella 5: Sollecitazioni per calotta e piedritti, S2, GI

Verifica a pressoflessione



Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

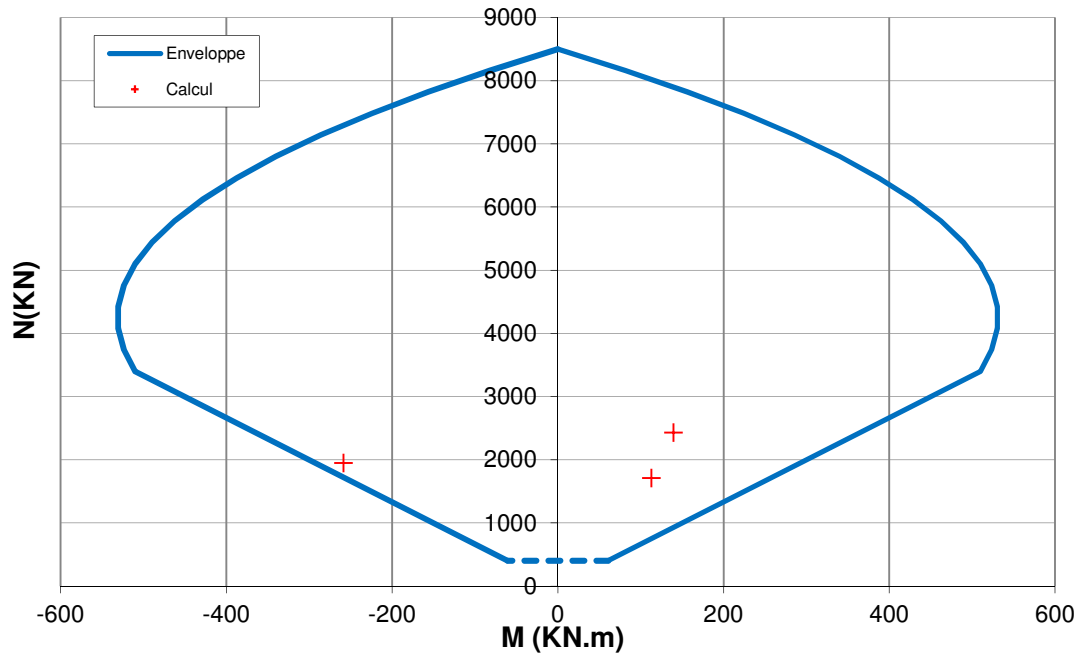


Figura 11: Diagramma di interazione M-N, S2, GI, calotta e piedritti 50 cm

La sezione non armata è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=2.0.

Verifica dell'interazione N+V

$V_{SLU}$ [kN]	x [m]	$\tau_{cp}$ [MPa]	$\sigma_{cp}$ [MPa]	$f_{ctd}$ [MPa]	$\sigma_{clim}$ [MPa]	$f_{cvd}$ [MPa]	Verifica	FS
263,0	0,48	0,82	5,04	1,15	7,87	2,67	OK	3,26
70,9	0,46	0,23	3,71	1,15	7,87	2,36	OK	10,24

Tabella 6: Verifica del rivestimento al taglio per calotta e piedritti, S2, GI

Per l'arco rovescio le sezioni determinanti presentano gli sforzi seguenti:

Combinazione	$M_{SLS}$ [kNm]	$N_{SLS}$ [kN]	$V_{SLS}$ [kN]	$M_{SLU}$ [kNm]	$N_{SLU}$ [kN]	$V_{SLU}$ [kN]
$M_{max}, N, V$	-216,7	1244,4	145,4	-281,7	1617,7	189,0
$M, N_{max}, V$	-164,5	1340,5	193,8	-213,8	1742,7	251,9
$M, N_{min}, V$	-100,1	640,1	20,9	-130,1	832,1	27,1
$M, N, V_{max}$	0,0	1070,0	222,4	0,0	1391,0	289,1

Tabella 7: Sollecitazioni per l'arco rovescio, S2, GI

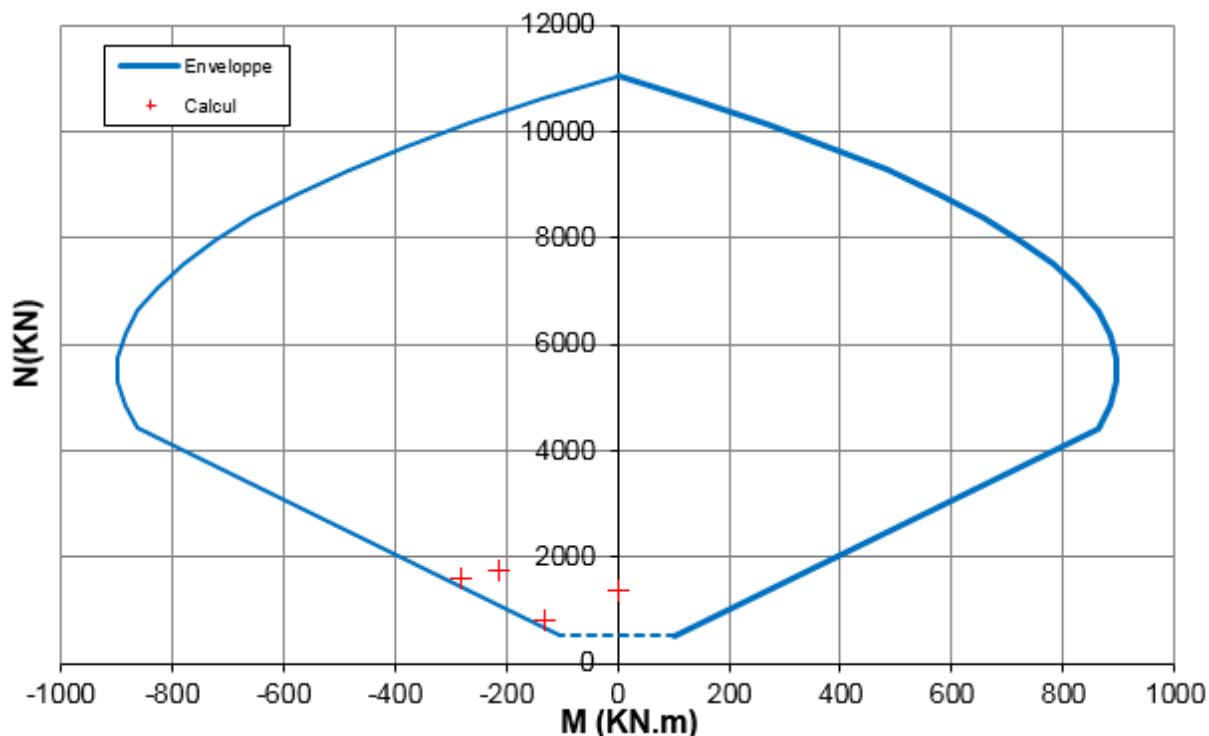


Figura 12: Diagramma di interazione M-N, S2, GI, arco rovescio 65cm

La sezione non armata è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=4.7.

Verifica dell'interazione N+V

V <sub>SLU</sub> [kN]	x [m]	$\tau_{cp}$ [MPa]	$\sigma_{cp}$ [MPa]	$f_{ctd}$ [MPa]	$\sigma_{clim}$ [MPa]	$f_{cvd}$ [MPa]	Verifica	FS
189,0	0,38	0,75	4,29	1,15	7,87	2,50	OK	3,33
251,9	0,51	0,75	3,45	1,15	7,87	2,30	OK	3,07
27,2	0,42	0,10	1,97	1,15	7,87	1,89	OK	19,59
289,1	0,65	0,67	2,14	1,15	7,87	1,94	OK	2,91

Tabella 8: Verifica del rivestimento al taglio per l'arco rovescio, S2, FG

Conclusione

La sezione in calcestruzzo non armato è sufficiente a riprendere i carichi statici.

6.3 Sezione di innesto

6.3.1 Modello di calcolo

Si è effettuato un modello 2D con il software Zsoil, che tiene conto del calcolo 3D effettuato per i sostegni (esposto nella relazione PRV\_C3A\_7541\_26-48-21) mediante il tasso di deconfinamento (si veda il § 6.3.2).

La modellazione in 2D del rivestimento definitivo è necessaria per le seguenti ragioni:

- Il modello 2D permette la discretizzazione in una maglia più fine per gli elementi volumici costituenti il rivestimento e quindi dei risultati di maggiore precisione.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Integrare tale maglia nel modello 3D significherebbe incrementare notevolmente i numeri di nodi e di elementi e quindi i tempi di calcolo.

- Nel modello 3D è impossibile la rappresentazione dei diagrammi degli sforzi interni per gli elementi volumici.

Si considera una sezione di calcolo a circa 2/3 della lunghezza totale della sezione di innesto, a partire dalla sezione corrente (ovvero ad 1/3 della lunghezza totale partendo dalla biforcazione).

Quest'ubicazione permette di porsi a sufficiente distanza dalla biforcazione per non risentire di effetti 3D dovuti alla presenza del setto roccioso e delle due gallerie ed in particolare della sezione corrente con conci prefabbricati realizzata in precedenza.

Infatti, una sezione di calcolo in corrispondenza del massimo allargamento risulterebbe eccessivamente conservativa in quanto significherebbe avere tale geometria per una lunghezza almeno pari ad almeno 2D in entrambe le direzioni mentre in realtà il setto roccioso e gli anelli di conci completi immediatamente successivi alla biforcazione consentono un riporto dei carichi dal rivestimento della sezione di innesto (compresi i conci che si conservano) verso questi elementi. Inoltre, nell'altra direzione la sezione si riduce.

Ubicando la sezione a 2/3 si consente invece una rappresentazione più realistica e "media" degli sforzi presenti nel rivestimento.

Come si può vedere nelle figure seguenti, nel modello 2D vengono modellate tutte le fasi di scavo che avvengono in quella sezione, compresa quindi la messa in opera dei sostegni prima della messa in opera del rivestimento definitivo. Il tasso di deconfinamento alla messa in opera del sostegno viene determinato dal modello 3D come descritto nel seguente paragrafo.

Per il cls proiettato anche in questo caso sono utilizzati degli elementi "BEAM", con i parametri seguenti:

$$t_{eq} = 0.20m$$
$$E_{eq} = 7000 MPa$$

Per i bulloni si sono utilizzati degli elementi "NAIL" con i parametri seguenti:

- Bullone

$$E = 200000 MPa$$
$$\phi = 37 mm$$

- Interfaccia

$$q = 1500 kPa$$
$$\phi = 52 mm$$

Il rivestimento gettato in opera ed i conci sono rappresentati come elementi volumici del tipo "CONTINUUM FOR STRUCTURES". In modo conservativo i conci sono stati rappresentati come elementi continui, senza discontinuità in corrispondenza dei giunti. Si veda la relazione PRV\_C3A\_3950\_26-19-00 per maggiori dettagli sulla modellazione dei giunti.

I conci prefabbricati hanno i seguenti parametri (modello elastico lineare):

$$t = 450 mm$$
$$E = 36000 MPa \text{ (secondo Eurocodice 2)}$$
$$\gamma = 25 \frac{kN}{m^3}$$

Il rivestimento gettato in opera presenta i seguenti parametri (modello elastico lineare):

$$E = 33000 MPa \text{ (secondo Eurocodice 2)}$$

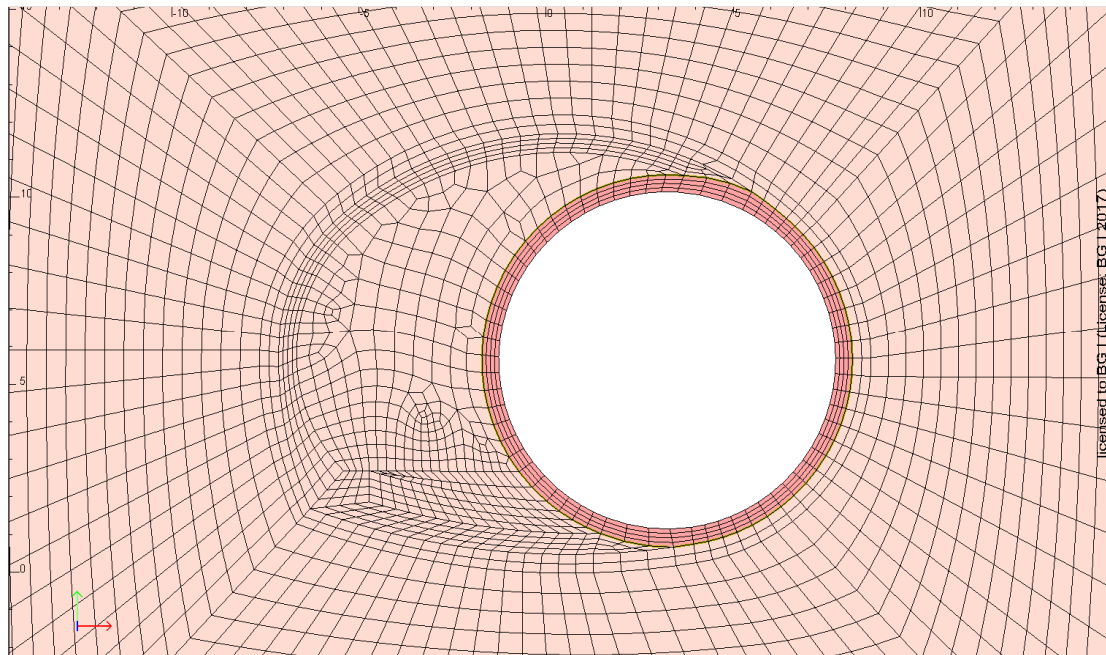
Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

$$\gamma = 25 \frac{kN}{m^3}$$

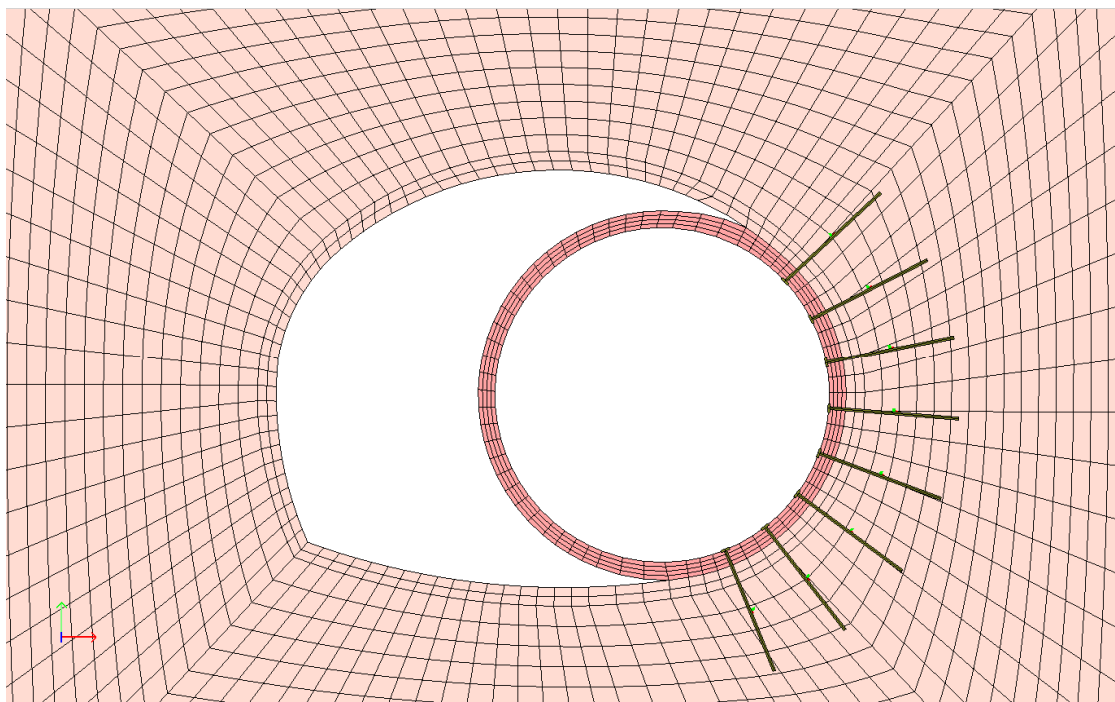
Si è posta un'interfaccia tra ammasso roccioso e concii che integra il vuoto anulare riempito con pea gravel.

Si è posta inoltre un'interfaccia tra ammasso roccioso e rivestimento definitivo.

Nelle figure seguenti si illustrano le fasi di scavo principali.

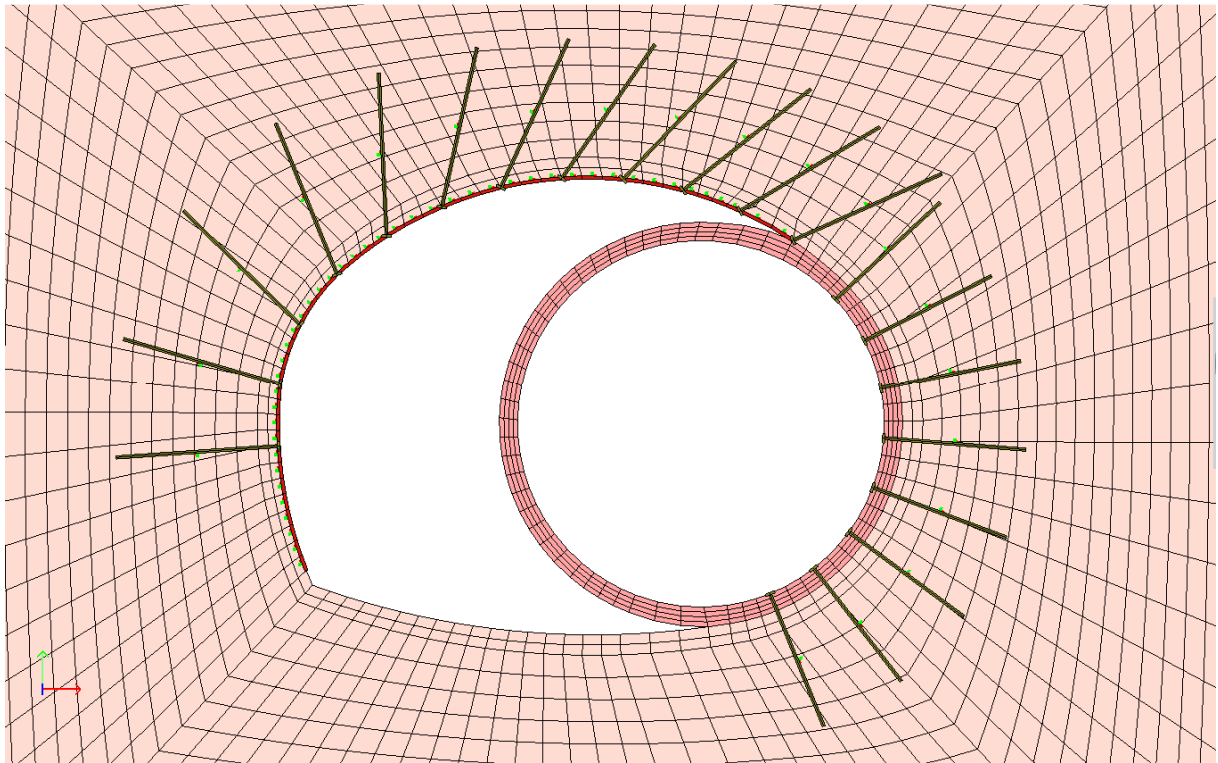


**Figura 13: Modello 2D: scavo della sezione corrente con TBM scudata e messa in opera dei concii**

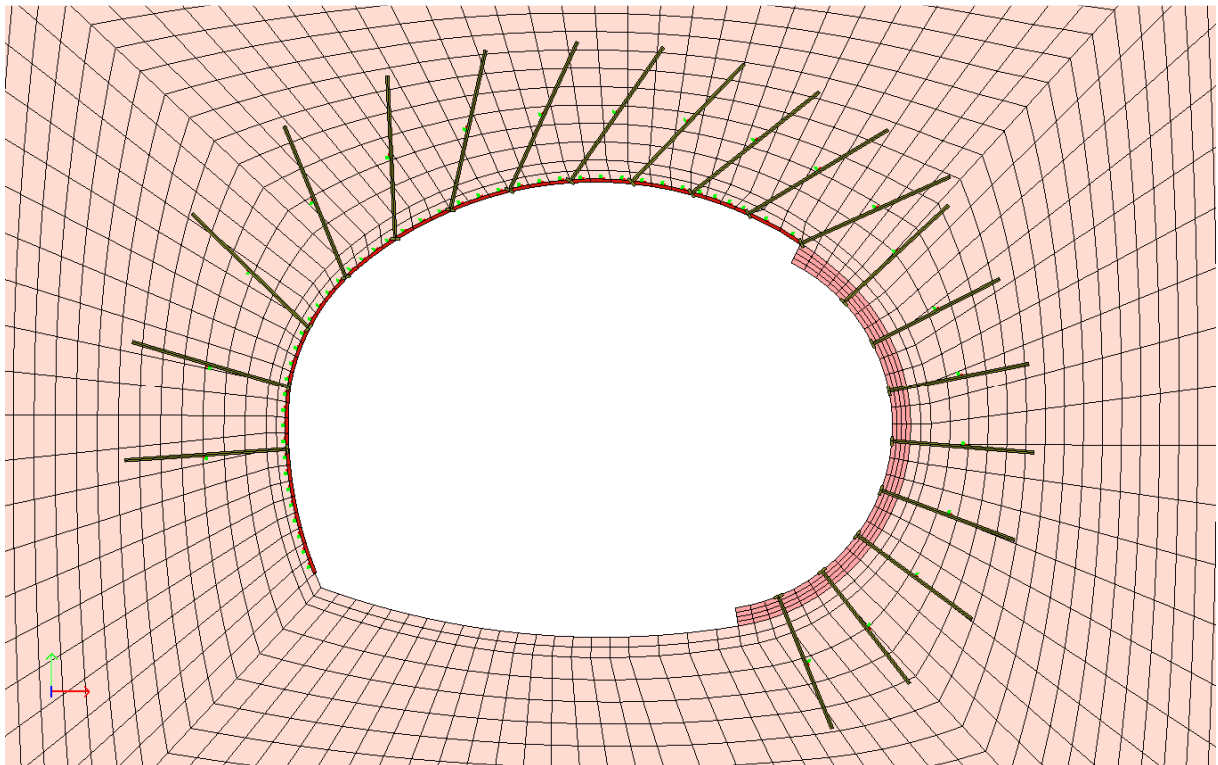


**Figura 14: Modello 2D: stabilizzazione dei concii rimasti con bullonature e scavo della parte da allargare senza rimozione dei concii**

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo



**Figura 15: Modello 2D: attivazione dei sostegni nell'allargamento**



**Figura 16: Modello 2D: rimozione dei conchi lato allargamento**



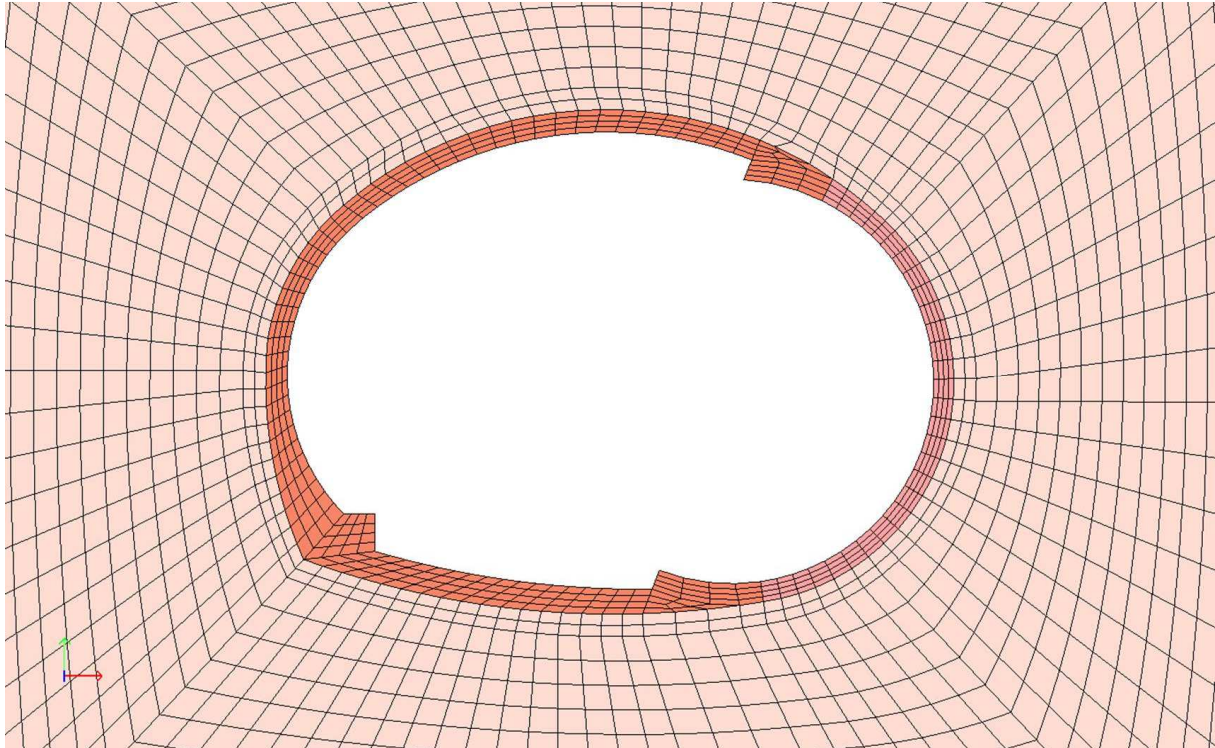


Figura 17: Modello 2D: attivazione del rivestimento definitivo e disattivazione dei sostegni sia lato allargamento che lato conci

### 6.3.2 Determinazione del tasso di deconfinamento dal modello 3D

Profilo di spostamenti ottenuto nel modello 3D:

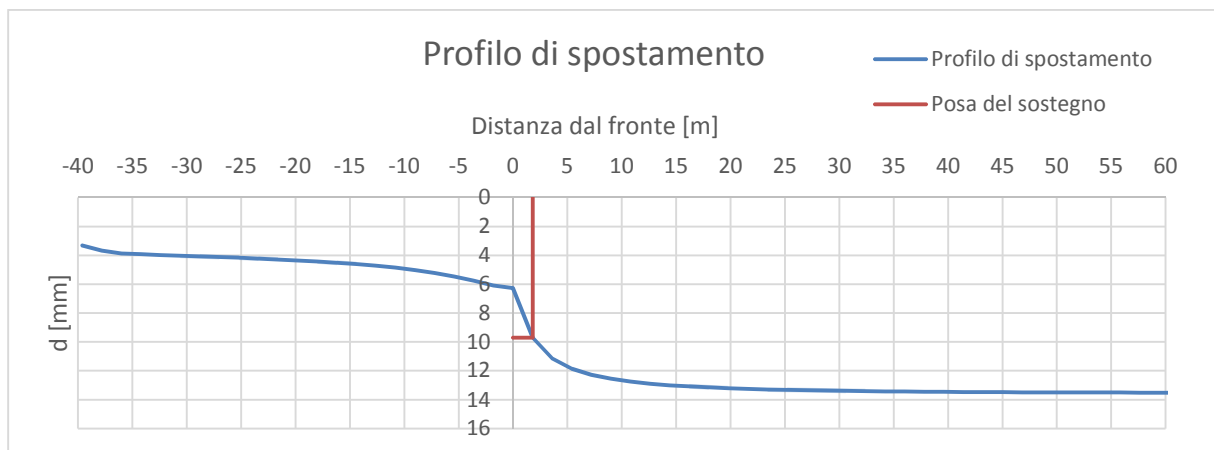


Figura 18: Profilo di spostamento ottenuto nel modello 3D nella sezione di calcolo

La posa del sostegno avviene a 1,8 m dal fronte, che corrisponde a uno spostamento di 9,7 mm.

Il tasso di deconfinamento è determinato osservando la pressione alla quale corrispondono 9,7 mm di spostamento sulla curva caratteristica di comportamento della sezione:

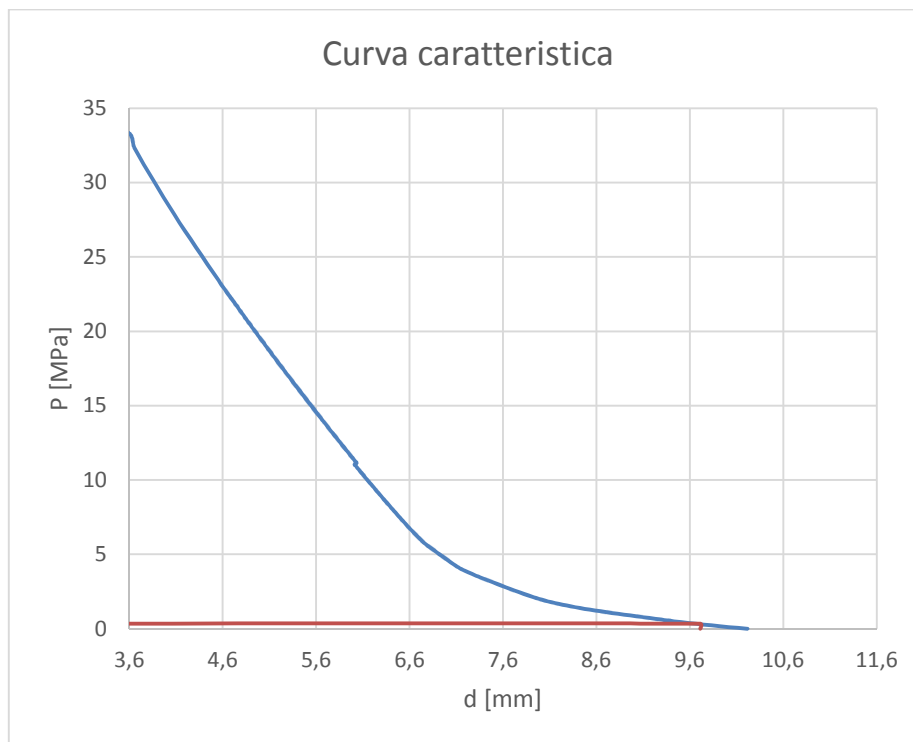


Figura 19: Curva caratteristica ottenuta nel modello 3D nella sezione di calcolo

La pressione corrispondente è pari a 0,33 MPa, il tasso di deconfinamento è quindi:

$$\lambda = \frac{(p_o - p_i)}{p_o} = \frac{33,45 \text{ MPa} - 0,33 \text{ MPa}}{33,45 \text{ MPa}} = 0,99$$



Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

6.3.3 Sollecitazioni nel rivestimento gettato in opera

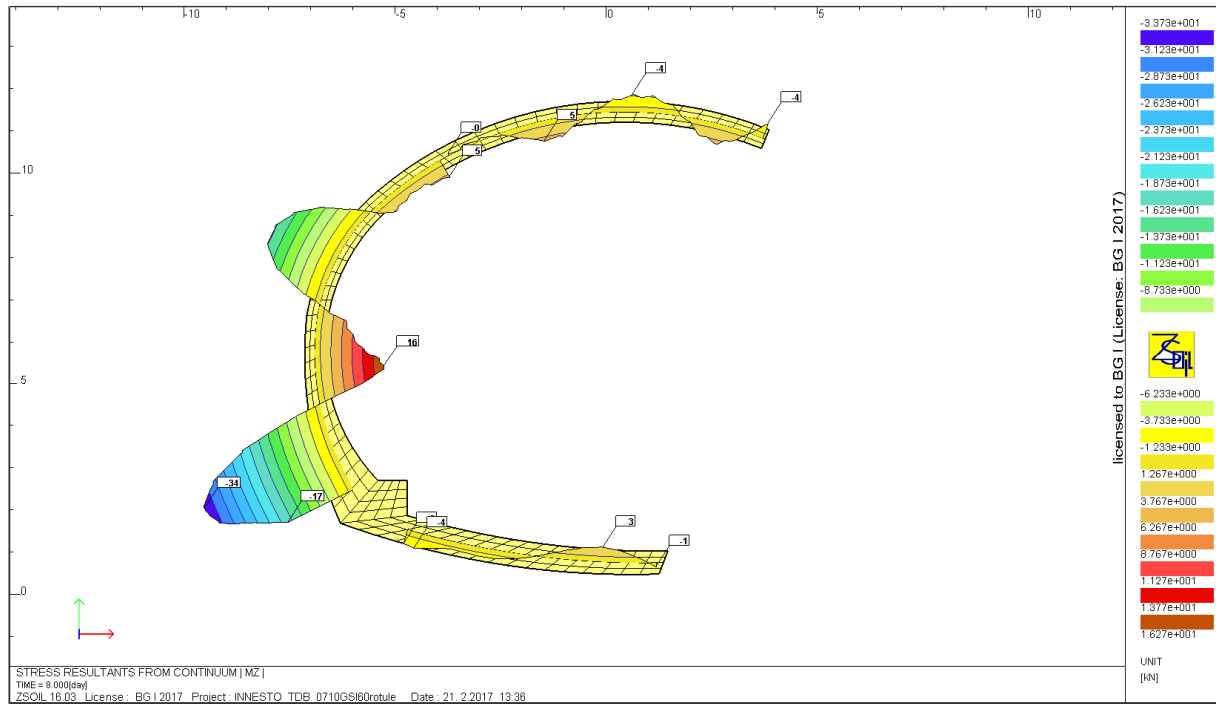


Figura 20: Sollecitazione a momento, rivestimento sezione di innesto

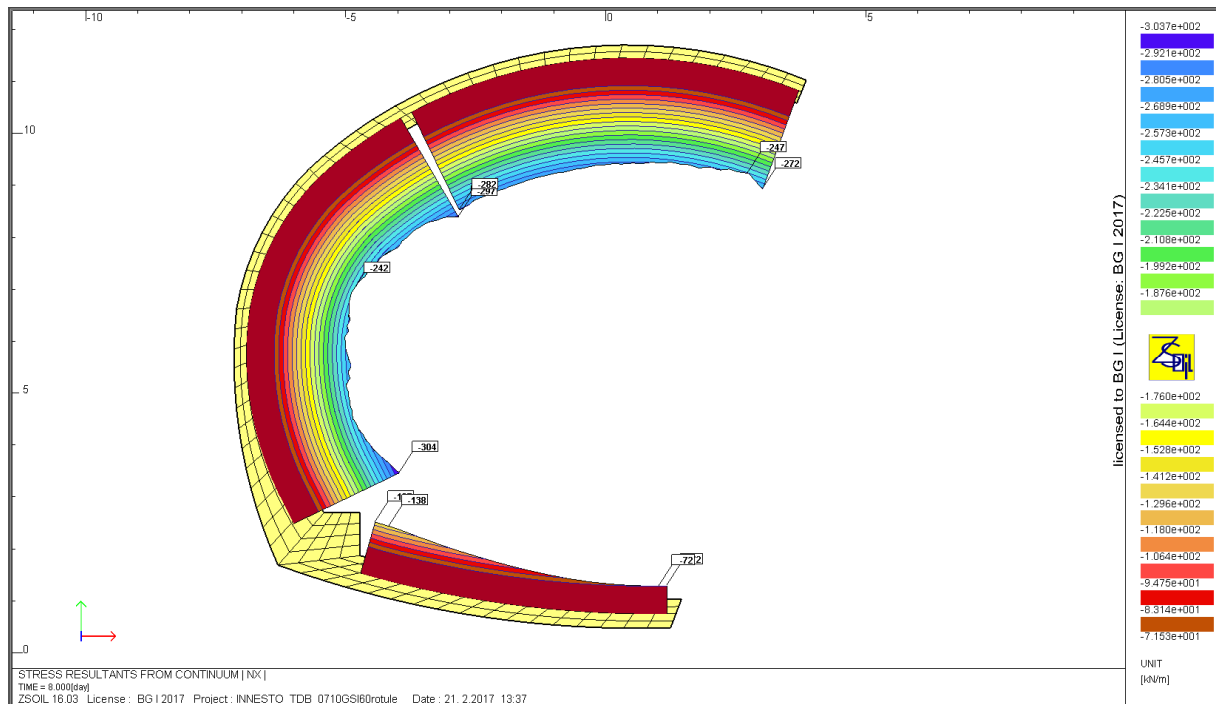


Figura 21: Sollecitazione a sforzo normale, rivestimento sezione di innesto

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

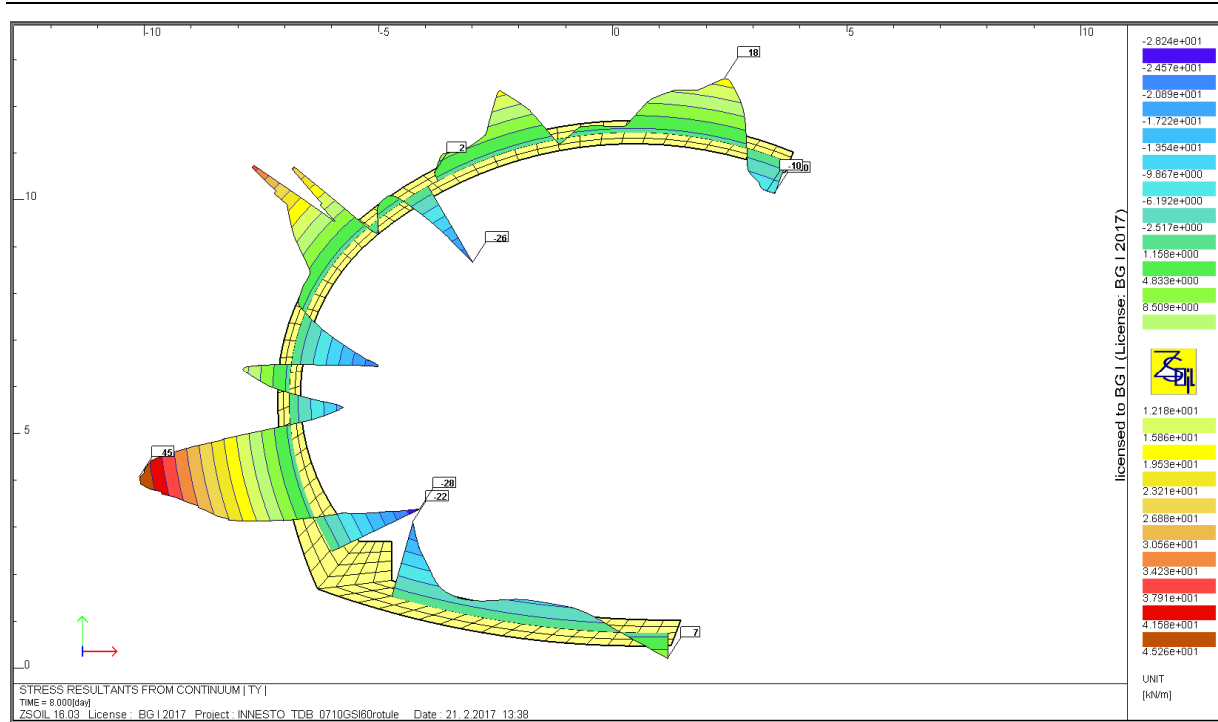


Figura 22: Sollecitazione a taglio, rivestimento sezione di innesto

6.3.4 Verifiche del rivestimento gettato in opera



### Calcul de la courbe d'interaction du béton non fibré

selon les recommandations de l'AFTES "utilisation du béton non armé en tunnel"  
 et "compatibilité avec les Eurocodes"

BG - 2014

#### Données

Largeur section $b$ =	1 m
Epaisseur section $h_w$ =	0,5 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck}$ =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	0,85
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c$ =	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU}$ =	1,3

#### Résultats

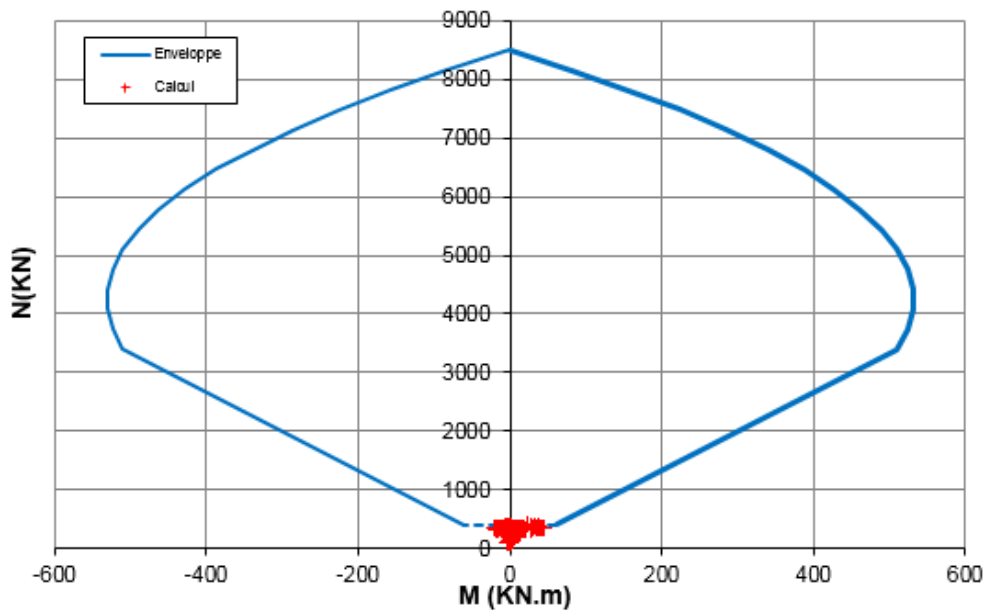


Figura 23: Diagramma di interazione M-N, sezione di innesto, 50cm

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), nessuna verifica particolare dev'essere condotta:  $FS \gg 1$ .

#### Verifica dell'interazione N+V

$V_{SLU}$ [kN]	$x$ [m]	$\tau_{cp}$ [MPa]	$\sigma_{cp}$ [MPa]	$f_{ctd}$ [MPa]	$\sigma_{clim}$ [MPa]	$f_{cvd}$ [MPa]	Verifica	FS
58,84	0,50	0,18	0,66	1,15	7,87	1,44	OK	6,51

Tabella 9: Verifica del rivestimento al taglio per la sezione di innesto

#### Conclusioni

Le verifiche statiche sono soddisfatte in assenza d'armatura.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

6.3.5 Sollecitazioni sui conci prefabbricati

Le sollecitazioni sui conci prefabbricati sono mostrate nelle figure seguenti.



Figura 24: Sollecitazione a momento, conci nella sezione di innesto

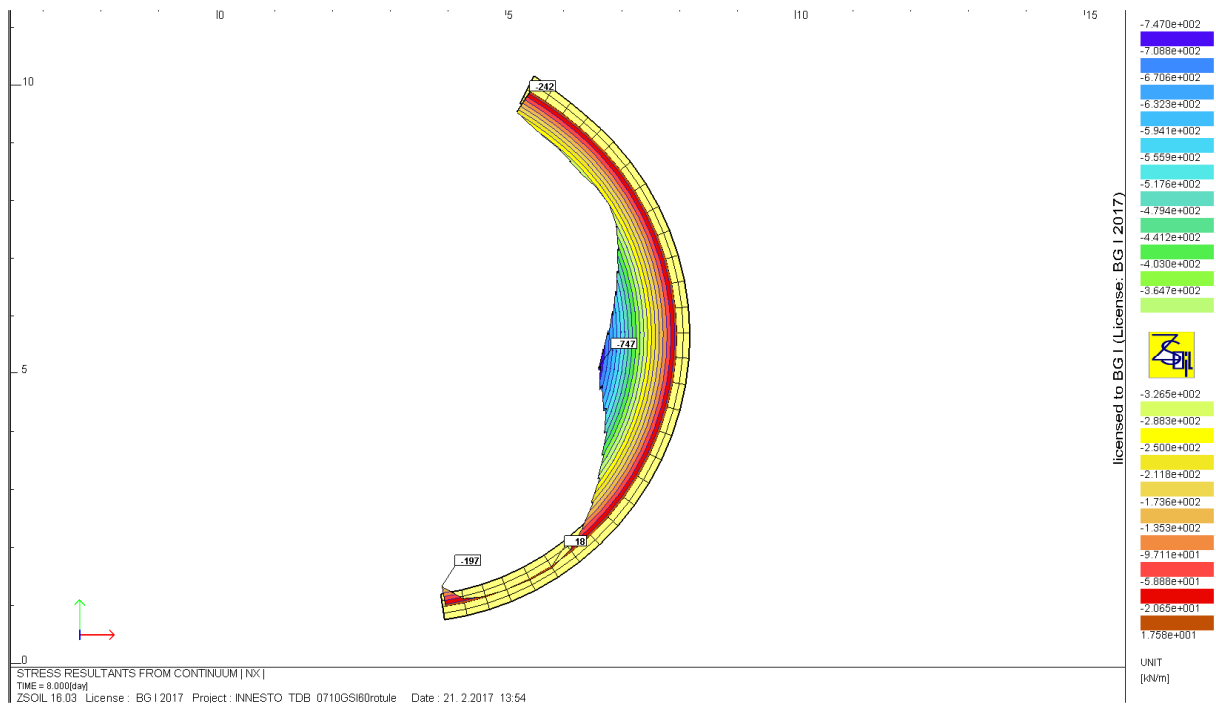


Figura 25: Sollecitazione a sforzo normale, conci nella sezione di innesto

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

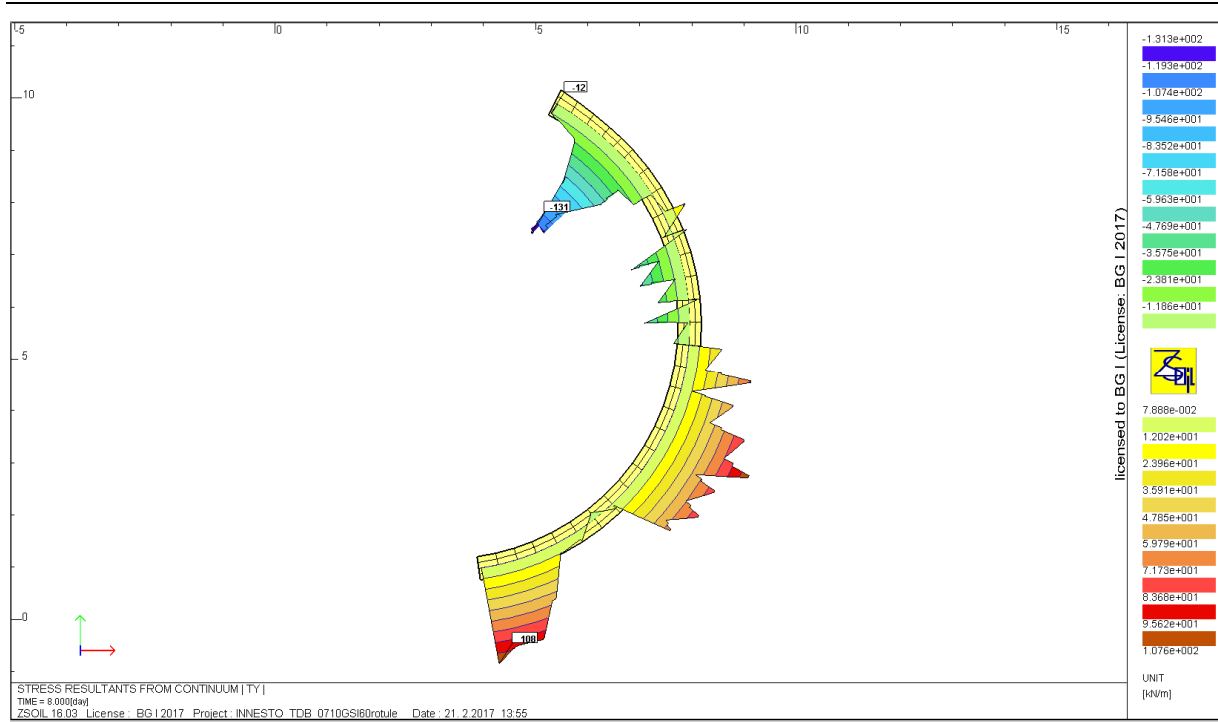


Figura 26: Sollecitazione a taglio, conci nella sezione di innesto

6.3.6 Verifica dei conci prefabbricati

Pressoflessione

La verifica a pressoflessione per i conci prefabbricati viene mostrata nella figura seguente.



Calcul de la courbe d'interaction du béton armé  
 selon l'Eurocode 2  
 BG Lyon - 2009

Données

<b>Section</b>					
Largueur section b =	1	m			
Epaisseur section hw =	0,45	m			
Section	0,45	m <sup>2</sup>			
<b>Béton</b>					
Résistance du béton fck =	45	MPa			
yc =	1,5				
<b>Acier</b>					
σe	450	MPa			
Es	200000	MPa			
ys =	1,15				
nbre barres	1	2	3	4	
diamètre	6,67	6,67	0	0	mm
enrobage à l'axe	14	14	0	0	m
section (cm <sup>2</sup> )	0,057	0,4	0	0	cm <sup>2</sup>
	10,26	10,26			

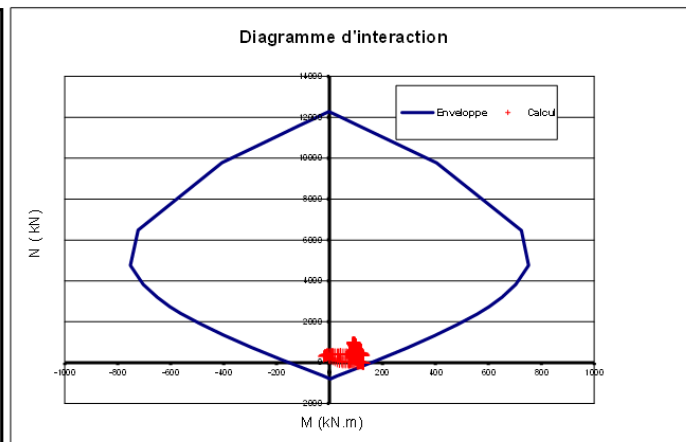


Figura 27: Verifica dei conci a pressoflessione

FS=1.18

### Taglio

Lo sforzo di taglio massimo è pari a 131 kN. Il calcolo è effettuato a SLU con  $V_{ed,max}=170.3$  kN/m, con lo sforzo normale concomitante pari a 242 kN/m.

Calcolo dello sforzo di taglio  $V_{Rd,c}$  in assenza di armatura a taglio (formulazione secondo l'Eurocodice 2 equivalente alle NTC 2008):

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d \quad \text{con } V_{Rd,c} > \left[ v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d$$

In questa formula, si adottano i valori seguenti:

- $C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = 0,12$
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$  con  $d = 400$  mm  $\Rightarrow$  si considera  $k = 1.707$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$  con  $A_{sl} = 10,26$  cm<sup>2</sup>/m et  $b_w = 1,000$  m  $\Rightarrow$  si considera  $\rho_l = 0,0026$
- $f_{ck} = 45$  MPa
- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 0.54$  MPa  $\leq 0.2 f_{cd}$
- $v_{min} = \frac{0.035}{\gamma_c} k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0.52$

Si ottiene dunque  $V_{Rd,c} = 240$  kN/ml  $> V_{ed}$

$\Rightarrow$  nessuna armatura a taglio è richiesta.

Fattore di sicurezza=1.4.

### Giunti tra conci e tra conci e parte gettata in opera

Si verifica per le due coppie determinanti:  $M_{max}=100$  kNm,  $N=0$  kN (130, 0 a SLU) e  $N_{max}=747$  kN,  $M=60$  kNm (932, 78 a SLU).

Si hanno quindi le tensioni seguenti nella parte compressa del giunto:

$$\text{Coppia } M_{max}, N: \sigma_{max} = \frac{M_{max} h}{I} \frac{1}{2} = 6.3 \text{ MPa} < f_{cd} = 25.5 \text{ MPa}$$

$$\text{Coppia } M, N_{max}: \sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max} h}{I} \frac{1}{2} = 6.9 \text{ MPa} < f_{cd} = 25.5 \text{ MPa} \text{ con } t_{contatto}=297 \text{ mm}$$

Per quanto riguarda la connessione tra la parte prefabbricata (conci) e la parte gettata in opera, il cls gettato in opera si appoggia contro i conci che si sono mantenuti. Questi ultimi si appoggiano in parte bassa sull'arco rovescio (parte gettata in opera). Ci si trova nella stessa configurazione di una volta gettata su due murette, con giunti strutturali in direzione longitudinale. La sezione di attacco tra getto in opera e conci prefabbricati è equivalente ai giunti tra un concio e l'altro. Peraltro nel diagramma delle sollecitazioni si vede che il momento è quasi nullo in corrispondenza dei giunti e si dispone inoltre di una superficie di contatto di 45 cm, quindi la verifica è soddisfatta, siccome è soddisfatta nel caso dei giunti tra conci con spessore inferiori e sollecitazioni più importanti.

## 7. Verifica dei rivestimenti al fuoco

Come definito nella relazione PRV\_C3A\_7540\_26-48-21, le strutture in galleria (lato condotto di estrazione fumi) devono rispettare le seguenti curve di incendio:

- ISO 834 4 ore
- HC 2 ore
- RWS 2 ore

Le curve temperatura-tempo di incendio sono rappresentate in figura seguente.

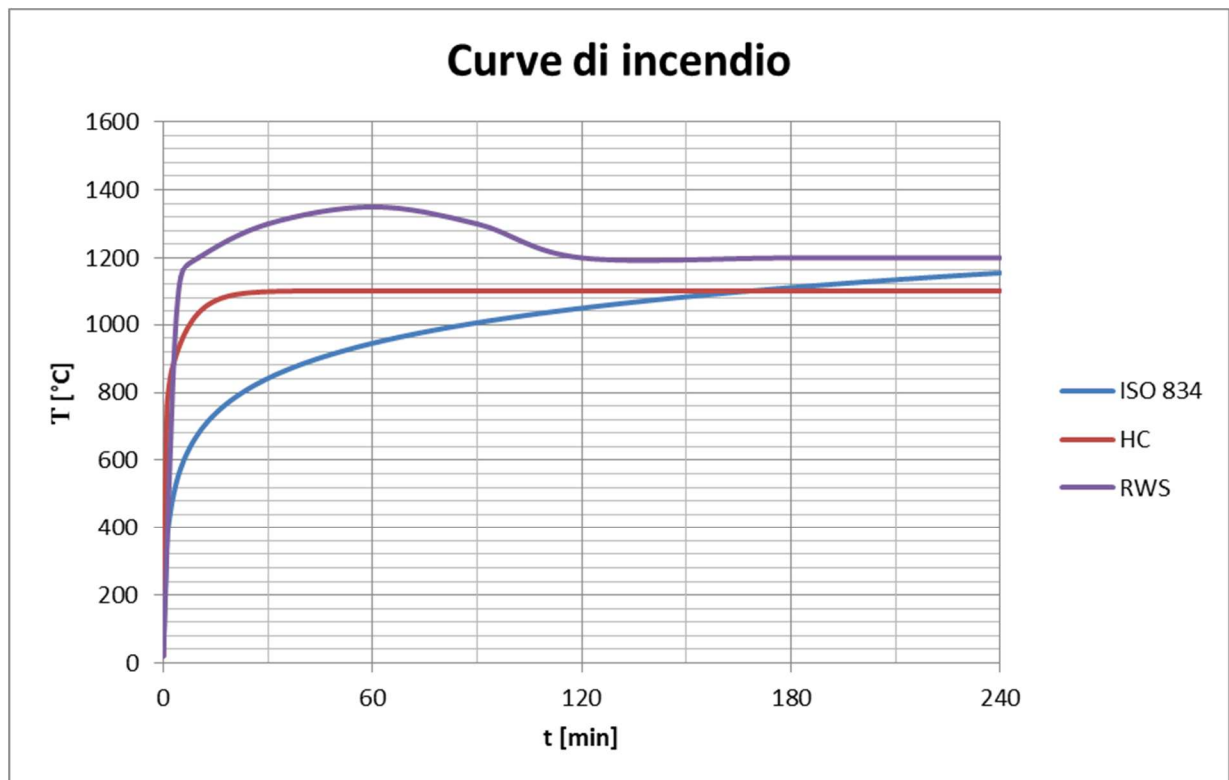


Figura 28: Curve temperatura-tempo di incendio

### 7.1 Metodologia

La verifica al fuoco è effettuata in conformità all'Eurocodice 2 e secondo la metodologia proposta dal CETU nella raccomandazione denominata "Comportement au feu des tunnels routiers".

L'approccio adottato segue i passi seguenti (si fa riferimento ai paragrafi della raccomandazione del CETU su cui ci si è basati):

1. Calcolo termico per determinare il campo di temperatura della sezione esposta al fuoco (secondo allegato C);
2. Calcolo delle proprietà meccaniche della sezione riscaldata ed in particolare la dilatazione termica (secondo l'allegato E.1.3, § a e b);



3. Calcolo delle sollecitazioni indirette legate all'incendio attraverso un calcolo numerico alle reazioni iperstatiche (SCIA) per determinare gli sforzi termici nel rivestimento;
4. Verifica delle sezioni riscaldate a SLU secondo NTC 2008.

Come nel caso delle verifiche statiche, tale approccio è basato su un modello lineare, sia per quanto riguarda la determinazione delle sollecitazioni meccaniche che la verifica di resistenza della struttura. L'utilizzo di modelli non lineari porta a risultati meno conservativi.

Per il calcolo termico e delle dilatazioni termiche indotte si sono utilizzati dei fogli di calcolo elaborati internamente da BG sulla base dei paragrafi delle raccomandazioni del CETU citati. Le equazioni alla base di questi fogli ed il dettaglio di tali calcoli sono mostrati in allegato alla relazione PRV\_C3A\_3950\_26-19-00 per un caso rappresentativo dei calcoli effettuati in entrambe le relazioni (3949 e 3950). Tale foglio è stato validato durante la sua applicazione per altri progetti realizzati da BG in Francia.

Per quanto riguarda l'uso di SCIA si veda la guida all'utilizzo.

### **7.1.1 Spalling**

Per tenere conto della possibilità di spalling del calcestruzzo, considerando cioè la possibilità di distacco di porzioni di calcestruzzo con conseguente riduzione della sezione resistente, esposizione dell'armatura al fuoco e maggiore penetrazione del calore all'interno del calcestruzzo, il dominio di resistenza M – N – salvo indicazioni diverse in merito – considera una sezione avente uno spessore di 5 cm in meno; infatti, come si evince dalle curve temperatura – tempo illustrate in seguito, il calcestruzzo supera la temperatura critica di 500° C nei primi 5/6 cm esposti al fuoco. Inoltre, viene trascurata la presenza delle armature sul lato esposto al fuoco.

Per limitare tale fenomeno si considera l'utilizzo di fibre in polipropilene. Sulla base dell'esperienza delle società del raggruppamento TSE3 nell'ambito di progetti simili, anche mediante l'esecuzione di prove in laboratorio, e da letteratura come ad esempio secondo Lourenço et al. (2010), si definisce un dosaggio di fibre di 2 kg/m<sup>3</sup>. Tale valore rappresenta il dosaggio minimo di fibre raccomandato da EC2 per limitare il fenomeno dello spalling.

### **7.1.2 Calcolo termico**

L'andamento della temperatura nella sezione è determinata con un foglio Excel che permette il calcolo della temperatura in un elemento di cls di tipo piastra risolvendo le equazioni del calore in una direzione sulla base delle 3 curve al fuoco.

Il calcolo è effettuato secondo il metodo delle differenze finite ed i parametri utilizzati sono i seguenti:

- Conduzione:
  - $C_p$  calore specifico del cls che varia in funzione della temperatura (Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>). Le variazioni sono quelle descritte nell'Eurocodice 2 – parte 1-2 con contenuto d'acqua dell'1.5%;
  - $\rho$  massa volumica del cls (kgm<sup>-3</sup>)
  - $\lambda$  conduttività termica del cls che varia in funzione della temperatura (Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>). Le variazioni sono descritte nell'EC2-parte 1-2.
- Convezione:
  - $\alpha_c$ : coefficiente di scambio termico per convezione (Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>). Conformemente alle raccomandazioni del CETU,  $\alpha_c$  avrà il valore previsto dall'Eurocodice 1.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

- Irraggiamento:
  - $\varepsilon_m$  emissività della superficie delle pareti (cls)
  - $\varepsilon_f$  emissività del fuoco
  - $\Phi$  fattore di forma

I valori sono stati tratti dall'Eurocodice 1 secondo le raccomandazioni del CETU.

La tabella seguente presenta la sintesi dei valori stabiliti per ciascuna delle proprietà:

$C_p$ [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [kgm <sup>-3</sup> ]	$\lambda$ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\alpha_c$ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] lato esposto al fuoco	$\alpha_c$ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] lato non esposto al fuoco	$\varepsilon_m$ [-]	$\varepsilon_f$ [-]	$\Phi$ [-]
F (θ°C) EC2	2300 (per θ 20°C)	F (θ°C) EC2	25 per ISO 834 e RWS 50 per HC	4	0.7	1	1

**Tabella 10: Proprietà termiche**

Nel caso di calcestruzzo armato è tenuto conto della bassa percentuale di acciaio rispetto al cls, si ammette che le armature non partecipano alla propagazione del calore.

Di seguito, la figura mostra il calcolo termico della sezione S2 sottoposta per 4 ore alla curva di incendio ISO834.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo



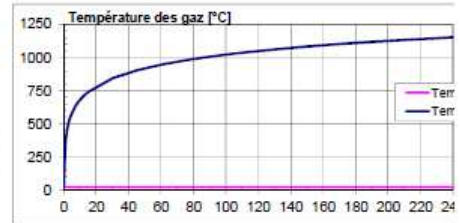
Calculs thermiques avec exposition feu CN  
 Fiche de calcul  
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

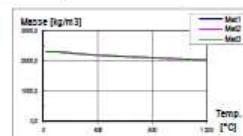
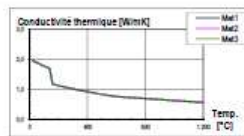
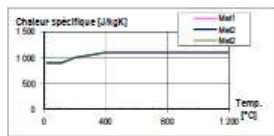
		CN		
		Face		
		INF	SUP	
- Température initiale :	$\theta_{ti}$	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	$\theta_{t,max}$	1 153	20	[°C]
- Coefficient de convection :	$\alpha_{ce}$	25	4	[W/m <sup>2</sup> K]
- Rayonnement :				
-Facteur de forme	$\Phi$	1,0	1,0	[-]
-Emissivité du feu	$\epsilon_f$	1,0	1,0	[-]
-Emissivité surface de l'élément	$\epsilon_a$	0,8	0,8	[-]

Lancement



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
-Epaisseur	e	0	500	0	[mm]
-Matériau		Béton $\mu=1.5\%$	Béton $\mu=1.5\%$	Béton $\mu=1.5\%$	
-Masse volumique	$\rho$ (20°C)	2 300	2 300	2 300	[kg/m <sup>3</sup> ]
-Chaleur spécifique	$c_p$ (20°C)	1470,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
-Conductivité therm.	$\lambda_a$ (20°C)	-	-	-	[W/mK]
-Code matériau		2	2	2	



Données calcul

- Pas de temps	5	[s]	OK : dx sous-multiple de la durée totale
- dx	5	[mm]	OK : dx sous-multiple de l'épaisseur totale
- durée feu	240	[min]	

Résultats

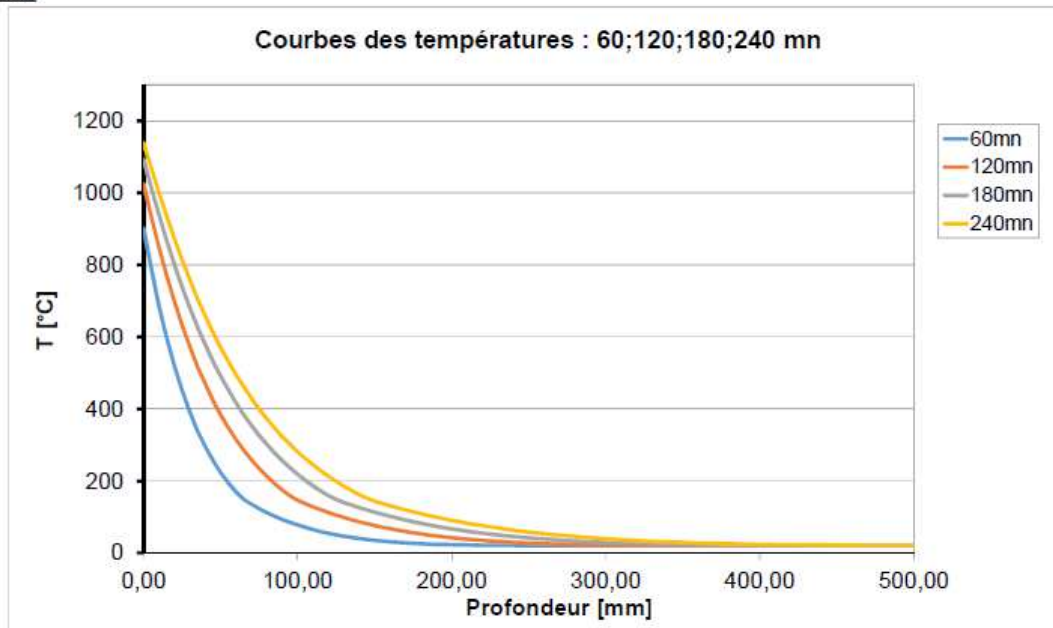


Figura 29: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h

7.1.3 Calcolo delle proprietà termiche nella sezione riscaldata

L'aumento di temperatura sui materiali genera una variazione delle loro proprietà meccaniche ed in particolare:

- una perdita di resistenza
- una diminuzione del modulo di Young.

Una volta determinato il campo di temperatura, si calcolano le proprietà termiche della sezione in c.a. riscaldata sulla base delle proprietà del cls e degli acciai d'armatura forniti nell'Eurocodice 2 parte 1-2.

La resistenza ed il modulo di Young dei materiali riscaldati sono calcolati nel modo seguente:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \cdot \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}}$$

dove:

$k_{\theta}$  è un fattore di riduzione dipendente dalla temperatura del materiale;

$X_k$  è la proprietà (resistenza, modulo) caratteristica del materiale;

$\gamma_{M,fi}$  è il fattore parziale di sicurezza in situazione di incendio, pari a 1.

Le caratteristiche della sezione riscaldata sono dedotte integrando sulla sezione le caratteristiche dei materiali riscaldati. Seguendo il metodo definito nella raccomandazione del CETU, si calcola quindi:

$$ES_J = \iint_S E_c(T(y)) dS$$

$$EI_J = \iint_S E_c(T(y)) y^2 dS$$

Si deduce da queste caratteristiche riscaldate il modulo di Young e l'inerzia flessionale della sezione riscaldata che servono per il calcolo strutturale alle reazioni iperstatiche:

$$\text{Modulo di Young della sezione riscaldata: } E_J = \frac{ES_J}{S}$$

$$\text{Inerzia flessionale della sezione riscaldata: } I_J = \frac{EI_J}{E_J}$$

#### 7.1.4 Sollecitazioni indirette legate all'incendio

Il riscaldamento dei materiali per effetto dell'incendio genera una dilatazione, oltre ad una variazione delle loro proprietà meccaniche. Con l'ipotesi di deformazioni piane, l'allungamento e la curvatura considerate per la sezione riscaldata sono fornite dalle espressioni riportate nelle raccomandazioni del CETU:

$$\varepsilon_{th} = \frac{\iint_S E_c(y) \alpha \times (T(y) - T_0) dS + \sum E_s(y_i) \alpha \times (T(y) - T_0) A_i}{ES_J}$$

$$\gamma_{th} = \frac{\iint_S y E_c(y) \alpha \times (T(y) - T_0) dS + \sum y_i E_s(y_i) \alpha \times (T(y) - T_0) A_i}{EI_J}$$

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Con:

$\varepsilon_{th}$  la deformazione longitudinale dovuta agli effetti termici

$\gamma_{th}$  la curvatura dovuta agli effetti termici.

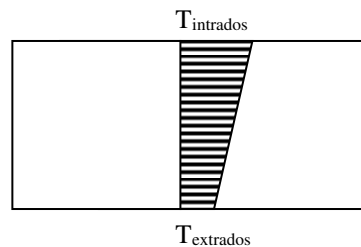
Quando impedita, questa dilatazione genera degli sforzi nella struttura.

Questi sforzi sono calcolati con un software strutturale (SCIA Engineer) con un modello alle reazioni iperstatiche nel quale si introduce un campo di temperatura che genera degli sforzi equivalenti. Non si tratta evidentemente della temperatura reale della sezione, ma di un artificio di calcolo che permette di generare le stesse deformazioni della struttura.

Si introduce quindi nel software SCIA:

$$T_{intradosso} - T_0 = \varepsilon_{th} + \gamma_{th} \frac{h}{2}$$

$$T_{estradosso} - T_0 = \varepsilon_{th} + \gamma_{th} \frac{h}{2}$$



La figura seguente mostra il calcolo termico della sezione S2, FG sottoposta per 4 ore alla curva di incendio ISO834:

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Calcul Thermique - rigidité à froid

Données matériaux

Béton :	-Résistance caractéristique :	fck	C30	
	-Module d'Young à froid :	Ecm(20°)	31 729	[MPa]
Acier :	-Limite élastique :	fyk	450	[MPa]
	-Module d'Young à froid :	Es(20°)	200 000	[MPa]

Données section pour un mètre de large

Section béton :	-Hauteur :	h	0,5	[m]		
	-Discretisation :	$\Delta h$	0,005	[m]		
	-Largeur :	L	1	[m]		
Armatures inf :			lit n°1	lit n°2	lit n°3	
	-Nb barres :	nb	6,666666667			[u]
	-Diamètre :	f	14			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]
Armatures sup :						
	-Nb barres :	nb	6,666666667			[u]
	-Diamètre :	f	14			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]

Résultats

$\epsilon_{th}/\alpha$	48,72
$\gamma_{th}/\alpha$	266,32
E	21637,24
EI	195,11
ES	10818,62
I	9,02E-03
$I_0$ (à froid)	1,04E-02
coef réduction sur I	8,66E-01
$\Delta T_{inf}$	115,30
$\Delta T_{sup}$	-17,86

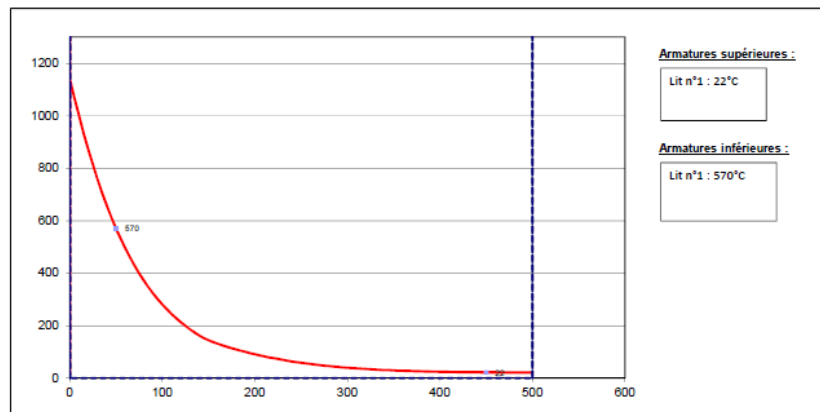


Figura 30: Dati di input e risultati

Nel modello di calcolo con SCIA si considerano come sezioni esposte al fuoco solo quelle in calotta e piedritto (lato condotto di ventilazione), in quanto in arco rovescio si considera la presenza della platea che, con il suo spessore considerevole, limita notevolmente la propagazione del fuoco.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

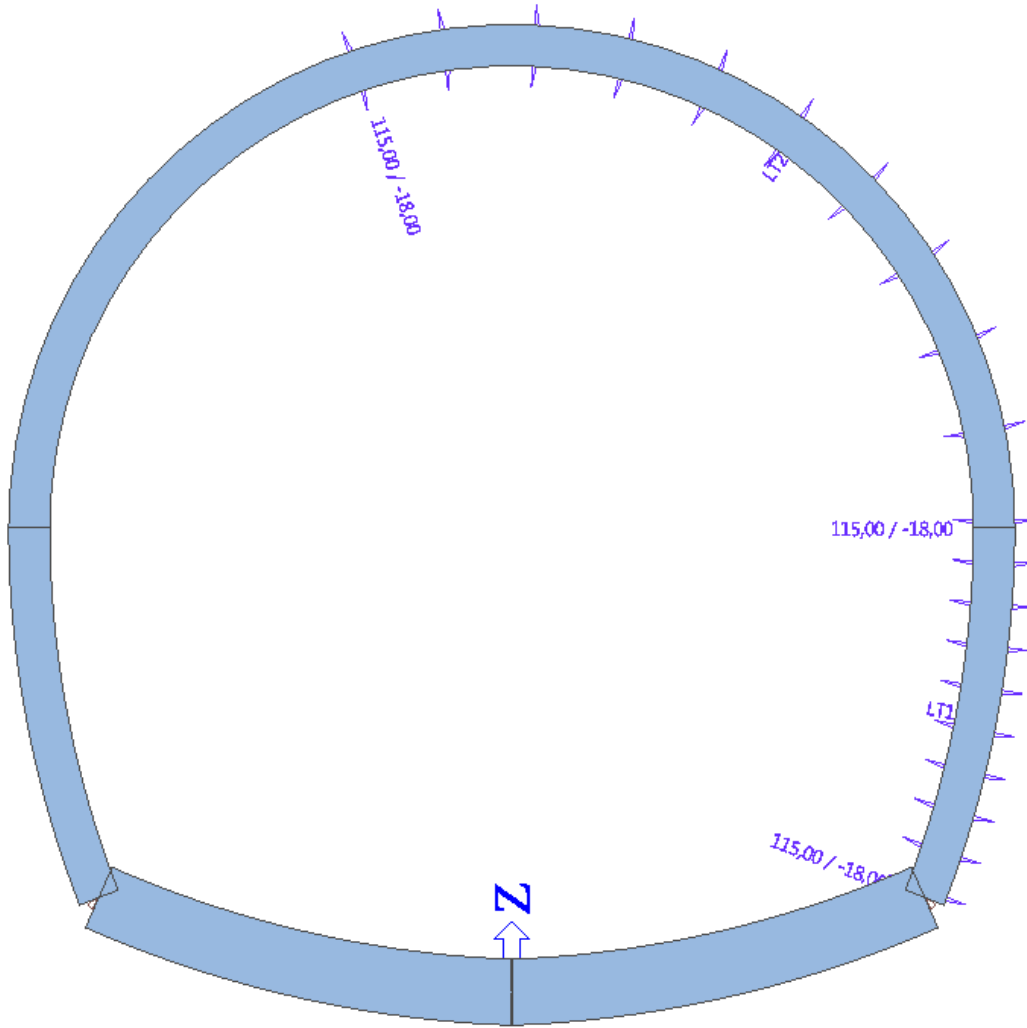


Figura 31: Dati di input per il calcolo delle sollecitazioni, S2, FG, curva ISO834 4h

La rigidezza  $K$  degli appoggi è stata calcolata con la formula di Galerkin, dipendente dalle proprietà del terreno e dalla sezione:

$$k_s = \frac{E}{(1 + \nu)R}$$

Dove:

- $k_s$ : modulo di reazione dell'ammasso roccioso [kN/m<sup>3</sup>]
- $E$ : modulo di elasticità dell'ammasso roccioso [kN/m<sup>2</sup>]
- $\nu$ : coefficiente di Poisson dell'ammasso roccioso [-]
- $R$ : raggio equivalente della sezione  $R_{eq} = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$  [m]

Sezione	E [MPa]	$\nu$	R [m]	$k_s$ [MPa/m]
FG	100	0.2	6.6	12.6
GI	400	0.2	6.6	50.4

Tabella 11: Rigidzza radiale degli appoggi per il metodo delle reazioni iperstatiche

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Anche nel modello di calcolo con SCIA della galleria di connessione 2 si considerano come sezioni esposte al fuoco solo quelle in calotta e piedritto (lato condotto di ventilazione), in quanto in arco rovescio si considera la presenza della platea che, con il suo spessore considerevole, limita notevolmente la propagazione del fuoco:

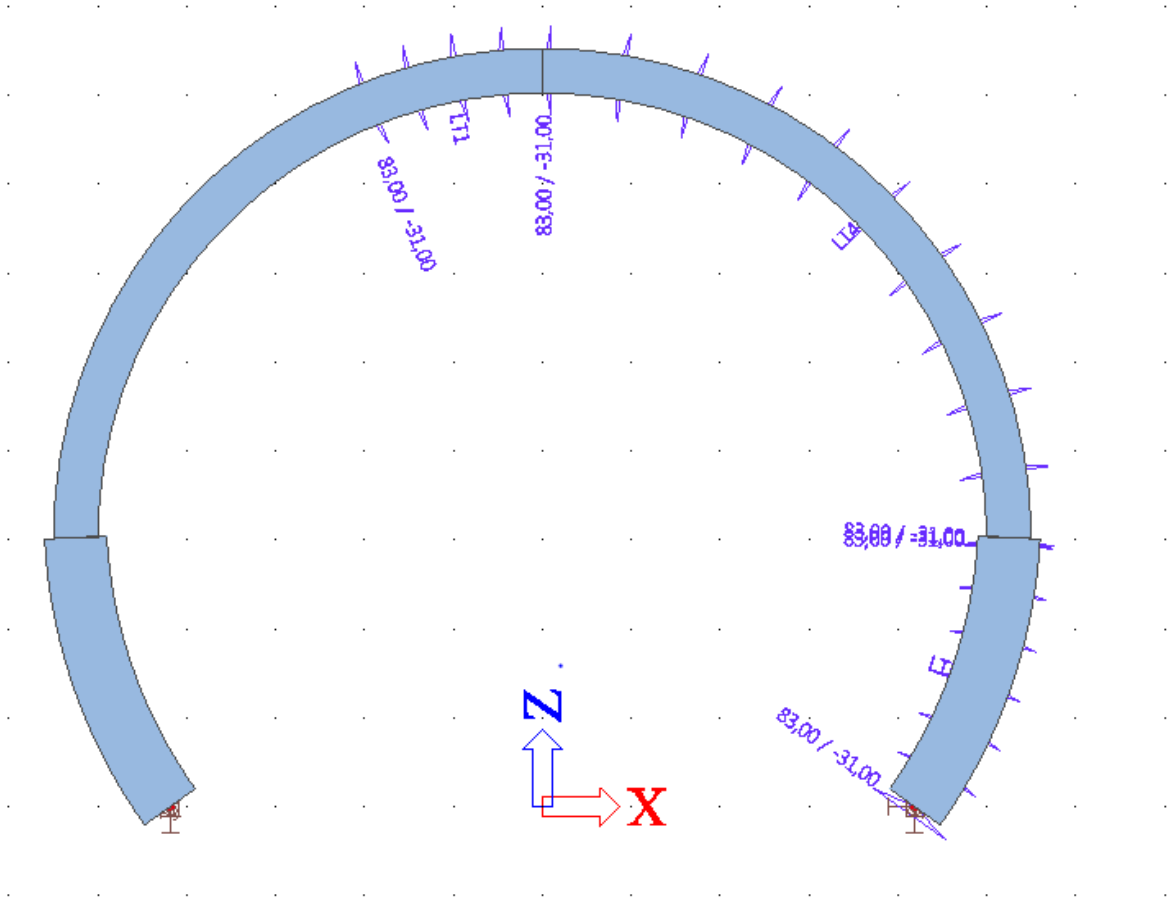


Figura 32: Dati di input per il calcolo delle sollecitazioni, connessione 2, curva ISO834 4h

Rigidezza  $K$  degli appoggi:

$$k_s = \frac{E}{(1 + \nu)R} = \frac{49270 \text{ MPa}}{(1 + 0.2) \cdot 5.25 \text{ m}} = 7821 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

Dove:

- $k_s$ : modulo di reazione dell'ammasso roccioso [kN/m<sup>3</sup>]
- $E$ : modulo di elasticità dell'ammasso roccioso [kN/m<sup>2</sup>]
- $\nu$ : coefficiente di Poisson dell'ammasso roccioso [-]
- $R$ : raggio equivalente della sezione  $R_{eq} = 5.25$ [m]

Analogamente, per la sezione di innesto:



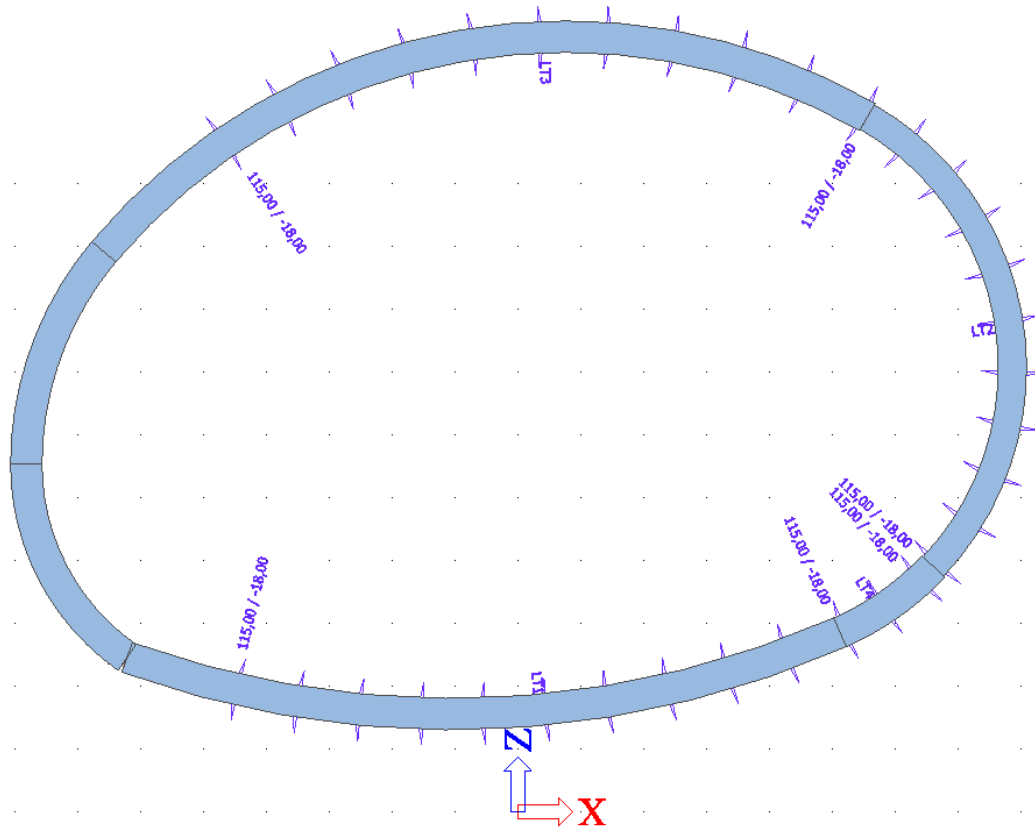


Figura 33: Dati di input per il calcolo delle sollecitazioni, sezione di innesto, curva ISO834 4h

Rigidezza  $K$  degli appoggi:

$$k_s = \frac{E}{(1 + \nu)R} = 5175 \frac{MN}{m^2}$$

Dove:

- $k_s$ : modulo di reazione dell'ammasso roccioso [kN/m<sup>3</sup>]
- $E$ : modulo di elasticità dell'ammasso roccioso [kN/m<sup>2</sup>]
- $\nu$ : coefficiente di Poisson dell'ammasso roccioso [-]
- $R$ : raggio equivalente della sezione  $R_{eq} = 6.53$  [m]

$$E = 40560 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.2$$

### 7.1.5 Verifica delle sezioni riscaldate a SLU – combinazione eccezionale

Le verifiche al fuoco vengono condotte secondo l'Eurocodice 2 - parte 1 – 2.

La riduzione di resistenza viene effettuata secondo il punto 4.2.4 della suddetta norma, ovvero sulla base delle curve e delle equazioni ivi fornite, con le seguenti ipotesi:

1. Cls: curva 1, cls ordinario per aggregati silicei
2. Acciaio: classe N, curva 2, armatura tesa trafilata a freddo.

Per il cls, si calcola il coefficiente di riduzione per ogni striscia di 1 m e poi si determina il coefficiente di riduzione medio sulla sezione, da considerare nei calcoli.

Per quanto riguarda le azioni, per la verifica deve risultare:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}$$

dove:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_d + A_d$$

è l'effetto di calcolo delle azioni in condizioni di incendio (situazione eccezionale), determinato in conformità all'Eurocodice 1 parte 1-2.

$$\eta_{fi} = \frac{G_k}{\gamma_G \cdot G_k} = 0.77 \text{ (nel caso di sole azioni permanenti)}$$

$E_d$  corrisponde al valore di progetto della sollecitazione a temperatura ambiente secondo la combinazione caratteristica allo SLU.

$A_d$  corrisponde agli sforzi termici secondo il metodo indicato in precedenza (si considerano le coppie  $N_{max}$ ,  $M$ ;  $N_{min}$ ,  $M$ ;  $N$ ,  $M_{min}$ ;  $N$ ,  $M_{max}$ ).

## 7.2 Verifica della sezione tipo S2

### 7.2.1 Calcolo dell'armatura minima

Ai fini delle verifiche al fuoco, si è calcolata l'armatura minima secondo le NTC eq. 4.1.4.3:

$$A_{s,min} = 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} \cdot b \cdot d = 0.26 \frac{2.9 \text{ MPa}}{450 \text{ MPa}} \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 500 \text{ mm} = 837.8 \text{ mm}^2$$

Scelta:

$$\begin{aligned} \text{Intradosso (lemba inferiore): } & \phi 14 @ 150 \\ \text{Estradosso (lemba superiore): } & \phi 14 @ 150 \\ A_s = & 2 \times 1026 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

### 7.2.2 Calcolo termico e sollecitazioni legate all'incendio

L'andamento delle temperature nella sezione per le 3 curve è riportato in figura seguente.

Curva ISO834 240 minuti

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

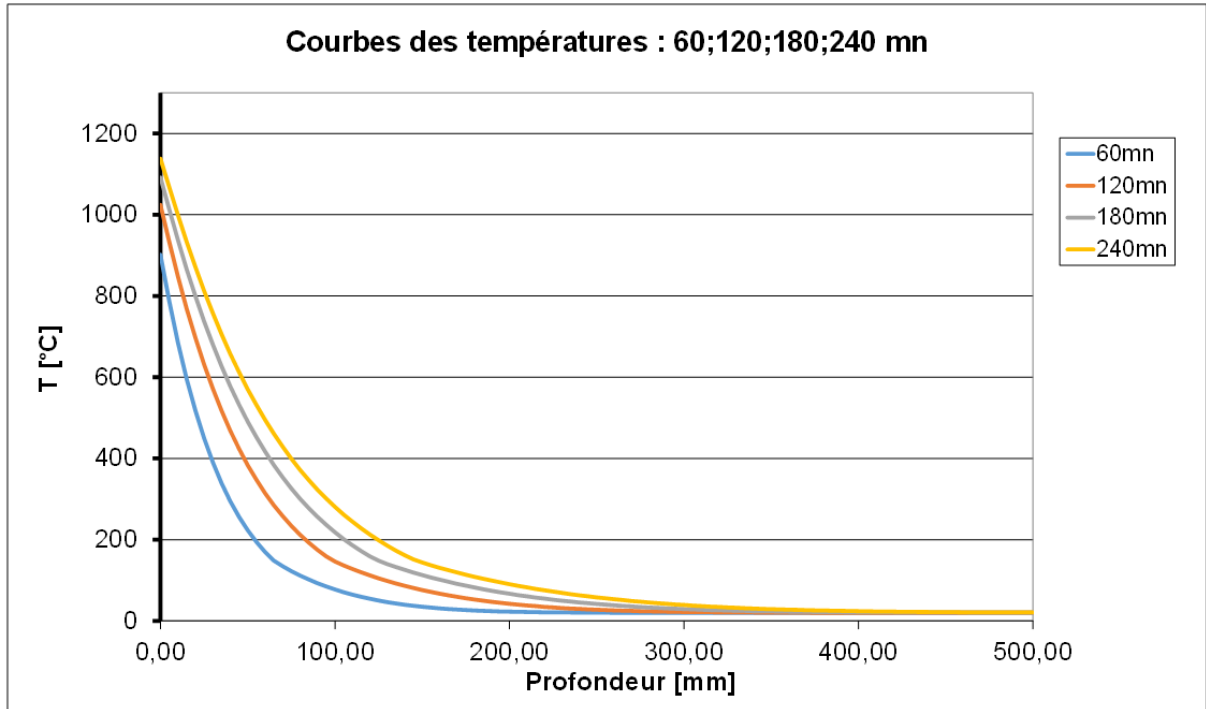


Figura 34: Andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4 ore

Curva HC 120 minuti

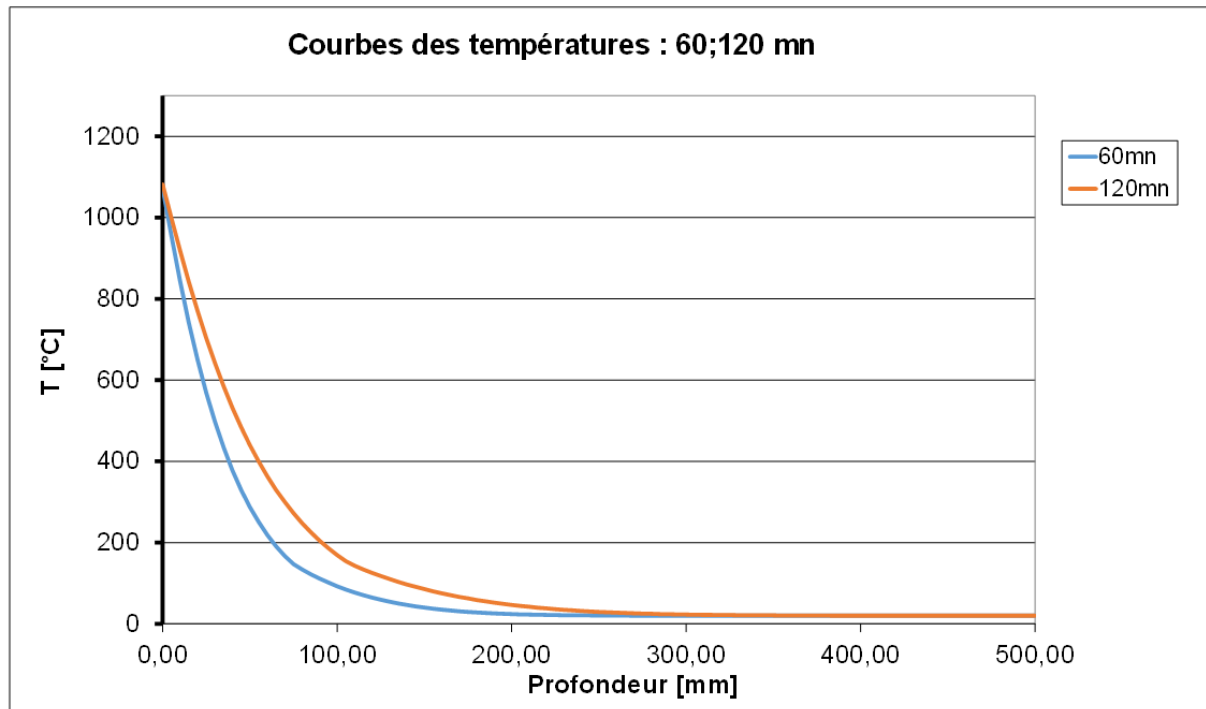


Figura 35: Andamento delle temperature nella sezione per la curva HC 2 ore

Curva RWS 120 minuti

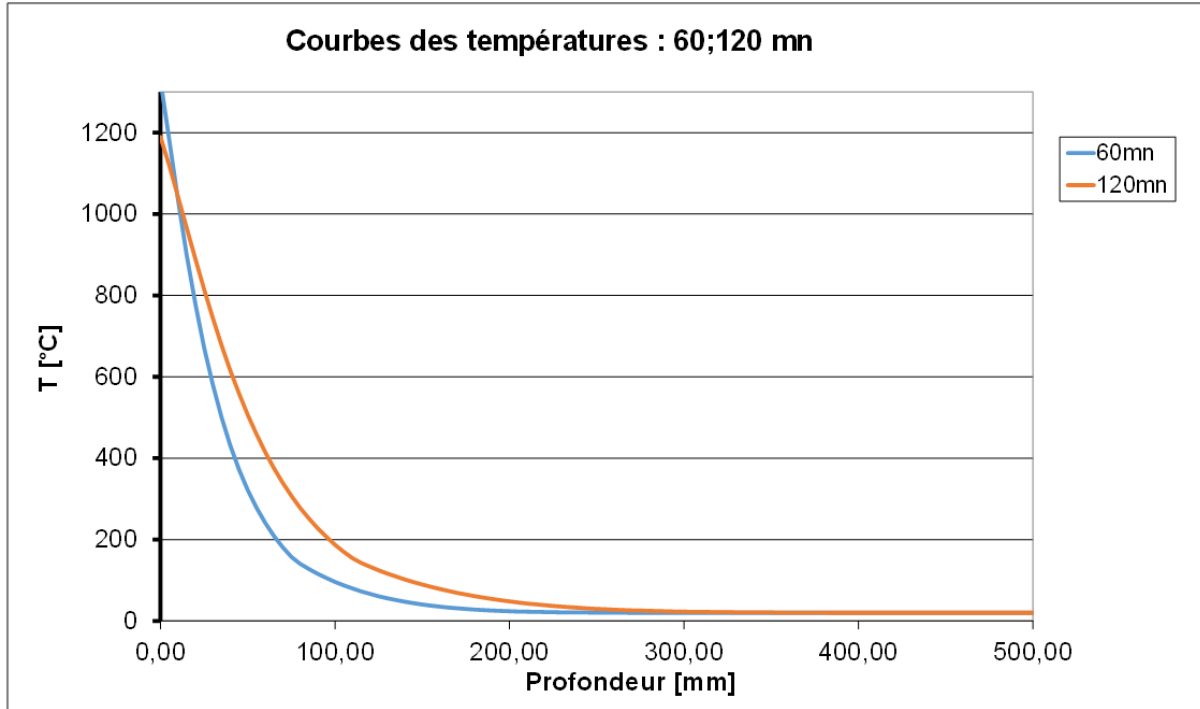


Figura 36: Andamento delle temperature nella sezione per la curva RWS 2 ore

- Calcolo delle proprietà termiche della sezione riscaldata

La sintesi delle proprietà termiche della sezione riscaldata per ogni curva di incendio è fornita nella tabella seguente:

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
<b>E<sub>0</sub> [MPa]</b>	31591	21637	24439	24124
<b>I<sub>0</sub> [.10<sup>-3</sup> m<sup>4</sup>]</b>	10,4	9,02	8,66	8,60

Tabella 12: Caratteristiche della sezione riscaldata

- Sollecitazioni indirette legate all'incendio

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
<b>ε<sub>th</sub> [.10<sup>-5</sup>]</b>	0	48,7	33,4	33,1
<b>γ<sub>th</sub> [.10<sup>-5</sup> m<sup>-1</sup>]</b>	0	266,3	276,3	267,7
<b>T<sub>inf</sub> – T<sub>0</sub> [°C]</b>	0	115	102	100
<b>T<sub>sup</sub> – T<sub>0</sub> [°C]</b>	0	-18	-36	-34

Tabella 13: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG

### 7.2.3 Depositi fluvioglaciali

Sforzi termici	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN]	M [kNm]	N [kN]	M [kNm]	N [kN]	M [kNm]
$M_{max}, N_{max}$	203	957	172	938	167	904
$M, N_{min}$	33	-39	4	-43	6	-42

Tabella 14: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG

I coefficienti di riduzione della resistenza tenendo conto del fenomeno dello spalling sono i seguenti:

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
$k_{\theta,cls}$	1	0,96	0.98	0.98
Intradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	0	0	0
Estradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	1	1	1

Tabella 15: Coefficienti di riduzione della resistenza considerando lo spalling

L'uso delle fibre di polipropilene limita notevolmente il fenomeno di spalling. Si considerano allora i primi 5 cm di cls e le armature all'intradosso, con i coefficienti di riduzione della resistenza forniti nella tabella seguente.

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
$k_{\theta,cls}$	1	0,88	0.98	0.98
Intradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	0.5	0.66	0.58
Estradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	1	1	1

Tabella 16: Coefficienti di riduzione della resistenza senza considerare lo spalling (uso di fibre di polipropilene)

Per la verifica, agli sforzi statici a SLU calcolati in precedenza (con il modello ZSoil) ed opportunamente ridotti di un coefficiente 0.77, si sono sommati quelli termici (calcolati con SCIA). Per quanto riguarda le resistenze, si considerano i coefficienti di riduzione della curva di incendio ISO834 4 ore in quanto sono i più conservativi.

Per il cls si ha dunque:  $f_{c\theta} = f_{ck} k_{\theta,cls} = 26.4 \text{ MPa}$

Per le armature, si ha:

- All'intradosso  $f_{y\theta} = f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 225 \text{ MPa}$
- All'estradosso,  $f_{y\theta} = f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 450 \text{ MPa}$

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Nel diagramma di interazione, al fine di avere lo stesso valore di resistenza dell'acciaio per le armature inferiori e superiori (450 MPa), si dimezza il numero di armature all'intradosso.

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]
M <sub>max</sub> , N <sub>max</sub>	1312	1039	1281	1020	1277	986
M, N <sub>min</sub>	533	-163	504	-167	506	-166

Tabella 17: Sforzi di dimensionamento, S2, FG



Calcul de la courbe d'interaction du béton armé  
 selon l'Eurocode 2  
 BG Lyon - 2009

Données

Section					
Largeur section b =	1	m			
Epaisseur section hw =	0,5	m			
Section	0,5	m <sup>2</sup>			
Béton					
Résistance du béton f <sub>ck</sub> =	26,4	MPa			
γ <sub>c</sub> =	1				
Acier					
σ <sub>e</sub>	450	MPa			
E <sub>s</sub>	200000	MPa			
γ <sub>s</sub> =	1				
nbre barres	1	2	3	4	
diamètre	3,33	6,67	0	0	mm
enrobage à l'axe	0,057	0,45	0	0	m
section (cm <sup>2</sup> )	5,13	10,26			cm <sup>2</sup>

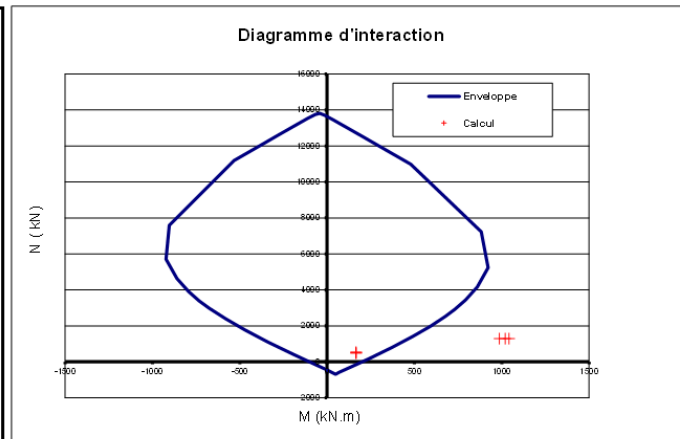


Figura 37: Diagramma di interazione della sezione S2 FG per la curva di incendio ISO834 4h, armatura minima

Si nota che i punti si trovano al di fuori del diagramma di interazione. Siccome il solo aumento del tasso di armatura comporta un aumento degli sforzi termici, l'armatura è stata aumentata ad un diametro di 22 mm con 100 mm di spaziatura contestualmente all'utilizzo a fogli di Promatect-T spessore 35 mm o equivalenti, in modo di avere l'effetto positivo di un aumento di resistenza dovuto all'armatura.

### 7.2.4 Depositi glaciali indifferenziati

Il rivestimento previsto è uguale a quello della sezione in FG, le sollecitazioni termiche sono dunque le medesime.

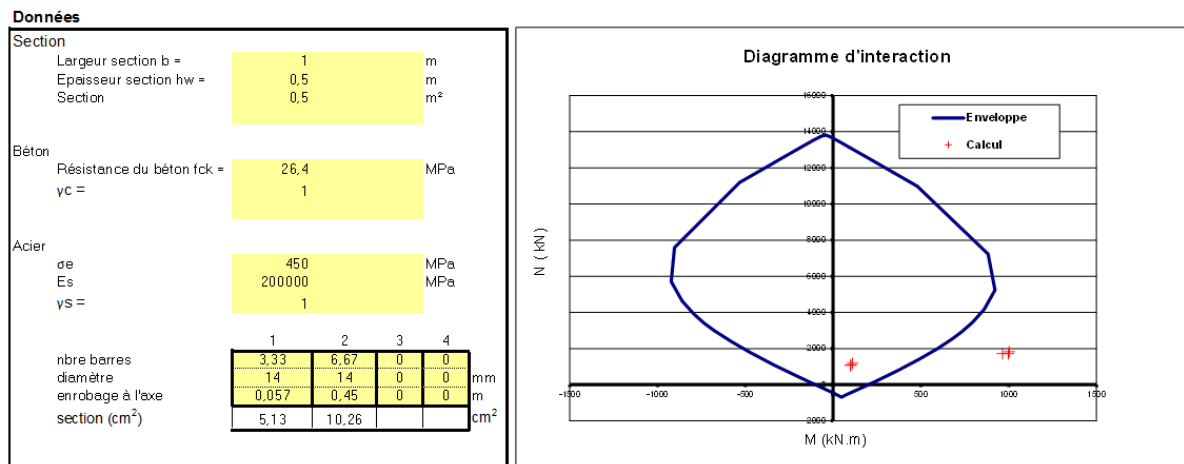
Sforzi termici	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN]	M [kNm]	N [kN]	M [kNm]	N [kN]	M [kNm]
Calotta	416	915	321	907	316	874
	251	46	160	34	160	33

**Tabella 18: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, GI**

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]
M <sub>max</sub> , N <sub>max</sub>	1837	1004	1742	996	1737	963
M, N <sub>min</sub>	1183	113	1092	101	1092	100

**Tabella 19: Sforzi di dimensionamento, S2, GI**

Utilizzando le medesime ipotesi di calcolo che per la sezione nei depositi fluvioglaciali (considerando quindi i primi 5 cm di cls dimezzando le armature all'intradosso, dato che  $k_{\theta, acciaio}=0,5$ ) la verifica non è soddisfatta per un'armatura minima.



**Figura 38: Diagramma di interazione della sezione S2 GI per la curva di incendio ISO834 4h**

Si effettua dunque la verifica in presenza di protezione termica per la sezione nei depositi FG e si estende alla sezione nei depositi GI.

### 7.2.5 Verifica in presenza di protezione termica

Si verifica solo la sezione nei depositi fluvioglaciali, in quanto la più gravosa analizzando il diagramma di interazione.

Si svolge il calcolo termico come descritto in precedenza ma tenendo conto della protezione termica di tipo Promatect-T 35 mm.

L'andamento della temperatura nella sezione è determinato con il foglio Excel elaborato internamente da BG come mostrato e descritto in precedenza.

La tabella seguente presenta la sintesi dei valori stabiliti per ciascuna delle proprietà per il cls e per l'isolante (prestazioni).

Tali parametri sono stati tratti dall'Eurocodice 2 – parte 1-2, dall'Eurocodice 1 – parte 1-2, dalle raccomandazioni del CETU "comportement au feu des tunnel routiers" e "catalogue des protections passives" o dalle schede tecniche dei fornitori.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

	$C_p$ ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	$\rho$ ( $kg.m^{-3}$ )	$\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	$\alpha_c$ ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$\epsilon_m$ (-)	$\epsilon_f$ (-)	$\Phi$ (-)
Clis	f( $\theta^\circ C$ ) (secondo EC 2)	2 300 (secondo EC2)	f( $\theta^\circ C$ ) (secondo EC 2)	HC ed Eureka: 50 ISO834 e RWS: 25 (secondo EC1 e racc. CETU)	0.7 (secondo EC2)	1 (secondo EC2 e racc. CETU)	1 (secondo EC1 e racc. CETU)
Isolante	742 (secondo catalogo CETU)	810 -990 (secondo catalogo CETU e fornitori)	0.212-0.2 (secondo fornitori)	4 (secondo EC1 e racc. CETU)	0.8 (secondo racc. CETU)	1 (secondo EC2 e racc. CETU)	1 (secondo EC2 e racc. CETU)

**Tabella 20: Proprietà termiche di calcestruzzo e materiale isolante**

Il calcolo termico per la curva ISO 834 4h per il sistema fogli di protezione termica 35 mm + rivestimento 500 mm è mostrato nella figura seguente.



Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo



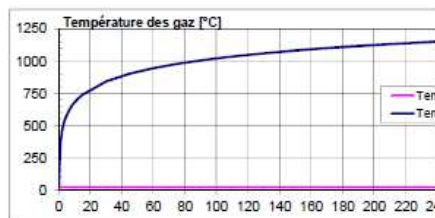
Calculs thermiques avec exposition feu CN  
 Fiche de calcul  
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

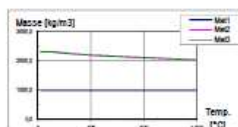
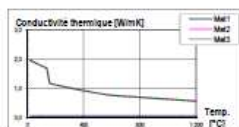
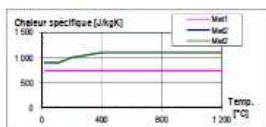
		CN		[°C]
		INF	SUP	
- Température initiale :	$\theta_{i0}$	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	$\theta_{max}$	1 153	20	[°C]
- Coefficient de convection :	$\alpha_c$	25	4	[W/m <sup>2</sup> K]
- Rayonnement :				
- Facteur de forme	$\Phi$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité du feu	$\epsilon_f$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité surface de l'élément	$\epsilon_m$	0,8	0,8	[-]

Lancement



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
- Epaisseur	e	35	500	0	[mm]
- Matériau		Promatect T	Béton u=1.5%	Béton u=1.5%	
- Masse volumique	$\rho$ (20°C)	990	2 300	2 300	[kg/m <sup>3</sup> ]
- Chaleur spécifique	$c_p$ (20°C)	742,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
- Conductivité therm.	$\lambda_a$ (20°C)	0,05	-	-	[W/mK]
- Code matériau		10	2	2	



Données calcul

- Pas de temps	S	[s]	OK : dt sous-multiple de la durée totale
- dx	S	[mm]	OK : dx sous-multiple de l'épaisseur totale
- durée feu	240	[min]	-

Résultats

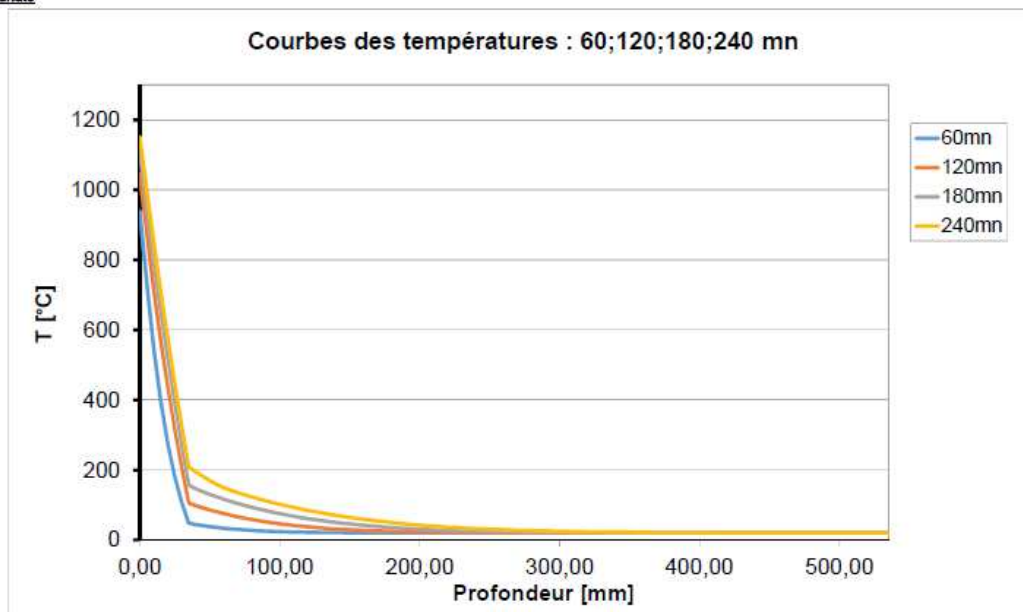


Figura 39: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Calcul Thermique - rigidité à froid

Données matériaux

Béton :

-Résistance caractéristique :	fck	C30	
-Module d'Young à froid :	Ecm(20°)	31 729	[MPa]

Acier :

-Limite élastique :	fyk	450	[MPa]
-Module d'Young à froid :	Es(20°)	200 000	[MPa]

Données section pour un mètre de large

Section béton :

-Hauteur :	h	0,5	[m]
-Discretisation :	$\Delta h$	0,005	[m]
-Largeur :	L	1	[m]

Armatures inf :

		lit n°1	lit n°2	lit n°3	
-Nb barres :	nb	10			[u]
-Diamètre :	f	22			[mm]
-Enrobage :	e	50			[mm]
-Matériau n°	n°	2	2	2	

Armatures sup :

-Nb barres :	nb	10			[u]
-Diamètre :	f	22			[mm]
-Enrobage :	e	50			[mm]
		2	2	2	

Résultats

$\epsilon_{th}/\alpha$	25,00
$\gamma_{th}/\alpha$	219,65

E	28459,91
EI	278,47
ES	14229,96
I	9,78E-03
$I_0$ (à froid)	1,04E-02
coef réduction sur I	9,39E-01

$\Delta T_{inf}$	79,92
$\Delta T_{sup}$	-29,91

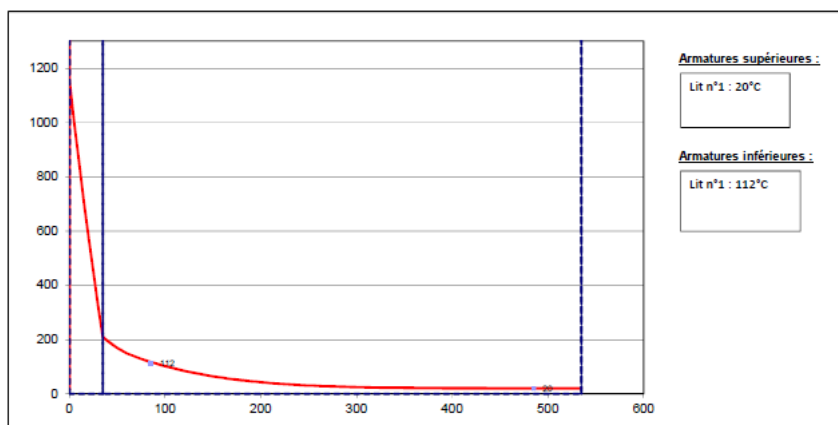


Figura 40: Caratteristiche della sezione riscaldata in presenza di Promatect-T 35mm

	A T ambiente	ISO 834 4h
$k_{\theta,cls}$	1	0,997
<b>Intradosso</b> $k_{\theta,acciaio}$	1	0,988
<b>Estradosso</b> $k_{\theta,acciaio}$	1	1

Tabella 21: Coefficienti di riduzione delle resistenze, S2, FG, in presenza di Promatect-T

	A T ambiente	ISO834 4h
$\epsilon_{th} [ \cdot 10^{-5} ]$	0	25,0
$\gamma_{th} [ \cdot 10^{-5} m^{-1} ]$	0	219,65
$T_{inf} - T_0 [ ^\circ C ]$	0	80
$T_{sup} - T_0 [ ^\circ C ]$	0	-30

**Tabella 22: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG, in presenza di Promatect-T**

Sforzi termici	ISO 834 4h	
	N [kN]	M [kNm]
$M_{max}, N_{max}$	147	846
$M, N_{min}$	-6	-54

**Tabella 23: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo, S2, FG, in presenza di Promatect-T**

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h	
	$N_{SLU}$ [kN]	$M_{SLU}$ [kNm]
$M_{max}, N_{max}$	1251	890
$M, N_{min}$	494	-170

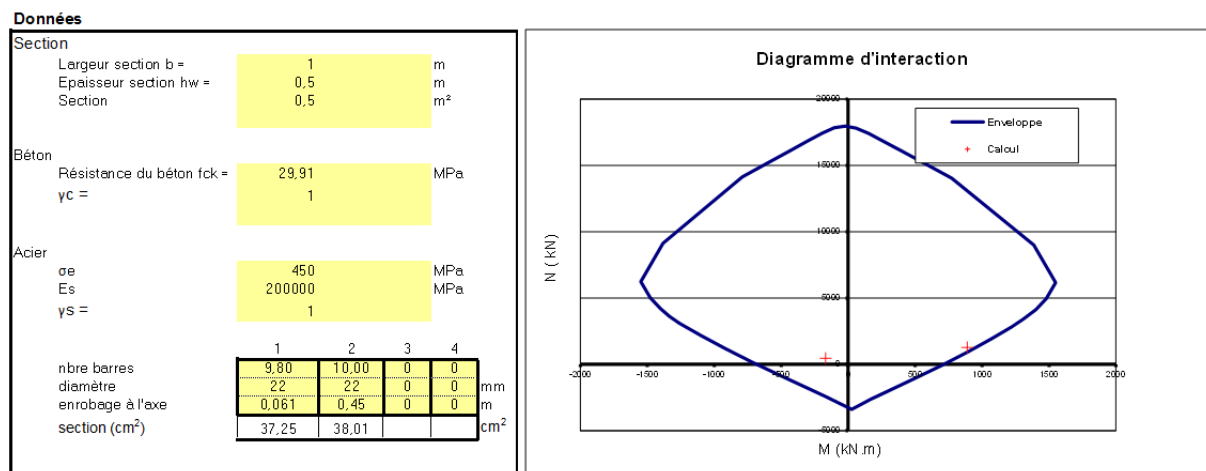
**Tabella 24: Sforzi di dimensionamento, S2, FG, in presenza di Promatect-T**

Per il cls si ha dunque:  $f_{c0}=f_{ck} k_{\theta,cls} = 29.91$  MPa

Per le armature, si ha:

- All'intradosso  $f_{y0}=f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 444.6$  MPa
- All'estradosso,  $f_{y0}=f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 450$  MPa

Nel diagramma di interazione, al fine di avere lo stesso valore di resistenza dell'acciaio per le armature inferiori e superiori (450 MPa), si riduce il numero di armature all'intradosso di un fattore pari a 0.98.



**Figura 41: Diagramma di interazione della sezione S2 FG per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm**

La verifica è soddisfatta in presenza di protezione termica.

### 7.2.6 Sintesi delle armature necessarie

Ricapitolando, per la sezione S2, per le verifiche statiche ed al fuoco, si hanno le seguenti resistenze di calcolo minime, azioni sollecitanti massime/minime, armature necessarie all'intradosso/estradosso in calotta/piedritti e arco rovescio, fattori di sicurezza e dispositivi di protezione al fuoco riportati in tabella:

	Verifiche statiche		Verifiche al fuoco	
<b>Resistenze di calcolo dei materiali</b>	$f_{cd}$ [MPa]	20	$f_{cd, fi}$ [MPa]	29.9
	$f_{yd}$ [MPa]	391	$f_{yd, fi}$ [MPa]	444 / 450
<b>Sezione resistente</b>	Spessore (cm)	50	Spessore (cm)	50
<b>Azioni sollecitanti considerate nel diagramma d'interazione</b>	$N_{max}$ [kN/m], $M$ [kNm/m]	1887, 118	$N_{max}$ [kN/m], $M_{max}$ [kNm/m]	1251, 890
	$N$ [kN/m], $M_{min/max}$ [kNm/m]	1611, 210	$N_{min}$ [kN/m], $M$ [kNm/m]	494, -170
<b>Armature in calotta e piedritti</b>	Intradosso [mm]	-	Intradosso [mm]	Ø22@100
	Estradosso [mm]	-	Estradosso [mm]	Ø22@100
<b>Armature in arco rovescio</b>	Intradosso [mm]	-	Intradosso [mm]	Ø22@100
	Estradosso [mm]	-	Estradosso [mm]	Ø22@100
<b>Fattori di sicurezza</b>		2.5		1.05
<b>Dispositivi di protezione al fuoco</b>	-	-	Protezione al fuoco di tipo Promatect-T o equivalente spessore 35 mm	

**Tabella 25: Riassunto dei risultati della verifica**

In calotta e piedritti, serve un tasso d'armatura di  $120 \text{ kg/m}^3$  (considerando lo spessore minimo, pari a 50 cm) e l'applicazione di una protezione termica di tipo Promatect-T 35 mm all'intradosso del rivestimento lato condotto di estrazione fumi.

In arco rovescio, al fine di garantire la continuità, viene disposta un'armatura longitudinale equivalente a quella di calotta e piedritti. Il tasso è di  $90 \text{ kg/m}^3$  (si ha uno spessore maggiore della sezione rispetto alla calotta).

Considerando un fattore di 1.3 al fine di tener conto della sovrapposizione delle barre, così come della presenza dell'armatura di ripartizione, ed integrando lo spessore reale della sezione, si ottiene, in calotta e piedritti, un'incidenza d'armatura pari a  $160 \text{ kg/m}^3$  per le sezioni di spessore 50 cm e  $70 \text{ kg/m}^3$  per le sezioni di spessore 120 cm (**tasso medio di  $120 \text{ kg/m}^3$** ). In arco rovescio l'incidenza d'armatura è pari a  $120 \text{ kg/m}^3$ .

Questi risultati valgono anche per la **sezione tipo S1:  $160 \text{ kg/m}^3$**  in calotta e piedritti (lo spessore della sezione non è variabile) e  $120 \text{ kg/m}^3$  in arco rovescio.

### 7.3 Sezione corrente con conci prefabbricati

Per la sezione con conci prefabbricati, le verifiche al fuoco effettuate per il Tunnel di Base (si veda la relazione PRV\_C3A\_3950\_26-19-00) mostrano la necessità di armare i conci con un tasso d'armatura di 100 kg/m<sup>3</sup> ma senza protezioni specifiche al fuoco.

### 7.4 Sezione di innesto

#### 7.4.1 Calcolo dell'armatura minima

Ai fini delle verifiche al fuoco, si è calcolata l'armatura minima secondo le NTC eq. 4.1.4.3:

$$A_{s,min} = 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} \cdot b \cdot d = 0.26 \frac{2.9 \text{ MPa}}{450 \text{ MPa}} \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 500 \text{ mm} = 837.8 \text{ mm}^2$$

Scelta:

**Intradosso (lemba inferiore): Ø14@150**  
**Estradosso (lemba superiore): Ø14@150**  
 **$A_s = 2 \times 1026 \text{ mm}^2$**

#### 7.4.2 Calcolo termico e sollecitazioni legate all'incendio

- Calcolo termico

L'andamento delle temperature nella sezione per le 3 curve è riportato in figura seguente.

#### Curva ISO834 240 minuti

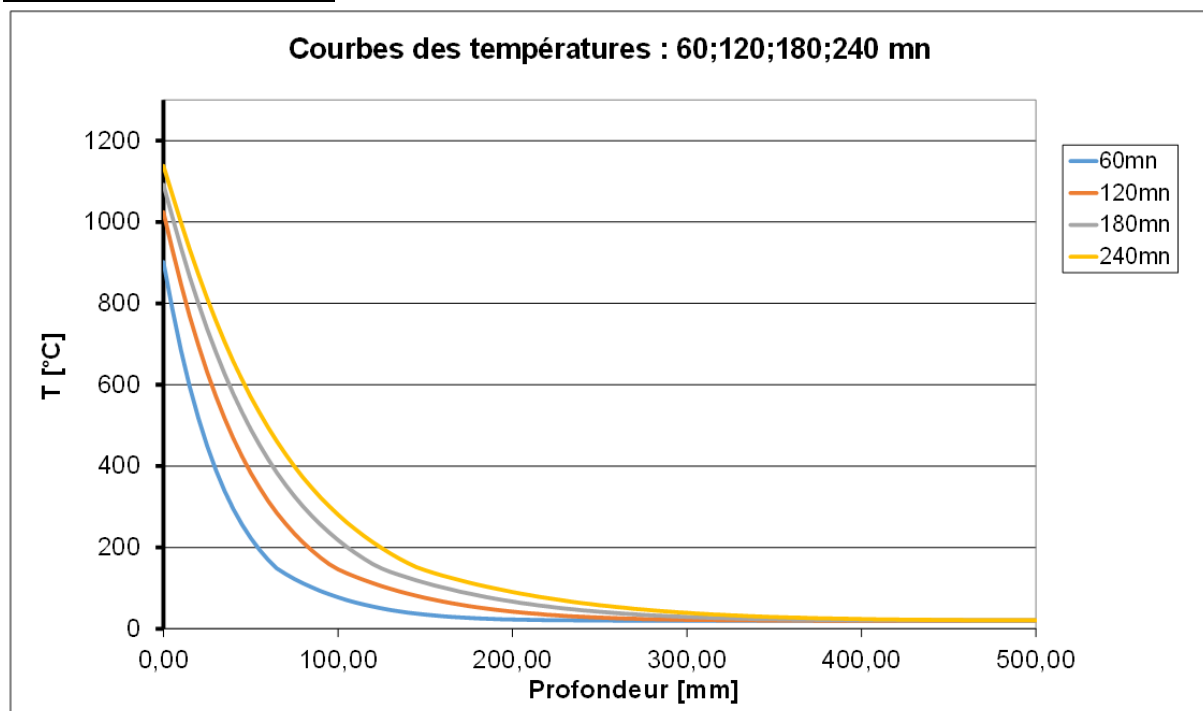


Figura 42: Andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4 ore

#### Curva HC 120 minuti

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

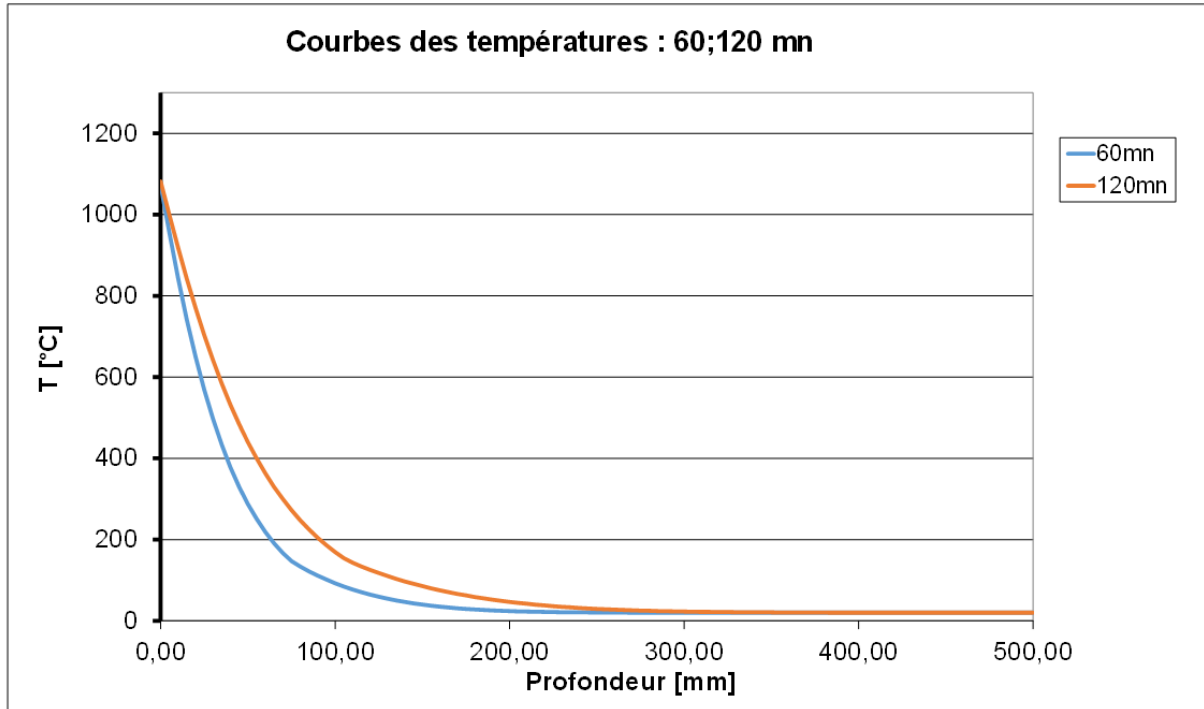


Figura 43: Andamento delle temperature nella sezione per la curva HC 2 ore

Curva RWS 120 minuti

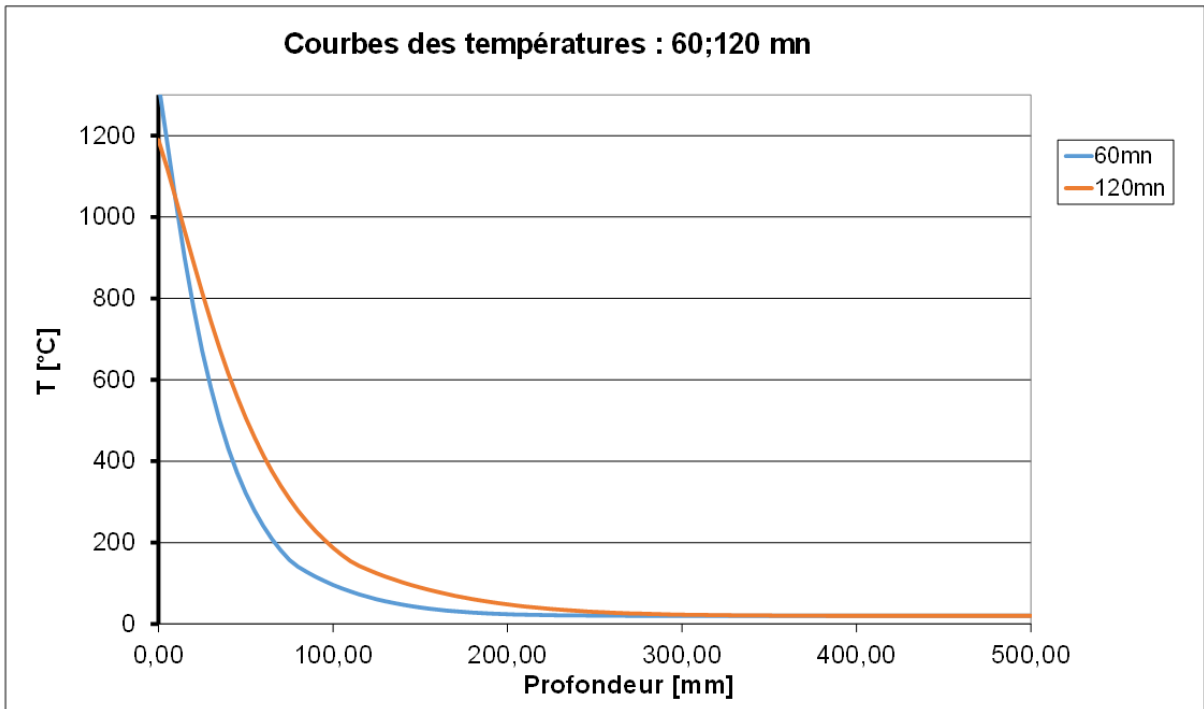


Figura 44: Andamento delle temperature nella sezione per la curva RWS 2 ore

- Calcolo delle proprietà termiche della sezione riscaldata

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

La sintesi delle proprietà termiche della sezione riscaldata per ogni curva di incendio è fornita nella tabella seguente:

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
$E_0$ [MPa]	31591	21637	24439	24124
$I_0$ [ $\cdot 10^{-3} m^4$ ]	10,4	9,02	8,66	8,60

Tabella 26: Caratteristiche della sezione riscaldata

- Sollecitazioni indirette legate all'incendio

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
$\varepsilon_{th}$ [ $\cdot 10^{-5}$ ]	0	48,7	33,4	33,1
$\gamma_{th}$ [ $\cdot 10^{-5} m^{-1}$ ]	0	266,3	276,3	267,7
$T_{inf} - T_0$ [°C]	0	115	102	100
$T_{sup} - T_0$ [°C]	0	-18	-36	-34

Tabella 27: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo

### 7.4.3 Verifica in presenza dell'armatura minima

I carichi statici e termici vengono inseriti nel modello SCIA secondo il caso di carico indicato nel § 8.1.5.

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	$N_{SLU}$ [kN]	$M_{SLU}$ [kNm]	$N_{SLU}$ [kN]	$M_{SLU}$ [kNm]	$N_{SLU}$ [kN]	$M_{SLU}$ [kNm]
<b>Mmax</b>	5102	-819	3659	-804	3619	-774
<b>M,Nmax</b>	5107	-823	3664	-808	3624	-778
<b>M,Nmin</b>	4933	-823	3490	-809	3451	-779

Tabella 28: Sforzi di dimensionamento

Utilizzando le medesime ipotesi di calcolo che per la sezione nei calcoli precedenti (considerando quindi i primi 5 cm di cls dimezzando le armature all'intradosso, dato che  $k_{\theta,acciaio}=0,5$ ) la verifica non è soddisfatta per un'armatura minima.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo



Calcul de la courbe d'interaction du béton armé  
 selon l'Eurocode 2  
 BG Lyon - 2009

Données

<b>Section</b>																																			
Largeur section b =	1	m																																	
Epaisseur section hw =	0,5	m																																	
Section	0,5	m <sup>2</sup>																																	
<b>Béton</b>																																			
Résistance du béton fck =	26,4	MPa																																	
γc =	1																																		
<b>Acier</b>																																			
σe	450	MPa																																	
Es	200000	MPa																																	
γs =	1																																		
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td></td> </tr> <tr> <td>nbre barres</td> <td>3,33</td> <td>6,67</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>diamètre</td> <td>14</td> <td>14</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>enrobage à l'axe</td> <td>0,057</td> <td>0,45</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>section (cm<sup>2</sup>)</td> <td>5,13</td> <td>10,26</td> <td></td> <td></td> <td>cm<sup>2</sup></td> </tr> </table>							1	2	3	4		nbre barres	3,33	6,67	0	0		diamètre	14	14	0	0	mm	enrobage à l'axe	0,057	0,45	0	0	m	section (cm <sup>2</sup> )	5,13	10,26			cm <sup>2</sup>
	1	2	3	4																															
nbre barres	3,33	6,67	0	0																															
diamètre	14	14	0	0	mm																														
enrobage à l'axe	0,057	0,45	0	0	m																														
section (cm <sup>2</sup> )	5,13	10,26			cm <sup>2</sup>																														

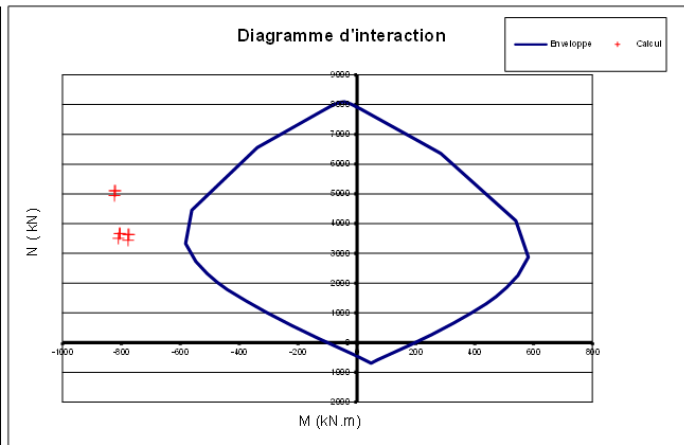


Figura 45: Diagramma di interazione della sezione per la curva di incendio ISO834 4h

Si effettua dunque la verifica in presenza di protezione termica.

**7.4.4 Verifica in presenza di protezione termica**

Si svolge il calcolo termico come descritto in precedenza ma tenendo conto della protezione termica di tipo Promatect-T 35 mm.

Il calcolo termico per la curva ISO 834 4h per il sistema fogli di protezione termica 35 mm + rivestimento 500 mm è mostrato nella figura seguente.



Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo



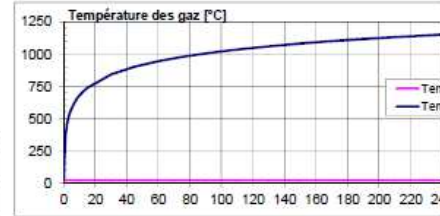
Calculs thermiques avec exposition feu CN  
 Fiche de calcul  
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

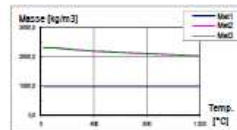
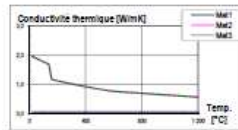
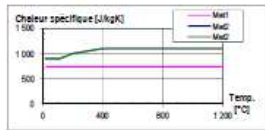
		CN		[°C]
		INF	SUP	
- Température initiale :	$\theta_{i0}$	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	$\theta_{max}$	1 153	20	[°C]
- Coefficient de convection :	$\alpha_c$	25	4	[W/m <sup>2</sup> K]
- Rayonnement :				
- Facteur de forme	$\Phi$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité du feu	$\epsilon_f$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité surface de l'élément	$\epsilon_m$	0,8	0,8	[-]

Lancement



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
- Epaisseur	e	35	500	0	[mm]
- Matériau		Promatect T	Béton u=1.5%	Béton u=1.5%	
- Masse volumique	$\rho$ (20°C)	990	2 300	2 300	[kg/m <sup>3</sup> ]
- Chaleur spécifique	$c_p$ (20°C)	742,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
- Conductivité therm.	$\lambda_c$ (20°C)	0,05	-	-	[W/mK]
- Code matériau		10	2	2	



Données calcul

- Pas de temps	S	[s]	OK : dt sous-multiple de la durée totale
- dx	S	[mm]	OK : dx sous-multiple de l'épaisseur totale
- durée feu	240	[min]	-

Résultats

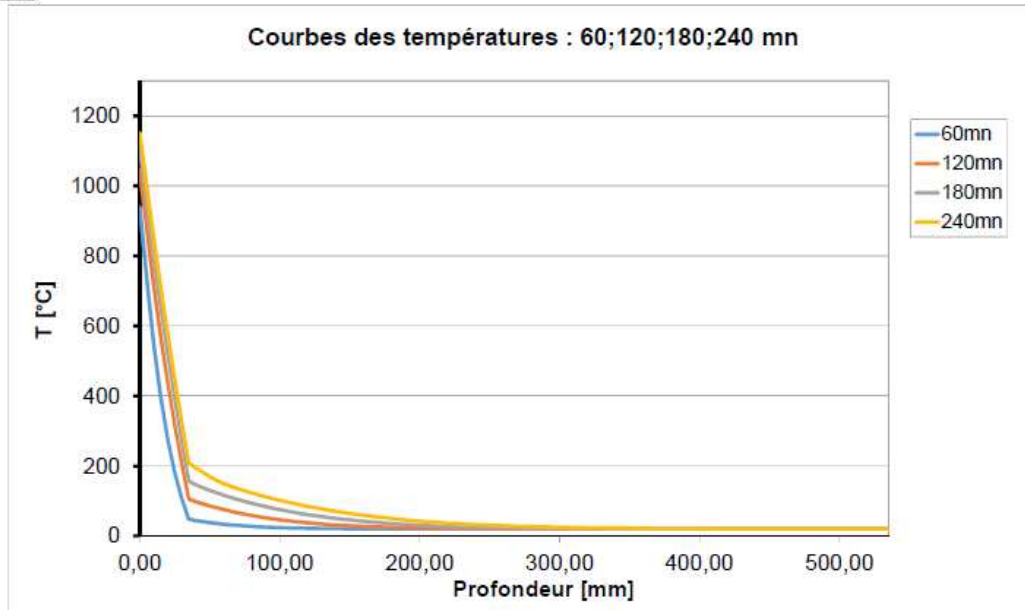


Figura 46: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Calcul Thermique - rigidité à froid

Données matériaux

Béton :	-Résistance caractéristique :	fk	C30	
	-Module d'Young à froid :	Ecm(20°)	31 729	[MPa]
Acier :	-Limite élastique :	fyk	450	[MPa]
	-Module d'Young à froid :	Es(20°)	200 000	[MPa]

Données section pour un mètre de large

Section béton :	-Hauteur :	h	0,5	[m]		
	-Discrétisation :	Δh	0,005	[m]		
	-Largeur :	L	1	[m]		
Armatures inf :			lit n°1	lit n°2	lit n°3	
	-Nb barres :	nb	6,666666667			[u]
	-Diamètre :	f	14			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]
Armatures sup :						
	-Nb barres :	nb	6,666666667			[u]
	-Diamètre :	f	14			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]

Résultats

$\epsilon_{th}/\alpha$	21,28
$\gamma_{th}/\alpha$	181,70
E	28459,91
EI	278,47
ES	14229,96
I	9,78E-03
$l_0$ (à froid)	1,04E-02
coef réduction sur I	9,39E-01
$\Delta T_{inf}$	66,71
$\Delta T_{sup}$	-24,14

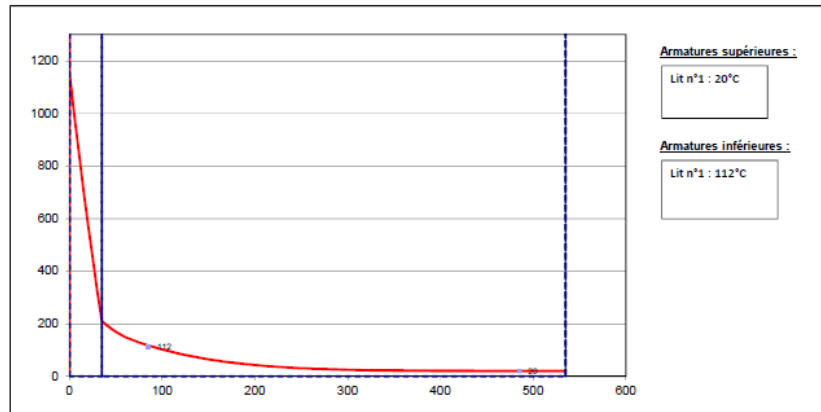


Figura 47: Caratteristiche della sezione riscaldata in presenza di Promatect-T 35mm

	A T ambiente	ISO 834 4h
$k_{\theta,cls}$	1	0,997
<b>Intradosso</b> $k_{\theta,acciaio}$	1	0,988
<b>Estradosso</b> $k_{\theta,acciaio}$	1	1

Tabella 29: Coefficienti di riduzione delle resistenze in presenza di Promatect-T

	A T ambiente	ISO834 4h
$\epsilon_{th} [ \cdot 10^{-5} ]$	0	21,28
$\gamma_{th} [ \cdot 10^{-5} m^{-1} ]$	0	181,70
$T_{inf} - T_0 [ ^\circ C ]$	0	67
$T_{sup} - T_0 [ ^\circ C ]$	0	-24

Tabella 30: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Gli sforzi termici sono costanti nella sezione:

Sforzi termici	ISO 834 4h	
	N [kN]	M [kNm]
$M_{max}, N_{max}$	2207	-608

Tabella 31: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h	
	$N_{SLU}$ [kN]	$M_{SLU}$ [kNm]
$M_{max}, N$	2431	-604
$M, N_{max}$	2436	-608
$M, N_{min}$	2262	-609

Tabella 32: Sforzi di dimensionamento in presenza di Promatect-T

Per il cls si ha dunque:  $f_{c\theta} = f_{ck} k_{\theta,cls} = 29.91$  MPa

Per le armature, si ha:

- All'intradosso  $f_{y\theta} = f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 444.6$  MPa
- All'estradosso,  $f_{y\theta} = f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 450$  MPa

Nel diagramma di interazione, al fine di avere lo stesso valore di resistenza dell'acciaio per le armature inferiori e superiori (450 MPa), si riduce il numero di armature all'intradosso di un fattore pari a 0.98.

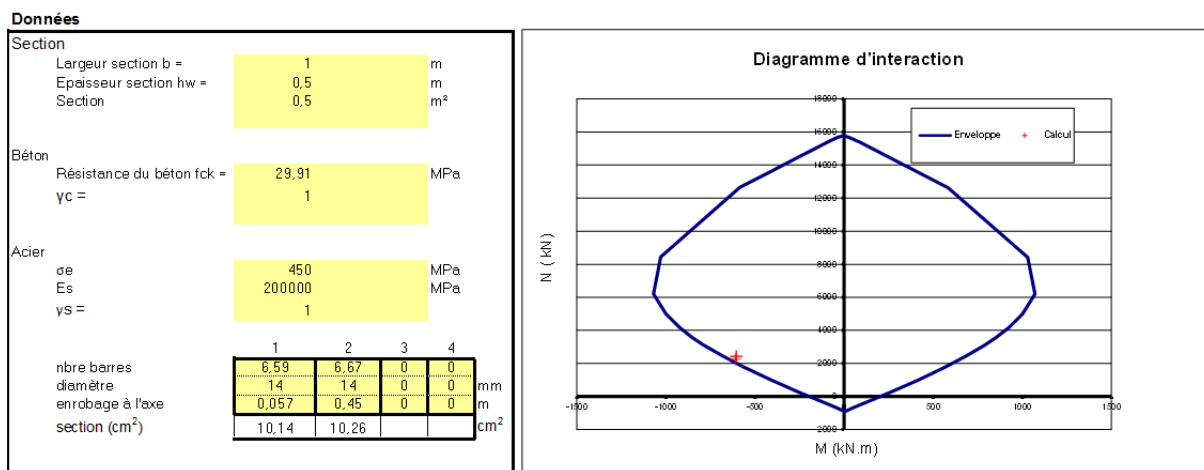


Figura 48: Diagramma di interazione della sezione d'innesto per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm

La verifica è soddisfatta in presenza di protezione termica.

#### 7.4.5 Sintesi delle armature necessarie

Ricapitolando, per le verifiche statiche ed al fuoco, si hanno le seguenti resistenze di calcolo minime, azioni sollecitanti massime/minime, armature necessarie all'intradosso/estradosso in calotta/piedritti e arco rovescio, fattori di sicurezza e dispositivi di protezione al fuoco riportati in tabella:

Resistenze di calcolo dei materiali	Verifiche statiche		Verifiche al fuoco	
	$f_{cd}$ [MPa]	20	$f_{cd, fi}$ [MPa]	29.9
$f_{yd}$ [MPa]	391	$f_{yd, fi}$ [MPa]	444 / 450	
Sezione resistente	Spessore (cm)	50	Spessore (cm)	50
Azioni sollecitanti considerate nel diagramma d'interazione	Nmax [kN/m], Mmax [kNm/m]	2816, 265	Nmax [kN/m], Mmax [kNm/m]	4290, 786
	Nmin [kN/m], M [kNm/m]	2628, 46	Nmin [kN/m], M [kNm/m]	4145, 634
Armature in calotta e piedritti	Intradosso [mm]	Ø14@150	Intradosso [mm]	Ø14@150
	Estradosso [mm]	Ø14@150	Estradosso [mm]	Ø14@150
Fattori di sicurezza		1.11		1,07
Dispositivi di protezione al fuoco			Protezione al fuoco di tipo Promatect-T o equivalente spessore 35 mm	

Tabella 33: Riassunto dei risultati della verifica

Serve un tasso d'armatura di 35 kg/m<sup>3</sup> (considerando lo spessore minimo, pari a 50 cm) e l'applicazione di una protezione termica di tipo Promatect-T 35 mm all'intradosso del rivestimento.

Considerando un fattore di 1.3 al fine di tener conto della sovrapposizione delle barre, così come della presenza dell'armatura di ripartizione, ed integrando lo spessore reale della sezione, si ottiene, in calotta e piedritti, un'incidenza d'armatura pari a 45 kg/m<sup>3</sup>.

#### 7.4.6 Verifica dei conci

In questo capitolo si verificano i conci in presenza di una protezione termica al fine di garantire la continuità di tale protezione nella sezione di innesto.

Per le proprietà della sezione riscaldata si veda la relazione PRV\_C3A\_3950\_26-19-00.

Sforzi termici	ISO 834 4h	
	N [kN]	M [kNm]
$M_{max}, N_{max}$	2207	-459

Tabella 34: Sforzi termici indotti dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h	
	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]
M <sub>max</sub> ,N	2193	-382
M,N <sub>max</sub>	2782	-409

Tabella 35: Sforzi di dimensionamento in presenza di Promatect-T

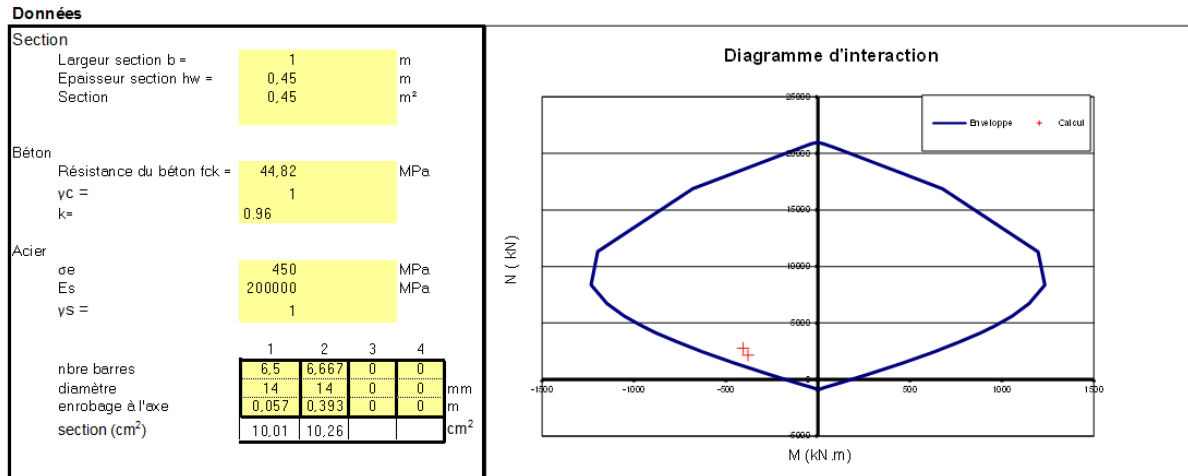


Figura 49: Diagramma di interazione dei conci della sezione d'innesto per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm

I conci sono verificati con un fattore di sicurezza pari a FS=1.53.

## 7.5 Galleria di connessione 2

Come anticipato al § 5.1, la verifica del rivestimento definitivo alle sollecitazioni statiche viene effettuata tramite i calcoli della sezione E-E dell'area di sicurezza di Clarea (relazione PRV\_C3A\_3731\_26-48-20).

Le sollecitazioni termiche ottenute dal modello SCIA per la galleria di connessione 2 (si considera l'effettiva geometria della galleria di connessione 2) vengono quindi sommate a quelle statiche provenienti dalla sezione E-E ed in particolare dalla sezione tipo S4 (definita S3 per la galleria di connessione 2). Tale approccio risulta conservativo in quanto la sezione E-E è di dimensioni maggiori.

### 7.5.1 Calcolo dell'armatura minima

Ai fini delle verifiche al fuoco, si è calcolata l'armatura minima secondo le NTC eq. 4.1.4.3:

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} \cdot b \cdot d = 0,26 \frac{2,9 \text{ MPa}}{450 \text{ MPa}} \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 500 \text{ mm} = 837,8 \text{ mm}^2$$

Scelta:

**Intradosso (lemba inferiore): Ø14@150**  
**Estradosso (lemba superiore): Ø14@150**  
**A<sub>s</sub> = 2x1026mm<sup>2</sup>**

### 7.5.2 Calcolo termico e sollecitazioni legate all'incendio

- Calcolo termico

L'andamento delle temperature nella sezione per le 3 curve è riportato in figura seguente.

#### Curva ISO834 240 minuti

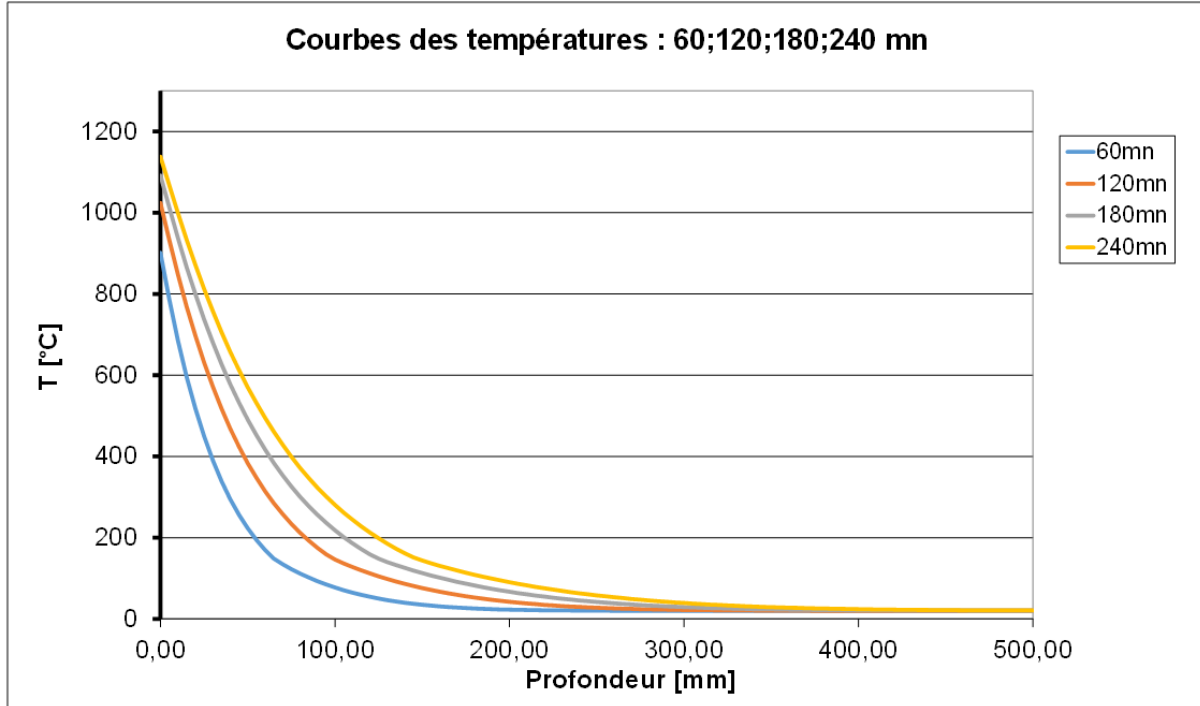


Figura 50: Andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4 ore

#### Curva HC 120 minuti

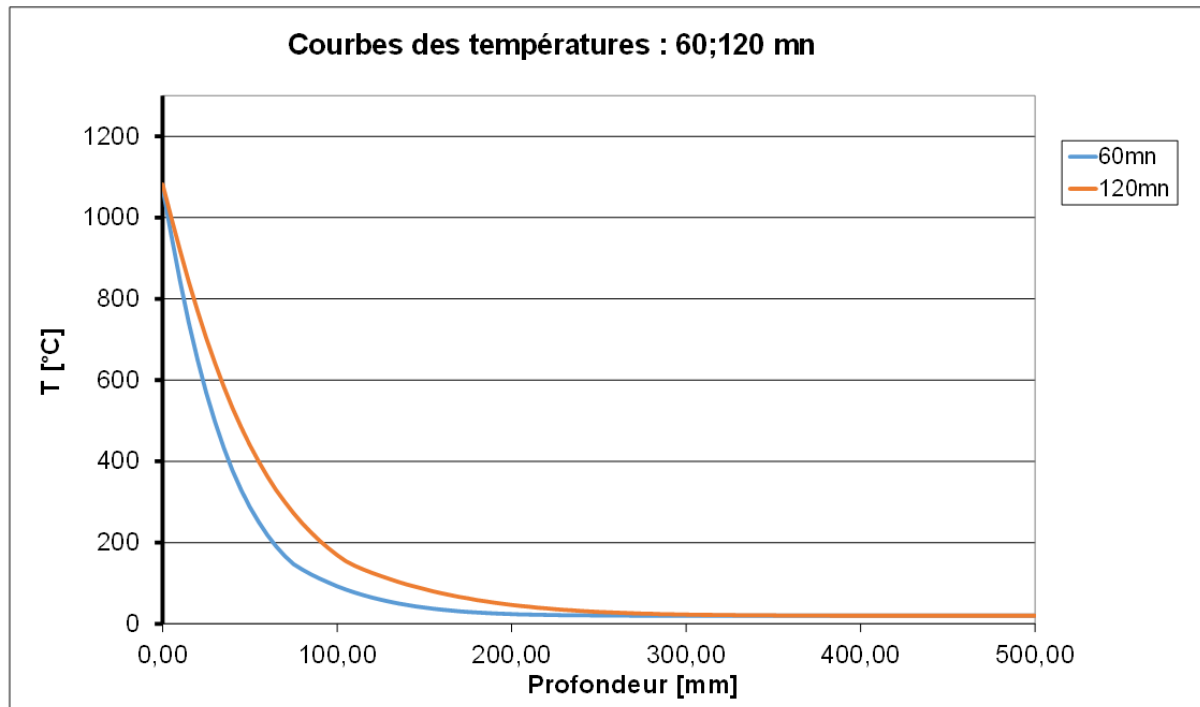


Figura 51: Andamento delle temperature nella sezione per la curva HC 2 ore

Curva RWS 120 minuti

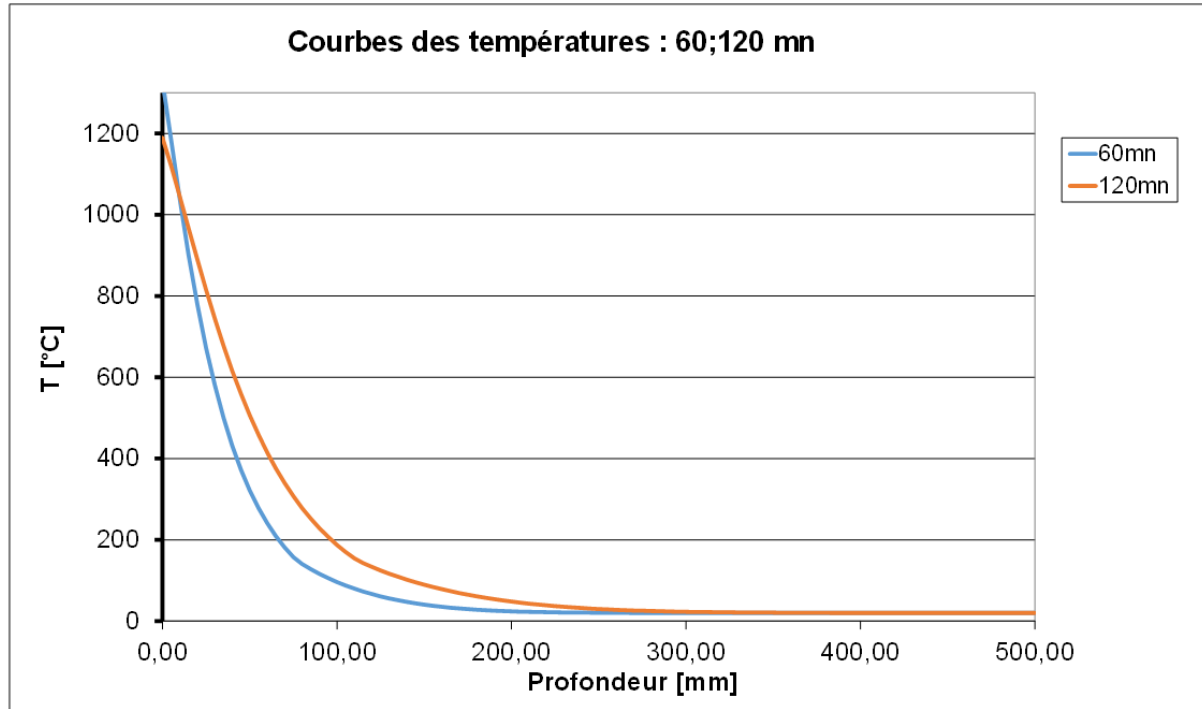


Figura 52: Andamento delle temperature nella sezione per la curva RWS 2 ore

- Calcolo delle proprietà termiche della sezione riscaldata

La sintesi delle proprietà termiche della sezione riscaldata per ogni curva di incendio è fornita nella tabella seguente:

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
<b>E<sub>0</sub> [MPa]</b>	31591	21637	24439	24124
<b>I<sub>0</sub> [.10<sup>-3</sup> m<sup>4</sup>]</b>	10,4	9,02	8,66	8,60

Tabella 36: Caratteristiche della sezione riscaldata

- Sollecitazioni indirette legate all'incendio

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
<b>ε<sub>th</sub> [.10<sup>-5</sup>]</b>	0	48,7	33,4	33,1
<b>γ<sub>th</sub> [.10<sup>-5</sup> m<sup>-1</sup>]</b>	0	266,3	276,3	267,7
<b>T<sub>inf</sub> – T<sub>0</sub> [°C]</b>	0	115	102	100
<b>T<sub>sup</sub> – T<sub>0</sub> [°C]</b>	0	-18	-36	-34

Tabella 37: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo

### 7.5.3 Verifica in presenza dell'armatura minima

I carichi statici (dalla sezione E-E) e termici (dal modello specifico in SCIA) vengono inseriti nel modello SCIA secondo il caso di carico indicato in §8.1.5.

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]
M <sub>max</sub> , N <sub>max</sub>	10994	-1732	7480	-1657	7480	-1657
M <sub>l</sub> , N <sub>min</sub>	5892	-794	4013	-784	4013	-784

Tabella 38: Sforzi di dimensionamento

Utilizzando le medesime ipotesi di calcolo che per la sezione nei calcoli precedenti (considerando quindi i primi 5 cm di cls dimezzando le armature all'intradosso, dato che  $k_{\theta, acciaio}=0,5$ ) la verifica non è soddisfatta per un'armatura minima.

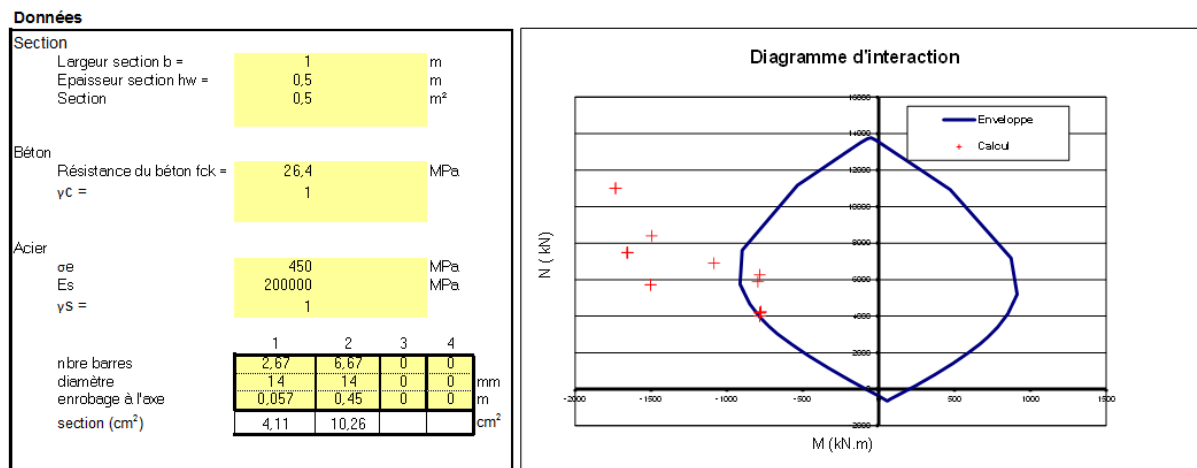


Figura 53: Diagramma di interazione della sezione per la curva di incendio ISO834 4h

Si effettua dunque la verifica in presenza di protezione termica e di un'armatura supplementare al fine di soddisfare le condizioni di resistenza.

### 7.5.4 Verifica in presenza di protezione termica

Si svolge il calcolo termico come descritto in precedenza ma tenendo conto della protezione termica di tipo Promatect-T 35 mm.

L'andamento della temperatura nella sezione è determinato con il foglio Excel elaborato internamente da BG come mostrato e descritto in precedenza.

La tabella seguente presenta la sintesi dei valori stabiliti per ciascuna delle proprietà per il cls e per l'isolante (prestazioni).



Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Tali parametri sono stati tratti dall'Eurocodice 2 – parte 1-2, dall'Eurocodice 1 – parte 1-2, dalle raccomandazioni del CETU "comportement au feu des tunnel routiers" e "catalogue des protections passives" o dalle schede tecniche dei fornitori.

	$C_p$ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$\rho$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	$\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	$\alpha_c$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	$\epsilon_m$ (-)	$\epsilon_f$ (-)	$\Phi$ (-)
Clis	$f(\theta^\circ C)$ (secondo EC 2)	2 300 (secondo EC2)	$f(\theta^\circ C)$ (secondo EC 2)	HC ed Eureka: 50 ISO834 e RWS: 25 (secondo EC1 e racc. CETU)	0.7 (secondo EC2)	1 (secondo EC2 e racc. CETU)	1 (secondo EC1 e racc. CETU)
Isolante	742 (secondo catalogo CETU)	810 -990 (secondo catalogo CETU e fornitori)	0.212-0.2 (secondo fornitori)	4 (secondo EC1 e racc. CETU)	0.8 (secondo racc. CETU)	1 (secondo EC2 e racc. CETU)	1 (secondo EC2 e racc. CETU)

**Tabella 39: Proprietà termiche di calcestruzzo e materiale isolante**

Il calcolo termico per la curva ISO 834 4h per il sistema fogli di protezione termica 35 mm + rivestimento 500 mm è mostrato nella figura seguente.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo



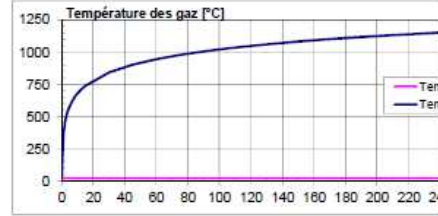
Calculs thermiques avec exposition feu CN  
 Fiche de calcul  
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

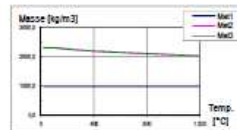
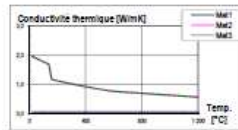
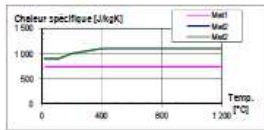
		CN		[°C]
		INF	SUP	
- Température initiale :	$\theta_{i0}$	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	$\theta_{max}$	1 153	20	[°C]
- Coefficient de convection :	$\alpha_c$	25	4	[W/m <sup>2</sup> K]
<b>Rayonnement :</b>				
- Facteur de forme :	$\Phi$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité du feu :	$\epsilon_f$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité surface de l'élément :	$\epsilon_m$	0,8	0,8	[-]

Lancement



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
- Epaisseur :	e	35	500	0	[mm]
- Matériau :		Promatect T	Béton u=1.5%	Béton u=1.5%	
- Masse volumique :	$\rho$ (20°C)	990	2 300	2 300	[kg/m <sup>3</sup> ]
- Chaleur spécifique :	$c_p$ (20°C)	742,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
- Conductivité therm. :	$\lambda_a$ (20°C)	0,05	-	-	[W/mK]
- Code matériau :		10	2	2	



Données calcul

- Pas de temps :	S	[s]	OK : dt sous-multiple de la durée totale
- dx :	S	[mm]	OK : dx sous-multiple de l'épaisseur totale
- durée feu :	240	[min]	-

Résultats

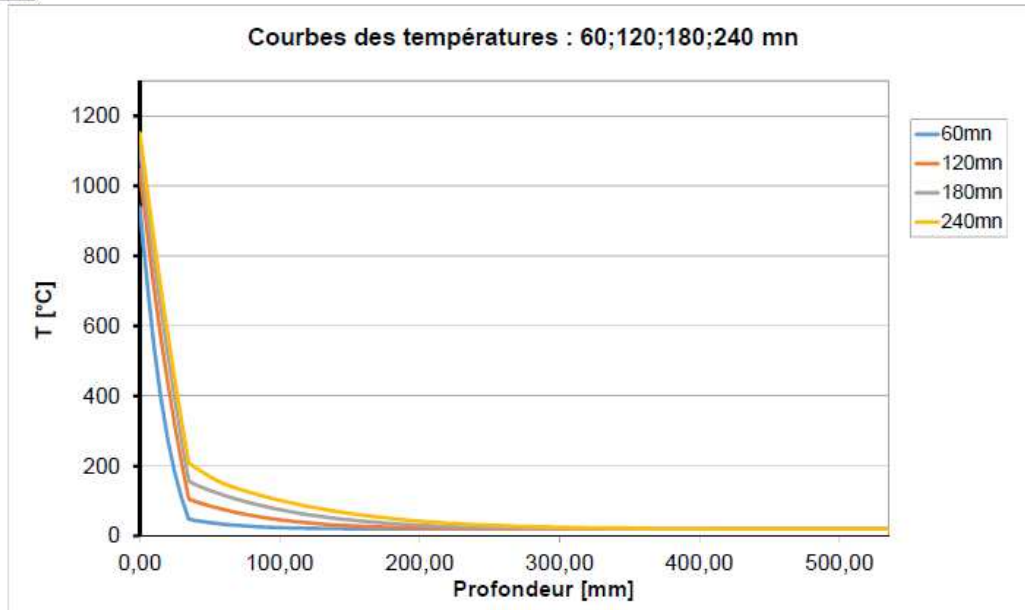


Figura 54: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Données matériaux

Béton :	-Résistance caractéristique :	f <sub>ck</sub>	C30	
	-Module d'Young à froid :	E <sub>cm(20°)</sub>	31 729	[MPa]
Acier :	-Limite élastique :	f <sub>yk</sub>	450	[MPa]
	-Module d'Young à froid :	E <sub>s(20°)</sub>	200 000	[MPa]

Données section pour un mètre de large

Section béton :	-Hauteur :	h	0,5	[m]		
	-Discretisation :	Δh	0,005	[m]		
	-Largeur :	L	1	[m]		
Armatures inf :			lit n°1	lit n°2	lit n°3	
	-Nb barres :	nb	10			[u]
	-Diamètre :	f	24			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]
	-Matériau n°	n°	2	2	2	
Armatures sup :						
	-Nb barres :	nb	10			[u]
	-Diamètre :	f	24			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]
			2	2	2	

Résultats

$\epsilon_{th}/\alpha$	25,97
$\gamma_{th}/\alpha$	229,53

E	28459,91
EI	278,47
ES	14229,96
I	9,78E-03
$l_0$ (à froid)	1,04E-02
coef réduction sur I	9,39E-01

$\Delta T_{inf}$	83,36
$\Delta T_{sup}$	-31,41

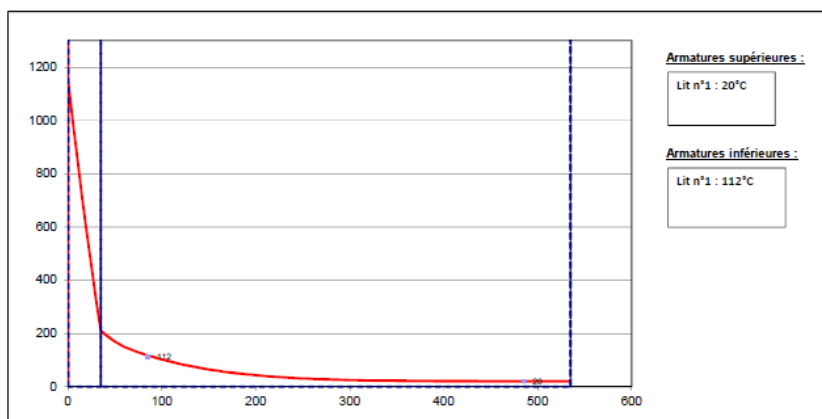


Figura 55: Caratteristiche della sezione riscaldata in presenza di Promatect-T 35mm

	A T ambiente	ISO 834 4h
$k_{\theta,cls}$	1	0,997
Intradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	0,988
Estradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	1

Tabella 40: Coefficienti di riduzione delle resistenze in presenza di Promatect-T

	A T ambiente	ISO834 4h
$\epsilon_{th} [ \cdot 10^{-5} ]$	0	25,97
$\gamma_{th} [ \cdot 10^{-5} m^{-1} ]$	0	229,53
$T_{inf} - T_0 [ ^\circ C ]$	0	83
$T_{sup} - T_0 [ ^\circ C ]$	0	-31

Tabella 41: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del calcestruzzo in presenza di Promatect-T

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Sforzi di dimensionamento	ISO 834 4h	
	N <sub>SLU</sub> [kN]	M <sub>SLU</sub> [kNm]
M <sub>max</sub> , N <sub>max</sub>	5896	-1533
M, N <sub>min</sub>	3163	-734

Tabella 42: Sforzi di dimensionamento in presenza di Promatect-T

Per il cls si ha dunque:  $f_{c\theta} = f_{ck} k_{\theta,cls} = 29.91 \text{ MPa}$

Per le armature, si ha:

- All'intradosso  $f_{y\theta} = f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 444.6 \text{ MPa}$
- All'estradosso,  $f_{y\theta} = f_{yk} k_{\theta,acciaio} = 450 \text{ MPa}$

Nel diagramma di interazione, al fine di avere lo stesso valore di resistenza dell'acciaio per le armature inferiori e superiori (450 MPa), si riduce il numero di armature all'intradosso di un fattore pari a 0.98.

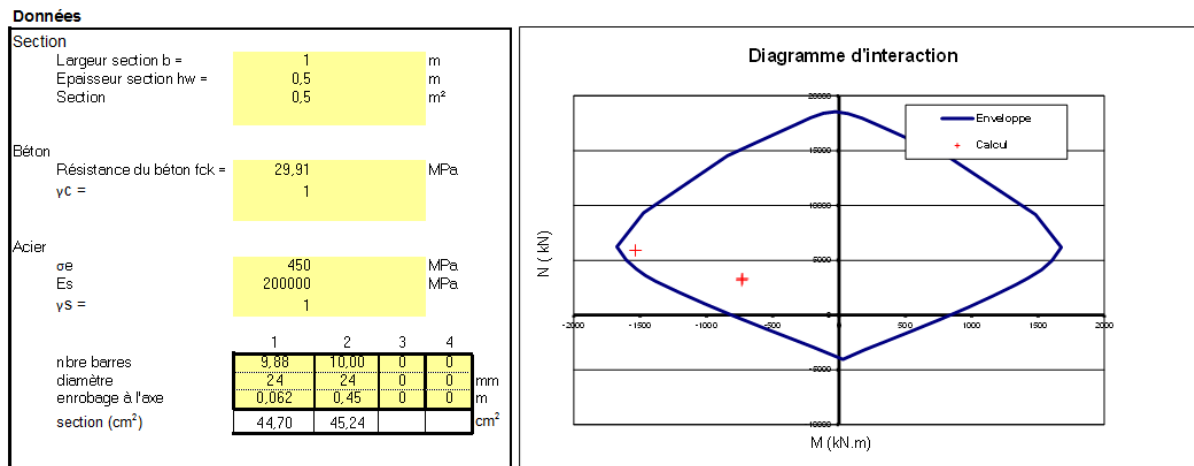


Figura 56: Diagramma di interazione per la curva di incendio ISO834 4h in presenza di Promatect-T 35 mm

La verifica è soddisfatta in presenza di protezione termica.

### 7.5.5 Sintesi delle armature necessarie

Ricapitolando, per le verifiche statiche ed al fuoco, si hanno le seguenti resistenze di calcolo minime, azioni sollecitanti massime/minime, armature necessarie all'intradosso/estradosso in calotta/piedritti e arco rovescio, fattori di sicurezza e dispositivi di protezione al fuoco riportati in tabella:

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

	Verifiche statiche		Verifiche al fuoco	
<b>Resistenze di calcolo dei materiali</b>	$f_{cd}$ [MPa]	20	$f_{cd, fi}$ [MPa]	29.9
	$f_{yd}$ [MPa]	391	$f_{yd, fi}$ [MPa]	444 / 450
<b>Sezione resistente</b>	Spessore (cm)	50	Spessore (cm)	50
<b>Azioni sollecitanti considerate nel diagramma d'interazione</b>	Nmax [kN/m], Mmax [kNm/m]	3032, -261	Nmax [kN/m], Mmax [kNm/m]	5896, -1532
	Nmin [kN/m], M [kNm/m]	1751, 81	Nmin [kN/m], M [kNm/m]	3163, -734
<b>Armature in calotta e piedritti</b>	Intradosso [mm]	-	Intradosso [mm]	Ø24@100
	Estradosso [mm]	-	Estradosso [mm]	Ø24@100
<b>Fattori di sicurezza</b>		1.85		1.08
<b>Dispositivi di protezione al fuoco</b>	-		Protezione al fuoco di tipo Promatect-T o equivalente spessore 35 mm	

**Tabella 43: Riassunto dei risultati della verifica**

In calotta e piedritti, serve un tasso d'armatura di  $140 \text{ kg/m}^3$  (considerando lo spessore minimo, pari a 50 cm) e l'applicazione di una protezione termica di tipo Promatect-T 35 mm all'intradosso del rivestimento.

Considerando un fattore di 1.3 al fine di tener conto della sovrapposizione delle barre, così come della presenza dell'armatura di ripartizione, ed integrando lo spessore reale della sezione, si ottiene, in calotta e piedritti, un'incidenza d'armatura pari a  **$180 \text{ kg/m}^3$** .

## 8. Dimensionamento del setto verticale interno

### 8.1 Generalità

All'interno della galleria di ventilazione sarà realizzato un setto verticale di suddivisione tra la zona di estrazione dei fumi in caso di incendio ed il condotto di ventilazione dell'area di sicurezza. L'elemento avrà un'altezza massima di 8.3 m, in corrispondenza alla sezione di dimensioni maggiori, ed uno spessore pari a 0.25 m.

Il setto viene realizzato successivamente al getto del rivestimento definitivo. Tra il rivestimento in calotta ed il setto in c.a. si dispone un riempimento in polistirene per permettere la dilatazione libera del setto. Inferiormente, tra il setto e la platea di riempimento si crea un appoggio in elastomero e schiuma. La connessione tra setto e rivestimento/platea si realizza tramite degli spinotti in acciaio. Il passo degli spinotti è definito al § 9.4.

In direzione longitudinale si prevedono giunti strutturali ogni 50 m (mentre la lunghezza dei campi di getto è pari a 10 m).

Al fine di proteggere questi giunti al fuoco e limitare l'espansione termica in entrambe le direzioni (longitudinale e trasversale), si mette in opera sul lato del condotto di estrazione

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

fumi una protezione termica con pannelli di tipo Promatect-T o equivalenti di spessore 35 mm. Ulteriori giunti tagliafuoco sono previsti in corrispondenza di polistirene ed elastomeri (nei giunti superiori ed inferiori) al fine di mantenere intatte le loro prestazioni.

## 8.2 Carichi agenti

I carichi più importanti agenti sul setto sono dati dalla pressione/depressione di ventilazione dell'impianto di estrazione fumi (ventilatori principali) e dell'area di sicurezza. Il peso proprio della struttura è stato trascurato, in quanto avrebbe un effetto favorevole di riduzione delle tensioni di trazione nelle barre di armatura.

La tabella seguente riassume le pressioni di ventilazione sul setto, ottenute dalle simulazioni aerauliche:

	<b>Valori massimi (kPa)</b>	<b>Valori “a regime” (kPa)</b>
<b>Ventilatori principali (estrazione fumi)</b>	± 6.6	± 3
<b>Ventilatori area di sicurezza</b>	-	± 1.5

**Tabella 44: Carichi dovuti alla pressione/depressione del setto**

Come si può vedere dalla tabella, i ventilatori principali ed i ventilatori dell'area di sicurezza possono portare una pressione sia positiva che negativa sul setto. Pertanto le azioni positive di un condotto possono sommarsi alle pressioni negative dell'altro condotto o viceversa. Per i ventilatori principali si considerano i valori massimi.

Sull'elemento strutturale, schematizzato come una trave di larghezza pari a 1.0 m, è stata dunque assunta a stato limite ultimo un'unica azione variabile, calcolata come segue:

$$q_k = 6.6 + 1.5 = 8.1 \text{ kN/m}$$

In esercizio si utilizzerà il valore massimo a regime:

$$q_k = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Avendo trascurato il peso proprio, non vi sono azioni permanenti.

## 8.3 Armature necessarie nel setto

### 8.3.1 Materiali e resistenze di calcolo statico

Il setto divisorio sarà realizzato con i seguenti materiali:

Calcestruzzo di classe C30/37:

Resistenza cilindrica caratteristica:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Resistenza a compressione di calcolo per le verifiche a SLU:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = 17 \text{ MPa}$$

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

dove:

$\alpha_{cc} = 0.85$  coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata

$\gamma_c = 1.5$  coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo

Resistenza a trazione media:  $f_{ctm} = 2.9 \text{ N/mm}^2$

Acciaio d'armatura B450C:

Resistenza caratteristica a snervamento:  $f_{yk} = 450 \text{ MPa}$

Resistenza a snervamento di calcolo:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 391 \text{ MPa}$$

Dove:

$\gamma_s = 1.15$  coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio d'armatura

### 8.3.2 Verifica a SLU

La figura seguente illustra lo schema statico di calcolo del setto, rappresentato da una trave verticale appoggiata alle estremità di altezza pari a 8.3 m.

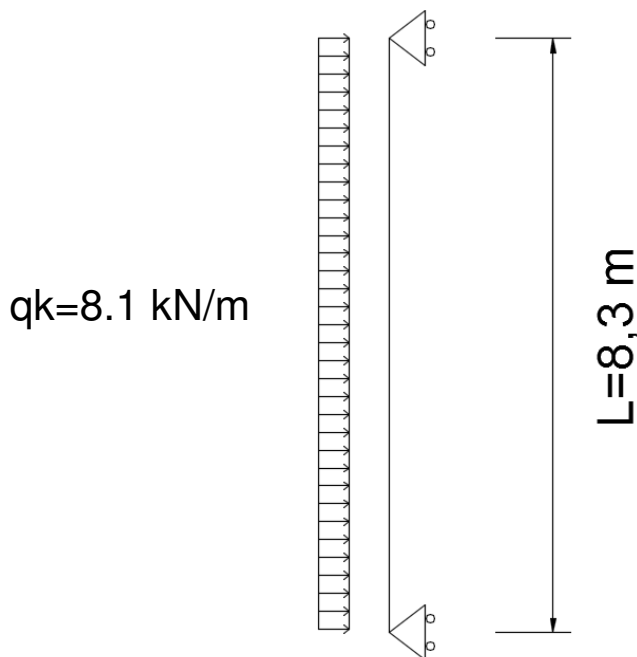


Figura 57: Schema statico del setto

L'azione di calcolo allo SLU sarà data dalla seguente combinazione secondo le NTC per un'azione variabile:

$$p_d = \gamma_Q q_k = 12.5 \text{ kN/m}$$

### Verifica a momento flettente

Il momento flettente di calcolo, agente nella sezione di mezzeria, sarà pari a:

$$M_{sd} = \frac{p_d \cdot l^2}{8} = 104.6 \text{ kNm/m}$$

Per la sezione si sono prese in considerazione le seguenti misure:

Altezza  $h = 250 \text{ mm}$

Copriferro  $c = 30 \text{ mm}$

Altezza utile  $d = h - c = 220 \text{ mm}$

L'area di armatura tesa necessaria ad assorbire il momento flettente di calcolo è stata calcolata utilizzando un metodo semplificato che consiste nel trascurare l'armatura compressa e considerare un braccio di leva interno pari a  $0.9 d$ .

$$A_s = \frac{M_{sd}}{0.9d \cdot f_{yd}} = 1350 \text{ mm}^2$$

L'armatura minima prescritta dalla normativa è pari a:

$$A_{s,\min} = 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t \cdot d = 367 \text{ mm}^2 < A_s$$

dove:

$b_t = 1000 \text{ mm}$  (calcolo effettuato su una sezione di  $1 \text{ m}$ )

Considerando un'armatura tesa composta da barre  $\phi 14$  con passo  $10 \text{ cm}$  si ottiene un'armatura effettiva pari a:

$$A_{s,\text{eff}} = 1539 \text{ mm}^2$$

L'armatura sarà disposta in modo simmetrico (uguale su entrambe le facce), per cui si avrà un'area totale di armatura sulla sezione pari a  $3079 \text{ mm}^2$ .

### Verifica a taglio

$$V_{Ed} = p_d \cdot \frac{l}{2} = 50.4 \text{ kN}$$

La resistenza della sezione senza armatura al taglio secondo l'EC2 corrisponde a:

$$V_{Rd} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k(100\rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w d \geq v_{\min} A_c$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1,95$$



$$\rho_1 = \frac{A_s}{A_c} = 0,0062$$

$$v_{min} = 0,035k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,52 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd} = 155 \text{ kN}$$

La sezione è verificata senza armatura al taglio con un fattore di sicurezza pari a FS=3.

### 8.3.3 Verifica al fuoco

Per quanto riguarda la verifica al fuoco, la metodologia è quella utilizzata nei capitoli precedenti. La struttura del setto è isostatica, dunque l'incendio non genera nessuno sforzo termico nella sezione. La verifica si esegua dunque tenendo conto delle caratteristiche di resistenza ridotte dei materiali soggetti all'aumento di temperatura:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$$

I precedenti calcoli permettono di affermare che la resistenza al fuoco di 4 ore secondo la curva ISO 834 è il caso determinante.

Alla figura seguente si mostra la temperatura all'interno della sezione in calcestruzzo di spessore 25 cm, considerata la presenza dei pannelli di tipo Promatect-T.

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo



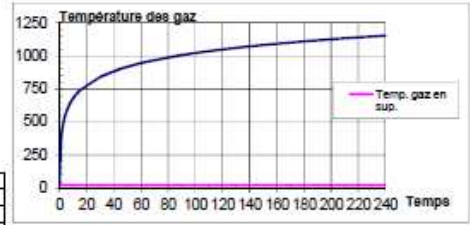
Calculs thermiques avec exposition feu CN  
 Fiche de calcul  
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

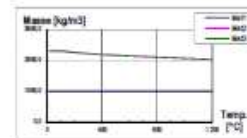
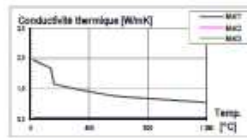
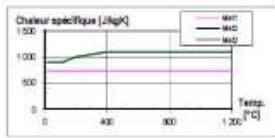
		Face		
		INF	SUP	
- Température initiale :	$\theta_{i0}$	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	$\theta_{max}$	1153	20	[°C]
- Coefficient de convection :	$\alpha_{ce}$	25	4	[W/m²K]
- Rayonnement :				
- Facteur de forme	$\Phi$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité du feu	$\epsilon_f$	1,0	1,0	[-]
- Emissivité surface de l'élément	$\epsilon_e$	0,8	0,8	[-]

Lancement



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
- Epaisseur	e	25	250	0	[mm]
- Matériau		Promatect T	Béton u=1.5%	Béton u=1.5%	
- Masse volumique	$\rho$ (20°C)	990	2300	2300	[kg/m³]
- Chaleur spécifique	$c_p$ (20°C)	742,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
- Conductivité therm.	$\lambda_c$ (20°C)	0,05	-	-	[W/mK]
- Code matériau		10	2	2	



Données calcul

- Pas de temps	5	[s]	OK : dit sous-multiple de la durée totale
- dx	5	[mm]	OK : dit sous-multiple de l'épaisseur totale
- durée feu	240	[mn]	-

Résultats

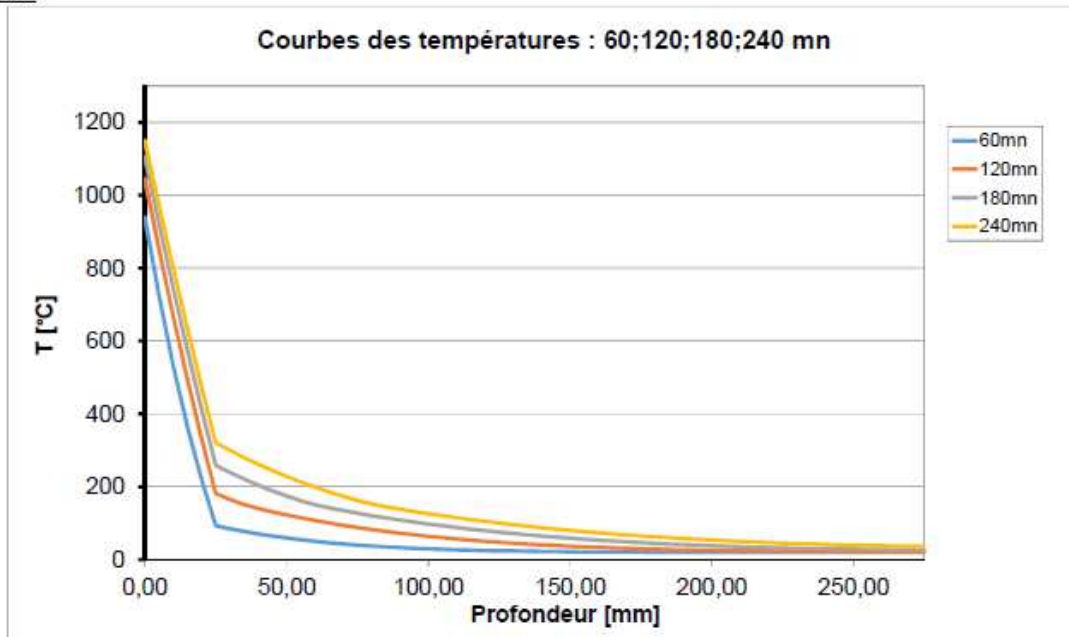


Figura 58: Dati di input per il calcolo e andamento delle temperature nella sezione per la curva ISO834 4h

Le proprietà della sezione riscaldata sono presentate alla figura seguente, considerando l'utilizzo delle fibre in polipropilene:

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Calcul Thermique - rigidité à froid

Données matériaux

Béton :	-Résistance caractéristique :	f <sub>ck</sub>	C30	
	-Module d'Young à froid :	E <sub>cm</sub> (20°)	31 729	[MPa]
Acier :	-Limite élastique :	f <sub>yk</sub>	450	[MPa]
	-Module d'Young à froid :	E <sub>s</sub> (20°)	200 000	[MPa]

Données section pour un mètre de large

Section béton :	-Hauteur :	h	0,25	[m]		
	-Discretisation :	Δh	0,005	[m]		
	-Largeur :	L	1	[m]		
Armatures inf :			lit n°1	lit n°2	lit n°3	
	-Nb barres :	nb	10			[u]
	-Diamètre :	f	14			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]
Armatures sup :						
	-Nb barres :	nb	10			[u]
	-Diamètre :	f	14			[mm]
	-Enrobage :	e	50			[mm]
			2	2	2	

Résultats

ε <sub>th</sub> /α	72,53
γ <sub>th</sub> /α	552,98
E	22632,47
EI	29,35
ES	5658,12
I	1,30E-03
I <sub>0</sub> (à froid)	1,30E-03
coef réduction sur I	9,96E-01
ΔT <sub>inf</sub>	141,66
ΔT <sub>sup</sub>	3,40

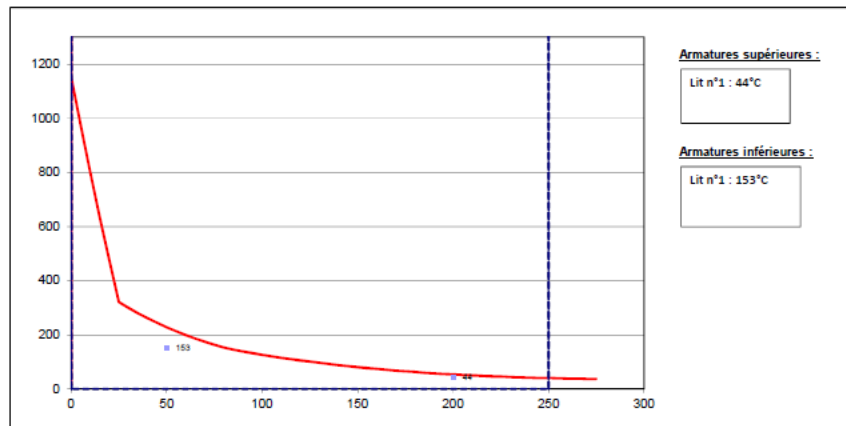


Figura 59: Caratteristiche della sezione riscaldata

Secondo l'Eurocodice 2, 1-2, tabella 3.2a si ottengono i seguenti coefficienti di riduzione di resistenza:

	A T ambiente	ISO 834 4h
<b>k<sub>θ,cls</sub></b>	1	0,999
<b>Lato esposto a 153°C</b> <b>k<sub>θ,acciaio</sub></b>	1	0,95
<b>Lato esposto a 44°C</b> <b>k<sub>θ,acciaio</sub></b>	1	1

Tabella 45: Coefficienti di riduzione delle resistenze

$$f_{cd,fi} = 0.999 \cdot 30 \text{ MPa} = 29.97 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,fi,153} = 0.95 \cdot 450 \text{ MPa} = 427 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,fi,44} = 450 \text{ MPa}$$

Il momento resistente della sezione è dunque:

$$M_{Rd,fi} = 1539 \text{ mm}^2 \cdot 427 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0.9 \cdot 220 \text{ mm} = 130 \text{ kNm}$$

Nel caso di situazione accidentale abbiamo:

$$p_d = 12 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed,fi} = \frac{12 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (8.2 \text{ m})^2}{8} = 100.9 \text{ kNm} < M_{Rd,fi}$$

L'armatura è dunque sufficiente per resistere alla situazione di incendio, ed è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=1.3.

Si ottiene un'incidenza d'armatura pari a 95 kg/m<sup>3</sup>.

Considerando un fattore di 1.8 al fine di tener conto delle armature in senso longitudinale, della sovrapposizione delle barre, così come di un'eventuale staffatura nella zona degli appoggi, si ottiene **un'incidenza d'armatura pari a 170 kg/m<sup>3</sup>**, da considerare nei computi.

### 8.3.4 Verifica a SLE

L'azione di calcolo allo SLE sarà data dalla seguenti combinazioni:

$q_{ELS} = q_k$  per la verifica dell'apertura delle fessure (combinazione conservativa: il peso proprio produce una compressione favorevole)

$q_{ELS} = q_k + g_k$  per la verifica della compressione nel calcestruzzo

Con:

$$q_k = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_k = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Le sollecitazioni sono quindi:

$$M = 25,8 \text{ kNm}$$

$$N = 51,9 \text{ kN}$$

#### Apertura delle fessure

Si verifica la limitazione delle fessure tramite il criterio di tensione limite nell'acciaio. Secondo le tabelle 7.2 e 7.3 dell'EC 2, per un'armatura di diametro 14mm e spaziatura 100mm la tensione nell'acciaio non deve superare i 200MPa al fine di rispettare la limitazione dell'apertura delle fessure a 0,2 mm:

$$\sigma_s = \frac{M}{z} \cdot \frac{1}{A_s} = \frac{25,8 \text{ kNm}}{0,9 \cdot 0,22 \text{ m}} \cdot \frac{1}{1,026 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 127 \text{ MPa} < 200 \text{ MPa}$$

Il criterio di limitazione di apertura delle fessure è dunque soddisfatto.

#### Compressione massima nel calcestruzzo

Note de calcul du revêtement définitif / Relazione di calcolo del rivestimento definitivo

Secondo l'EC 2, al fine di evitare una fessurazione longitudinale con una conseguente diminuzione della durabilità, è necessario verificare che la tensione nel calcestruzzo non superi la tensione limite di:

$$\sigma_c \leq 0,6f_{ck} = 18 \text{ MPa}$$

Si considera in questo caso anche lo sforzo normale dovuto al peso proprio. Quest'ultima è un'ipotesi conservativa siccome il massimo dello sforzo normale si trova in realtà più in basso rispetto al punto di momento massimo:

$$\sigma_c = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = 0,2 \text{ MPa} + 2,47 \text{ MPa} = 2.67 \text{ MPa} < 18 \text{ MPa}$$

La sezione è verificata alla tensione massima.

#### 8.4 Passo degli spinotti tra setto e rivestimento

Sulla base della pressione a SLU agente sul setto considerando la sua altezza massima (§ 8.3.2), la reazione da riprendere in senso trasversale è pari a 50.4 kN. Per spinotti in acciaio S500 di 20 mm di diametro, la resistenza al taglio è pari a

$$V_R = 0.75 \cdot A_s \cdot \tau_s = 0.75 \cdot 314 \text{ mm}^2 \cdot 251 \text{ MPa} = 59 \text{ kN}$$

Il passo degli spinotti necessario è quindi pari a 1 m.

### 9. Conclusioni

In conclusione, le verifiche risultano soddisfatte con le caratteristiche dei rivestimenti definitivi illustrate nella tabella seguente.

Opera	Maddalena 2, sezione cilindrica	Maddalena 2, sezione S2 Tronco-conica	Maddalena 2, sezioni con conci prefabbricati	Galleria di connessione 2	Sezione di innesto (con connessione 2 o con TdB)	Setto divisorio (Maddalena 2 e connessione 2)
Spessore minimo (cm)	50	50-120	45	50	50	25
Classe cls	C30/37	C30/37	C45/55	C30/37	C30/37	C30/37
Tasso d'armatura (kg/m <sup>3</sup> )	160 (calotta e piedritti) 120 (arco rovescio)	160-70*(calotta e piedritti) 120 (arco rovescio)	100	180	45 (rivestimento) 100 (conci)	170
Protezione termica	Promatect – T 35 mm lato condotto di ventilazione	Promatect – T 35 mm lato condotto di ventilazione	-	Promatect – T 35 mm	Promatect – T 35 mm (rivestimento + conci)	Promatect – T 35 mm

\*Si intendono 160 kg/m<sup>3</sup> per le sezioni di spessore 50 cm e 70 kg/m<sup>3</sup> per le sezioni di spessore 120 cm. In complessivo è pari a 120 kg/m<sup>3</sup>

**Tabella 46: Caratteristiche dei rivestimenti definitivi**