

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

SECTION COURANTE COTE ITALIE – SEZIONE CORRENTE LATO ITALIA
SCENARIOS DE PROJET COTE ITALIE – SCENARI DI PROGETTO LATO ITALIARAPPORT DE CALCUL DU REVETEMENT AVEC VOUSOIRS PREFABRIQUES –
RELAZIONE DI CALCOLO DEL RIVESTIMENTO CON CONCI PREFABBRICATI

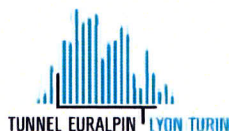
Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0-F	2012-2013	Première diffusion / Prima emissione Révision suite aux commentaires LTF / Revisione a seguito commenti LTF Passage au statut AP / Passaggio allo stato AP	M. JANUTOLO (BG) E. GARIN (BG) F. DE VIVO (LOM)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
G	31/10/2016	Première émission PRV – Révision des tronçons d'application de la section / Prima emissione PRV – revisione delle tratte di applicazione della sezione	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG) G. QUESTI (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
H	27/01/2017	Révision suite aux commentaires TELT / Revisione a seguito commenti TELT	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG) G. QUESTI (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
I	30/03/2017	Révision suite aux commentaires TELT et passage au statut AP / Revisione a seguito commenti TELT e passaggio allo stato AP	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG) G. QUESTI (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI

COD E DOC	P	R	V	C	3	A	T	S	3	3	9	5	0	I
	Phase / Fase		Sigle étude / Sigla		Émetteur / Emittente			Numero			Indice			

A	P	N	0	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	C3A	//	//	26	19	00	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	9
1.1 Generalità.....	9
1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato.....	9
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	10
2.1 Documenti di progetto	10
2.2 Quadro normativo di riferimento.....	10
2.3 Bibliografia	10
3. CARATTERISTICHE DEI CONCI E DEGLI ANELLI.....	11
3.1 Geometria	11
3.2 Materiali.....	13
3.2.1 Calcestruzzo	13
3.2.2 Acciaio	14
3.3 Processo di prefabbricazione e resistenza allo scassero	14
4. ARMATURE MINIME SECONDO NTC 2008.....	16
4.1 Armature circolari.....	16
4.2 Armature longitudinali.....	16
5. VERIFICA DELLA SEZIONE A MOVIMENTAZIONE E STOCCAGGIO.....	17
5.1 Sollecitazioni allo stoccaggio	17
5.2 Sollecitazioni alla movimentazione.....	19
6. DEFINIZIONE DELLE COMBINAZIONI DI CARICO (IN FASE DI COSTRUZIONE E DI ESERCIZIO)	20
6.1 Azioni permanenti	20
6.1.1 Peso proprio	20
6.1.2 Pressione dell'ammasso roccioso	20
6.1.3 Pressione idrostatica.....	20
6.2 Azioni di esecuzione.....	21
6.2.1 Iniezione del riempimento	21
6.2.2 Spinta della TBM.....	22
6.3 Elementi da verificare.....	22
6.4 Sezioni di verifica (ammasso)	23
6.5 Sintesi delle verifiche	24
7. MODELLO DELL'ANELLO DI CONCI E RISULTATI	26
7.1 Descrizione del modello	26
7.1.1 Modellazione del rivestimento.....	26
7.1.2 Modellazione dei giunti radiali dei conci.....	26
7.1.3 Modellazione della reazione dell'ammasso	27
7.1.4 Spinta dell'ammasso sul rivestimento	29
7.2 Sollecitazioni ottenute	39
7.2.1 Sezione A	41
7.2.2 Sezione C	43
7.2.3 Sezione C sotto pressione di riempimento.....	44
7.2.4 Sezione D	45

7.2.5	Sezione D sotto pressione di pompaggio	46
7.3	Spostamenti / deformata	47
7.3.1	Sezione A	47
7.3.2	Sezione B	47
7.3.3	Sezione C	48
7.3.4	Sezione D	48
8.	VERIFICA STATICA DELLE SEZIONI IN DIREZIONE RADIALE	48
8.1	Sezione A	49
8.1.1	Verifica a pressoflessione	49
8.1.2	Verifica a taglio	49
8.1.3	Verifica dei giunti	50
8.1.4	Verifica a SLE	50
8.2	Sezione B	51
8.2.1	Verifica a pressoflessione	51
8.2.2	Verifica a taglio	51
8.2.3	Verifica dei giunti	52
8.2.4	Verifica a SLE	52
8.3	Sezione C	53
8.3.1	Verifica a pressoflessione	53
8.3.2	Verifica a taglio	53
8.3.3	Verifica giunti	54
8.3.4	Verifica a SLE	55
8.4	Sezione C sotto pressione di riempimento	55
8.4.1	Verifica a pressoflessione	55
8.4.2	Verifica a taglio	55
8.4.3	Verifica dei giunti	56
8.5	Sezione D	57
8.5.1	Verifica a pressoflessione	57
8.5.2	Verifica a taglio	57
8.5.3	Verifica dei giunti	58
8.5.4	Verifica a SLE	58
8.6	Sezione D sotto pressione di pompaggio	58
8.6.1	Verifica a pressoflessione	59
8.6.2	Verifica a taglio	59
8.6.3	Verifica dei giunti	60
9.	DIFFUSIONE DELLA PRESSIONE LOCALIZZATA IN PROSSIMITÀ DEI GIUNTI	60
9.1	Sezione A	60
9.2	Sezione B	62
9.3	Sezione C	63
9.4	Sezione D	64
9.5	Conclusione	64
10.	VERIFICA DELLE STRUTTURE IN DIREZIONE LONGITUDINALE	65
10.1	TM45	65
10.1.1	Anello	65
10.1.2	Giunto tra conci	65
10.2	TM40	66
10.2.1	Anello	66
10.2.2	Giunto tra conci	66

11.	VERIFICHE AL FUOCO.....	68
11.1	Verifiche dei conci.....	68
11.1.1	Metodologia.....	68
11.1.2	Spalling superficiale	69
11.1.3	Sezione C.....	69
11.1.4	Sezione A.....	80
11.1.5	Sezione D.....	83
11.2	Verifiche dei giunti tra conci	87
11.3	Protezione al fuoco per il sottoattraversamento del Cenischia.....	87
11.3.1	Generalità.....	87
11.3.2	Propagazione del calore e soluzioni adottate.....	89
12.	VERIFICHE DI BULLONI, CONNETTORI E GUARNIZIONI	91
12.1	Bulloni	91
12.2	Connettori	92
12.3	Guarnizioni	93
13.	IPOSTESI ALLA BASE DEL DIMENSIONAMENTO E RISCHI ASSUNTI.....	96
14.	TASSI D'ARMATURA NECESSARI E PREVISTI.....	98
15.	CONCLUSIONE	99
	ALLEGATO 1: VERIFICHE AL FUOCO – METODOLOGIA ED ESEMPIO.....	100
	ALLEGATO 2: VERIFICHE AL FUOCO - SFORZI NELLA SEZIONE CON CERNIERE.....	109
	ALLEGATO 3: DIAGRAMMI DI INTERAZIONE - SFORZI NELLA SEZIONE CON CERNIERE.....	112

LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

Figura 1:	Sezioni dei conci TM45 (da documento PRV_C3A_0620_26-10-30).....	11
Figura 2:	Sezioni dei conci TM40 (da documento PRV_C3A_0621_26-10-30).....	12
Figura 3:	Dettaglio dei giunti radiali con bulloni– caso TM 45 (da documento PRV_C3A_4851_26-19-30).....	12
Figura 4:	Dettaglio dei giunti radiali con bulloni e connettori biconici – caso TM 45 (da documento PRV_C3A_4851_26-19-30)	13
Figura 5:	Prima combinazione di carico di stoccaggio a SLU	17
Figura 6:	Seconda combinazione di carico di stoccaggio a SLU.....	18
Figura 7:	Terza combinazione di carico di stoccaggio a SLU	18
Figura 8:	Momento flettente a SLU per lo stoccaggio – combinazione 1.....	18
Figura 9:	Momento flettente a SLU per lo stoccaggio – combinazione 2.....	19
Figura 10:	Momento flettente a SLU per lo stoccaggio – combinazione 3.....	19
Figura 11:	Applicazione del pompaggio in calotta	21
Figura 12:	Schema di un giunto radiale per TM45.....	22
Figura 13:	Schema di un giunto radiale per TM40.....	23
Figura 14:	Modello 2D continuo (senza giunti)	28
Figura 15:	Modello 2D con giunti	28
Figura 16:	Schema della geometria della TBM considerata (il disegno non è in scala) ..	29

Figura 17: Interazione tra scudo e ammasso roccioso (schema).....	30
Figura 18: Profilo longitudinale di spostamento (LDP) in calotta tenendo conto dell'interazione scudo- ammasso	31
Figura 19: Curva caratteristica	31
Figura 20: Pressioni sul rivestimento per la sezione A	32
Figura 21: Profilo longitudinale di spostamento (LDP)	33
Figura 22: Curva caratteristica	34
Figura 23: Pressioni dell'ammasso sul rivestimento per la sezione B come modellate....	34
Figura 24: Carico idraulico sul rivestimento per la sezione B come modellate.....	35
Figura 25: Assunzione di Terzaghi per valutare il carico sul rivestimento	35
Figura 26: Pressioni sul rivestimento dovute alle spinte del terreno per la sezione C.....	36
Figura 27: Pressioni sul rivestimento dovute alla falda per la sezione C.....	37
Figura 28: Profilo longitudinale di spostamento (LDP)	37
Figura 29: Curva caratteristica	38
Figura 30: Pressioni dell'ammasso sul rivestimento per la sezione D come modellate....	39
Figura 31: Carico idraulico sul rivestimento per la sezione D come modellate	39
Figura 32: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione A – modello continuo.....	41
Figura 33: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione A – modello con cerniere.....	41
Figura 34: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione B – modello continuo	42
Figura 35: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione B – modello con cerniere.....	42
Figura 36: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione C – modello continuo.....	43
Figura 37: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione C – modello con cerniere.....	43
Figura 38: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione C – modello continuo.....	44
Figura 39: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione D – modello continuo.....	45
Figura 40: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione D – modello con cerniere.....	45
Figura 41: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione D durante il pompaggio – modello continuo	46
Figura 42: Diagramma di spostamento radiale per la sezione A.....	47
Figura 43: Diagramma di spostamento radiale per la sezione B	47
Figura 44: Diagramma di spostamento radiale per la sezione C.....	48
Figura 45: Diagramma di spostamento radiale per la sezione D.....	48
Figura 46: Verifica della sezione A in c.a. a SLU	49
Figura 47: Verifica della sezione B in c.a. a SLU	51
Figura 48: Verifica della sezione C in c.a. a SLU	53
Figura 49: Verifica della sezione C in c.a. a SLU con redistribuzione del momento.....	54
Figura 50: Verifica della sezione C in c.a. a SLU	55
Figura 51: Verifica dei giunti della sezione C sotto pressione di pompaggio	56
Figura 52: Verifica della sezione D in c.a. a SLU	57
Figura 53: Verifica della sezione D sotto pressione di pompaggio in c.a. a SLU.....	59
Figura 54: Verifica dei giunti della sezione D sotto pressione di pompaggio	60
Figura 55: Applicazione della spinta sul giunto longitudinale – piani D e D' di armatura	65
Figura 56: Applicazione della spinta sul giunto longitudinale – piani D e D' di armatura	67
Figura 57: Curve temperatura tempo di incendio	68
Figura 58: Andamento delle temperature nella sezione per le 4 curve di incendio considerate	71
Figura 59: Modello di carico	72
Figura 60: Diagramma di interazione della sezione C.....	73

Figura 61: Calcolo dell'andamento della temperatura nella sezione per la curva ISO834 4h	75
Figura 62: Calcolo dell'andamento della temperatura nella sezione per la curva HC 2h	76
Figura 63: Calcolo dell'andamento della temperatura nella sezione per la curva RWS.	77
Figura 64: Diagramma di interazione della sezione C in presenza di 35mm di Promatect-T	79
Figura 65: Diagramma di interazione della sezione A	82
Figura 66: Andamento delle temperature nella sezione per le 3 curve di incendio considerate	84
Figura 67: Diagramma di interazione della sezione D	86
Figura 68: Protezione al fuoco	89
Figura 69: Caratteristiche tecniche/termiche dei giunti tagliafuoco	90
Figura 70: Posizione del giunto tagliafuoco	91
Figura 71: modello di calcolo e risultati nel caso di eccentricità di 0.2 m	94
Figura 72: profondità delle zona di distacco in fz. dell'eccentricità	94
Figura 73: apertura del giunto in fz. dell'eccentricità	95
Figura 74: diagramma di impermeabilità all'acqua alle varie pressioni in funzione dell'offset tra i due conci attigui e del gap massimo nel giunto per il tipo di guarnizioni previsto in progetto	96
Figura 75: Dati di input per il calcolo termico (esempio curva ISO 834 4h)	103
Figura 76: Dati di input per il calcolo termico delle proprietà meccaniche: geometria e caratteristiche meccaniche dei componenti della struttura	106
Figura 77: Sintesi dei risultati del calcolo delle proprietà meccaniche	108
Figura 78: Verifica della sezione A con cerniere a SLU	112
Figura 79: Verifica della sezione B con cerniere a SLU	112
Figura 80: Verifica della sezione C con cerniere a SLU	113
Figura 81: Verifica della sezione D con cerniere a SLU	113

LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Momenti flettenti a SLU per stoccaggio	19
Tabella 2: Azioni di esecuzione	21
Tabella 3: Sezioni di verifica	23
Tabella 4: Carichi e verifiche del rivestimento	26
Tabella 5: Pressioni sul rivestimento per la sezione C	36
Tabella 6: Sollecitazioni nell'anello per la sezione A – modello continuo	41
Tabella 7: Sollecitazioni nell'anello per la sezione A – modello con cerniere	41
Tabella 8: Sollecitazioni nell'anello per la sezione B – modello continuo	42
Tabella 9: Sollecitazioni nell'anello per la sezione B – modello con cerniere	42
Tabella 10: Sollecitazioni nell'anello per la sezione C – modello continuo	43
Tabella 11: Sollecitazioni nell'anello per la sezione C – modello con cerniere	43
Tabella 12: Sollecitazioni nell'anello per la sezione C – modello continuo	44
Tabella 13: Sollecitazioni nell'anello per la sezione D – modello continuo	45
Tabella 14: Sollecitazioni nell'anello per la sezione D – modello con cerniere	45
Tabella 15: Sollecitazioni nell'anello per la sezione D durante il pompaggio – modello continuo	46
Tabella 16: Caratteristiche della sezione riscaldata	71

Tabella 17: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del cls	71
Tabella 18: Sforzi termici calcolati con SCIA	72
Tabella 19: Coefficienti di riduzione della resistenza	72
Tabella 20: Sforzi dimensionanti	73
Tabella 21: Proprietà termiche del cls e dell'isolante (prestazioni)	74
Tabella 22: Caratteristiche della sezione riscaldata	78
Tabella 23: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del cls	78
Tabella 24: Sforzi termici calcolati con SCIA	78
Tabella 25: Coefficienti di riduzione della resistenza	79
Tabella 26: Sforzi dimensionanti	79
Tabella 27: Resistenze della struttura, azioni sollecitanti, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per la sezione C	80
Tabella 28: Sforzi termici calcolati con SCIA	80
Tabella 29: Coefficienti di riduzione della resistenza	81
Tabella 30: Sforzi dimensionanti	81
Tabella 31: Resistenze della struttura, azioni sollecitanti, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per la sezione A	82
Tabella 32: Caratteristiche della sezione riscaldata	84
Tabella 33: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del cls	84
Tabella 34: Sforzi termici calcolati con SCIA	85
Tabella 35: Coefficienti di riduzione della resistenza	85
Tabella 36: Sforzi dimensionanti	86
Tabella 37: Resistenze della struttura, azioni sollecitanti, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per la sezione D	87
Tabella 38: Temperature nella sezione	90
Tabella 39: Sezioni d'armatura circolari e longitudinali necessarie per TM45	98
Tabella 40: Sezioni d'armatura circolari e longitudinali necessarie per TM40	98
Tabella 41: Armatura per frettaggio e fessurazione per TM45	98
Tabella 42: Armatura per frettaggio e fessurazione per TM40	98
Tabella 43: Proprietà termiche	102
Tabella 44: Dettagli del calcolo delle proprietà meccaniche	107
Tabella 45: Sforzi nella sezione C in caso di incendio	109
Tabella 46: Sforzi nella sezione C con cerniere in caso di incendio	109
Tabella 47: Sforzi nella sezione A in caso di incendio	110
Tabella 48: Sforzi nella sezione A con cerniere in caso di incendio	110
Tabella 49: Sforzi nella sezione D in caso di incendio	111
Tabella 50: Sforzi nella sezione D con cerniere in caso di incendio	111

RESUME/RIASSUNTO

Le présent rapport a pour but de fournir le dimensionnement des voussoirs préfabriqués en béton armé installés à l'arrière du tunnelier mixte à bouclier qui creusera une bonne partie du tracé coté Italie du pk 53+515 VP/ 53+690 VI au pk 61+076.5 et la galerie Maddalena 2 du PM 160 au PM 3058.

En fonction de la géologie on a prévu deux types de voussoirs, de 40 cm avec classe de résistance C40/50 dans les premiers 3.5 km environ à partir de Suse et de 45 cm avec classe de résistance C45/55 dans les 3.7/6.7 km environ successifs.

Les vérifications à l'ELU et à l'ELS ont été menées en fonctions des charges permanentes du terrain et des roches et des charges variables pendant la phase de manutention et de construction selon les NTC2008. De plus, le ferrailage minimum dans les voussoirs et à proximité des joints (frettage) a été calculé selon les NTC 2008 ou, le cas échéant, l'Eurocode 2 ou d'autres normes.

Les vérifications sont satisfaites pour tous les principaux cas de charge, y compris la charge accidentelle due au feu.

Ce dimensionnement des voussoirs est strictement lié au projet de la machine, avec ses caractéristiques et ses fonctions selon les unités lithologiques traversées (sur la base des connaissances actuelles).

La presente relazione ha lo scopo di fornire il dimensionamento dei conci in c.a. prefabbricati da posizionare a tergo della fresa mista scudata che scaverà una buona parte del tracciato lato Italia dalla pk 53+515 BP/ 53+690 BD alla pk 61+076.5 e la galleria Maddalena 2 dal PM 160 al PM 3058.

In funzione della geologia si sono previste due tipologie di conci, da 40 cm con classe di resistenza C40/50 nei primi 3.5 km circa a partire da Susa e da 45 cm con classe di resistenza C45/55 negli ulteriori 3.7/6.7 km circa.

Si sono condotte le verifiche a SLU e SLE in funzione dei carichi permanenti dell'ammasso e dei carichi variabili durante le fasi di stoccaggio e di costruzione secondo le NTC 2008. Inoltre, si sono calcolate le armature minime nei conci ed in prossimità dei giunti (frettaggio), secondo le NTC 2008 o, in assenza di indicazioni specifiche, l'Eurocodice 2 od altre normative.

Le verifiche sono soddisfatte per tutte le principali combinazioni di carico, compresa la combinazione eccezionale dovuta al fuoco.

Tale dimensionamento e verifica dei conci è strettamente legato alla progettazione della macchina, alle sue caratteristiche e funzionalità a seconda delle unità litologiche attraversate (sulla base delle conoscenze attuali).

1. Introduzione

1.1 Generalità

La presente relazione presenta il dimensionamento dei conci prefabbricati per la fresa mista scudata, prevista di operare nella tratta lato Italia per circa 7.5 km, tra la pk 53+515 BP / 53+690 BD fino all'imbocco e per buona parte della galleria Maddalena 2, come motivato nella relazione PRV_C3A_0880_33-08-01_30-01.

Si tratta di verificare lo spessore del rivestimento ipotizzato di 40 cm per la tratta di tunnel di Base compresa tra la pk 57+400 e la pk 61+076.5 (sezione tipo TM40) e di 45 cm per la tratta di TdB compresa tra la pk 53+514.8 (per la canna BP) / 53+690 (per la canna BD) e la pk 57+400 ed in Maddalena 2 (sezione tipo TM45) e di determinare le armature necessarie, tenendo conto delle condizioni di carico permanenti (peso proprio, pressione dell'ammasso e carico idraulico, laddove presente), transitorie durante la messa in opera (es. iniezione malta cementizia), transitorie prima della messa in opera (movimentazione e stoccaggio) ed eccezionali (incendio), nonché delle azioni indotte sui conci dai martinetti di spinta delle TBM. Siccome la TBM attraverserà sia rocce che terreni sciolti, nel seguito si utilizzerà il termine "ammasso" per definire entrambi.

I calcoli delle sollecitazioni sul rivestimento sono stati eseguiti con il software SCIA Engineering.

Il calcolo delle contropressioni al fronte (quando la fresa opera in modalità slurry), della spinta necessaria all'avanzamento e gli altri dati relativi alla macchina ed al sistema di intasamento a tergo dei conci sono contenuti nella relazione PRV_C3A_0896_33-02-02_10-05.

In seguito, si riportano le verifiche di resistenza al fuoco delle strutture secondo l'EN 1992-1-2/NA e la guida d'applicazione del CETU; a tal proposito viene assunta la responsabilità, nel ruolo di progettisti, delle scelte esposte. Per la determinazione delle sollecitazioni meccaniche dovute all'incendio, si è usato un modello elastico lineare, che è alla base delle equazioni fornite nel testo. Vale il principio di sovrapposizione degli effetti per i carichi, ed il modello è lineare (senza comportamento di tipo elastoplastico con legge di comportamento associata alla temperatura locale). Tra l'altro, secondo le raccomandazioni del CETU, un calcolo di tipo non lineare non è giustificato alla luce delle incertezze di tipo geomeccanico e potrà essere realizzato in fase di progetto esecutivo.

Infine, si sono effettuati dei calcoli ed espresse delle considerazioni in merito a bulloni, connettori e guarnizioni EPDM. Per quanto riguarda le guarnizioni, per evitare una loro perdita di funzionalità nelle tratte in cui risultano particolarmente necessarie, si è prevista adeguata protezione con pannellature di tipo Promatect-T sulle pareti e giunti tagliafuoco. Si sono fornite le specifiche di tali materiali.

1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato

Il documento è stato aggiornato rispetto al Progetto Definitivo Approvato in merito alla tratta di applicazione dello scavo con TBM scudata, alla copertura massima di questa tratta e all'aggiunta di calcoli e considerazioni che riguardano i giunti tra conci, i bulloni, i connettori e le guarnizioni.

2. Documenti di riferimento

2.1 Documenti di progetto

I documenti di riferimento del capitolo 26-19 (sezione corrente lato Italia) sono i seguenti:

- PRV_C3A_0435_26-19-00_10-01 Relazione generale illustrativa lato Italia
- PRV_C3A_3949_26-19-00_10-02 Relazione tecnica e di calcolo
- PRV_C3A_0620_26-10-30_40-02 Sezione tipo TM 45. Geometria anello e disposizione conci
- PRV_C3A_0621_26-10-30_40-03 Sezione tipo TM 40. Geometria anello e disposizione conci
- PRV_C3A_4851_26-19-30_40-15 Dettaglio dei conci prefabbricati
- PRV_C3A_3952_26-19-40_10-01 Relazione descrittiva sul sistema di drenaggio.

Le caratteristiche della fresa sono descritte nel rapporto PRV_C3A_0896_33-02-02_10-05.

2.2 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).

2.3 Bibliografia

Per quanto riguarda l'interazione ammasso roccioso-scudo ed ammasso roccioso-rivestimento per la determinazione della pressione dovuta all'ammasso, alcuni valori sono stati stimati sulla base degli studi contenuti nei documenti seguenti (a cui si rimanda per una trattazione più completa):

- Zhao K., Janutolo M., Barla G. (2012), *A completely 3D model for simulation of mechanised tunnel excavation*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, 475-497.
- Zhao K. (2012), *3D numerical modelling of squeezing behaviour in mechanized excavation of deep tunnels*. Tesi di dottorato, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino.

Per le verifiche al fuoco si è fatto riferimento ai seguenti documenti:

- Lourenço L., Barros J., Alves J. (2010): *Fiber reinforced concrete of enhanced fire resistance for tunnel segments*
- De Clippelaar D. (2011): *Practical passive fire protection in TBM driven road tunnels ensuring the water seal of precast lining in the event of a large tunnel fire*. MSc thesis, Delft University of Technology.

Si è inoltre fatto riferimento ai testi seguenti:

- Japan Society of Civil Engineers (1996): *Japanese standard for shield tunneling. The third edition*.
- Leonhardt (1977): *Cemento armato e cemento armato precompresso – calcolo di progetto e tecniche costruttive*. Edizioni tecniche Milano.
- Muir Wood, A.M. (1975): *The circular tunnel in elastic ground*, Géotechnique 25(1)

3. Caratteristiche dei conci e degli anelli

3.1 Geometria

Un anello di conci è costituito da 7 conci generici ed un concio di chiave.

- Spessore del concio: 40/45 cm
- Larghezza: 1.8 m
- Raggio medio: $R_m = 4.6 / 4.575$ m
- Lunghezza sviluppata di un concio generico (estradosso): $L = 4.021$ m
- Diametro di estradosso di un anello: 9.6 m
- Volume di un concio: $2.782 / 3.104$ m³
- Peso specifico: 25 kN/m³
- Peso di un concio generico: $P = 69.55 / 77.6$ kN
- Peso della chiave: $P_c = 34.6 / 38.8$ kN

Le sezioni del rivestimento sono presentate nelle figure 1 e 2.

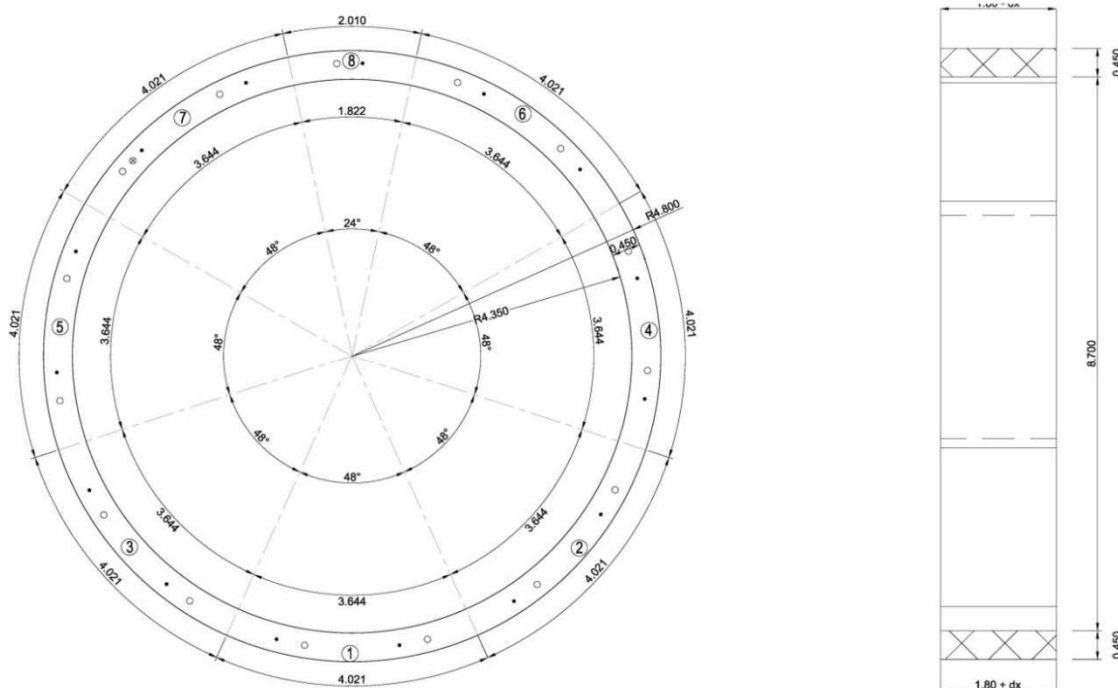


Figura 1: Sezioni dei conci TM45 (da documento PRV_C3A_0620_26-10-30)

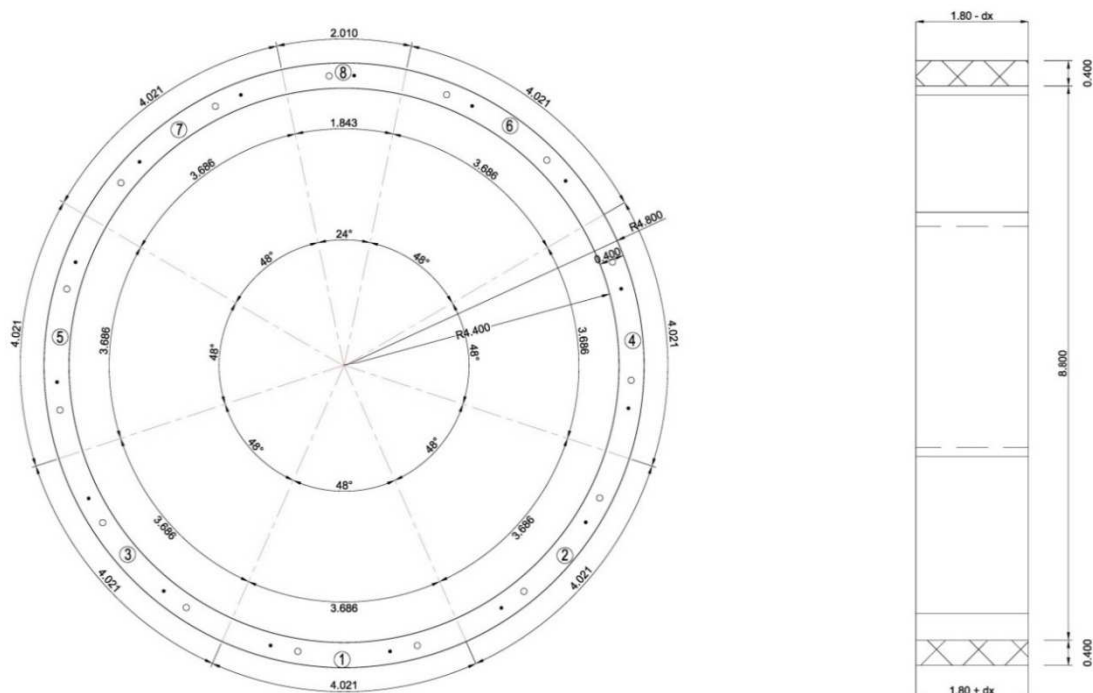


Figura 2: Sezioni dei conci TM40 (da documento PRV_C3A_0621_26-10-30)

DETTAGLIO 1 GIUNTO TRASVERSALE E LONGITUDINALE /
DETAIL 1 JOINT TRANSVERSAL ET LONGITUDINAL

1:5

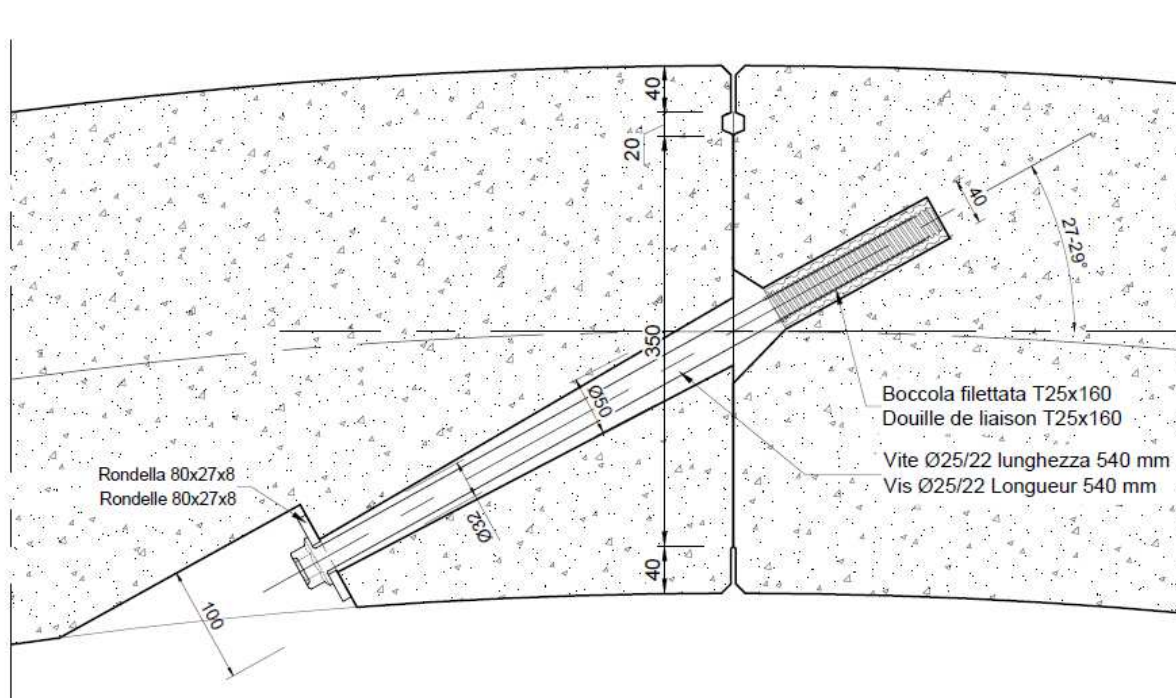


Figura 3: Dettaglio dei giunti radiali con bulloni– caso TM 45 (da documento PRV_C3A_4851_26-19-30)

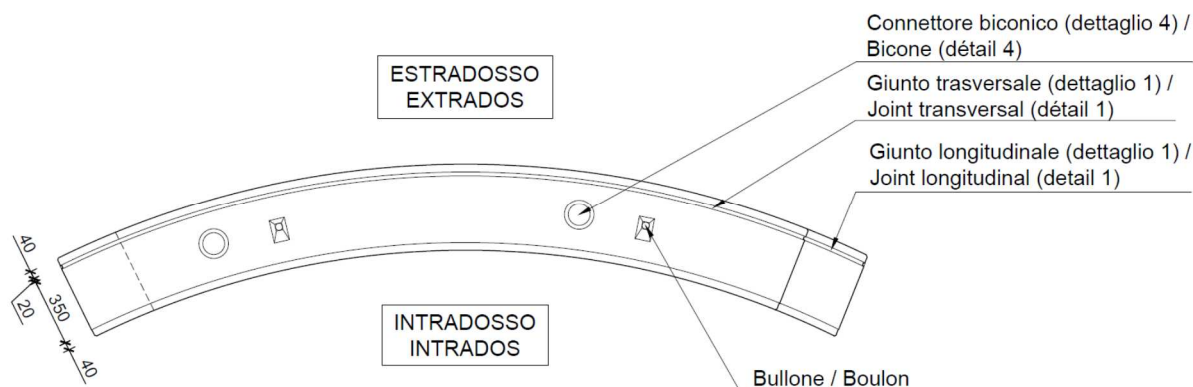


Figura 4: Dettaglio dei giunti radiali con bulloni e connettori biconici – caso TM 45 (da documento PRV_C3A_4851_26-19-30)

3.2 Materiali

3.2.1 Calcestruzzo

Classe C45/55 minima (TM45):

- Resistenza cubica caratteristica del cls: $R_{ck}=55$ MPa
- Resistenza cilindrica caratteristica del cls: $f_{ck}=45$ MPa
- Resistenza a trazione media del cls: $f_{ctm}=3.8$ MPa
- Resistenza a trazione frattile 5%: $f_{ctk,0.05}= 2.7$ MPa
- Resistenza di calcolo a trazione di calcolo del cls: $f_{ctd} = f_{ctd,0.05}/\gamma_c=1.8$ MPa
- Modulo di elasticità secante: $E_{cm}=36$ GPa
- Coefficiente di viscosità $\varphi(\infty,t_0) = 2,0$
- Modulo di elasticità effettivo del cls: $E_{c,eff} = E_{cm}/(1+ \varphi(\infty,t_0)) = 12$ GPa
- Coefficiente parziale di sicurezza relativo al cls: $\gamma_c=1.5$
- Resistenza di calcolo a compressione del cls: $f_{cd} = \alpha_{cc}f_{ck}/\gamma_c=25.5$ MPa
- Utilizzo di un diagramma parabola-rettangolo a SLU
- Tensione massima del cls a compressione a SLE = $0.6f_{ck}=27$ MPa
- Tensione massima del cls a compressione a SLE sotto combinazioni di carichi quasi permanenti per considerare un comportamento visco-elastico lineare = $0.45f_{ck}= 20.25$ MPa
- Copriferro: assunto uguale a 5 cm
- Classi di esposizione: XA2-XC2-XD2 (minima secondo geologia)
- Cemento CEM III, classe di lavorabilità S2, rapporto acqua/cemento $a/c\leq 0.4$ (tenendo conto delle esigenze minime definite dal capitolato RFI, dalle NTC 2008 e dall'Eurocodice 2 sulla base delle classi di esposizione e della resistenza).

Classe C40/50 minima (TM40):

- Resistenza cubica caratteristica del cls: $R_{ck}=50$ MPa
- Resistenza cilindrica caratteristica del cls: $f_{ck}=40$ MPa
- Resistenza a trazione media del cls: $f_{ctm}=3.5$ MPa
- Resistenza a trazione frattile 5%: $f_{ctk,0.05}= 2.5$ MPa
- Resistenza di calcolo a trazione di calcolo del cls: $f_{ctd} = f_{ctk,0.05}/\gamma_c=1.667$ MPa
- Modulo di elasticità secante: $E_{cm}=35$ GPa
- Coefficiente di viscosità $\varphi(\infty,t_0) = 2,0$
- Modulo di elasticità effettivo del cls: $E_{c,eff} = E_{cm}/(1+ \varphi(\infty,t_0)) = 11.66$ GPa
- Coefficiente parziale di sicurezza relativo al cls: $\gamma_c=1.5$
- Resistenza di calcolo a compressione del cls: $f_{cd} = \alpha_{cc}f_{ck}/\gamma_c =22.6$ MPa
- Utilizzo di un diagramma parabola-rettangolo a SLU
- Tensione massima del cls a compressione a SLE = $0.6f_{ck}=24$ MPa
- Tensione massima del cls a compressione sotto combinazioni di carichi quasi permanenti per considerare un comportamento visco-elastico lineare = $0.45f_{ck}=18$ MPa
- Copriferro: assunto uguale a 5 cm
- Classi di esposizione: XA2-XC2-XD2 (definite per estensione anche per questa tratta)
- Cemento classe CEM III, classe di lavorabilità S2, rapporto acqua cemento $a/c\leq 0.4$.

3.2.2 Acciaio

Barre d'armatura in acciaio tipo B450C:

- Tensione caratteristica di snervamento: $f_{yk}=450$ MPa
- Coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio: $\gamma_s=1.15$
- Resistenza di calcolo: $f_{yd}=f_{yk}/\gamma_s=391.3$ MPa
- Utilizzo del diagramma elastico – perfettamente plastico a SLU
- Tensione massima dell'acciaio a trazione a SLE = $0.8 f_{yk}=360$ MPa
- Modulo elastico $E_s= 200$ GPa.

3.3 Processo di prefabbricazione e resistenza allo scassero

Come illustrato nella relazione PRV_C3A_6010_33-01-02_10-01, a Salbertrand sarà ubicato l'impianto di prefabbricazione dei conci.

L'impianto sarà equipaggiato da una centrale di betonaggio e sarà automatizzato (del tipo “a carosello”) con “linee di lavoro” che prevedono le seguenti fasi (fornite a titolo indicativo e da definire meglio comunque in fase esecutiva dalle imprese):

- Pulizia dei casseri
Viene utilizzata una lancia alimentata ad aria compressa per eliminare dalle casseforme i piccoli detriti di cls essendo le casseforme a tenuta.
- Stesura dell'olio disarmante
L'olio viene nebulizzato e successivamente distribuito uniformemente con operazione manuale.
- Posa delle gabbie d'armatura
Le gabbie vengono alloggiare nei casseri in funzione della tipologia dopo aver posizionato i distanziatori.
- Chiusura del cassero
A gabbie posate vengono chiuse con avvitatori pneumatici le sponde laterali e le testate mobili.
- Inserimento degli inserti
Gli inserti vengono posizionati negli appositi incastri e bloccati meccanicamente sul cassero.
- Verifica del copriferro
Prima di chiudere i coperchi superiori dei casseri viene verificato l'effettivo rispetto dei copriferri per ogni singola gabbia. Nel caso vi siano delle non conformità, le gabbie vengono tolte dal cassero e sostituite, contrassegnate come non conformi e depositate in apposita area in attesa di essere rese conformi.
- Chiusura dei coperchi
- Getto-vibrazione
Il getto viene effettuato tramite benna appesa alla gru a ponte, dopo averne verificato la consistenza ed aver confezionato i cubetti per le prove a compressione.
La vibrazione è contestuale al getto.
- Maturazione
La maturazione è formata ed avviene mediante l'emissione sotto cassero di vapore, dopo aver ricoperto le casseforme con teli a tenuta, appositamente studiati per mantenere l'ambiente circostante al cassero saturo a temperatura di circa 50-60 ° C. La fase di maturazione dura circa 8h-9h a seconda dei due tipi di conci (TM 40 e TM 45). Si comporrà di una salita progressiva e poi di una discesa della temperatura. Durante le fasi di maturazione, nonostante il ciclo sia controllato automaticamente, un tecnico rileva le temperature sul manufatto mediante termometro ad immersione, al fine di verificare l'efficienza dell'impianto. Inoltre viene realizzato un cubetto di cls posto nelle stesse condizioni di maturazione del manufatto.
- Scassero
Prima di effettuare lo scassero il tecnico di produzione effettua la rottura del cubetto che deve raggiungere $R_{ck} = 15 \text{ N/mm}^2$ (C12/15), e quindi autorizza la fase di scassero.
- Ribaltamento dei conci
Per poter essere accatastati correttamente, gli elementi prefabbricati devono ruotare di 180° a scassero avvenuto. A tale scopo è stata studiata un'apposita pinza oleodinamica alloggiata su una gru a ponte, costituita da due bracci dotati di ganasce che ruotano idraulicamente e che agganciano gli elementi con appositi perni, imprimendo una forza di compressione agli elementi stessi. In questa fase gli operatori compiono un

controllo dettagliato dei manufatti verificando la posizione degli inserti e l'eventuale presenza di fessurazioni. Nel caso in cui vi siano degli elementi non conformi, questi vengono inviati all'area destinata ai ripristini. In caso di controllo positivo i conci vengono inviati in pre-stoccaggio (all'interno dell'edificio per evitare shock termici)

- Finiture

Successivamente saranno movimentati e stoccati nell'area esterna di stoccaggio. Si è quindi verificato che possano resistere a tali sforzi quando il valore di resistenza a compressione è pari alla resistenza allo scasso ($R_{ck}=15$ MPa). Seguono infine le verifiche in fase di costruzione della galleria (resistenza caratteristica del cls a 28 giorni).

4. Armature minime secondo NTC 2008

Ai fini delle verifiche statiche esposte nei successivi capitoli, si considerano le armature minime calcolate sulla base delle NTC 2008.

4.1 Armature circolari

TM45

L'area dell'armatura in zona tesa non deve essere inferiore a

$$A_{s,\min} = 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d = 8.78 \text{ cm}^2$$

e comunque non minore a $0.0013b_t d = 5.85 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Nei calcoli statici si considera:

Estradosso: $\varnothing 14@150$

Intradosso: $\varnothing 14@150$

TM40

Per la sezione tipo TM 40, l'area dell'armatura in zona tesa non deve essere inferiore a

$$A_{s,\min} = 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d = 7.07 \text{ cm}^2$$

e comunque non minore a $0.0013b_t d = 4.55 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Nei calcoli statici si considera:

Estradosso: $\varnothing 12@150$

Intradosso: $\varnothing 12@150$

4.2 Armature longitudinali

Si prevede di disporre una quantità minima d'armatura longitudinale, assimilando l'anello ad una parete, pari a $0.002 A_c$, ovvero:

- per TM40 $0.002 \times 0.4 = 8 \text{ cm}^2/\text{m}$ da disporre superiormente ed inferiormente (estradosso ed intradosso), ovvero $8/2 = 4 \text{ cm}^2/\text{m}$ per lato

- per TM45 $0.002 \times 0.45 = 9 \text{ cm}^2/\text{m}$ da disporre superiormente ed inferiormente (estradosso ed intradosso), ovvero $9/2 = 4.5 \text{ cm}^2/\text{m}$ per lato.

5. Verifica della sezione a movimentazione e stoccaggio

Tali azioni si considerano solo nel caso della TM40, in quanto la sezione è di minor spessore e con calcestruzzo di minore resistenza e quindi più sfavorevole per l'azione stessa.

Si considera precauzionalmente la resistenza allo scasso ovvero $f_{ck} = 12 \text{ MPa}$, anche se al momento dello stoccaggio il cls ha probabilmente resistenza superiore (es. dell'ordine di 16 MPa secondo l'evoluzione della maturazione).

5.1 Sollecitazioni allo stoccaggio

I conci sono stoccati per pile da 8 (anello completo). Sono separati da paia di tasselli. Il carico massimo è ripreso dal concio situato sotto la pila.

Il modello considera una trave di lunghezza 4.02 m e di larghezza 1.8 m, di peso proprio 77.6 kN.

Gli si applica, in due punti distanti 1.5 m, il carico dei conci sovrastanti: una pila di 6 conci di 77.6 kN e la chiave di 38.8 kN cioè circa $Q = 500 \text{ kN}$.

Si applica la combinazione a SLU seguente:

$$\gamma_{G1} G_1 + \gamma_{Q1} Q_{k1}$$

Con:

γ_{G1} : coefficiente parziale dei carichi permanenti, pari a 1.3;

G_1 : carichi permanenti, ovvero peso proprio del concio;

γ_{Q1} : coefficiente parziale delle azioni variabili, pari a 1.5;

Q_{k1} : azione variabile, dovuta al peso dei conci sovrastanti.

La posizione degli appoggi è variabile e si considerano tre combinazioni di carico, come illustrato nelle figure seguenti.

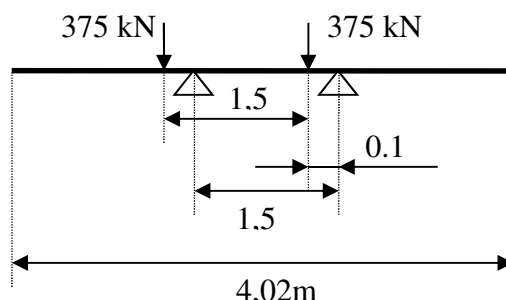


Figura 5: Prima combinazione di carico di stoccaggio a SLU

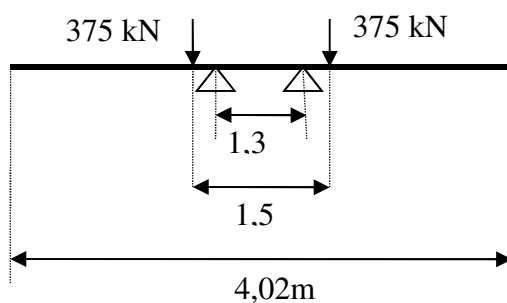


Figura 6: Seconda combinazione di carico di stoccaggio a SLU

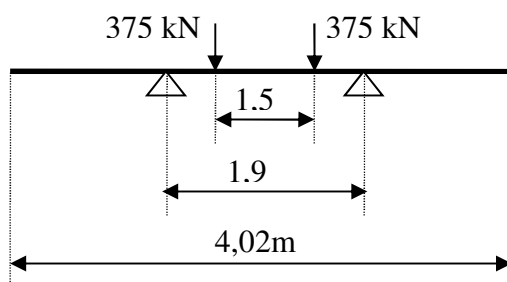


Figura 7: Terza combinazione di carico di stoccaggio a SLU

Si forniscono qui di seguito i diagrammi di momento flettente a SLU nel concio più sollecitato per ciascuna delle 3 combinazioni di carico di stoccaggio. Si riassumono in seguito in una tabella i risultati ottenuti.

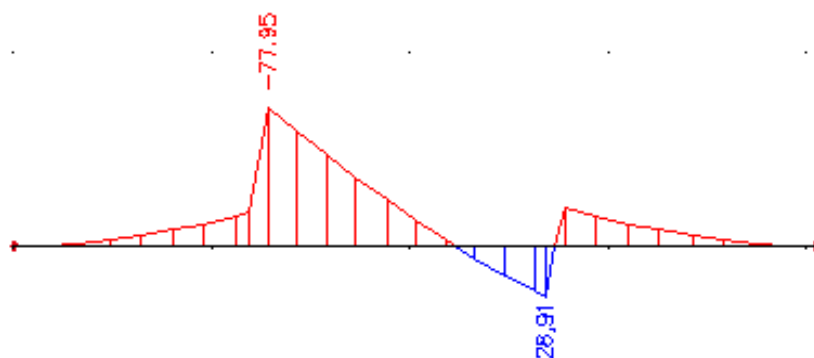


Figura 8: Momento flettente a SLU per lo stoccaggio – combinazione 1

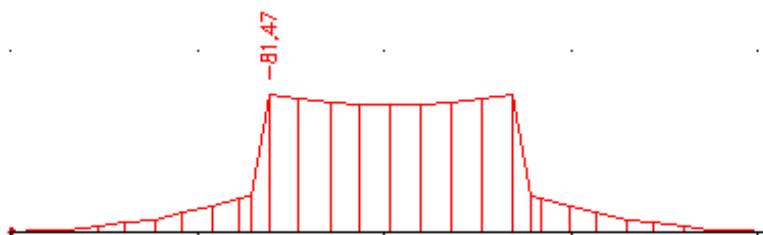


Figura 9: Momento flettente a SLU per lo stoccaggio – combinazione 2

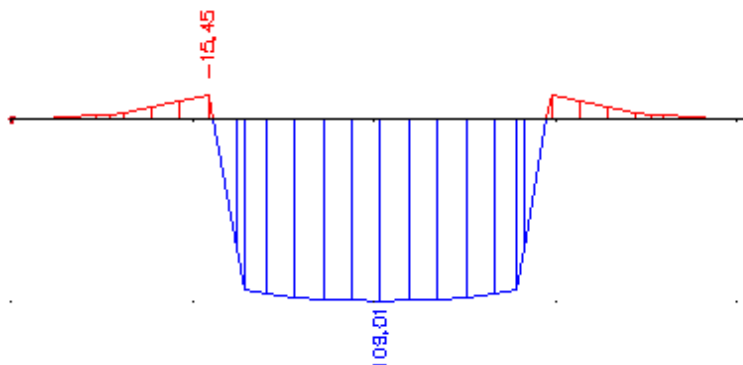


Figura 10: Momento flettente a SLU per lo stoccaggio – combinazione 3

Si fornisce qui di seguito una tabella che riassume i momenti flettenti a SLU.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Mmin (kNm)	-38.95	0	0
M max (kNm)	14.45	40.7	54.5

Tabella 1: Momenti flettenti a SLU per stoccaggio

Si verifica quindi che $M_{ed\ max}=54.5\ kNm \leq M_{rd} = 100\ kNm$.

Gli sforzi di taglio nei conci per lo stoccaggio non sono verificati in quanto gli appoggi permettono la trasmissione degli sforzi.

5.2 Sollecitazioni alla movimentazione

Si considera che il concio viene movimentato a mezzo di due fori di presa situati al centro del concio o da un sistema vacuum che applicherà il suo sforzo circa nella stessa posizione.

Si considera la combinazione a SLU seguente:

$\gamma_{G1} G_1$

Con:

γ_{G1} : coefficiente parziale dei carichi permanenti, pari a 1.3;

G_1 : carichi permanenti, ovvero peso proprio del concio.

Il momento dovuto al peso proprio è pari a:

$$M_{ed}=1\ m \times 38.8\ kN = 38.8\ kNm \times 1.3 = 50.44\ kNm$$

Si verifica quindi che:

$$M_{ed\ max}=50.44\ kNm \leq M_{rd} = 100\ kNm$$

Si genera inoltre uno sforzo di taglio V_{ed} pari a 38.8 kN.

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 $d = 350$ mm \Rightarrow si considera $k = 1.76$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$ con $A_{sl} = 10,26$ cm²/m et $b_w = 1,000$ m \Rightarrow si considera $\rho_l = 0,0029$
- $f_{ck} = 12$ MPa
- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 0$ MPa
- $v_{\min} = \frac{0.053}{\gamma_c} k^2 f_{ck}^{1/2} = 0.28$

Si ottiene dunque $V_{Rd,c} = 112$ kN/m $>$ V_{ed}

6. Definizione delle combinazioni di carico (in fase di costruzione e di esercizio)

6.1 Azioni permanenti

6.1.1 Peso proprio

Il cls dei conci ha un peso specifico di 25 kN/m³.

6.1.2 Pressione dell'ammasso roccioso

La pressione dovuta all'ammasso è calcolata con il metodo convergenza-confinamento nel caso di ammassi rocciosi e quando la galleria è profonda. Non si considera il punzonamento dei diedri/cunei di roccia, in quanto si considera che le spinte dovute all'ammasso roccioso in zone di faglia (ipotesi di comportamento continuo) sono maggiori e più gravose che il caso dei diedri. Inoltre vi è incertezza sull'effettivo orientamento dei sistemi di discontinuità.

Nel caso di terreni poco coesivi e quando la galleria è più prossima alla superficie, si è utilizzato invece il metodo di Terzaghi (1943). La motivazione della scelta dei metodi di analisi utilizzati (convergenza-confinamento, criterio di Terzaghi) è fornita nella relazione PRV_C3A_3949_26-19-00_10-02.

6.1.3 Pressione idrostatica

Alla pressione degli ammassi si aggiunge la pressione idrostatica laddove è prevista impermeabilizzazione totale (full round). Si veda a questo proposito la relazione PRV_C3A_3952_26-19-40_10-01. In alcuni casi, la pressione idrostatica potrebbe non essere presente (assenza di acquiferi). La presenza o meno di essa ed il suo impatto sul dimensionamento è dettagliata per ciascuna sezione di verifica al § 8.2.

6.2 Azioni di esecuzione

Le azioni di esecuzione sono presentati nella tabella qui sotto:

Azione	Iniezione del riempimento	Spinta della TBM	
Struttura sollecitata	Anello	anello	Giunto longitudinale
Direzione dell'azione	radiale	longitudinale	longitudinale

Tabella 2: Azioni di esecuzione

6.2.1 Iniezione del riempimento

Il riempimento in malta cementizia dell'intercapedine tra anello ed ammasso (nelle porzioni dove è applicato; si veda la relazione PRV_C3A_0896_33-02-02_10-05) permette la redistribuzione in senso più uniforme delle sollecitazioni sul rivestimento. Questa iniezione induce una pressione aggiuntiva.

Si considerano 2 casi:

- Pressione di riempimento: si applica una pressione radiale uniforme di 200 kPa. Si ha questo caso quando si inietta la malta a tergo dello scudo di coda (caso "non drenato").
- Pompaggio: si applica una pressione radiale di 100 kPa in calotta. Si ha questo caso quando si pompa la malta attraverso i fori di presa dei conci (caso "drenato").

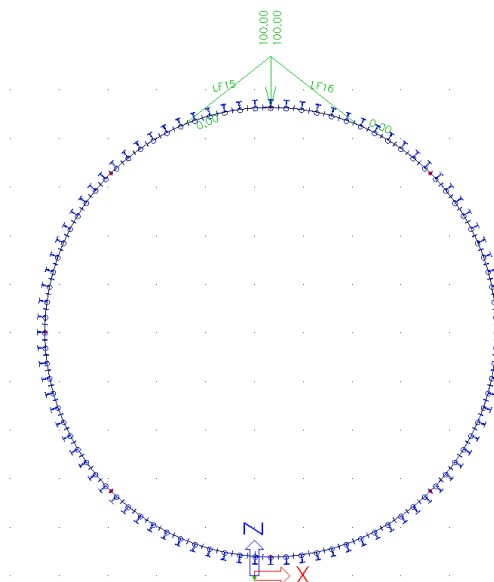


Figura 11: Applicazione del pompaggio in calotta

6.2.2 Spinta della TBM

La TBM procede grazie alla spinta longitudinale dei martinetti sui conci tramite delle piastre di ripartizione. Su ogni piastra agisce una coppia di due martinetti. Si prevede che vi siano quindici piastre ripartite sul perimetro nell'ipotesi più gravosa (assenza di anello di ripartizione tra conci e martinetti).

Per la sezione tipo TM45, si considera che la spinta massima della TBM è 120 MN (vedere relazione PRV_C3A_0896_33-02-02_10-05). Inoltre, bisogna calcolare la spinta localizzata sul giunto longitudinale. La forza massima applicata su una piastra a SLU è $F=12$ MN ripartita sulla piastra (15 piastre sulla sezione). La piastra si appoggia su una lunghezza di 1400 mm e sulla larghezza del giunto longitudinale (350 mm).

Per la sezione tipo TM40, si considera che la spinta massima della TBM è 50 MN (date le condizioni geomeccaniche molto più favorevoli). Inoltre, bisogna calcolare la spinta localizzata sul giunto longitudinale. La forza massima applicata su una piastra a SLU è $F=5$ MN ripartita sulla piastra (15 piastre sulla sezione). La piastra si appoggia su una lunghezza di 1400 mm e sulla larghezza del giunto longitudinale (300 mm).

6.3 Elementi da verificare

Si verificano gli elementi seguenti:

- Concio prefabbricato
- Giunto radiale e longitudinale tra conci
- Bulloni
- Connettori
- Guarnizione.

Per i giunti radiali tra conci, si considerano gli schemi illustrati nelle figure seguenti.

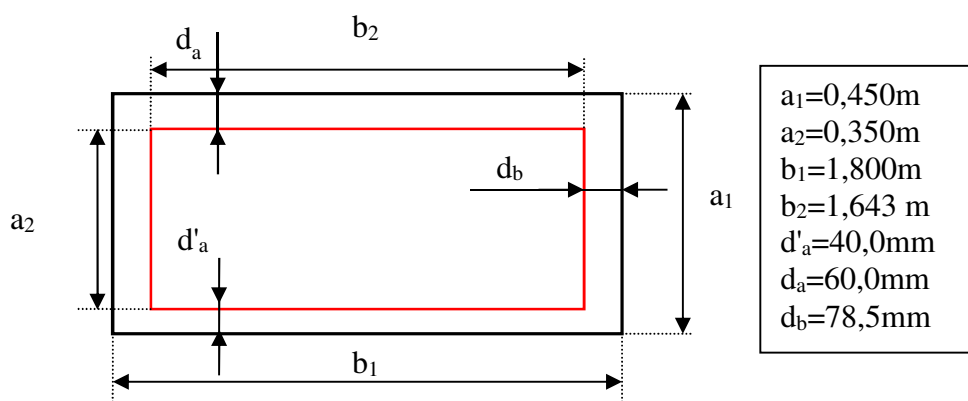


Figura 12: Schema di un giunto radiale per TM45

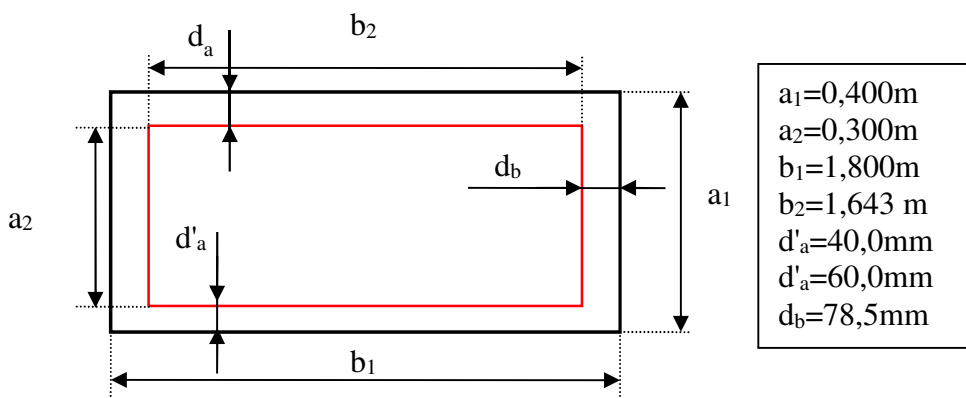


Figura 13: Schema di un giunto radiale per TM40

6.4 Sezioni di verifica (ammasso)

Dall'analisi della geomeccanica e del comportamento allo scavo contenute nel documento PRV_C3A_3949_26-19-00_10-02, si sono scelte le sezioni di calcolo elencate nella seguente tabella. Si tratta di una selezione delle sezioni di calcolo già definite nella relazione PRV_C3A_3949_26-19-00, rappresentative delle situazioni più gravose, per cui si rimanda ad essa per i parametri geomeccanici.

La pressione idrostatica da considerare per i calcoli è definita sulla base dei dati idrogeologici contenuti nella relazione PRV_C3A_3952_26-19-40_10-01. Si è considerato il carico idraulico massimo per la tratta per cui la sezione è rappresentativo.

Sezione di calcolo	Sezione di riferimento in relazione 3949	Parametri geomeccanici (in relazione 3949)	Pressione idrostatica [bar]	Tipo di conci	Tratta per cui la sezione è rappresentativa
A	C2	v. tabella 7, colonna GSI=35	-	TM45	Pk 53+417-55+029 TdB PM 270 - PM 3058 Maddalena 2
B	C4	v. tabella 9, colonna GSI=35	9 (quando presente)	TM45	Pk 55+029 – 56+058 TdB PM 160 – PM 270 Maddalena 2
C	C5	v. tabella 11	5.5	TM45	Pk 56+058 – 57+160 TdB
D	C6	v. tabella 12, colonna GSI=35	9 (quando presente)	TM40	Pk 57+160-61+076.5 TdB

Tabella 3: Sezioni di verifica

Nella sezione A si considera la presenza di una faglia con $GSI \leq 35$ in corrispondenza della massima copertura per lo scavo con TBM scudata (1210 m), che si trova alla PM 2600 della galleria Maddalena 2 (lungo il TdB si ha una copertura inferiore). In realtà, il profilo geomeccanico della galleria Maddalena 2 (documento PRV_C3B_7207_26-48-01), elaborato sulla base del ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena, indica un GSI pari a 55-60 in corrispondenza della copertura massima. Un GSI inferiore lungo il percorso della TBM è previsto nei casi seguenti:

- $GSI=50$ per una copertura di 700 m
- $GSI \leq 35$ per una copertura di 540 m.

Si tratta quindi di una condizione di calcolo molto conservativa rispetto al quadro geomeccanico previsto.

Le sezioni B, C e D rappresentano invece condizioni molto più simili alle previsioni.

6.5 Sintesi delle verifiche

In questo paragrafo si definiscono le combinazioni di carico e le verifiche relative ai conci ed ai giunti tra conci.

Le verifiche ed osservazioni relative a bulloni, connettori e guarnizioni sono descritte al capitolo 13.

Si sono considerate le seguenti combinazioni di carico:

- Combinazione fondamentale, impiegata a SLU:

$$\gamma_{G1} G_1 + \gamma_{Q1} Q_{k1}$$

Con:

γ_{G1} : coefficiente parziale dei carichi permanenti, pari a 1.3 (o 1 se sfavorevoli);

G_1 : carichi permanenti, ovvero peso proprio, pressione dell'ammasso, pressione idrostatica (quando presente);

γ_{Q1} : coefficiente parziale delle azioni variabili, pari a 1.5 (o 1 se sfavorevoli);

Q_{k1} : azione variabile, dovuta alla pressione di riempimento o di pompaggio o alla spinta massima della TBM.

- Combinazione caratteristica, impiegata a SLE:

$$G_1 + \psi_{11} Q_{k1}$$

Con:

G_1 : carichi permanenti, ovvero peso proprio, pressione dell'ammasso, pressione idrostatica (quando presente)

ψ_{11} : coefficiente di combinazione, pari a 0.9 in quanto più conservativo.

Q_{k1} : azione variabile, ovvero pressione di riempimento o di pompaggio o spinta massima della TBM.

- Combinazione eccezionale

$$G_1 + A_d + \psi_{21} Q_{k1}$$

Con:

G_1 : carichi permanenti, ovvero peso proprio, pressione dell'ammasso, pressione idrostatica (quando presente)

A_d : azioni eccezionali (fuoco)

Ψ_{21} : coefficiente di combinazione, pari a 0.8 in quanto più conservativo.

Q_{k1} : azione variabile, dovuta alla pressione di riempimento o di pompaggio o alla spinta massima della TBM.

Si nota che le azioni permanenti dovute alla pressione idrostatica o alla pressione dell'ammasso roccioso e le azioni variabili non sono sempre concomitanti o non agiscono nella stessa direzione.

La pressione di pompaggio non è concomitante con la pressione dell'ammasso e la pressione idrostatica. Infatti, mentre si inietta la malta cementizia il vuoto anulare non è ancora chiuso per cui non vi è trasmissione della pressione dell'ammasso sul concio. Inoltre la sezione viene drenata. Siccome la stessa pressione di pompaggio viene applicata sia nella sezione tipo TM40 che nella TM45, si considera il caso della sezione TM40 (sez. D), siccome è il caso più conservativo.

La pressione di riempimento a tergo dello scudo è concomitante alla pressione idrostatica solo nella sezione C. Infatti la pressione di riempimento deve essere superiore alla pressione idrostatica solo nel caso in cui la TBM opera in modalità chiusa, ovvero sotto la Val Cenischia (a 5,5 bar di pressione). Negli altri casi, la piena pressione idrostatica si ha solo a lungo termine (ovvero lontano dal fronte), quando viene meno l'effetto drenante dovuto alla macchina che abbate provvisoriamente la pressione idrostatica che può essere presente nella faglie o fratture dell'ammasso. Inoltre, in questi stessi casi, la pressione di riempimento non è di entità tale da contrastare le deformazioni dell'ammasso.

La spinta massima della TBM agisce invece in direzione ortogonale rispetto alle pressioni dell'ammasso e idrostatiche, per cui non vanno sommate assieme. Vale per le sezioni tipo TM45 e TM40 quasi indipendentemente dalle sezioni di calcolo relative all'ammasso, per cui basta una verifica per la TM45 ed una verifica per la TM40.

Le combinazioni di carico considerate per le verifiche nei paragrafi successivi sono riassunte nella tabella seguente.

Elemento verificato	Carichi	Combinazione di carico	Sezioni di verifica
Anello radiale – direz.	Peso proprio, pressione idrostatica quando presente	1.3 G_1 (SLU)	A, B, C e D
Anello radiale – direz.	Peso proprio, pressione idrostatica presente	G_1 (SLE)	A, B, C e D
Giunto radiale	Peso proprio, pressione idrostatica presente	1.3 G_1 (SLU)	A, B, C e D

Anello – direz. radiale	Peso proprio, pressione idrostatica, iniezione di malta cementizia - pressione di riempimento	$1.3 G_1 + 1.5 Q_{k1}$ (SLU)	C
Anello – direz. radiale	Peso proprio, iniezione di malta cementizia - pompaggio	$1.3 G_1 + 1.5 Q_{k1}$ (SLU)	D
Anello – direz. radiale	Peso proprio, ammasso, pressione idrostatica eventuale, fuoco	$G_1 + A_d$ (eccezionale)	A, B, C e D
Anello – direz. longitudinale	Spinta massima della TBM	$1.5 Q_{k1}$ (SLU)	A e D
Giunto longitudinale	Spinta massima della TBM	$1.5 Q_{k1}$ (SLU)	A e D

Tabella 4: Carichi e verifiche del rivestimento

7. Modello dell'anello di conci e risultati

7.1 Descrizione del modello

7.1.1 Modellazione del rivestimento

La modellazione è stata realizzata con l'ausilio del software SCIA Engineering.

Il rivestimento del tunnel è modellato in 2D (modello piano) mediante un insieme di elementi monodimensionali che rappresentano geometricamente la fibra media dei conci, con una mesh fine.

I calcoli sono effettuati per metro lineare di rivestimento; di conseguenza, gli elementi di tipo trave possiedono una sezione di $b=1000 \times h=400$ o $h=450$ mm.

Per il calcolo a SLE e a SLU sull'anello completo con il carico (peso proprio + ammasso + ev. pressione idrostatica), il materiale cls è introdotto con il modulo di deformazione effettivo, ovvero $E_{c,eff}=11.66$ GPa per TM40 e $E_{c,eff}=12$ GPa per TM45. Invece, per le due combinazioni di carico a SLU di iniezione della malta cementizia, il cls è introdotto con il suo modulo di deformazione secante, ovvero $E_{cm}=35$ GPa.

7.1.2 Modellazione dei giunti radiali dei conci

In letteratura, sono presenti alcuni metodi per tenere in conto del comportamento dei giunti e della loro influenza sul comportamento finale del rivestimento. Ad esempio, Muir-Wood (1975) ha sviluppato una formula empirica per considerare gli effetti dei giunti radiali in un calcolo con un anello continuo ed omogeneo, riducendo la rigidità a flessione del rivestimento.

In modo conservativo, in questa relazione, si considerano le due situazioni estreme seguenti:

- Modello continuo, ovvero senza giunti e senza la riduzione di rigidità proposta da Muir-Wood;
- Modello in cui i giunti sono rappresentati con cerniere perfette.

Le cerniere perfette lasciano libera la rotazione ϕ_y , mentre gli spostamenti lungo X e Z di un concio rispetto all'altro sono impediti per garantire la continuità dell'anello. Si fa presente che i nodi fissi sono esclusivamente quelli rappresentati dalle molle, senza far intervenire altre restrizioni.

Il concio di chiave è modellato in calotta in quanto è la posizione più sfavorevole.

Fa eccezione la verifica dell'anello di conci durante l'iniezione della malta cementizia. Durante l'iniezione i bulloni che attraversano i giunti radiali dei conci sono infatti ancora presenti, per questo motivo si considera solamente la situazione senza giunti. I bulloni non sono definitivi e saranno rimossi dietro la coda del back-up.

In ogni caso, in prima battuta l'anello viene conservativamente considerato come continuo. In allegato 3 si presentano i diagrammi di interazione per le diverse sezioni con cerniere perfette insieme con i relativi fattori di sicurezza che dimostrano che i risultati sono meno conservativi.

7.1.3 Modellazione della reazione dell'ammasso

L'interazione ammasso-concio è stata modellata secondo il metodo delle reazioni iperstatiche con degli appoggi flessibili in compressione, di rigidità K , che si attivano quando il rivestimento si sposta verso l'ammasso, con:

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

Ovvero, sulla base della tabella 3, si ottengono i seguenti valori per le 4 sezioni di calcolo previste:

- **A:** $K=980 \text{ MN/m}^3$
- **B:** $K=233.1 \text{ MN/m}^3$
- **C:** $K=20.03 \text{ MN/m}^3$
- **D:** $K=233.12 \text{ MN/m}^3$

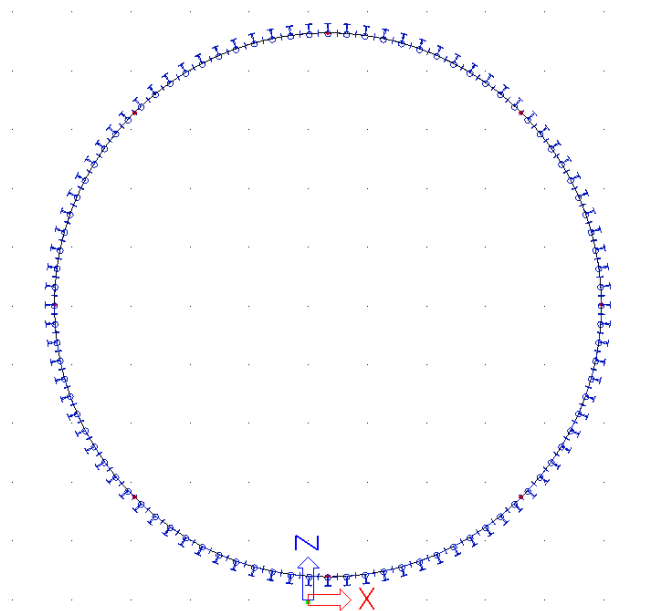


Figura 14: Modello 2D continuo (senza giunti)

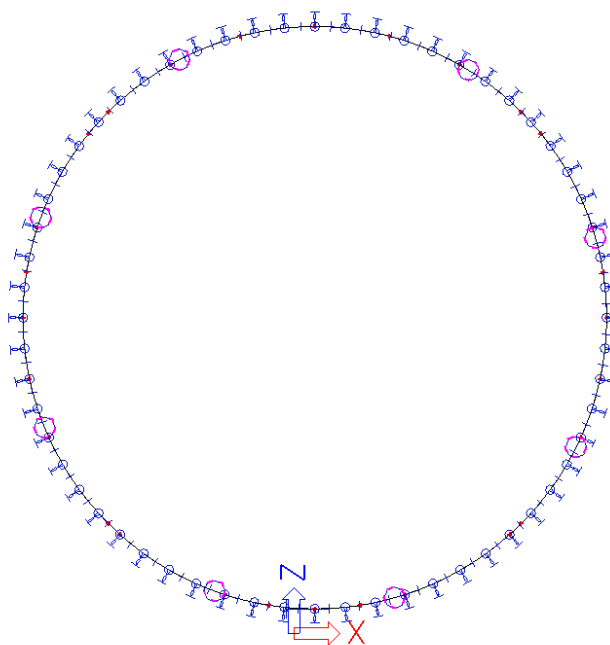


Figura 15: Modello 2D con giunti

7.1.4 Spinta dell'ammasso sul rivestimento

Sezione A

Si usa il metodo convergenza-confinamento per determinare la pressione agente sul rivestimento. Siccome in questo caso l'intercapedine tra scudo e ammasso roccioso si chiude, il profilo longitudinale di spostamento (LDP) deve tener conto del confinamento dovuto allo scudo. Si ricorda che si ha uno sovrascavo sul diametro ΔD pari a 25 cm (5 cm di sovrascavo di base dovuto ai dischi + 20 cm con i dispositivi adeguati) oltre alla conicità che è pari a 5 cm alla fine dello scudo.

Bisogna considerare la configurazione geometrica effettiva della macchina (vedere figura seguente), per cui l'intercapedine è massima in chiave mentre è minima in corrispondenza dell'arco rovescio.

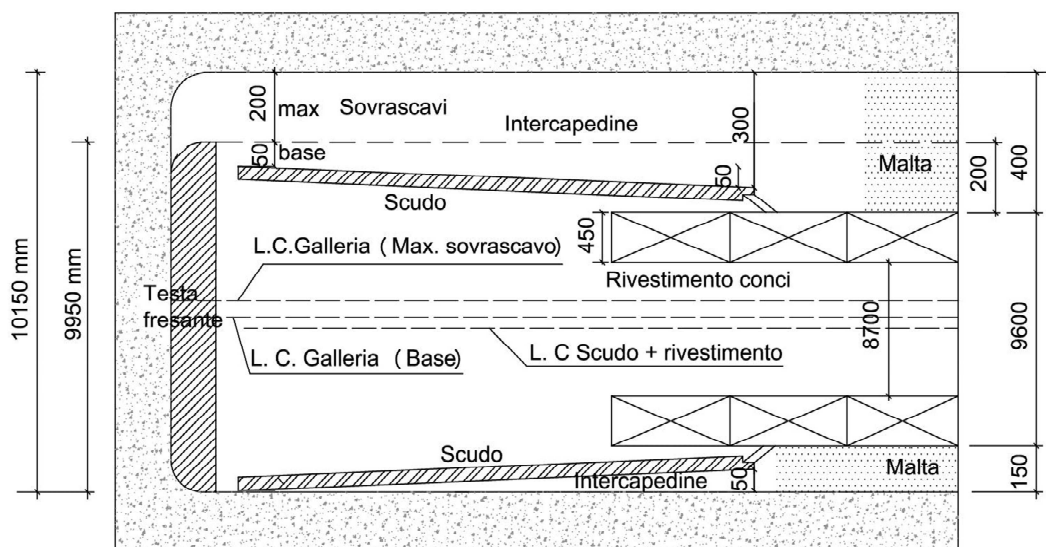


Figura 16: Schema della geometria della TBM considerata (il disegno non è in scala)

Il contatto avviene quindi prima in arco rovescio, poi progressivamente nei piedritti fino alla chiusura totale dell'intercapedine. Inoltre, le spinte dell'ammasso in arco rovescio provocano una traslazione verso l'alto dello scudo che viene a ridurre la distanza libera (dovuta all'intercapedine) in calotta. Tuttavia, questa traslazione, dato il peso dello scudo, è inferiore allo spostamento radiale in assenza di sostegni (si stima un 60% di esso).

Nel punto di chiusura totale si stima quindi che lo spostamento radiale in calotta effettivo è pari a circa 22 cm mentre in arco rovescio a circa 13 cm. La somma di essi porta ai 35 cm disponibili sul diametro alla coda dello scudo. Occorre considerare lo spostamento effettivo u (quello tale da determinare la chiusura dell'intercapedine), che è dato dalla seguente formula:

$$u = u_c - u_0$$

con u_c lo spostamento totale calcolato (dalla LDP), pari a 32 cm in calotta in questo caso e u_0 lo spostamento al fronte, pari a 10 cm.

Come si può vedere nella figure seguenti, la chiusura totale (contatto in calotta) avviene per una lunghezza di circa 0.7 m, ovvero a 9.3 m dalla testa fresante. La chiusura totale dello scudo in quel punto è compatibile con le caratteristiche della fresa, come dimostrato nella relazione PRV_C3A_0896_33-02-02.

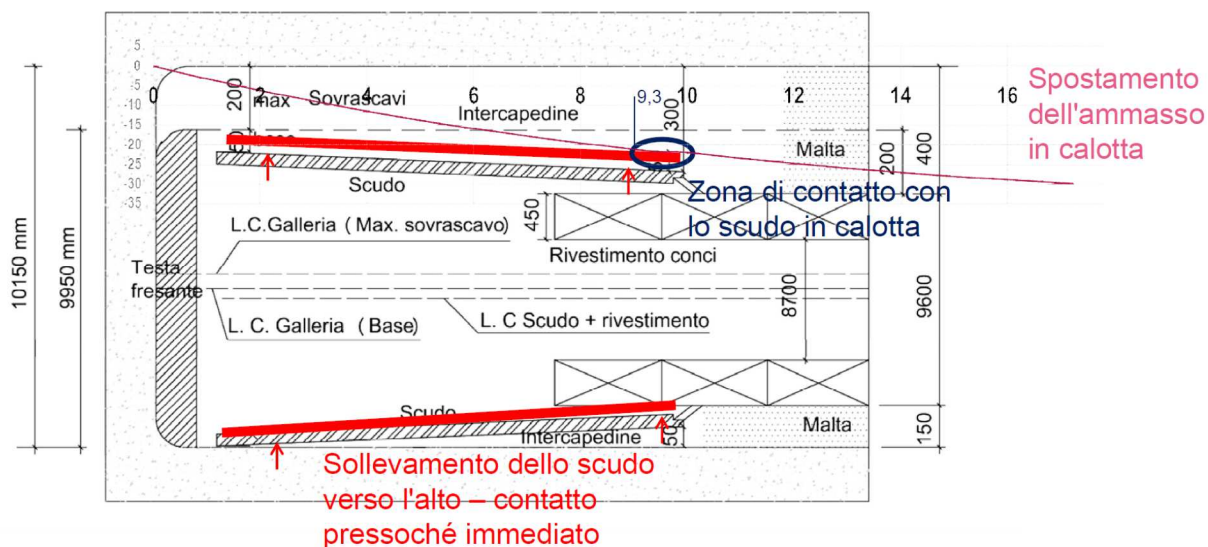


Figura 17: Interazione tra scudo e ammasso roccioso (schema)

La procedura di intasamento a tergo dei conci è descritta nella relazione PRV_C3A_0435_26-19-00. Si inietta prima la malta in arco rovescio (per garantire l'appoggio immediato dell'anello), poi il pea gravel nei piedritti (dopo che la malta in arco rovescio ha fatto presa – da disporre a 45°, secondo l'angolo di riposo del materiale) e successivamente la malta in calotta. Per convenzione, si considera che il rivestimento si carica a 5 m dalla coda dello scudo. A questa distanza l'intercapedine disponibile tra coda dello scudo ed estradosso dei conci (pari a circa 10 cm sul raggio) non si è ancora chiusa.

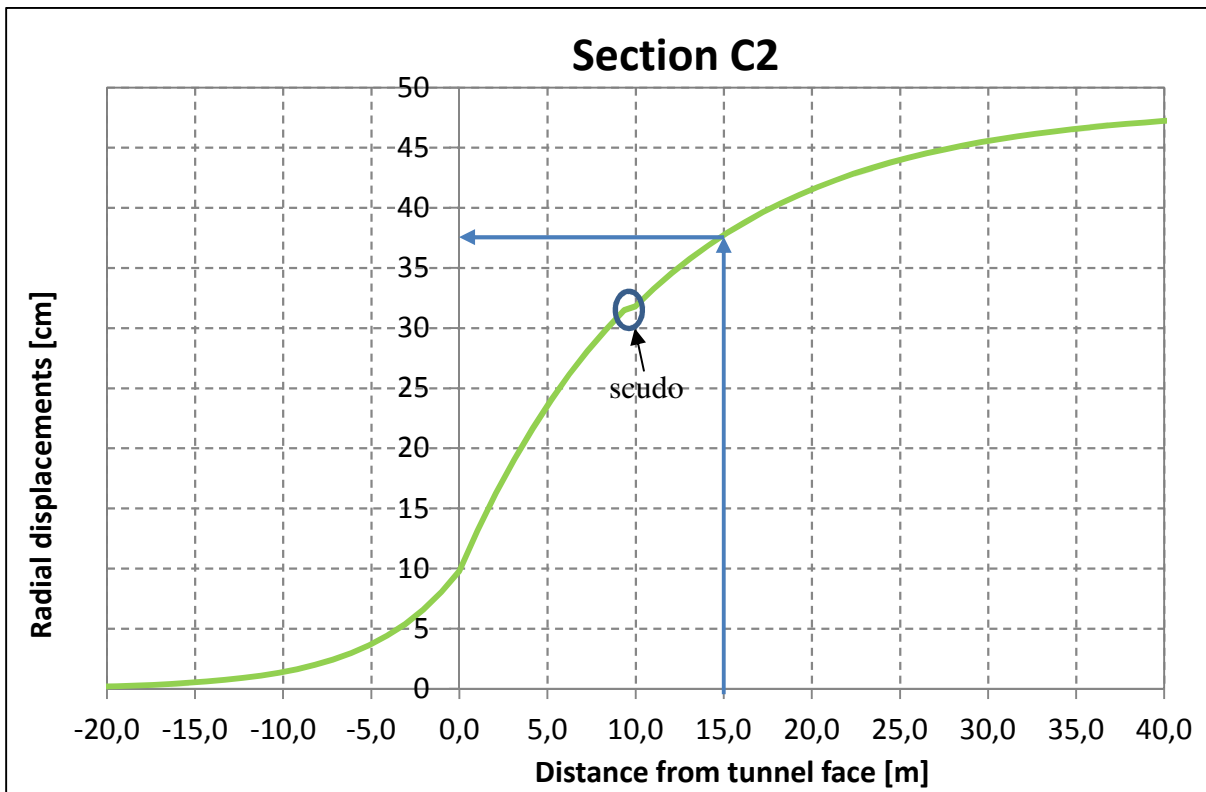


Figura 18: Profilo longitudinale di spostamento (LDP) in calotta tenendo conto dell'interazione scudo-ammasso

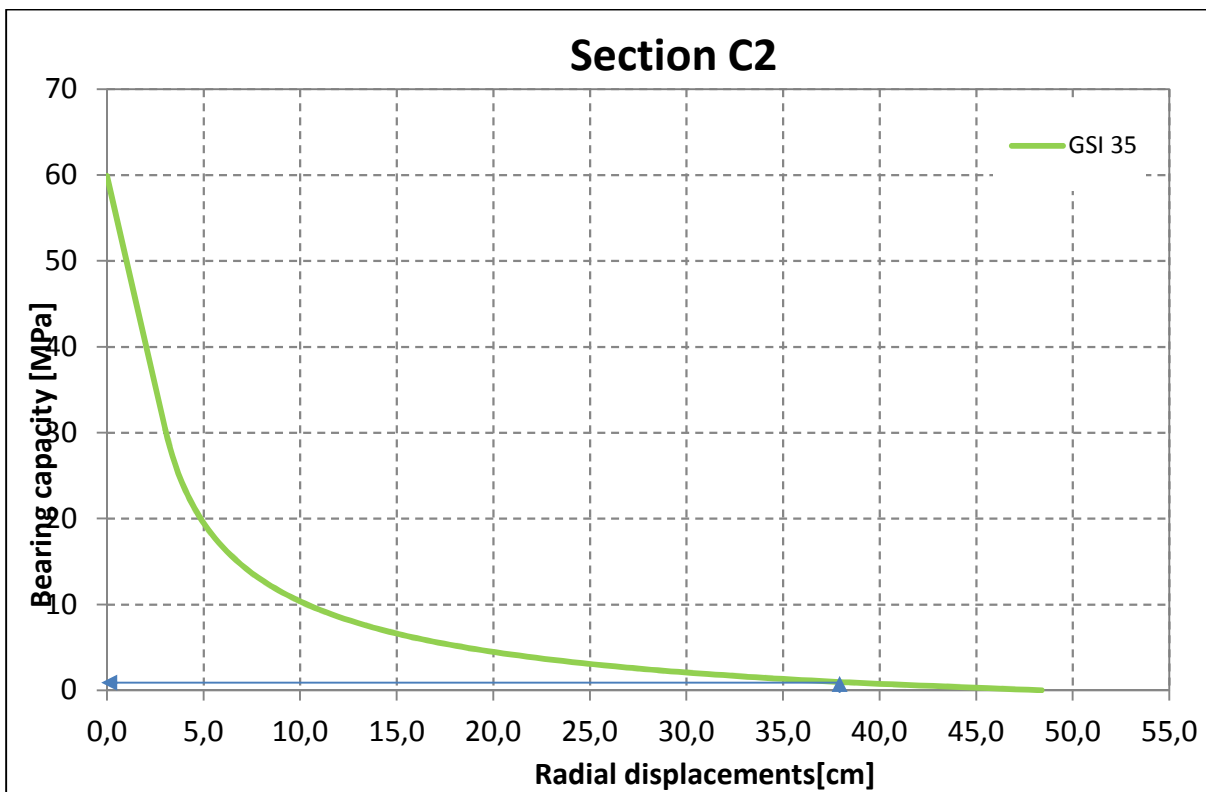


Figura 19: Curva caratteristica

Dalla curva caratteristica si ottiene una pressione dell'ammasso di 1.0 MPa circa (spostamento di 38 mm).

Siccome lo stato tensionale è anisotropo con $k_0=1.8$ (tensioni orizzontali maggiori), la fascia plastica sarà anisotropa con plasticizzazioni maggiori in calotta e meno importanti in piedritto. Per semplicità e prudenzialmente, in modo da riprodurre tale fenomeno, la pressione ottenuta dalle curve convergenza-confinamento è stata modellata in calotta, mentre in piedritto si è modellata una pressione 1.8 volte inferiore. Come mostrato nella seguente figura, la distribuzione negli altri elementi è variabile tra i due valori limite. La modellazione di una distribuzione di pressione anisotropa è importante, non solo per riprodurre in maniera più realistica il comportamento dell'ammasso in questo caso, ma anche più in generale per tener conto dell'anisotropia di comportamento dell'ammasso roccioso dovuta a discontinuità, scistosità, ecc., tipica dei micascisti, che può generare momenti notevoli sul rivestimento.

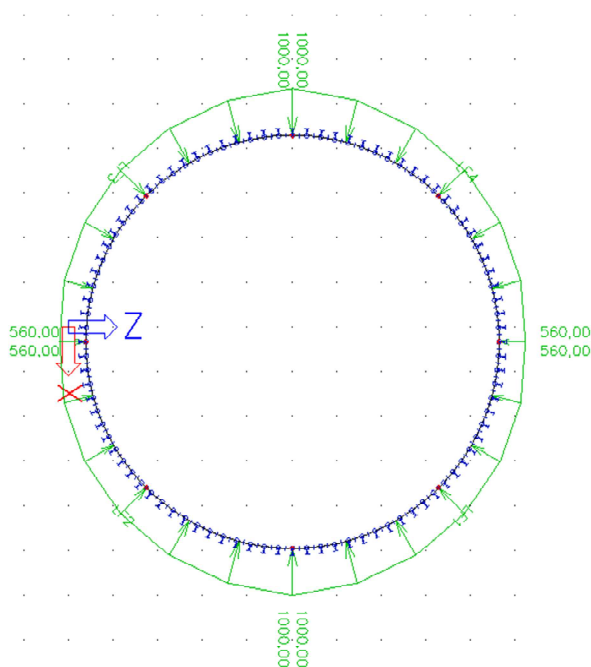


Figura 20: Pressioni sul rivestimento per la sezione A

Non si considera la pressione idrostatica, in quanto la sezione sarà drenata.

Sezione B

Sulla base dei dati idrogeologici riportati nella relazione descrittiva dei drenaggi lato Italia (documento PRV_C3A_3952_26-19-40_10-01), nella zona a scaglie si disporrà un'impermeabilizzazione totale e quindi il rivestimento avrà un carico massimo della falda di 90 m (dalla pk 55+029 alla pk 55+167), ovvero 900 kPa circa (a 1 MPa il tunnel sarà drenato).

La falda potrebbe anche non essere presente. Questo porta a carichi meno importanti sui rivestimenti e quindi non è il caso dimensionante. Inoltre, come mostrato nei profili PRV_C3A_3948e3951_26-19-00, le venute d'acqua più importanti si hanno in presenza delle zone più fratturate, come nel caso considerato in questa sezione di calcolo.

Per quanto riguarda la pressione dovuta all'ammasso, si considera che il rivestimento si carichi ad una distanza di 15 m dal fronte (5 m dalla coda dello scudo). In questo caso l'intercapedine è interamente intasata con malta cementizia. Tuttavia, la malta non viene tutta iniettata dalla coda dello scudo (questo avviene solo nel caso di scavo in modalità chiusa, sotto il Val Cenischia) ma si inietta per strati, aspettando l'indurimento dello strato sottostante prima di iniettare lo strato superiore. Quindi nel frattempo la macchina avanza e l'iniezione in calotta avviene in generale oltre i 5 m dalla coda dello scudo.

Grazie all'uso del sovrascavo con dispositivi, non vi è contatto tra ammasso roccioso e scudo. Dalle curve caratteristiche si ottiene una pressione pari a 200 kPa circa. Dato il coefficiente k_0 pari a 0.6, si considera tale pressione massima in direzione verticale, mentre in direzione orizzontale si considera $p_h = k_0 p_v = 120$ kPa.

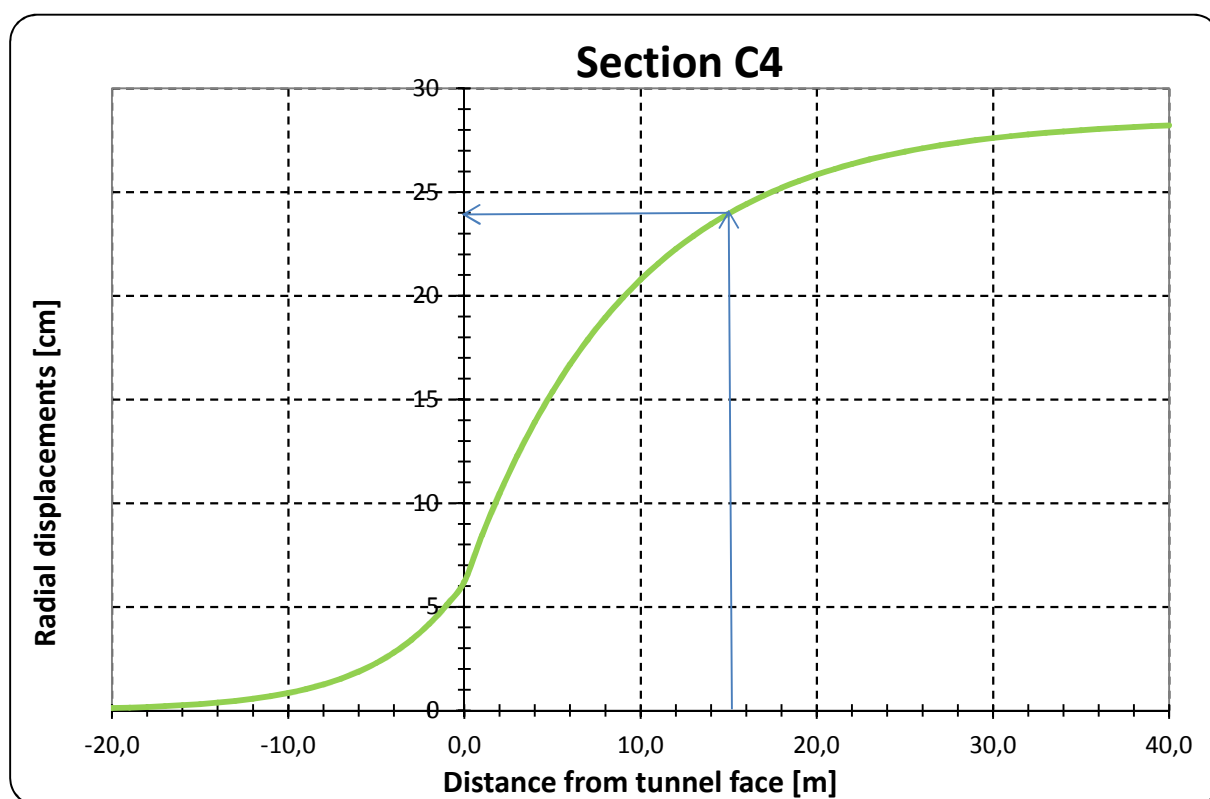


Figura 21: Profilo longitudinale di spostamento (LDP)

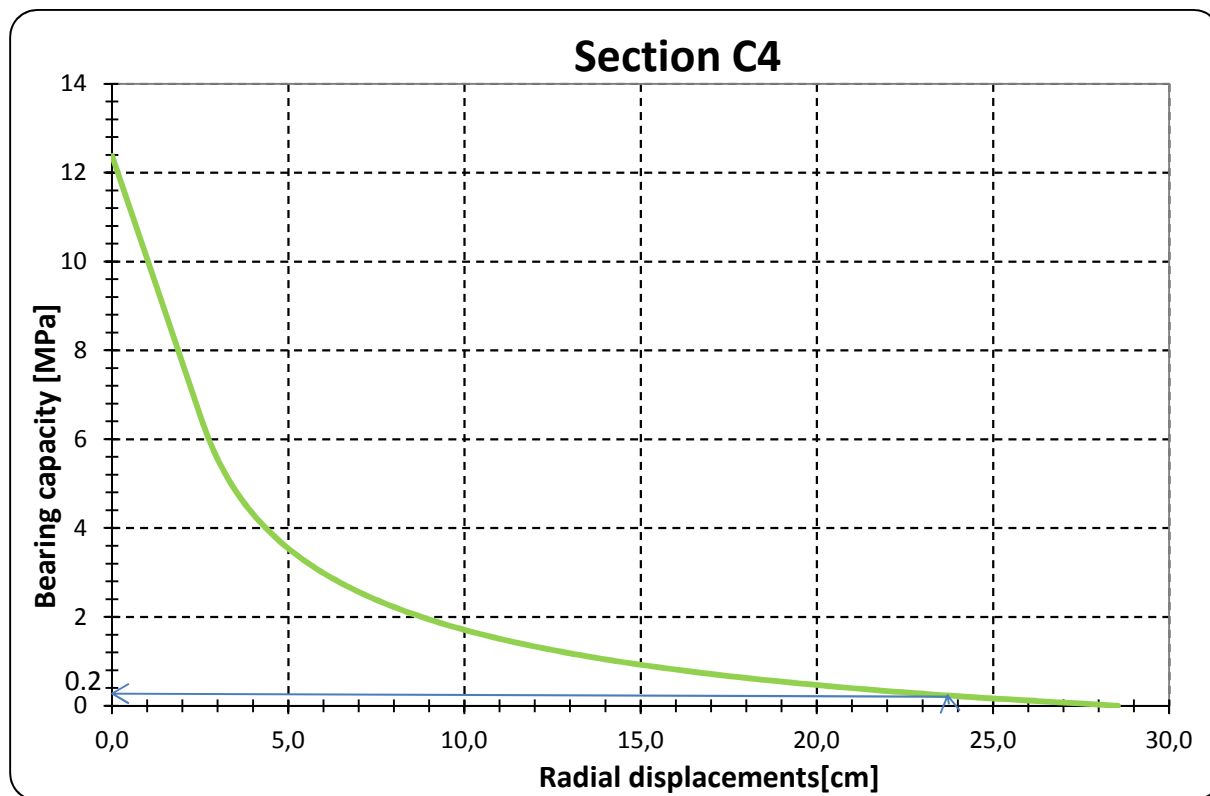


Figura 22: Curva caratteristica

Le pressioni modellate sono mostrate nella figura seguente.

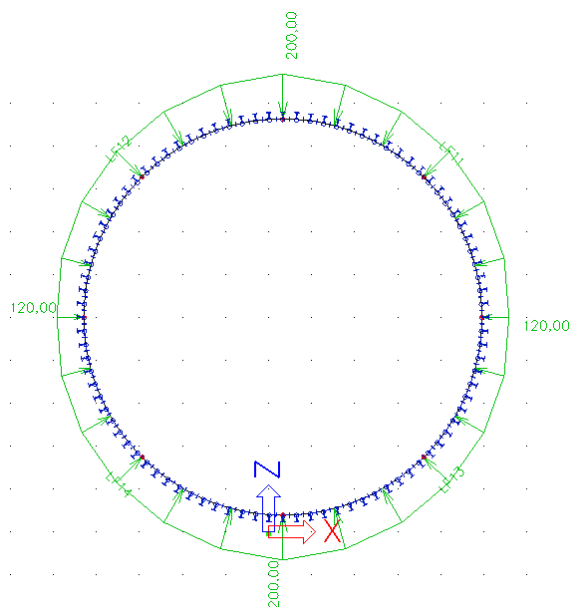


Figura 23: Pressioni dell'ammasso sul rivestimento per la sezione B come modellate

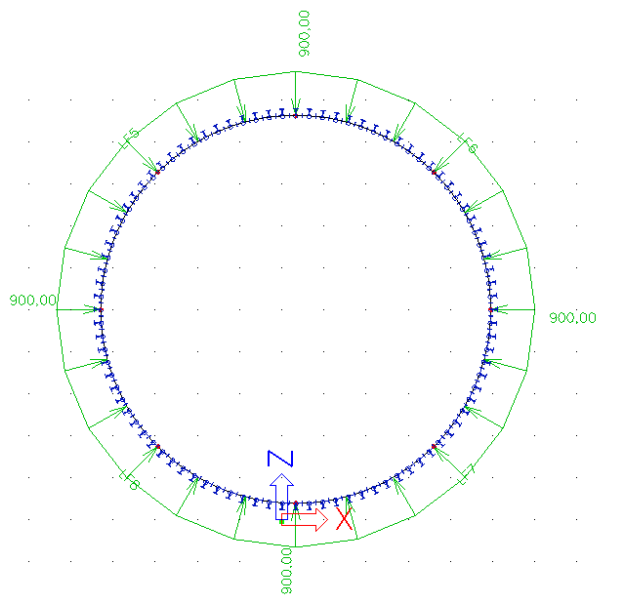


Figura 24: Carico idraulico sul rivestimento per la sezione B come modellate

Sezione C

Si considera che l'asse del tunnel è ad una profondità di 55 m. Le spinte verticali ed orizzontali sono riportate in tabella 5 e in fig. 24.

Nell'espressione di Terzaghi si considerano le tensioni efficaci e coesione nulla.

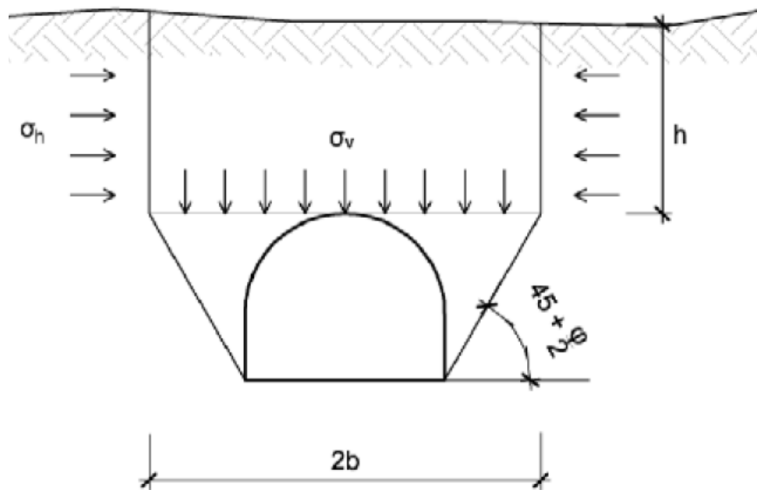


Figura 25: Assunzione di Terzaghi per valutare il carico sul rivestimento

Pressione verticale	Pressione orizzontale
$\sigma_v = \frac{by'-c}{\tan\varphi} (1-e^{-\frac{htan\varphi}{b}})$	$\sigma_h = ka \sigma_v$ $ka = tg^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}) = 0.27$
138.4 kPa	37.3 kPa

Tabella 5: Pressioni sul rivestimento per la sezione C

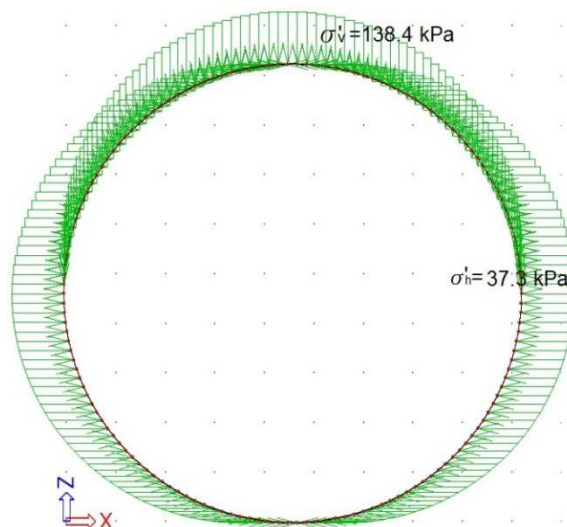


Figura 26: Pressioni sul rivestimento dovute alle spinte del terreno per la sezione C

Inoltre, bisogna considerare la falda (pressioni neutre), come illustrato nella figura seguente. Come descritto nella relazione PD2_C3B_0021_26-60-01, il battente idraulico massimo è pari a circa 50-60 m e coincide con la copertura topografica in corrispondenza del Torrente Cenischia. L'escursione massima del livello freatico durante un ciclo idrologico (1 anno) è dell'ordine di 10 m (la falda è quindi sempre presente). Si considera un carico idrostatico pari a 550 kPa.

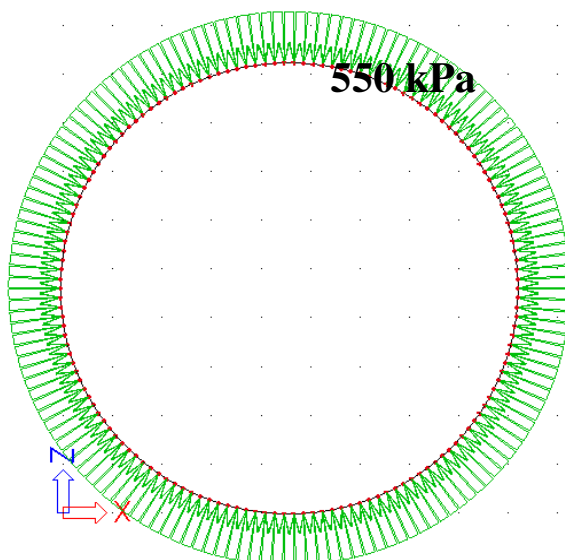


Figura 27: Pressioni sul rivestimento dovute alla falda per la sezione C

Sezione D

Si considerano le curve e la LDP già mostrate nella relazione PRV_C3A_3949_26-19-00_10-02 per GSI=35. Grazie all'uso del sovrascavo con dispositivi, non vi è contatto tra ammasso roccioso e scudo. Analogamente alla sezione B, si considera che il rivestimento si carica ad una distanza di 15 m dal fronte (5 m dalla coda dello scudo).

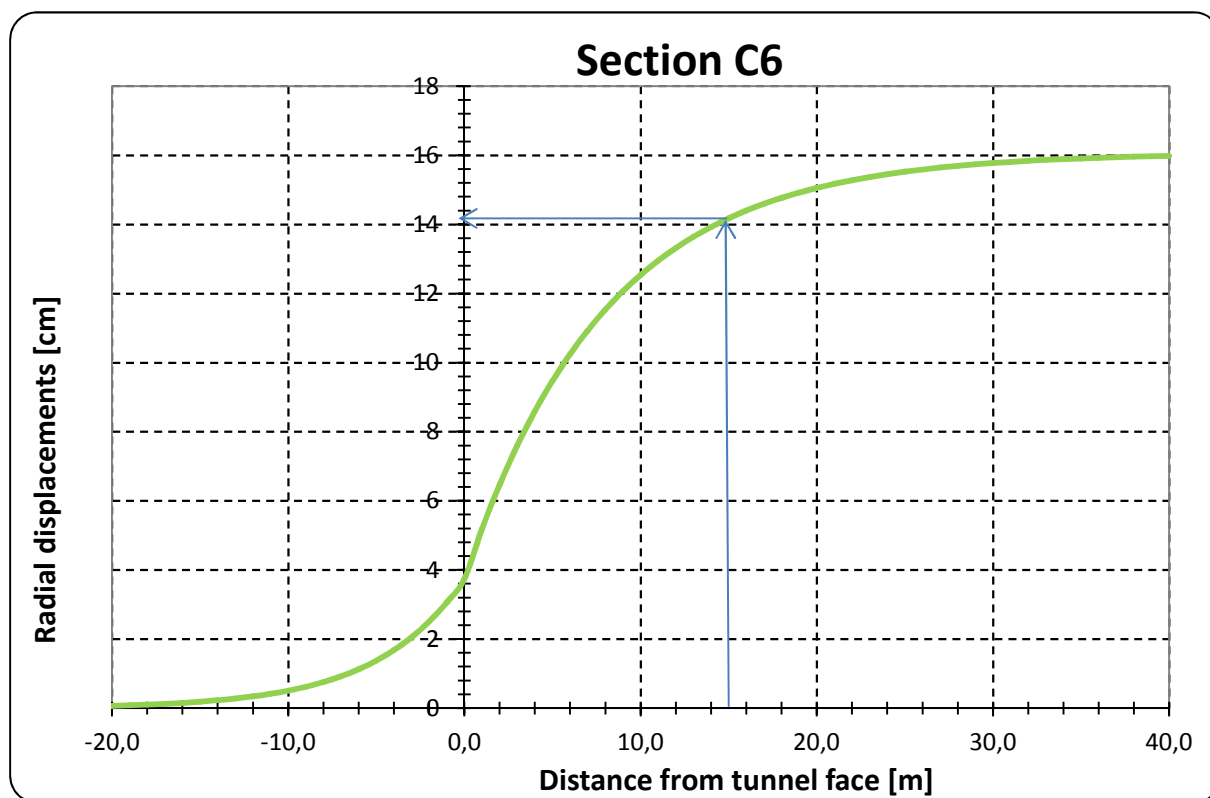


Figura 28: Profilo longitudinale di spostamento (LDP)

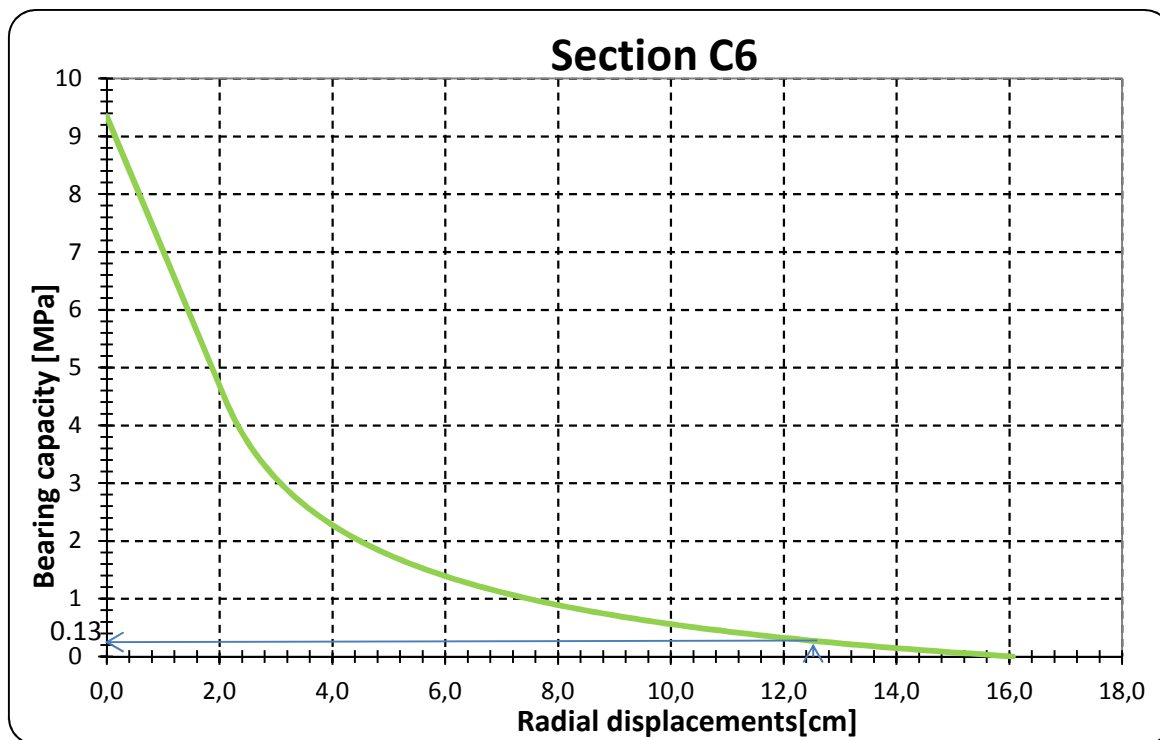


Figura 29: Curva caratteristica

Questo porta ad una pressione dell'ammasso di 130 kPa, che è stata modellata come pressione uniforme.

Inoltre, sulla base dei dati idrogeologici (contenuti nella relazione PRV_C3A_3952_26-19-40_10-01), si considera un carico idraulico massimo pari a 90 m (900 kPa), che si trova tra le pk 60+581 e 60+691.

La falda potrebbe anche non essere presente. Questo porta a carichi meno importanti sui rivestimenti e quindi non è il caso dimensionante. Inoltre, come mostrato nei profili PRV_C3A_3948e3951_26-19-00, le venute d'acqua più importanti si hanno in presenza delle zone più fratturate, come nel caso considerato in questa sezione di calcolo.

Le pressioni modellate sono mostrate nella figura seguente.

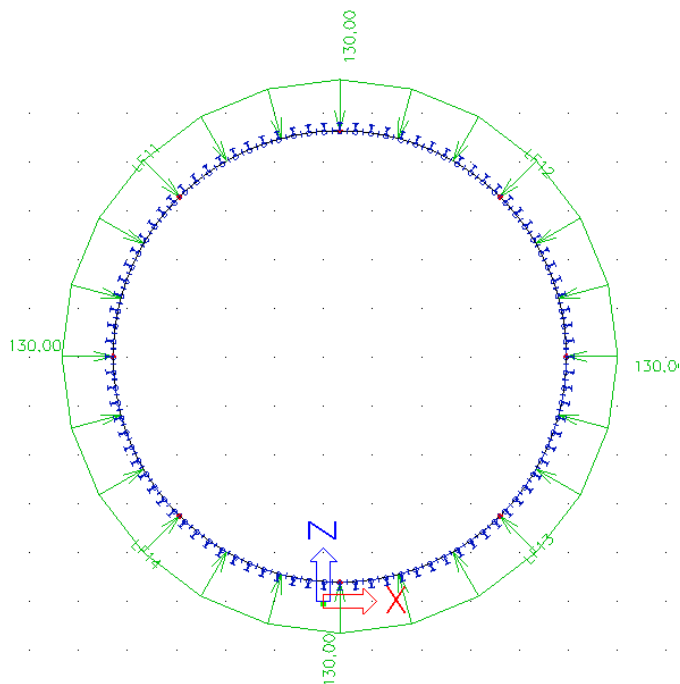


Figura 30: Pressioni dell'ammasso sul rivestimento per la sezione D come modellate

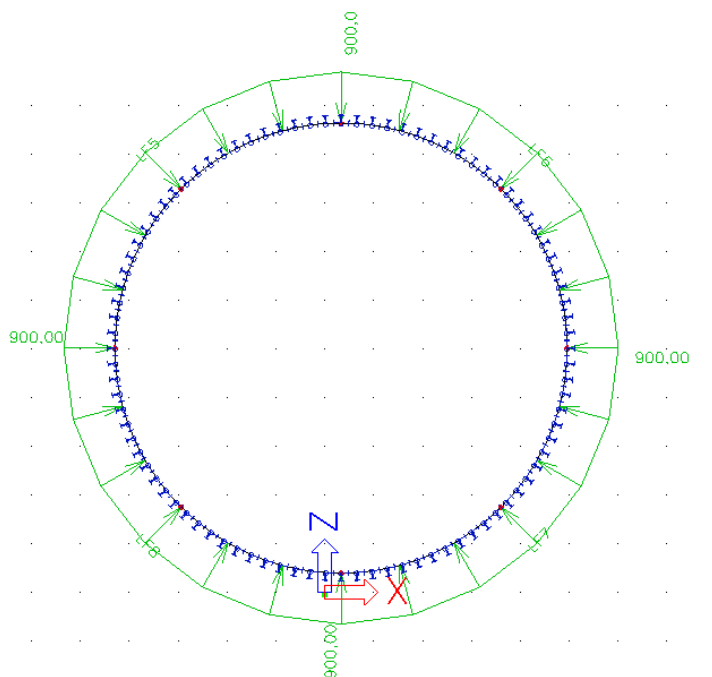


Figura 31: Carico idraulico sul rivestimento per la sezione D come modellate

7.2 Sollecitazioni ottenute

Si forniscono qui di seguito i diagrammi delle sollecitazioni e le tabelle delle coppie di sforzi dimensionanti per le quattro sezioni di calcolo così come fornite dal software SCIA, per tutte

le combinazioni di carico riguardanti l'anello ed i giunti in direzione radiale definite nel capitolo 6.5, tabella 4.

7.2.1 Sezione A

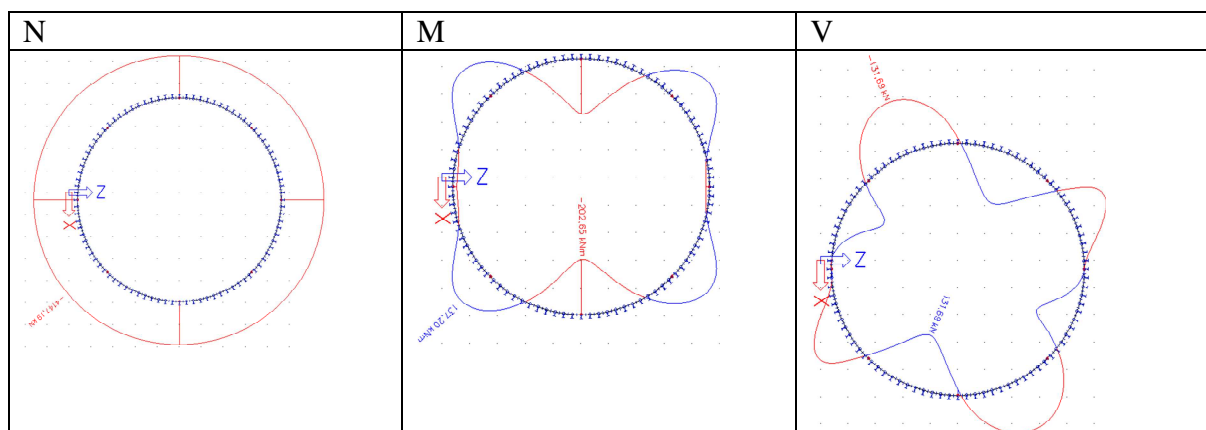


Figura 32: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione A – modello continuo

A Combinazione di carico	SLE			SLU		
	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]
M,Nmin,V	-13,12	4025,70	-0,20	-17,06	5233,41	-0,26
M,Nmax,V	132,60	4147,19	-36,99	172,38	5391,35	-48,09
Mmin,N,V	-202,65	4034,55	1,00	-263,45	5244,92	1,30
Mmax,N,V	137,20	4145,96	5,76	178,36	5389,75	7,49
M,N,Vmax	-34,91	4091,44	131,69	-45,38	5318,87	171,20

Tabella 6: Sollecitazioni nell'anello per la sezione A – modello continuo

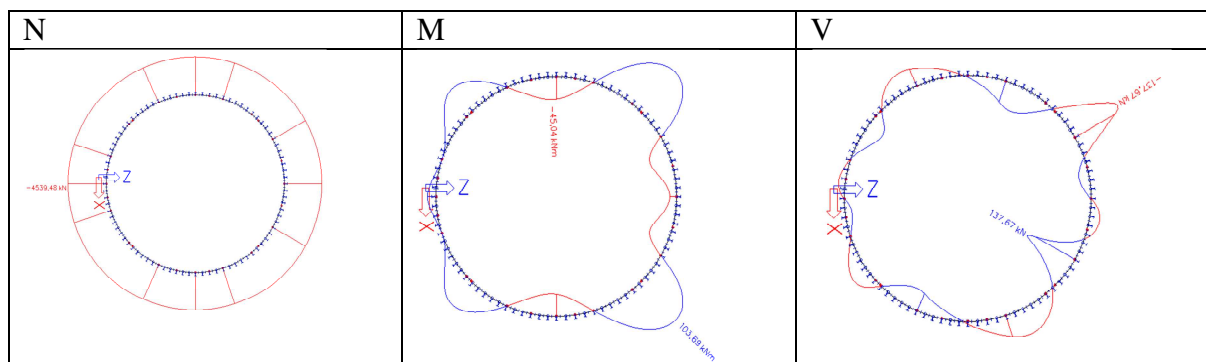


Figura 33: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione A – modello con cerniere

A Combinazione di carico	SLE			SLU		
	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]
M,Nmin,V	-39,46	4427,17	-15,78	-51,30	5755,32	-20,51
M,Nmax,V	17,09	4539,48	0	22,22	5901,32	0,00
Mmin,N,V	-45,04	4477,05	0,51	-58,55	5820,17	0,66
Mmax,N,V	103,69	4471,69	-3,04	134,80	5813,20	-3,95
M,N,Vmax	25,29	4446,9	137,67	32,88	5780,97	178,97

Tabella 7: Sollecitazioni nell'anello per la sezione A – modello con cerniere

Sezione B

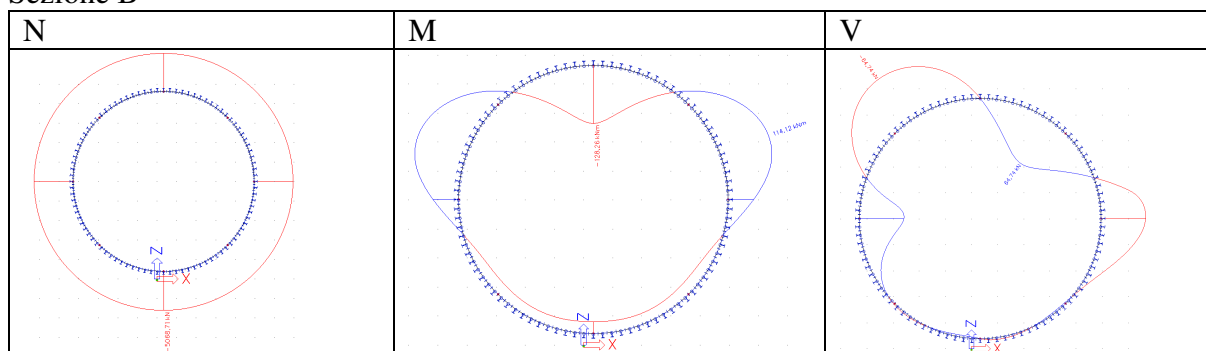


Figura 34: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione B – modello continuo

B Combinazione di carico	SLE			SLU		
	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]
Mmin,Nmin,V	-128,26	4944,62	0,04	-166,74	6428,01	0,05
M,Nmax,V	-26,38	5068,71	-0,04	-34,29	6589,32	-0,05
Mmax,N,V	114,12	5030,59	0,39	148,36	6539,77	0,51
M,N,Vmax	-3,05	4981,56	64,74	-3,97	6476,03	84,16

Tabella 8: Sollecitazioni nell'anello per la sezione B – modello continuo

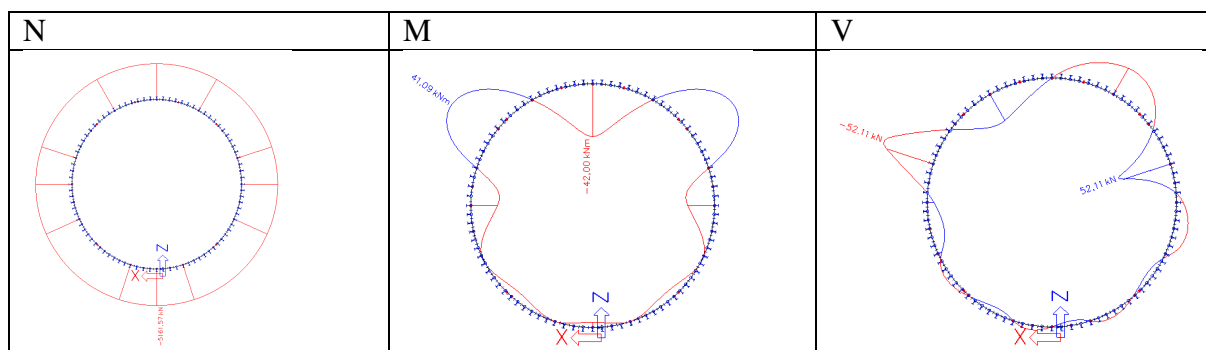


Figura 35: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione B – modello con cerniere

B Combinazione di carico	SLE			SLU		
	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]
Mmin,Nmin,V	-42	5051,27	0	-54,60	6566,65	0,00
M,Nmax,V	-4,21	5161,57	0	-5,47	6710,04	0,00
Mmax,N,V	-42	5051,27	0	-54,60	6566,65	0,00
M,N,Vmax	41,09	5090,56	0,3	53,42	6617,73	0,39

Tabella 9: Sollecitazioni nell'anello per la sezione B – modello con cerniere

7.2.2 Sezione C

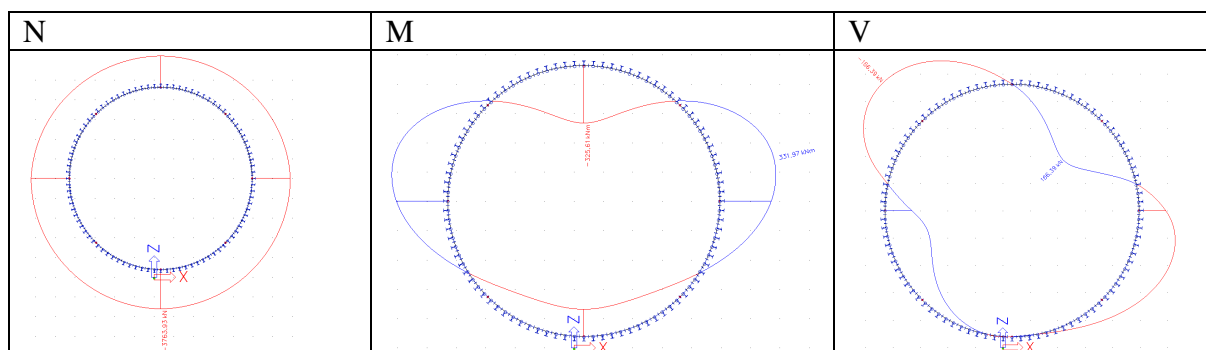


Figura 36: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione C – modello continuo

C	SLE			SLU		
	Combinazione di carico	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]
M,Nmin,V	-307,01	2971,13	47,11	-399,11	3862,47	61,24
M,Nmax,V	-154,06	3763,93	0,06	-200,28	4893,11	0,08
Mmin,N,V	-325,61	2984,68	-0,06	-423,29	3880,08	-0,08
Mmax,N,V	331,97	3501,80	3,95	431,56	4552,34	5,14
M,N,Vmax	34,46	3144,84	166,39	44,80	4088,29	216,31

Tabella 10: Sollecitazioni nell'anello per la sezione C – modello continuo

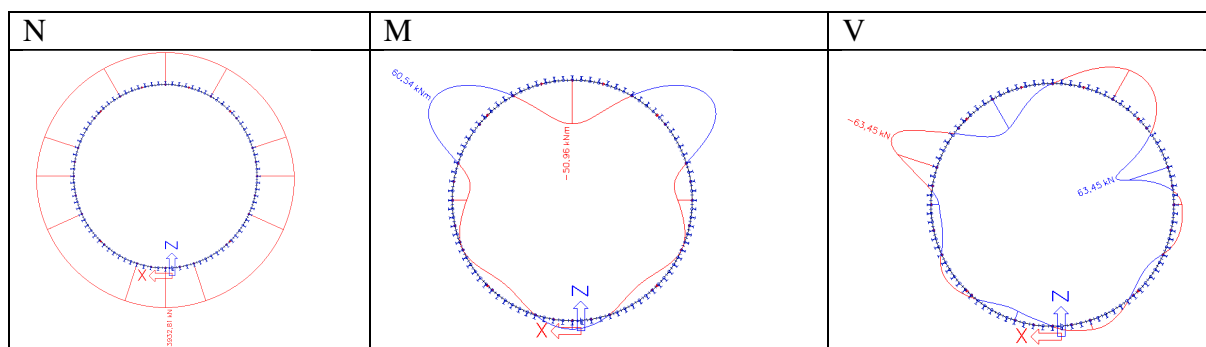


Figura 37: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione C – modello con cerniere

C	SLE			SLU		
	Combinazione di carico	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]
M,Nmin,V	-42,9	3160	-17,59	-55,77	4108,00	-22,87
M,Nmax,V	9,88	3932,81	0	12,84	5112,65	0,00
Mmin,N,V	-50,96	3177,3	0	-66,25	4130,49	0,00
Mmax,N,V	60,54	3351,59	1,5	78,70	4357,07	1,95
M,N,Vmax	22,46	3460,32	63,45	29,20	4498,42	82,49

Tabella 11: Sollecitazioni nell'anello per la sezione C – modello con cerniere

7.2.3 Sezione C sotto pressione di riempimento

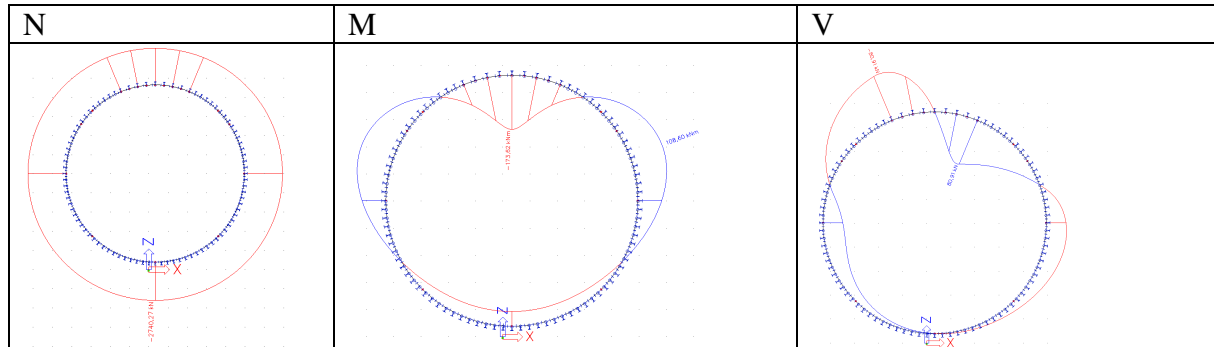


Figura 38: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione C – modello continuo

D	SLE			SLU		
	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]
Combinazione di carico						
Mmin,Nmin,V	-173,62	2610,85	0	-250,68	3406,1	0
M,Nmax,V	-46,87	2740,27	0	-64,73	3578,92	0
Mmax,N,V	108,6	2704,97	-1,18	154	3536,63	1,21
M,N,Vmax	-83,7	2633,55	80,91	-118,34	3438,95	118,43

Tabella 12: Sollecitazioni nell'anello per la sezione C – modello continuo

7.2.4 Sezione D

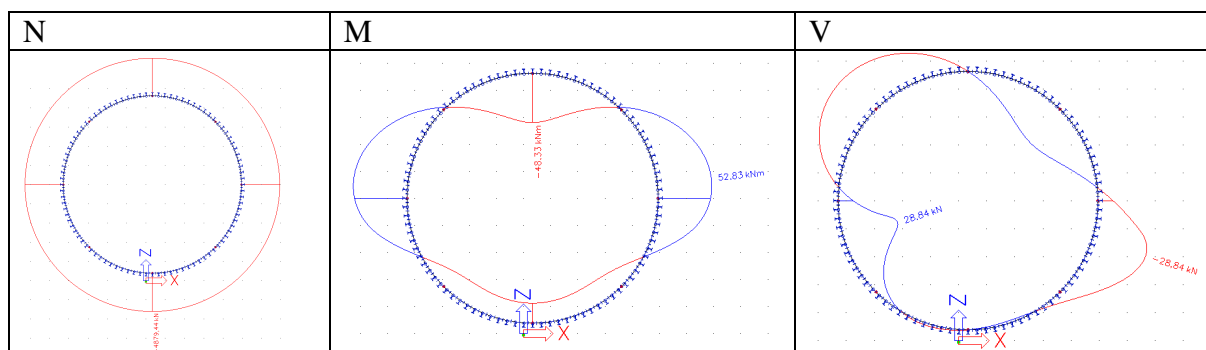


Figura 39: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione D – modello continuo

D	SLE			SLU		
	Combinazione di carico	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]
Mmin,Nmin,V	-48,33	4771,11	0,00	-62,83	6202,44	0,00
M,Nmax,V	-19,45	4879,44	0,00	-25,29	6343,27	0,00
Mmax,N,V	52,83	4838,46	0,55	68,68	6290,00	0,72
M,N,Vmax	22,49	4852,81	28,84	29,24	6308,65	37,49

Tabella 13: Sollecitazioni nell'anello per la sezione D – modello continuo

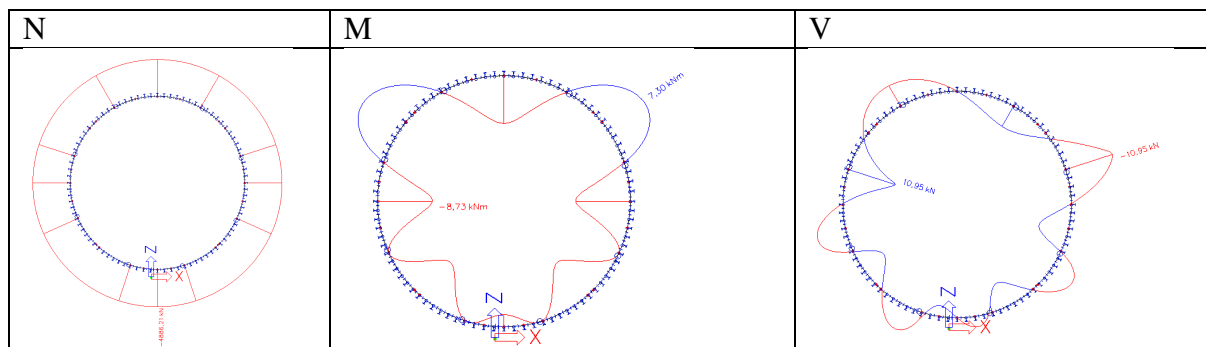


Figura 40: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione D – modello con cerniere

D	SLE			SLU		
	Combinazione di carico	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]
Mmin,Nmin,V	-7,67	4794,18	0	-9,97	6232,43	0,00
M,Nmax,V	-1,95	4886,21	0	-2,54	6352,07	0,00
Mmax,N,V	-8,73	4839,37	0,33	-11,35	6291,18	0,43
M,N,Vmax	7,3	4816,38	0,12	9,49	6261,29	0,16

Tabella 14: Sollecitazioni nell'anello per la sezione D – modello con cerniere

7.2.5 Sezione D sotto pressione di pompaggio

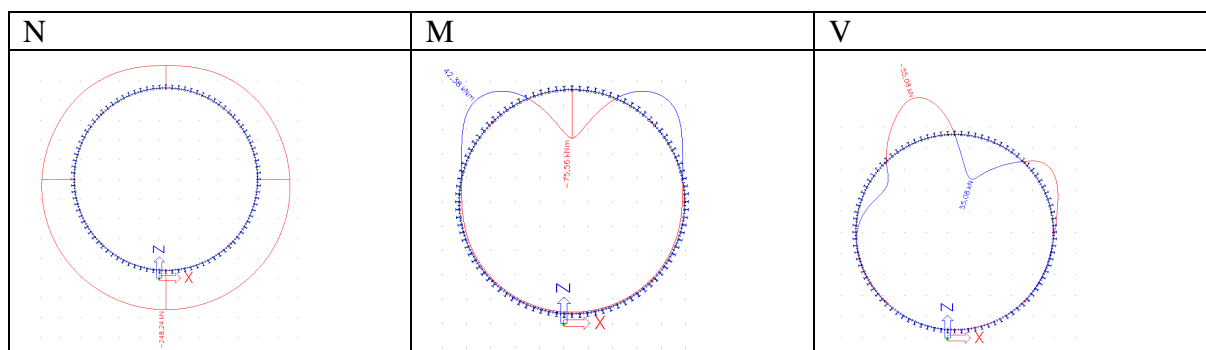


Figura 41: Sollecitazioni a SLE nell'anello per la sezione D durante il pompaggio – modello continuo

D Combinazione di carico	SLE			SLU		
	M [kNm]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	N [kN]	V [kN]
Mmin,Nmin,V	-75,56	141,68	0,00	-110,93	207,53	0
M,Nmax,V	-2,34	248,24	0,00	-3,33	348,75	0
Mmax,N,V	42,38	179,75	-0,02	61,88	261,23	-0,03
M,N,Vmax	-23,08	155,11	55,08	-33,05	224,07	81,48

Tabella 15: Sollecitazioni nell'anello per la sezione D durante il pompaggio – modello continuo

7.3 Spostamenti / deformata

Sono presentati i diagrammi di spostamento radiale [mm] delle sezioni sotto caso di carico caratteristico. Non si considerano le situazioni transitorie, di breve durata, dovute all'iniezione del riempimento. I modelli continui o con cerniere portano a risultati molto simili.

Si nota che gli spostamenti sono millimetrici per le sezioni A, B e D in roccia (massimo 7 mm per la sezione B), mentre nella sezione C nei terreni sciolti si ha uno spostamento massimo di 3 cm.

7.3.1 Sezione A

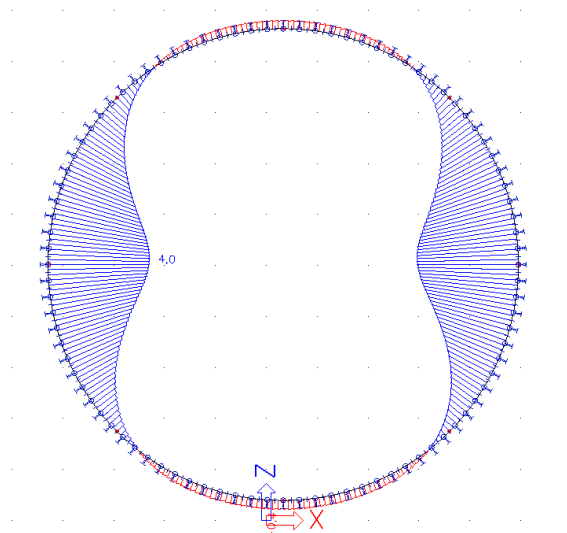


Figura 42: Diagramma di spostamento radiale per la sezione A

7.3.2 Sezione B

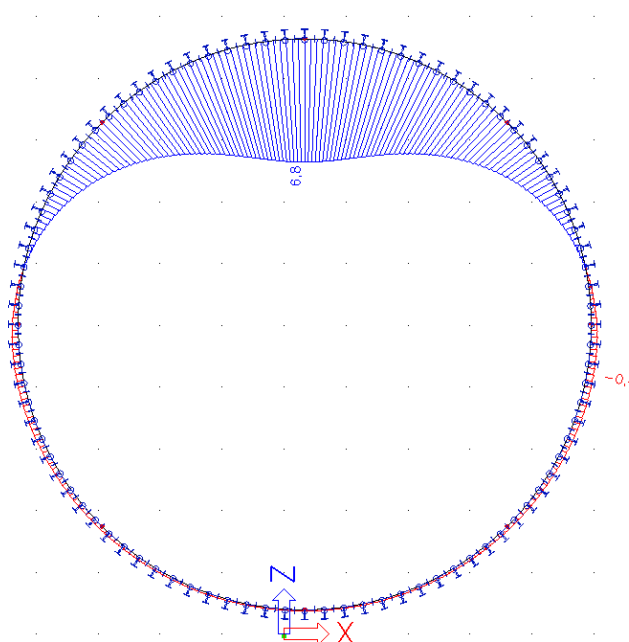


Figura 43: Diagramma di spostamento radiale per la sezione B

7.3.3 Sezione C

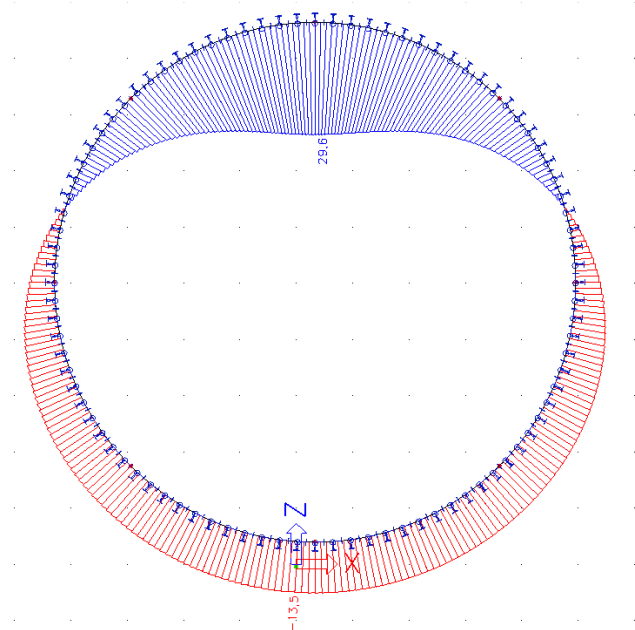


Figura 44: Diagramma di spostamento radiale per la sezione C

7.3.4 Sezione D

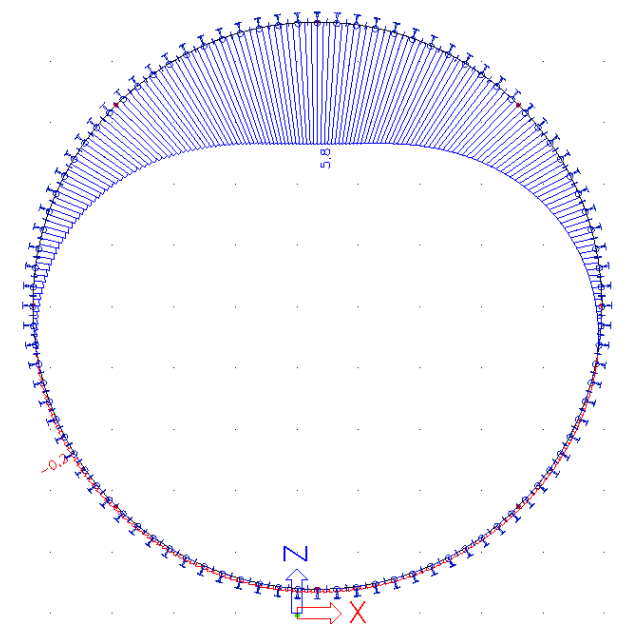


Figura 45: Diagramma di spostamento radiale per la sezione D

8. Verifica statica delle sezioni in direzione radiale

Si esegue la verifica statica dell'anello (conci) e dei giunti in direzione trasversale considerando le armature circolari minime definite al § 4. In questo modo si può verificare se queste armature sono sufficienti per le combinazioni di carico a SLE e SLU. Per la combinazione di carico eccezionale (fuoco) si veda il § 12.

Si nota che il modello continuo rispetto al modello con cerniere porta a valori molto simili di sforzo normale, ma a valori di momento e di sforzo di taglio molto più importanti. Questo è ancora più rilevante in corrispondenza dei giunti, in quanto nel modello con cerniere perfette il momento è nullo. Le verifiche sono dunque svolte considerando il modello continuo, che rappresenta la situazione più conservativa.

8.1 Sezione A

8.1.1 Verifica a pressoflessione

Il principio di questo calcolo è di verificare che le armature minime definite al § 4.1 siano sufficienti per l'insieme delle combinazioni di carico studiate.

Le sollecitazioni mostrate al § 7.2 sono verificate con l'ausilio del diagramma di interazione per il cls armato seguente.

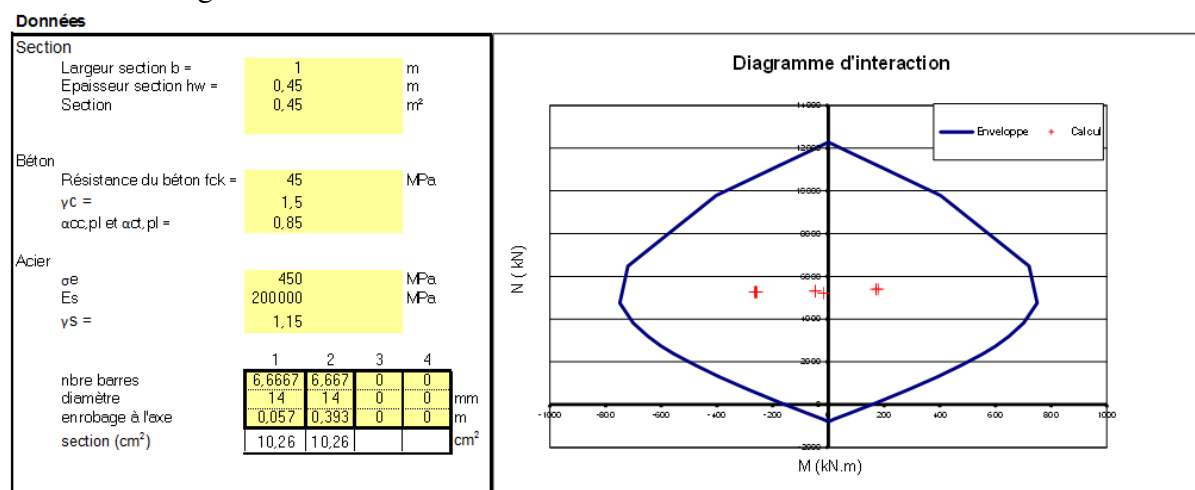


Figura 46: Verifica della sezione A in c.a. a SLU

La sezione è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=2,8.

8.1.2 Verifica a taglio

Il calcolo è effettuato a SLU con $V_{ed,max}=128,8$ kN/m, con lo sforzo normale concomitante pari a 5338,2 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 => si considera $k = 1,707$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$ con $A_{sl} = 10,26$ cm²/m et $b_w = 1,000$ m => si considera $\rho_l = 0,0026$
- $f_{ck} = 45$ MPa

- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 11,86 \text{ MPa} \geq 0.2 f_{cd}$, quindi vale 5,1 MPa
- $v_{min} = \frac{0.035}{\gamma_c} k_z^3 f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0.52$

Si ottiene dunque $V_{Rd,c} = 515,5 \text{ kN/ml} > V_{ed}$

=> nessuna armatura a taglio è richiesta.

Fattore di sicurezza=3,01

8.1.3 Verifica dei giunti

Al fine di verificare la resistenza strutturale dei giunti, che presentano uno spessore ridotto, è necessario verificare lo spessore di contatto. Infatti, se l'eccentricità dovuta al momento è troppo grande una parte della sezione sarà sottoposta a trazione e non partecipa dunque alla resistenza:

$$\text{se} \quad e > \frac{1}{6}t$$

$$\text{allora} \quad t_{contatto} = \frac{t}{2} \cdot \left(1 + \frac{t}{6e}\right)$$

Per la coppia M-N determinante otteniamo:

$$e = \frac{263.45}{5244.91} = 50.23 \text{ mm} < \frac{1}{6} 350 \text{ mm}$$

Si considera allora tutto lo spessore del giunto.

$$\sigma_{max} = \sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max} h}{I} \frac{1}{2} = 12.9 \text{ MPa} + 15.0 \text{ MPa} = 27.9 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$$

Il giunto è dunque verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=1.08.

8.1.4 Verifica a SLE

Fessurazione

Non bisogna effettuare nessuna verifica a fessurazione, in quanto i calcoli mostrano che, per la coppia (Nmin, Mmax), tutte le sezioni restano interamente compresse a SLE (stato limite di decompressione ai sensi delle NTC § 4.1.2.2.4.1):

$$\sigma_{min} = \frac{N_{min}}{A} - \frac{M_{max}}{I} y = 2.96 \text{ MPa} > 0$$

Tensioni di compressione nel calcestruzzo

Bisogna effettuare la verifica a tensione massima nel calcestruzzo riportate al § 4.1.2.2.5.1 NTC:

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max} h}{I} \frac{1}{2} = 14.97 \text{ MPa} > 0.45 f_{ck} = 20.25 \text{ MPa}$$

Deformazioni massime

Lo spostamento radiale massimo è pari a:

$$u_{max} = 4.0 \text{ mm}$$

Durante il monitoraggio occorrerà verificare che lo spostamento rimanga conforme con il valore ottenuto in questa modellazione.

8.2 Sezione B

8.2.1 Verifica a pressoflessione

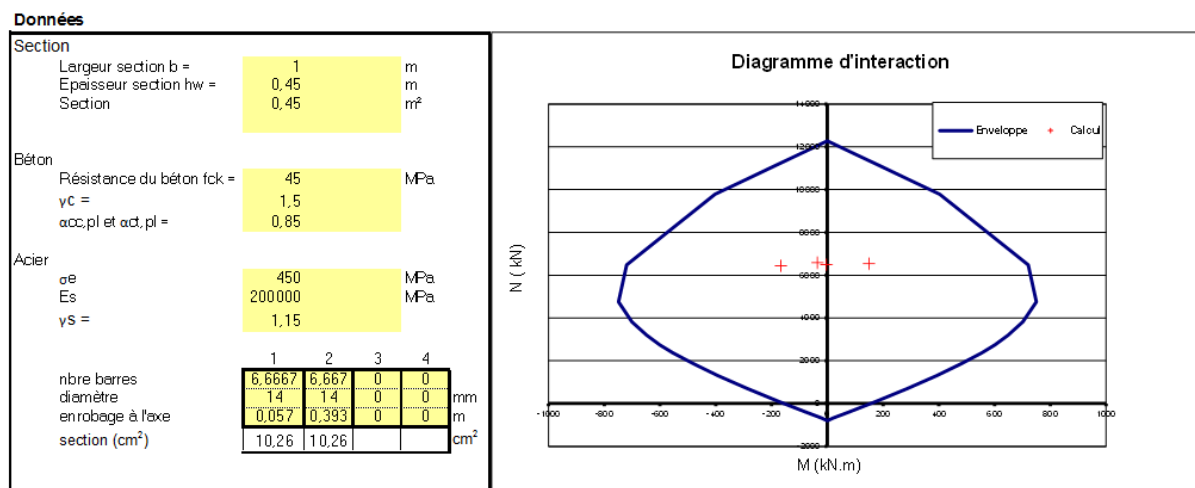


Figura 47: Verifica della sezione B in c.a. a SLU

La sezione è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=4,33.

8.2.2 Verifica a taglio

Il calcolo è effettuato a SLU con $V_{ed,max}=84,2$ kN/m, con lo sforzo normale concomitante pari a 6476 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):

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

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 $A_{sl} = 10,26$ cm²/m et $b_w = 1,000$ m \Rightarrow si considera $\rho_l = 0,0026$
- $f_{ck} = 45$ MPa
- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 14,39$ MPa $\geq 0,2 f_{cd}$, quindi vale 5,1 MPa
- $v_{min} = \frac{0,035}{\gamma_c} k^2 f_{ck}^{1/2} = 0,52$

Si ottiene dunque $V_{Rd,c} = 515,5$ kN/ml $> V_{ed}$

\Rightarrow nessuna armatura a taglio è richiesta.

Fattore di sicurezza=6,12

8.2.3 Verifica dei giunti

Per la coppia M-N determinante otteniamo:

$$e = \frac{166.73}{6428.01} = 25.94mm < \frac{1}{6} 350mm$$

Si considera allora tutto lo spessore del giunto.

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max}}{I} \frac{h}{2} = 18.37 MPa + 8.17 MPa = 26.53 MPa < 30 MPa$$

Il giunto è dunque verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=1.13.

8.2.4 Verifica a SLE

Fessurazione

Non bisogna effettuare nessuna verifica a fessurazione, in quanto i calcoli mostrano che, per la coppia (Nmin, Mmax), tutte le sezioni restano interamente compresse a SLE:

$$\sigma_{min} = \frac{N_{min}}{A} - \frac{M_{max}}{I} y = 7.19 MPa > 0$$

Tensioni di compressione nel calcestruzzo

Bisogna effettuare la verifica a tensione massima nel calcestruzzo riportate al § 4.1.2.2.5.1 NTC:

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max}}{I} \frac{h}{2} = 14.78 MPa > 0.45 f_{ck} = 20.25 MPa$$

Deformazioni massime

Lo spostamento radiale massimo è pari a:

$$u_{max} = 6.8mm$$

Durante il monitoraggio occorrerà verificare che lo spostamento rimanga conforme con il valore ottenuto in questa modellazione.

8.3 Sezione C

8.3.1 Verifica a pressoflessione

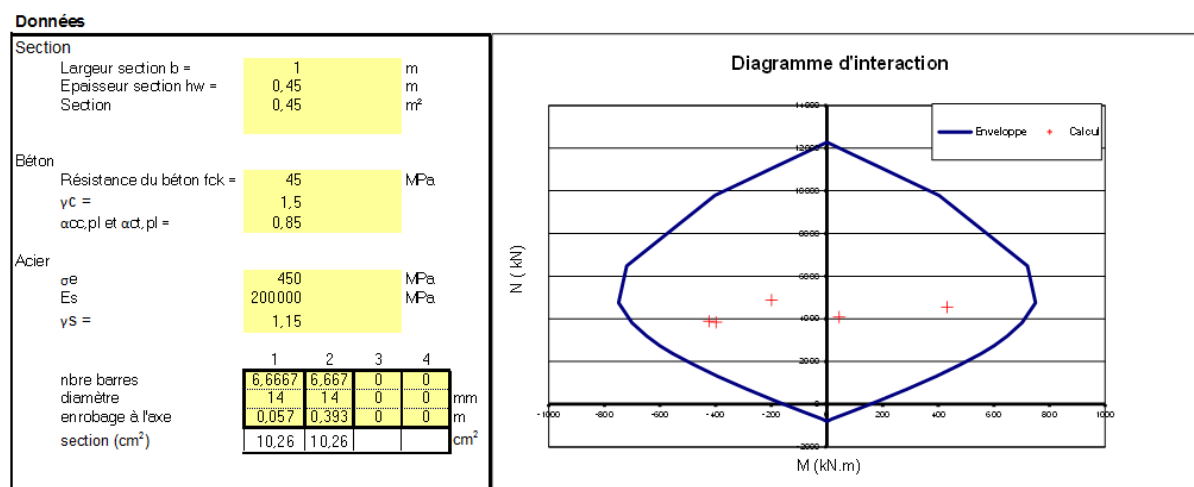


Figura 48: Verifica della sezione C in c.a. a SLU

La sezione è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=1,66.

8.3.2 Verifica a taglio

Il calcolo è effettuato a SLU con $V_{ed,max}=216,3$ kN/m, con lo sforzo normale concomitante pari a 4088,3 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):

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

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 => si considera $k = 1,707$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$ con $A_{sl} = 10,26$ cm²/m et $b_w = 1,000$ m => si considera $\rho_l = 0,0026$
- $f_{ck} = 45$ MPa
- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 9,09$ MPa $\geq 0,2 f_{cd}$, quindi vale 5,1 MPa
- $v_{min} = \frac{0,035}{\gamma_c} k^2 f_{ck}^{1/2} = 0,52$

Si ottiene dunque $V_{Rd,c} = 515,5$ kN/ml $> V_{ed}$

=> nessuna armatura a taglio è richiesta.

Fattore di sicurezza=2,38

8.3.3 Verifica giunti

Per la coppia M-N determinante otteniamo:

$$e = \frac{423.3}{3880.1} = 109.10 \text{ mm} > \frac{1}{6} 350 \text{ mm}$$

allora $t_{\text{contatto}} = 268.57 \text{ mm}$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{N_{\text{max}}}{A} + \frac{M_{\text{max}} h}{I} = 14.45 \text{ MPa} + 20.73 \text{ MPa} = 35.18 \text{ MPa} > 30 \text{ MPa}$$

Si considera allora la redistribuzione dei momenti dovuta alla diminuzione locale della rigidità causata dalla presenza del giunto, sulla base delle formule seguenti:

$$M_{\text{giunto}} = (1 - \zeta)M$$

$$M_{\text{segmento}} = (1 + \zeta)M$$

Si considera $\zeta=0.3$ sulla base di Leonhardt (1977) e delle Japanese Standard for Shield Tunnelling (1996).

Per la coppia M-N determinante otteniamo:

$$e = \frac{296.31}{3880.09} = 76.37 \text{ mm} > \frac{1}{6} 350 \text{ mm}$$

allora $t_{\text{contatto}} = 308.68$

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} = \frac{N_{\text{max}}}{A} + \frac{M_{\text{max}} h}{I} = 12.57 \text{ MPa} + 14.51 \text{ MPa} = 27.08 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$$

Il giunto è dunque verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=1.11.

Verifica della sezione in seguito alla redistribuzione del momento:

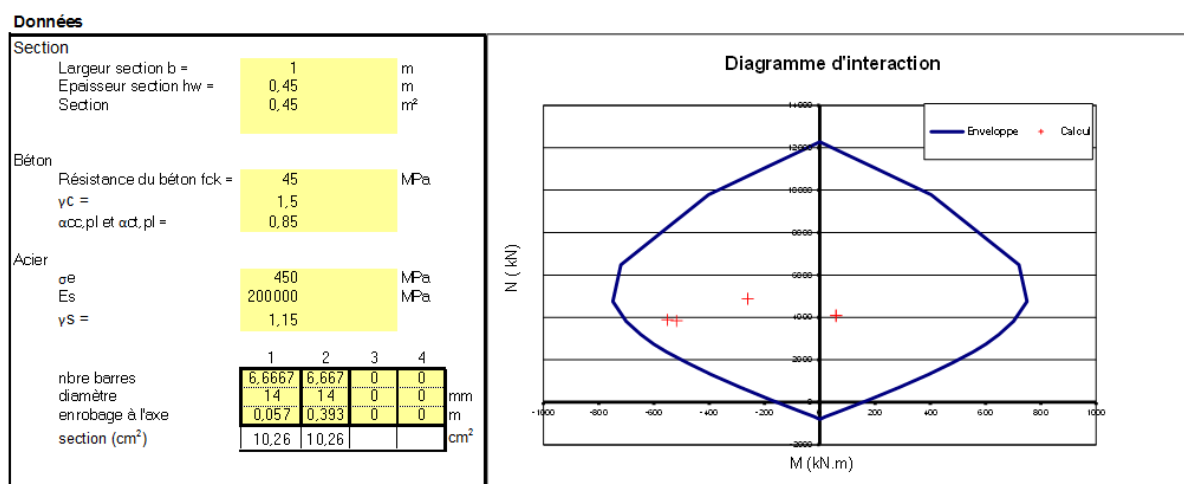


Figura 49: Verifica della sezione C in c.a. a SLU con redistribuzione del momento

8.3.4 Verifica a SLE

Fessurazione

Non bisogna effettuare nessuna verifica a fessurazione, in quanto i calcoli mostrano che, per la coppia (Nmin, Mmax), tutte le sezioni restano interamente compresse a SLE:

$$\sigma_{min} = \frac{N_{min}}{A} - \frac{M_{max}}{I} y = 0,68 \text{ MPa} > 0$$

Tensioni di compressione nel calcestruzzo

Bisogna effettuare la verifica a tensione massima nel calcestruzzo riportate al Cap. 4.1.2.2.5.1 NTC:

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max}}{I} \frac{h}{2} = 12.53 \text{ MPa} > 0.45 f_{ck} = 20.25 \text{ MPa}$$

Deformazioni massime

Lo spostamento radiale massimo è pari a:

$$u_{max} = 29.6 \text{ mm}$$

Durante il monitoraggio occorrerà verificare che lo spostamento rimanga conforme con il valore ottenuto in questa modellazione.

8.4 Sezione C sotto pressione di riempimento

8.4.1 Verifica a pressoflessione

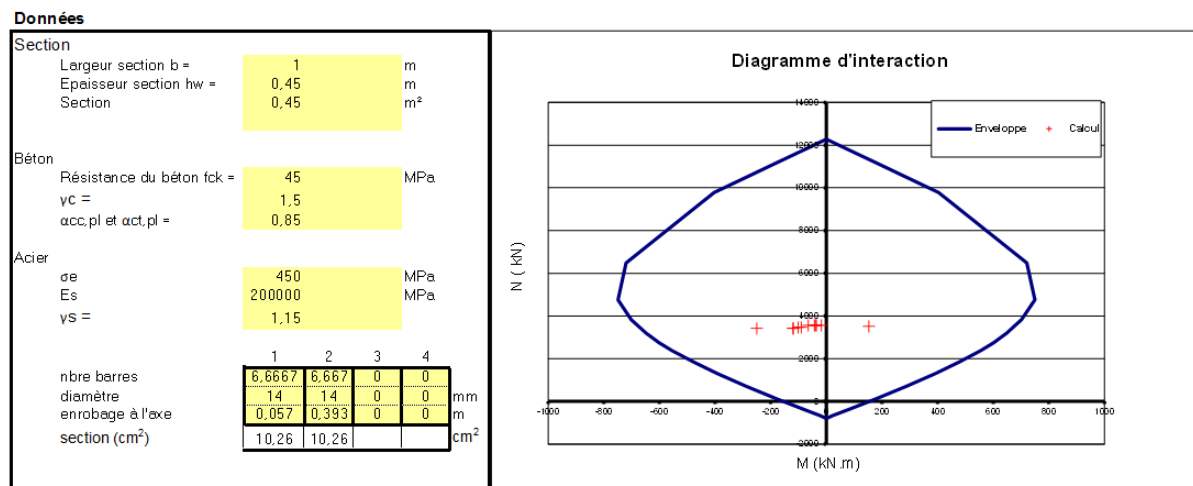


Figura 50: Verifica della sezione C in c.a. a SLU

La sezione è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=2,7.

8.4.2 Verifica a taglio

Il calcolo è effettuato a SLU con $V_{ed,max}=118.43 \text{ kN/m}$, con lo sforzo normale concomitante pari a 3438.95 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):

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

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 $d = 450$ mm \Rightarrow si considera $k = 1.707$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$ con $A_{sl} = 10.26$ cm²/m et $b_w = 1,000$ m \Rightarrow si considera $\rho_l = 0,00257$
- $f_{ck} = 40$ MPa
- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 7.6$ MPa $\geq 0.2 f_{cd}$, quindi vale 5.1 MPa
- $v_{min} = \frac{0.035}{\gamma_c} k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0.52$

Si ottiene dunque $V_{Rd,c} = 515.25$ kN/ml $> V_{ed}$

\Rightarrow nessuna armatura a taglio è richiesta.

Fattore di sicurezza=4.35

8.4.3 Verifica dei giunti

Durante la fase di costruzione, sono presenti i bulloni che attraversano i giunti al fine di garantire la stabilità dell'anello (per maggiori dettagli si veda il § 12.1).

Si tratta di due bulloni di diametro 25 mm posti al centro della sezione del giunto radiale (vedi elaborato PRV_C3A_4851_26-19-30_40-04).

Si verifica la sezione per la coppia M_{max} , N siccome in chiave di volta (ovvero al centro della calotta), dove si ha M_{min} , non è mai presente un giunto.

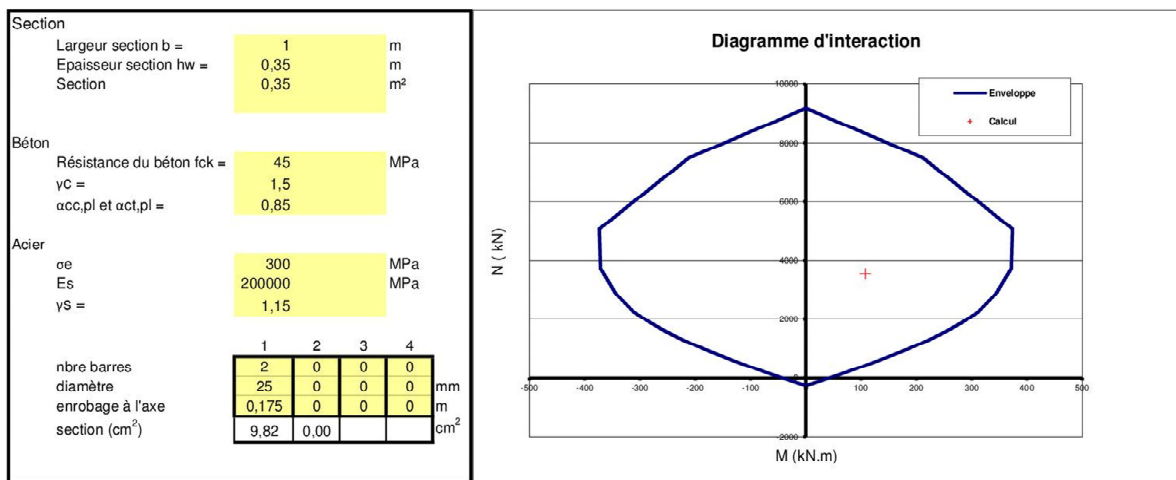


Figura 51: Verifica dei giunti della sezione C sotto pressione di pompaggio

Il giunto è verificato per gli sforzi ottenuti a SLU con un fattore di sicurezza di FS=2.4.

8.5 Sezione D

8.5.1 Verifica a pressoflessione

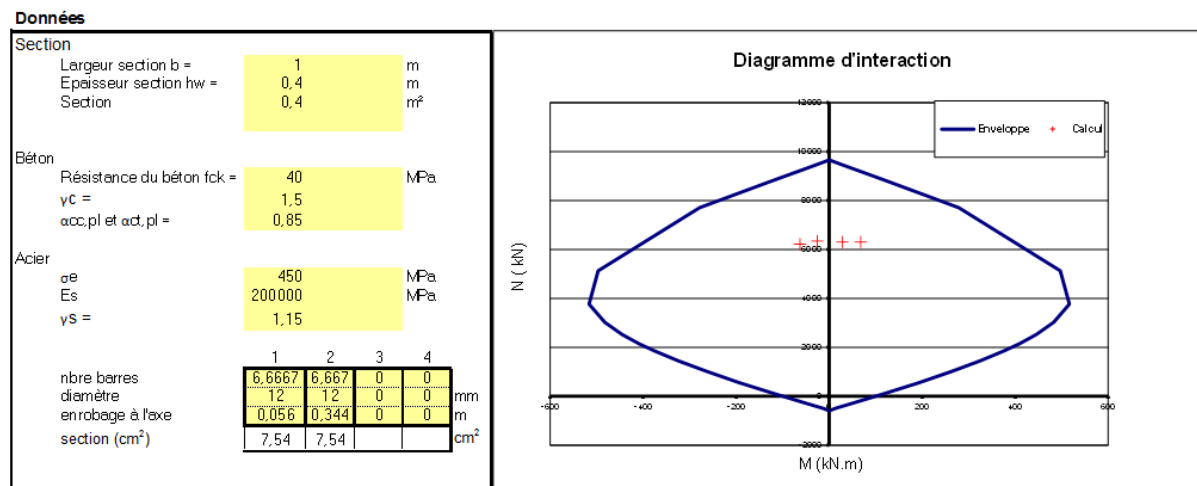


Figura 52: Verifica della sezione D in c.a. a SLU

La sezione è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=5,8.

8.5.2 Verifica a taglio

Il calcolo è effettuato a SLU con $V_{ed,max}=37,5$ kN/m, con lo sforzo normale concomitante pari a 6308,7 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):

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

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 => si considera $k = 1,7056$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$ con $A_{sl} = 7,54$ cm²/m et $b_w = 1,000$ m => si considera $\rho_l = 0,0022$
- $f_{ck} = 40$ MPa
- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 15,77$ MPa $\geq 0,2 f_{cd}$, quindi vale 4,5 MPa
- $v_{min} = \frac{0,035}{\gamma_c} k^3 f_{ck}^{1/2} = 0,52$

Si ottiene dunque $V_{Rd,c} = 418,3$ kN/ml $> V_{ed}$

=> nessuna armatura a taglio è richiesta.

Fattore di sicurezza=11,16

Conclusion: la sezione è verificata a SLU con l'armatura minima

8.5.3 Verifica dei giunti

Per la coppia M-N determinante otteniamo:

$$e = \frac{68.68}{6290.0} = 10.92mm < \frac{1}{6} 300mm = 50mm$$

Si considera allora tutto lo spessore del giunto.

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max} h}{I} \frac{1}{2} = 20.97MPa + 4.58 MPa = 21.34 MPa < 22.6 MPa$$

Il giunto è dunque verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=1.05.

8.5.4 Verifica a SLE

Fessurazione

Non bisogna effettuare nessuna verifica a fessurazione, in quanto i calcoli mostrano che, per la coppia (Nmin, Mmax), tutte le sezioni restano interamente compresse a SLE:

$$\sigma_{min} = \frac{N_{min}}{A} - \frac{M_{max}}{I} y = 9.17 MPa > 0$$

Tensioni di compressione nel calcestruzzo

Bisogna effettuare la verifica a tensione massima nel calcestruzzo riportate al Cap. 4.1.2.2.5.1 NTC:

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{A} + \frac{M_{max} h}{I} \frac{1}{2} = 12.32 MPa > 0.45f_{ck} = 20.25 MPa$$

Deformazioni massime

Lo spostamento radiale massimo è pari a:

$$u_{max} = 5.8mm$$

Durante il monitoraggio occorrerà verificare che lo spostamento rimanga conforme con il valore ottenuto in questa modellazione.

8.6 Sezione D sotto pressione di pompaggio

8.6.1 Verifica a pressoflessione



Calcul de la courbe d'interaction du béton armé

selon l'Eurocode 2

BG Lyon - 2009

Données

Section					
Largueur section b =	1	m			
Epaisseur section hw =	0,4	m			
Section	0,4	m ²			
Béton					
Résistance du béton f _{ck} =	40	MPa			
γ _c =	1,5				
acc.pl et α _{ct} .pl =	0,85				
Acier					
σ _e	450	MPa			
E _s	200000	MPa			
γ _s =	1,15				
nbre barres		1	2	3	4
diamètre	6,6667	6,667	0	0	mm
enrobage à l'axe	12	12	0	0	mm
section (cm ²)	0,041	0,359	0	0	cm ²
	7,54	7,54			

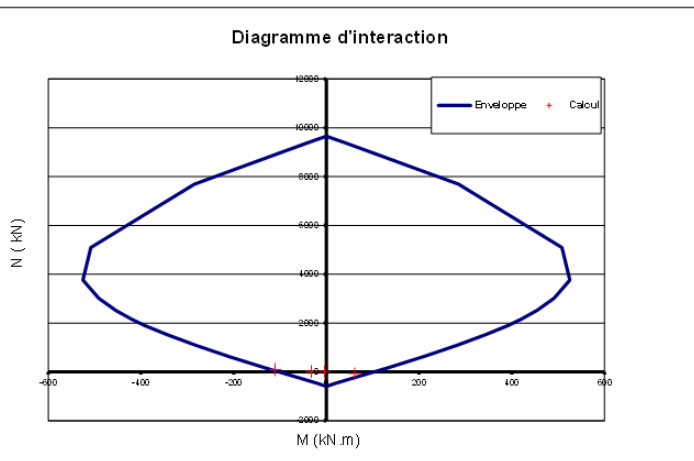


Figura 53: Verifica della sezione D sotto pressione di pompaggio in c.a. a SLU

La sezione è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=1.18.

In modo conservativo, le stesse armatura saranno considerate anche per la TM45.

8.6.2 Verifica a taglio

Il calcolo è effettuato a SLU con $V_{ed,max}=81.48$ kN/m, con lo sforzo normale concomitante pari a 227.07 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):

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

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 $k = 1.7056$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$ con $A_{sl} = 7,54$ cm²/m et $b_w = 1,000$ m \Rightarrow si considera $\rho_l = 0,0022$
- $f_{ck} = 40$ MPa
- $k_1 = 0,15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} = 0,57$ MPa $\geq 0,2 f_{cd}$, quindi vale 4,5 MPa
- $v_{min} = \frac{0,035}{\gamma_c} k^2 f_{ck}^{1/2} = 0,52$

Si ottiene dunque $V_{Rd,c} = 210.1 \text{ kN/ml} > V_{ed}$

=> nessuna armatura a taglio è richiesta.

Fattore di sicurezza=2.58

8.6.3 Verifica dei giunti

Durante la fase di costruzione, sono presenti i bulloni che attraversano i giunti al fine di garantire la stabilità dell'anello (per maggiori dettagli si veda il § 12.1).

Si tratta di due bulloni di diametro 25 mm posti al centro della sezione del giunto radiale (vedi elaborato PRV_C3A_4851_26-19-30_40-04).

Si verifica la sezione per la coppia M_{max} , N siccome in chiave di volta (ovvero al centro della calotta), dove si ha M_{min} , non è mai presente un giunto.

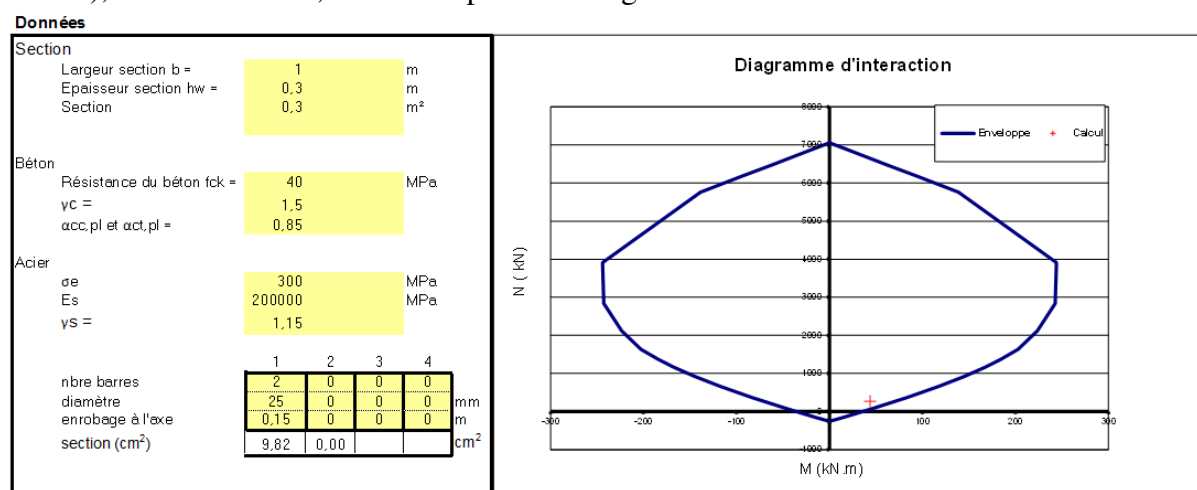


Figura 54: Verifica dei giunti della sezione D sotto pressione di pompaggio

Il giunto è verificato per gli sforzi ottenuti a SLU con un fattore di sicurezza di FS=1.13.

9. Diffusione della pressione localizzata in prossimità dei giunti

9.1 Sezione A

Gli sforzi applicati sono quelli calcolati a SLU.

Si considera, sotto il carico (PP+ammasso) $N_{max}=5391.35 \text{ kN/m}$.

Dunque $F_d=5391.35 \times 1.80 \text{ m}=9704.43 \text{ kN}$.

L'equilibrio del concio esige di disporre un'armatura equivalente alla somma di un'armatura trasversale bidirezionale (frettaggio di superficie) capace di riprendere lo sforzo di trazione e di un'armatura di cucitura (armatura di fessurazione). Inoltre, non è necessario fare un calcolo di equilibrio generale di diffusione pura.

Frettaggio di superficie

Nel modello bielle-tiranti è possibile calcolare la forza di trazione generata dalla diffusione della forza di compressione secondo l'EC 2, § 6.5.3:

a) pour le cas de régions de discontinuité partielle ($b \leq \frac{H}{2}$), voir Figure 6.25 a) :

$$T = \frac{1}{4} \frac{b-a}{b} F \quad \dots (6.58)$$

b) pour le cas de régions de discontinuité totale ($b > \frac{H}{2}$), voir Figure 6.25 b) :

$$T = \frac{1}{4} \left(1 - 0,7 \frac{a}{h}\right) F \quad \dots (6.59)$$

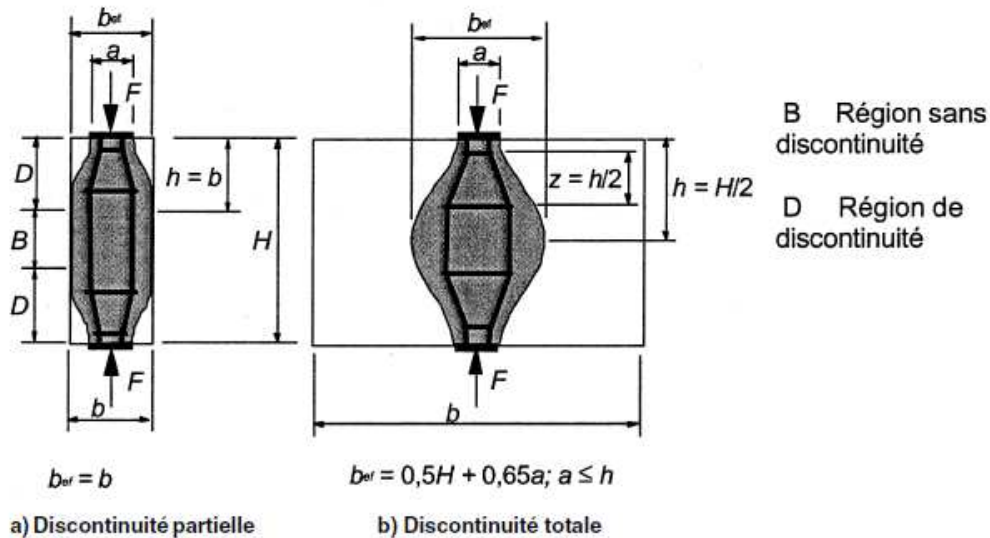


Figure 6.25 : Efforts transversaux de traction dans un champ de contraintes de compression avec armatures réparties

Direzione verticale:

$$T = \frac{1}{4} \frac{0,45 - 0,35}{0,45} F_d = 0,056 F_d$$

Direzione verticale:

$$T = \frac{1}{4} \frac{1,8 - 1,643}{1,8} F_d = 0,022 F_d$$

Media:

$$T = 0,04 F_d$$

$$A_s \geq \frac{0,04 F_d}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 9,704}{391} = 993 \text{ mm}^2 \text{ in entrambe le direzioni.}$$

Diffusione nel piano orizzontale D:

Per determinare le armature di diffusione si considera la formula presente nella guida metodologica del SETRA "Diffusion des efforts concentrés".

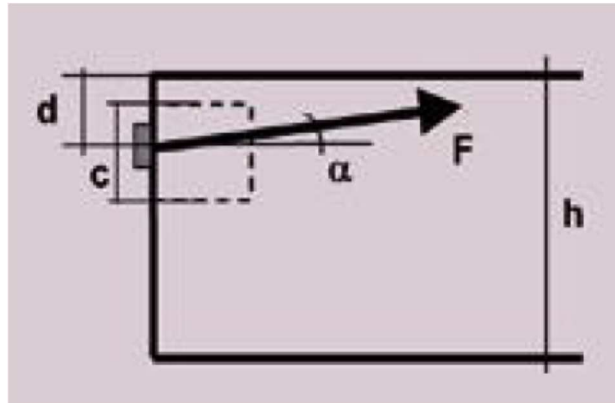
Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c}\right)}} = 1,21, \text{ ovvero } A_e = 4500 \text{ mm}^2$$

Per il significato di d, c e h si veda la seguente figura.

In questi casi, si ha $\alpha=0$. Se il carico è centrato (piano orizzontale D), d è uguale a h/2.

Sul piano verticale D', si considera invece l'eccentricità dello sforzo normale e la riduzione della superficie di contatto quando presente.



Diffusione nel piano verticale D'

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \quad \text{con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c} \right)}} = 1,09, \text{ ovvero } A_e = 4054 \text{ mm}^2$$

Sul piano orizzontale D, si dispongono quindi $A_e = 4500 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1,2 \times 1,643 = 1,87 \text{ m}$.

Sul piano verticale D', si dispongono quindi $A_e = 4054 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1,2 \times 0,35 = 0,42 \text{ m}$.

9.2 Sezione B

Gli sforzi applicati sono quelli calcolati a SLU.

Si considera, sotto il carico (PP+ammasso) $N_{\max} = 6589,33 \text{ kN/m}$.

Dunque $F_d = 6589,33 \times 1,80 \text{ m} = 11860,79 \text{ kN}$.

Frettaggio di superficie

Direzione verticale:

$$T = \frac{1 \cdot 0,45 - 0,35}{4 \cdot 0,45} F_d = 0,056 F_d$$

Direzione orizzontale:

$$T = \frac{1 \cdot 1,8 - 1,643}{4 \cdot 1,8} F_d = 0,022 F_d$$

Media:

$$T = 0,04 F_d$$

$$A_s \geq \frac{0,04 F_d}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 11,86}{391} = 1213 \text{ mm}^2 \text{ in entrambe le direzioni.}$$

Diffusione nel piano orizzontale D:

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c} \right)}} = 1.21, \text{ ovvero } A_e = 5500 \text{ mm}^2$$

Si dispongono quindi $A_e = 5500 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 1.643 = 1.87$ m.

Diffusione nel piano verticale D'

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c} \right)}} = 1.02, \text{ ovvero } A_e = 4637 \text{ mm}^2.$$

Si dispongono quindi $A_e = 4637 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 0.35 = 0.42$ m.

9.3 Sezione C

Gli sforzi applicati sono quelli calcolati a SLU in fase definitiva (lo sforzo normale è minore durante la fase di riempimento).

Gli sforzi applicati sono quelli calcolati a SLU.

Si considera, sotto il carico (PP+ammasso) $N_{\max} = 4893.27 \text{ kN/m}$.

Dunque $F_d = 5391.35 \times 1.80 \text{ m} = 8807.60 \text{ kN}$.

Frettaggio di superficie

Direzione verticale:

$$T = \frac{1}{4} \frac{0.45 - 0.3}{0.45} F_d = 0.083 F_d$$

Direzione verticale:

$$T = \frac{1}{4} \frac{1.8 - 1.643}{1.8} F_d = 0.022 F_d$$

Media:

$$T = 0.052 F_d$$

$$A_s \geq \frac{0.052 F_d}{f_{yd}} = \frac{0.052 \cdot 9.704}{391} = 1290 \text{ mm}^2 \text{ in entrambe le direzioni.}$$

Diffusione nel piano orizzontale D:

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}}, \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c} \right)}} = 1.21 \text{ ovvero } A_e = 4084 \text{ mm}^2$$

Si dispongono quindi $A_e = 4084 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 1.643 = 1.87$ m.

Diffusione nel piano verticale D'

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c} \right)}} = 1.16, \text{ ovvero } A_e = 3916 \text{ mm}^2$$

Si dispongono quindi $A_e = 3916 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 0.35 = 0.42$ m.

9.4 Sezione D

Gli sforzi applicati sono quelli calcolati a SLU in fase definitiva (lo sforzo normale è minore durante la fase di pompaggio).

Si considera, sotto il carico (PP+ammasso) $N_{\max} = 6343.27 \text{ kN/m}$.

Dunque $F_d = 5391.35 \times 1.80 \text{ m} = 11423.29 \text{ kN}$.

Frettaggio di superficie

Direzione verticale:

$$T = \frac{1 \cdot 0.45 - 0.35}{4 \cdot 0.45} F_d = 0.056 F_d$$

Direzione orizzontale:

$$T = \frac{1 \cdot 1.8 - 1.643}{4 \cdot 1.8} F_d = 0.022 F_d$$

Media:

$$T = 0.04 F_d$$

$$A_s \geq \frac{0.04 F_d}{f_{yd}} = \frac{0.04 \cdot 11.4}{391} = 1168 \text{ mm}^2 \text{ in entrambe le direzioni.}$$

Diffusione nel piano orizzontale D:

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c} \right)}} = 0.988, \text{ ovvero } A_e = 4326 \text{ mm}^2$$

Si dispongono quindi $A_e = 4326 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 1.643 = 1.87$ m.

Diffusione nel piano verticale D'

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{d \left(\frac{3}{h} + \frac{1}{c} \right)}} = 0.988, \text{ ovvero } A_e = 4326 \text{ mm}^2$$

Si dispongono quindi $A_s = 10.3 \text{ cm}^2$ orizzontali ad immediata prossimità del giunto radiale del concio e $A_e = 4326 \text{ mm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 0.35 = 0.42$ m.

9.5 Conclusione

Per le armature a diffusione, per i giunti della sezione TM45, la sezione B si è rivelata determinante, si dispongono dunque 5500 mm^2 nel piano orizzontale e 4637 mm^2 nel piano verticale della zona del giunto.

Per le armature a diffusione, per i giunti delle sezioni TM40, si dispongono 4326 mm^2 sia nel piano orizzontale che nel piano verticale della zona del giunto.

Per le armature di frettaggio, per i giunti della sezione TM45, la sezione C si è rivelata determinante, si dispongono dunque 1290 mm^2 in entrambi le direzioni.

Per le armature di frettaggio, per i giunti delle sezioni TM40, si dispongono 1168 mm^2 in entrambi le direzioni.

Le armature di frettaggio e di diffusione si disporranno, per uniformità nella sezione TM45, come per la sezione B.

10. Verifica delle strutture in direzione longitudinale

10.1 TM45

10.1.1 Anello

La tensione media di compressione a SLU su una sezione trasversale $S_t = \pi(R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2) = 12.93 \text{ m}^2$ è $\sigma = 1.5 \times 120 / S_t = 13.92 \text{ MPa}$.

La resistenza a compressione del cls a SLU è pari a 25.5 MPa .

10.1.2 Giunto tra conci

La forza massima applicata su una piastra a SLU è $F_d = 12 \text{ MN}$ ripartita sulla piastra. La piastra si appoggia su una lunghezza di 1400 mm e sulla larghezza del giunto longitudinale (350 mm). Il calcolo è effettuato sul concio di chiave (caso generale).

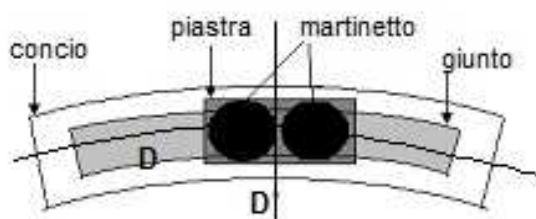


Figura 55: Applicazione della spinta sul giunto longitudinale – piani D e D' di armatura

Verifica pressione uniforme:

Determinazione dello sollecitazione limite di compressione:

$$F_{rd} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0}, \text{ con:}$$

- $A_{c0} = 0,350 \times 1.400 = 0,490 \text{ m}^2$
- $f_{cd} = 25.5 \text{ MPa}$
- $A_{c1} = 0,450 \times 1.916 = 0,8622 \text{ m}^2$

Si verifica che $F_d = 12000 \text{ kN} < F_{rd} = 16572 \text{ kN} (< 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} = 37485 \text{ kN})$

La tensione di compressione uniforme sulla sezione dei giunti vale:

$$\sigma = \frac{12}{0,350 \cdot 1,4} = 24.4 \text{ MPa}$$

La resistenza a compressione del cls a SLU è pari a 25.5 MPa .

Si è nel caso in cui lo sforzo concentrato derivante dalla sezione ridotta di cls è centrato in ogni piano orizzontale D e verticale D'. L'equilibrio del concio esige dunque di disporre un'armatura

equivalente alla somma di un'armatura trasversale bidirezionale (frettaggio di superficie) capace di riprendere lo sforzo di $0.04F_d$ e di un'armatura di cucitura (armatura di fessurazione). Inoltre, non bisogna fare un calcolo di equilibrio generale di diffusione pura.

Frettaggio di superficie

$$A_s \geq \frac{0.04F_d}{f_{yd}} = \frac{0.04 \cdot 12}{391} = 12.27 \text{ cm}^2 \text{ in entrambe le direzioni.}$$

Diffusione nel piano orizzontale D:

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{b_1/2 \cdot \left(\frac{3}{b_1} + \frac{1}{b_2}\right)}} = 0.956, \text{ ovvero } A_e = 44 \text{ cm}^2 \text{ (armature circolari)}$$

Si dispongono quindi $A_s = 12.27 \text{ cm}^2$ sotto forma di armature circolari ad immediata prossimità della piastra e $A_e = 44 \text{ cm}^2$ sotto forma di armature circolari ripartite su una lunghezza pari a $1.2 \times 1.400 = 1.68 \text{ m}$;

L'insieme delle armature $A_s + A_e$ devono essere ancorate al di là delle sezioni ristrette del giunto.

Diffusione nel piano verticale D'

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{a_1/2 \cdot \left(\frac{3}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right)}} = 0.966, \text{ ovvero } A_e = 44.4 \text{ cm}^2$$

Si dispongono quindi $A_s = 12.27 \text{ cm}^2$ sotto forma di armature circolari ad immediata prossimità della piastra e $A_e = 44.4 \text{ cm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 0.35 = 0.42 \text{ m}$;

L'insieme delle armature $A_s + A_e$ devono essere ancorate al di là delle sezioni ristrette del giunto.

10.2 TM40

10.2.1 Anello

La tensione media di compressione a SLU su una sezione trasversale $S_t = \pi(R_{ext}^2 - R_{int}^2) = 11.56 \text{ m}^2$ è $\sigma = 1.5 \times 50 / S_t = 6.48 \text{ MPa}$.

La resistenza di calcolo a compressione del cls è pari a 22.6 MPa .

10.2.2 Giunto tra conci

La forza massima applicata su una piastra a SLU è $F_d = 5 \text{ MN}$ ripartita sulla piastra. La piastra si appoggia su una lunghezza di 1400 mm e sulla larghezza del giunto longitudinale (300 mm). Il calcolo è effettuato sul concio di chiave (caso generale).

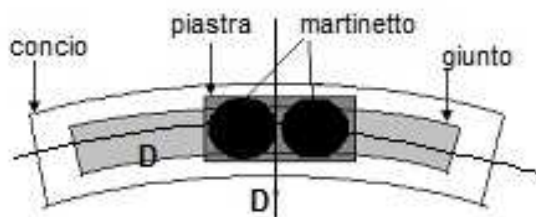


Figura 56: Applicazione della spinta sul giunto longitudinale – piani D e D' di armatura

Verifica pressione uniforme:

Determinazione dello sollecitazione limite di compressione:

$$F_{rd,u} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0}, \text{ con:}$$

- $A_{c0} = 0,300 \times 1.400 = 0,420 \text{ m}^2$
- $f_{cd} = 22.6 \text{ MPa}$
- $A_{c1} = 0,400 \times 1.926 = 0,77 \text{ m}^2$

Si verifica che $F_d = 5000 \text{ kN} < F_{rd,u} = 12852 \text{ kN} (< 3,0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} = 37485 \text{ kN})$

La tensione di compressione uniforme sulla sezione dei giunti vale:

$$\sigma = \frac{5}{0.300 \cdot 1.4} = 11.9 \text{ MPa}$$

Frettaggio di superficie

$$A_s \geq \frac{0.04 F_d}{f_{yd}} = \frac{0.04 \cdot 5}{391} = 5.1 \text{ cm}^2 \text{ in entrambe le direzioni.}$$

Diffusione nel piano orizzontale D:

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{b_1/2 \cdot \left(\frac{3}{b_1} + \frac{1}{b_2}\right)}} = 0.956, \text{ ovvero } A_e = 18.33 \text{ cm}^2 \text{ (armature circolari)}$$

Si dispongono quindi $A_s = 5.1 \text{ cm}^2$ sotto forma di armature circolari ad immediata prossimità della piastra e $A_e = 18.33 \text{ cm}^2$ sotto forma di armature circolari ripartite su una lunghezza pari a $1.2 \times 1.400 = 1.68 \text{ m}$.

L'insieme delle armature $A_s + A_e$ devono essere ancorate al di là delle sezioni ristrette del giunto.

Diffusione nel piano verticale D'

Armature di cucitura di prima zona:

$$A_e = 0,15 \cdot \xi \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \text{ con } \xi = \sqrt{\frac{2}{a_1/2 \cdot \left(\frac{3}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right)}} = 0.961, \text{ ovvero } A_e = 18.4 \text{ cm}^2$$

Si dispongono quindi $A_s = 5.1 \text{ cm}^2$ sotto forma di armature circolari ad immediata prossimità della piastra e $A_e = 18.4 \text{ cm}^2$ orizzontali ripartiti su una lunghezza pari a $1.2 \times 0.30 = 0.36 \text{ m}$;

L'insieme delle armature A_s+A_e devono essere ancorate al di là delle sezioni ristrette del giunto.

11. Verifiche al fuoco

11.1 Verifiche dei conci

Come definito nella relazione PRV_C3A_0435_26-19-00, le strutture in galleria 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.

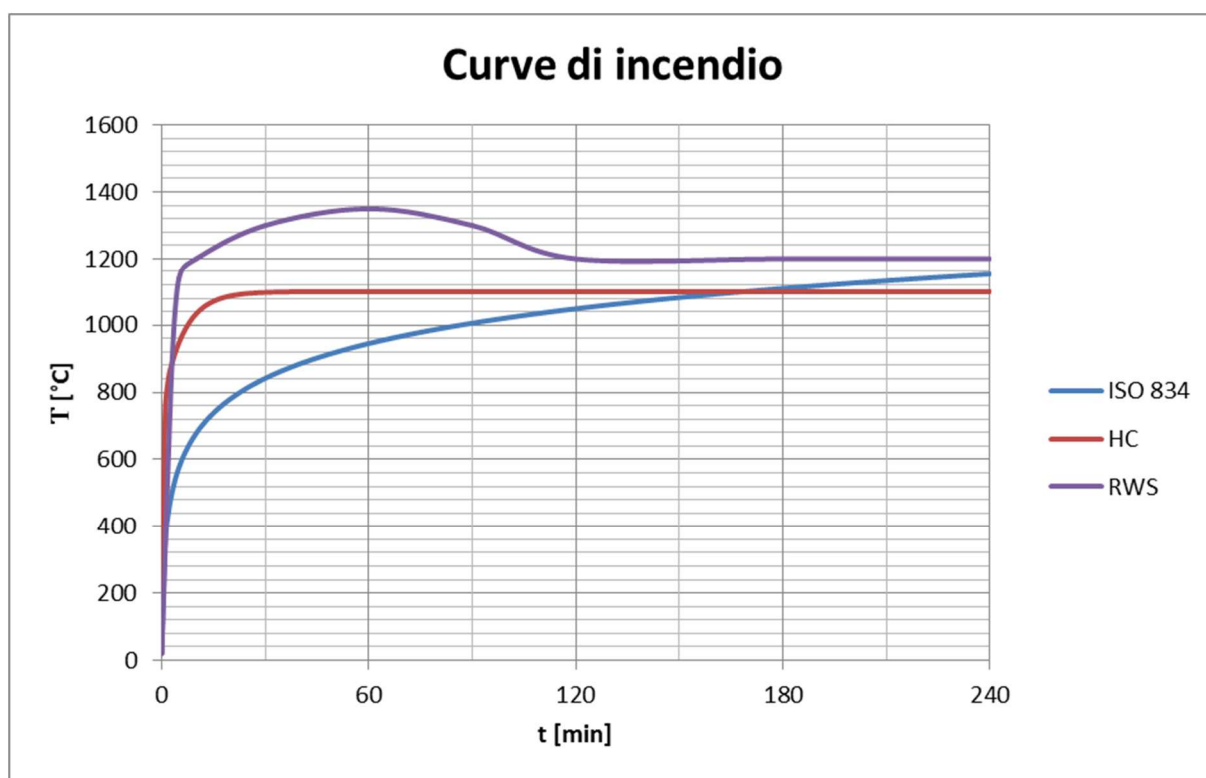


Figura 57: Curve temperatura tempo di incendio

Le verifiche sono state svolte per la sezione C e per la sezione D, ovvero per le sezioni più gravose rispettivamente per la TM45 e per la TM40. Siccome per la sezione C è necessario l'utilizzo di uno strato di Promatect-T, viene inoltre effettuata la verifica della sezione A, valida anche per la sezione B in quanto più gravosa.

I calcoli sono stati realizzati con il modello continuo, in quanto più conservativo.

11.1.1 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". Si è adottata tale metodologia dato il carattere transfrontaliero dell'opera, in modo da avere lo stesso approccio sia per lato Francia che per lato Italia.

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 l'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 le 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. Si veda a questo proposito la tabella a pag. 13 di tale raccomandazione del CETU. L'utilizzo di modelli non lineari porta a risultati meno conservativi. Tra l'altro, si richiama il fatto, come raccomandato dal CETU, che analisi più avanzate, di tipo lineare, devono essere scelte in funzione di analisi di tipo economico e quindi non sono giustificate in questo caso alla luce delle incertezze di tipo geomeccanico.

L'approccio adottato è usato correntemente in Francia per studi di Avant-Projet e di Projet.

Per il calcolo termico e delle proprietà meccaniche della sezione riscaldata si sono utilizzati dei fogli di calcolo elaborati internamente da BG sulla base dei paragrafi delle raccomandazioni del CETU citati. La metodologia adottata, le equazioni alla base di questi fogli ed il dettaglio di tali calcoli sono mostrati nell' **allegato 1**. Tali fogli sono stato validati 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.

11.1.2 Spalling superficiale

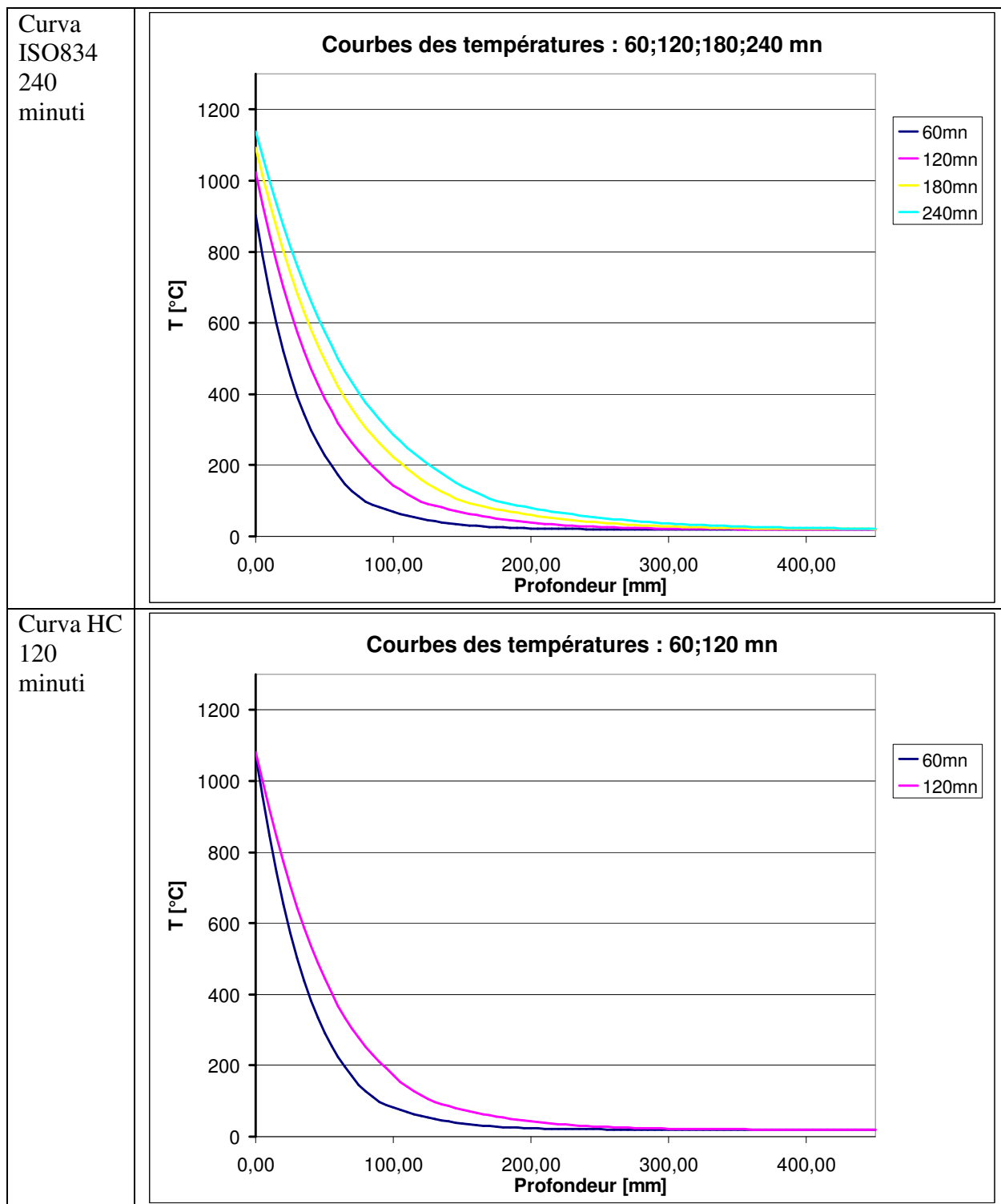
Per tenere conto della possibilità di spalling del calcestruzzo, considerando cioè la possibilità di distacco di porzioni di calcestruzzo con conseguente riduzione della sezione resistente, esposizione dell'armatura al fuoco e maggiore penetrazione del calore all'interno del calcestruzzo, il dominio di resistenza M – N 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 ricorre all'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/m³. Tale valore rappresenta il dosaggio minimo di fibre raccomandato da EC2 per limitare il fenomeno dello spalling.

11.1.3 Sezione C

- Calcolo termico

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



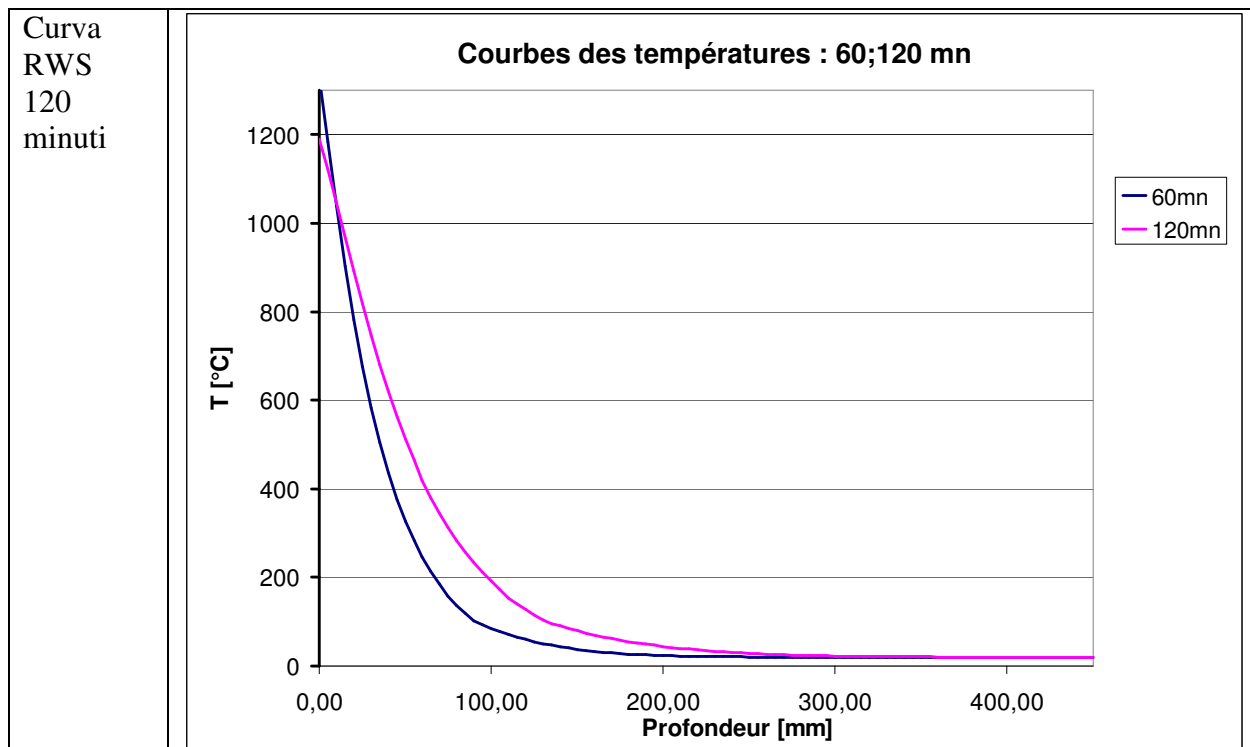


Figura 58: Andamento delle temperature nella sezione per le 4 curve di incendio considerate

- 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
E_0 [MPa]	36321	23873	27315	26910
I_0 [$\cdot 10^{-3} \text{ m}^4$]	7,59	6,63	6,33	6,29

Tabella 16: Caratteristiche della sezione riscaldata

- Sollecitazioni indirette legate all'incendio

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
ε_{th} [$\cdot 10^{-5}$]	0	53	36	35
γ_{th} [$\cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$]	0	276	306	293
$T_{inf} - T_0$ [°C]	0	115	105	101
$T_{sup} - T_0$ [°C]	0	-9	-33	-31

Tabella 17: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del cls

Nel modello di calcolo con SCIA si considerano come sezioni esposte al fuoco solo quelle in calotta e piedritto, in quanto in arco rovescio si considera la presenza della platea che, con il suo spessore considerevole (superiore ad 1 m), limita notevolmente la propagazione del fuoco. Si riutilizza il modello SCIA già precedentemente descritto.

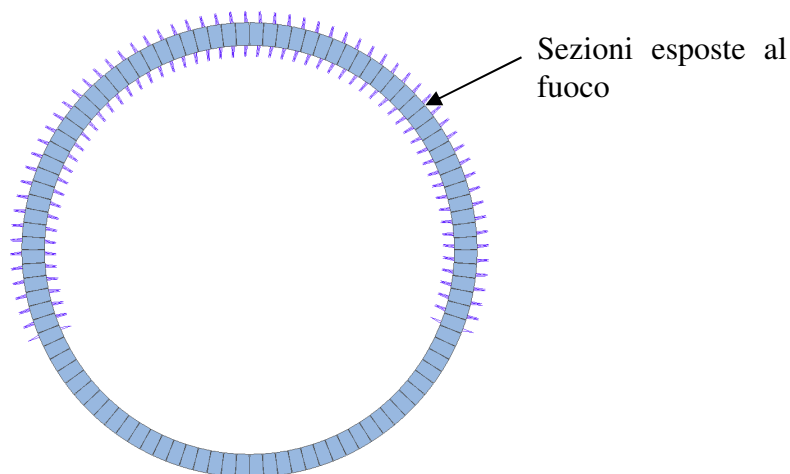


Figura 59: Modello di carico

Nella tabella seguente si riportano le coppie dimensionanti come fornite dal codice SCIA:

- 1) Nmax, Mmax.
- 2) Nmin, Mmin

Sforzi termici	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	895	526	649	664	1396	624
2	774	-30	498	-32	1255	-29

Tabella 18: Sforzi termici calcolati con SCIA

- Verifica delle sezioni riscaldate

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
k_{θ,cls}	1	0,880	0,912	0,897
Intradosso k_{θ,acciaio}	1	0,386	0,656	0,568
Estradosso k_{θ,acciaio}	1	1	1	1

Tabella 19: Coefficienti di riduzione della resistenza

Per quanto riguarda le resistenze, si considerano i coefficienti di riduzione della curva di incendio ISO834 4h in quanto sono i più conservativi. Grazie alla presenza di fibre di polipropilene non vi è spalling e la totalità dello spessore della sezione può essere considerata.

$$f_{ck} = k_{\theta,cls} \cdot f_{ck} = 39.6 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,intradosso} = k_{\theta,acciaio} \cdot f_{sy} = 173.7 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,estradosso} = k_{\theta,acciaio} \cdot f_{sy} = 450 \text{ MPa}$$

Siccome nel foglio di calcolo non è possibile inserire due resistenze diverse per le armature in estradosso e in intradosso, il coefficiente di riduzione è stato applicato sul numero di barre.

Per la verifica, agli sforzi statici sono stati introdotti nel modello ed opportunamente ridotti di un coefficiente 0.77.

Nella tabella seguente si riportano le 4 coppie dimensionanti per la situazione di incendio:

- 1) Nmax, M
- 2) Nmin, M
- 3) N, Mmin
- 4) N, Mmax.

Sforzi totali	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	2913	-22	2860	-27	2904	-9
2	2433	471	2405	579	2443	577
3	2846	-38	2793	-43	2815	-33
4	2595	552	2604	718	2570	638

Tabella 20: Sforzi dimensionanti

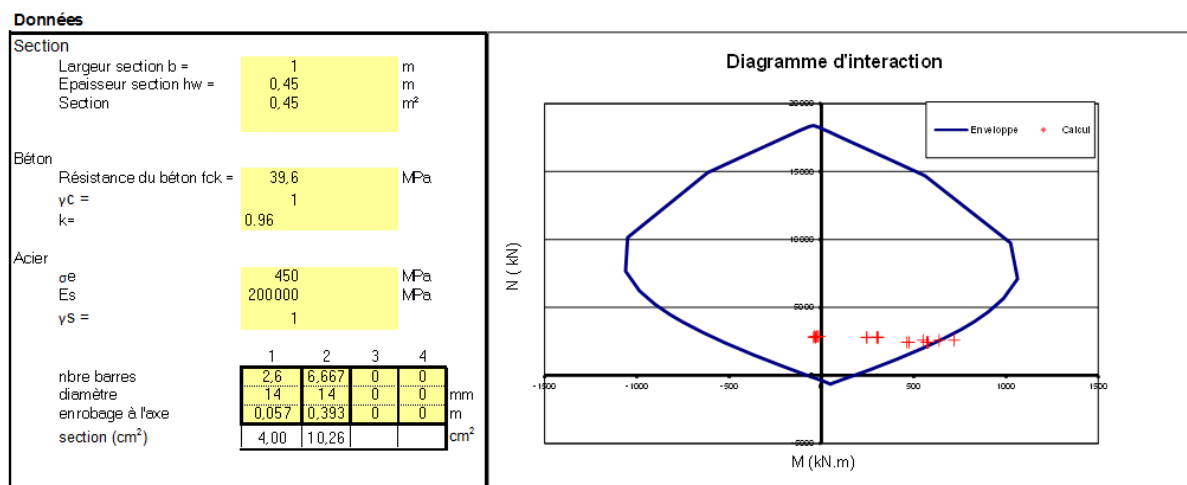


Figura 60: Diagramma di interazione della sezione C

La sezione non resiste alla situazione di incendio con l'utilizzo di sole fibre di polipropilene. Si impone l'utilizzo di uno strato di 35mm di Promatect-T al fine di ridurre la temperatura alla quale la sezione è sottoposta.

Calcolo in presenza di protezione termica

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.

	C_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	α_c ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	ϵ_m (-)	ϵ_f (-)	Φ (-)
Cls	$f(\theta^\circ C)$ (secondo EC 2)	2 300 (secondo EC2)	$f(\theta^\circ C)$ (secondo EC 2)	HC: 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 21: Proprietà termiche del cls e dell'isolante (prestazioni)

- Calcolo termico

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

Rapport de calcul du revêtement en voussoirs préfabriqués / Relazione di calcolo del rivestimento in conci prefabbricati



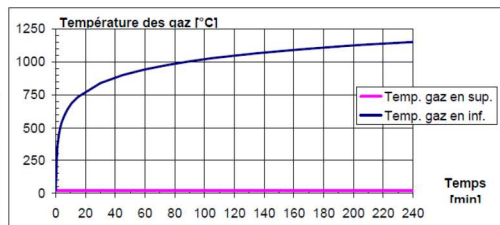
Calculs thermiques avec exposition feu CN
 Fiche de calcul
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

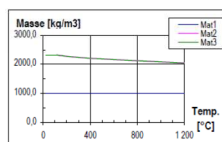
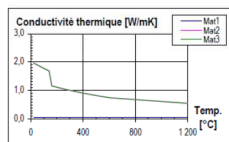
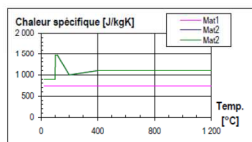
CN

		Face		
		INF	SUP	
- Température initiale :	θ_{0i}	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	θ_{max}	1 153	20	[°C]
- Coefficient de convection :	α_c	25	4	[W/m²K]
- Rayonnement :				
- Facteur de forme	Φ	1,0	1,0	[-]
- Emissivité du feu	ϵ_f	1,0	1,0	[-]
- Emissivité surface de l'élément	ϵ_m	0,7	0,7	[-]



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
- Epaisseur	e	35	450	0	[mm]
- Matériau		Promatect T	Béton u=1.5%	Béton u=1.5%	
- Masse volumique	ρ (20°C)	990	2 300	2 300	[kg/m³]
- Chaleur spécifique	c_p (20°C)	742,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
- Conductivité therm.	λ_c (20°C)	0,06	-	-	[W/mK]
- Code matériau		10	5	5	



Données calcul

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

Resultats

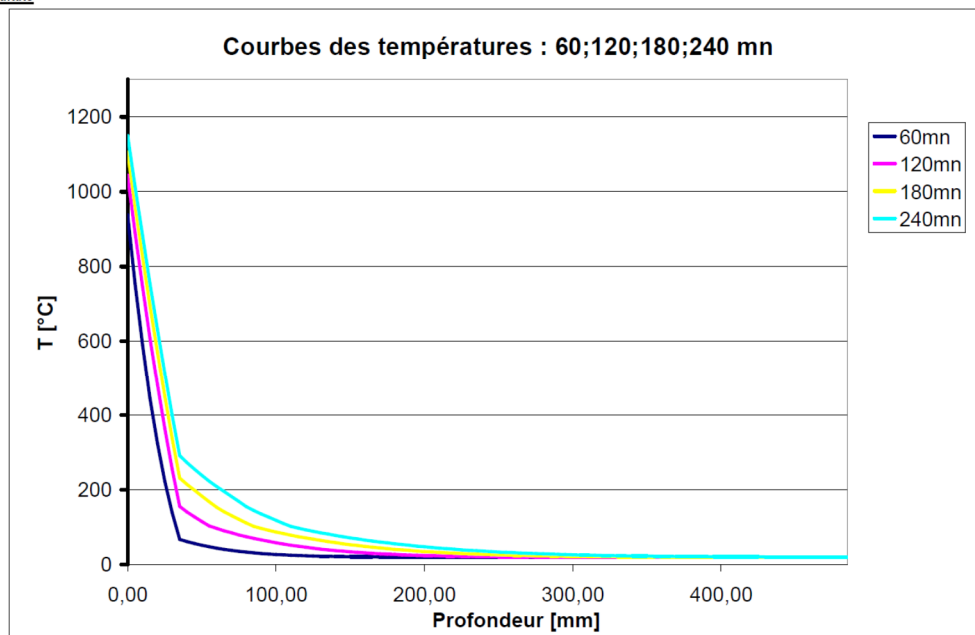


Figura 61: Calcolo dell'andamento della temperatura nella sezione per la curva ISO834 4h

Rapport de calcul du revêtement en voussoirs préfabriqués / Relazione di calcolo del rivestimento in conci prefabbricati



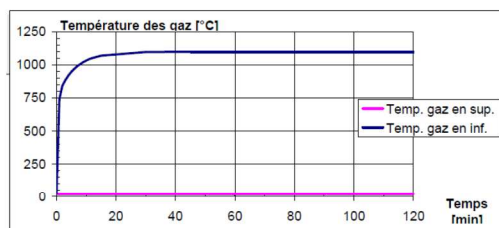
Calculs thermiques avec exposition feu HC
 Fiche de calcul
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

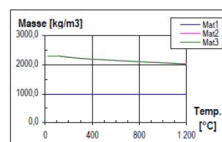
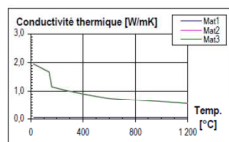
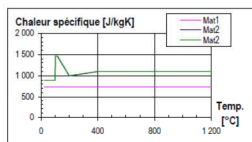
HC

		Face		
		INF	SUP	
- Température initiale :	θ_0	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	θ_{max}	1 100	20	[°C]
- Coefficient de convection :	α_c	50	4	[W/m²K]
- Rayonnement :				
- Facteur de forme	Φ	1,0	1,0	[-]
- Emissivité du feu	ϵ_f	1,0	1,0	[-]
- Emissivité surface de l'élément	ϵ_m	0,7	0,7	[-]



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
- Epaisseur	e	35	450	0	[mm]
- Matériau		Promatect T	Béton u=1.5%	Béton u=1.5%	
- Masse volumique	ρ (20°C)	990	2 300	2 300	[kg/m³]
- Chaleur spécifique	c_p (20°C)	742,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
- Conductivité therm.	λ_c (20°C)	0,06	-	-	[W/mK]
- Code matériau		10	5	5	



Données calcul

- Pas de temps	5	[s]	OK : dt sous-multiple de la durée totale
- dx	5	[mm]	OK : dx sous-multiple de l'épaisseur totale
- durée feu	120	[min]	-

Resultats

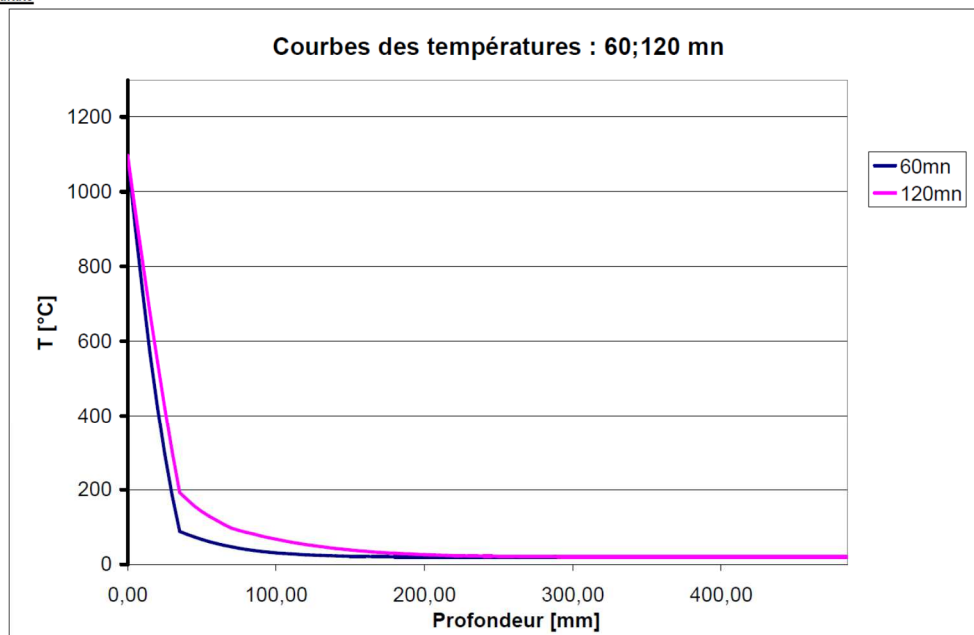


Figura 62: Calcolo dell'andamento della temperatura nella sezione per la curva HC 2h

Rapport de calcul du revêtement en voussoirs préfabriqués / Relazione di calcolo del rivestimento in conci prefabbricati



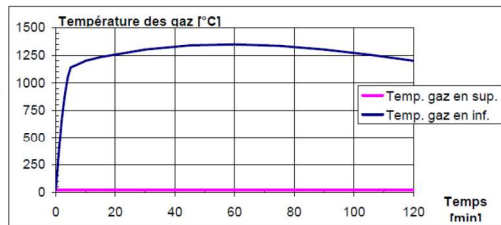
Calculs thermiques avec exposition feu RWS
 Fiche de calcul
 Calculs thermiques selon Eurocodes

Version du 25/10/2012

Données thermiques - Feu

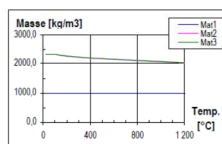
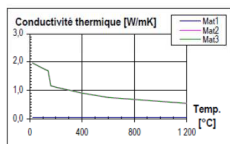
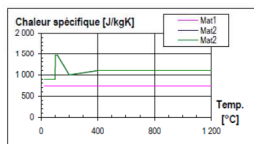
RWS

		Face		
		INF	SUP	
- Température initiale :	θ_0	20	20	[°C]
- Température maximale des gaz :	θ_{max}	1350	20	[°C]
- Coefficient de convection :	α_c	25	4	[W/m²K]
- Rayonnement :				
- Facteur de forme	Φ	1,0	1,0	[-]
- Emissivité du feu	e_f	1,0	1,0	[-]
- Emissivité surface de l'élément	e_m	0,7	0,7	[-]



Données matériaux

		Mat. 1	Mat. 2	Mat. 3	
- Epaisseur	e	35	450	0	[mm]
- Matériau		Promatect T	Béton u=1.5%	Béton u=1.5%	
- Masse volumique	ρ (20°C)	990	2300	2300	[kg/m³]
- Chaleur spécifique	c_c (20°C)	742,00	1470,00	1470,00	[J/kgK]
- Conductivité therm.	λ_c (20°C)	0,06	-	-	[W/mK]
- Code matériau		10	5	5	



Données calcul

- Pas de temps	5	[s]	OK : dt sous-multiple de la durée totale
- dx	5	[mm]	OK : dx sous-multiple de l'épaisseur totale
- durée feu	120	[mn]	-

Resultats

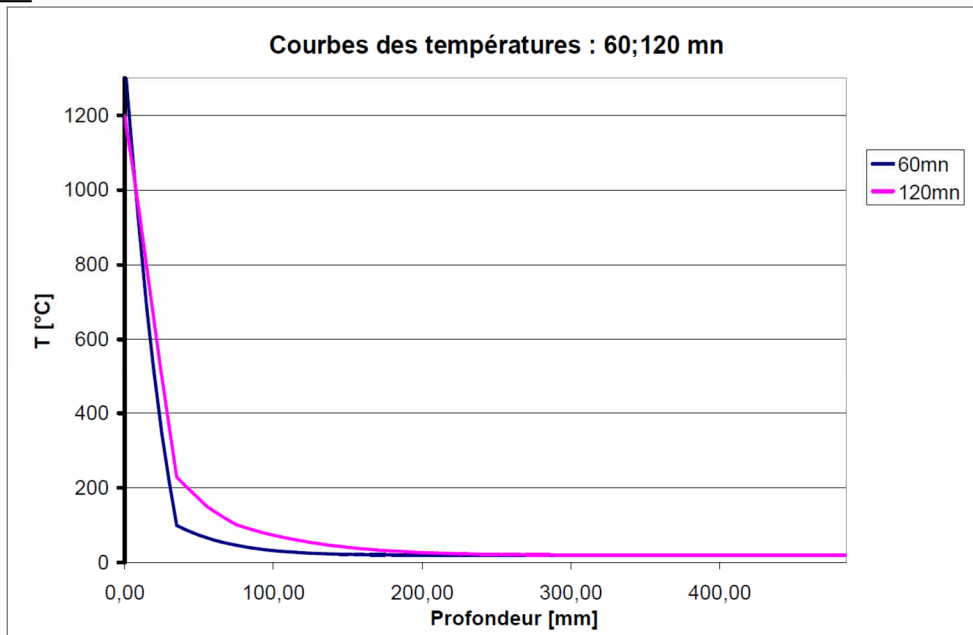


Figura 63: Calcolo dell'andamento della temperatura nella sezione per la curva RWS

- Calcolo delle proprietà termiche della sezione riscaldata:

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
E₀ [MPa]	36321	27550	32985	33674
I₀ [.10⁻³ m⁴]	7,59	7,14	7,03	7,14

Tabella 22: Caratteristiche della sezione riscaldata

- Sollecitazioni indirette legate all'incendio

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
ε_{th} [.10⁻⁵]	0	27	19	15
γ_{th} [.10⁻⁵ m⁻¹]	0	238	199	162
T_{inf} – T₀ [°C]	0	81	63	52
T_{sup} – T₀ [°C]	0	-26	-26	-21

Tabella 23: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del cls

Nella tabella seguente si riportano le coppie dimensionanti come fornite dal codice SCIA:

1) N_{max}, M_{max}.

2) N_{min}, M_{min}

Sforzi termici	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	594	688	363	515	469	432
2	437	-34	246	-24	372	-19

Tabella 24: Sforzi termici calcolati con SCIA

- Verifica delle sezioni riscaldate

Coefficienti di riduzione della resistenza:

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
k_{θ,cls}	1	0,996	0,996	0,997
Intradosso k_{θ,acciaio}	1	0,975	0,99	1

Estradosso k_{θ,acciaio}	1	1	1	1
---	---	---	---	---

Tabella 25: Coefficienti di riduzione della resistenza

Per la verifica, agli sforzi statici sono stati introdotti nel modello ed opportunamente ridotti di un coefficiente 0.77. Per quanto riguarda le resistenze, si considerano i coefficienti di riduzione della curva di incendio ISO834 4h in quanto sono i più conservativi.

Nella tabella seguente si riportano le 4 coppie dimensionanti per la situazione di incendio:

- 1) Nmax, M
- 2) Nmin, M
- 3) N, Mmin
- 4) N, Mmax.

Sforzi totali	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	2883	-24	2874	-28	2886	-15
2	2394	428	2383	414	2386	343
3	2816	-39	2812	-41	2774	-32
4	2611	592	2619	604	2633	509

Tabella 26: Sforzi dimensionanti

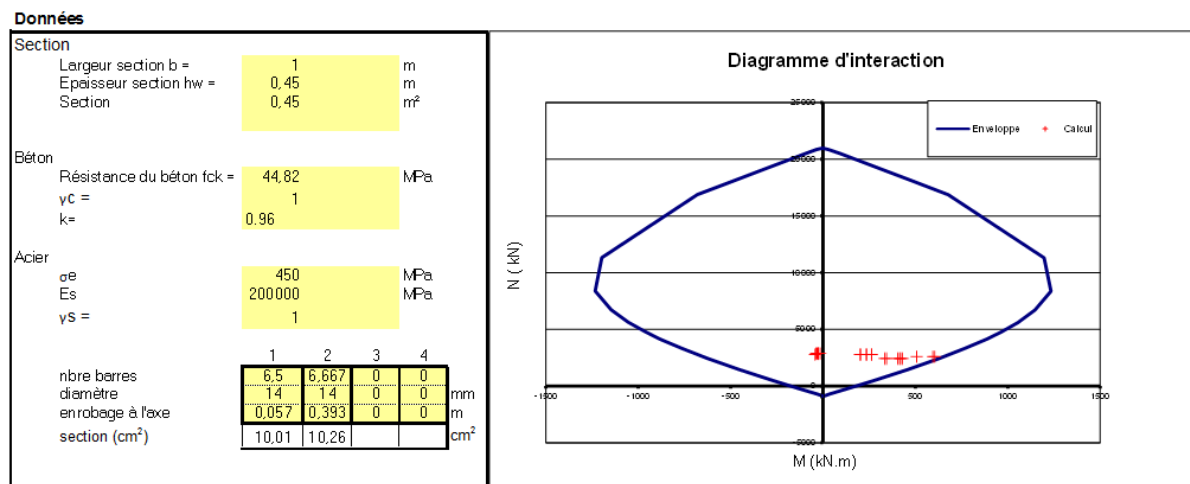


Figura 64: Diagramma di interazione della sezione C in presenza di 35mm di Promatect-T

FS=1.09

Ricapitolando, per la sezione C, si hanno le seguenti resistenze di calcolo minime, azioni sollecitanti massime/minime, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per le verifiche statiche ed al fuoco riportate in tabella:

	Verifiche statiche		Verifiche al fuoco	
Resistenze di calcolo dei materiali	f_{cd} [MPa]	17	$f_{cd, fi}$ [MPa]	44.8
	f_{yd} [MPa]	391.3	$f_{yd, fi}$ [MPa]	439/450
Sezione resistente	Spessore (cm)	45	Spessore (cm)	45
Azioni sollecitanti considerate nel diagramma d'interazione	Nmax [kN/m], Mmax [kNm/m]	4893, -260	Nmax [kN/m], M [kNm/m]	2903, -15
	N [kN/m], Mmax [kNm/m]	4552, 561	N [kN/m], Mmax [kNm/m]	2619, 604
	N [kN/m], Mmin [kNm/m]	3880, -159	N [kN/m], Mmin [kNm/m]	2812, -40
Armature in calotta e piedritti	Intradosso [mm]	14@150	Intradosso [mm]	14@150
	Estradosso [mm]	14@150	Estradosso [mm]	14@150
Misure di protezione al fuoco	-		Utilizzo di fibre di polipropilene, foglio di Promatect-T spessore 35mm	
FS	1.66		1.09	

Tabella 27: Resistenze della struttura, azioni sollecitanti, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per la sezione C

11.1.4 Sezione A

Per quanto riguarda la sezione A, i conci sono i medesimi ed è dunque valido il calcolo termico effettuato per la sezione C al precedente paragrafo.

Nella tabella seguente si riportano le coppie dimensionanti come fornite dal codice SCIA:

- 1) Nmax, Mmax.
- 2) Nmin, Mmin

Sforzi termici	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	2394	523	1788	660	1748	623
2	2275	-28	1639	-29	1607	-28

Tabella 28: Sforzi termici calcolati con SCIA

- Verifica delle sezioni riscaldate

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
$k_{\theta,cls}$	1	0,880	0,912	0,897
Intradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	0,386	0,656	0,568
Estradosso $k_{\theta,acciaio}$	1	1	1	1

Tabella 29: Coefficienti di riduzione della resistenza

Per quanto riguarda le resistenze, si considerano i coefficienti di riduzione della curva di incendio ISO834 4h in quanto sono i più conservativi. Grazie alla presenza di fibre di polipropilene non vi è spalling e la totalità dello spessore della sezione può essere considerato.

$$f_{ck} = k_{\theta,cls} \cdot f_{ck} = 39.6 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,intradosso} = k_{\theta,acciaio} \cdot f_{sy} = 173.7 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,estradosso} = k_{\theta,acciaio} \cdot f_{sy} = 450 \text{ MPa}$$

Siccome nel foglio di calcolo non è possibile inserire due resistenze diverse per le armature in estradosso e in intradosso, il coefficiente di riduzione è stato applicato sul numero di barre.

Per la verifica, agli sforzi statici sono stati introdotti nel modello ed opportunamente ridotti di un coefficiente 0.77.

Nella tabella seguente si riportano le 4 coppie dimensionanti per la situazione di incendio:

- 1) Nmax, M
- 2) Nmin, M
- 3) N, Mmin
- 4) N, Mmax.

Sforzi totali	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	3563	543	3472	709	3450	674
2	3483	-20	3366	-21	3352	-20
3	3484	-25	3367	-25	3353	-24
4	3561	553	3471	717	3448	681

Tabella 30: Sforzi dimensionanti

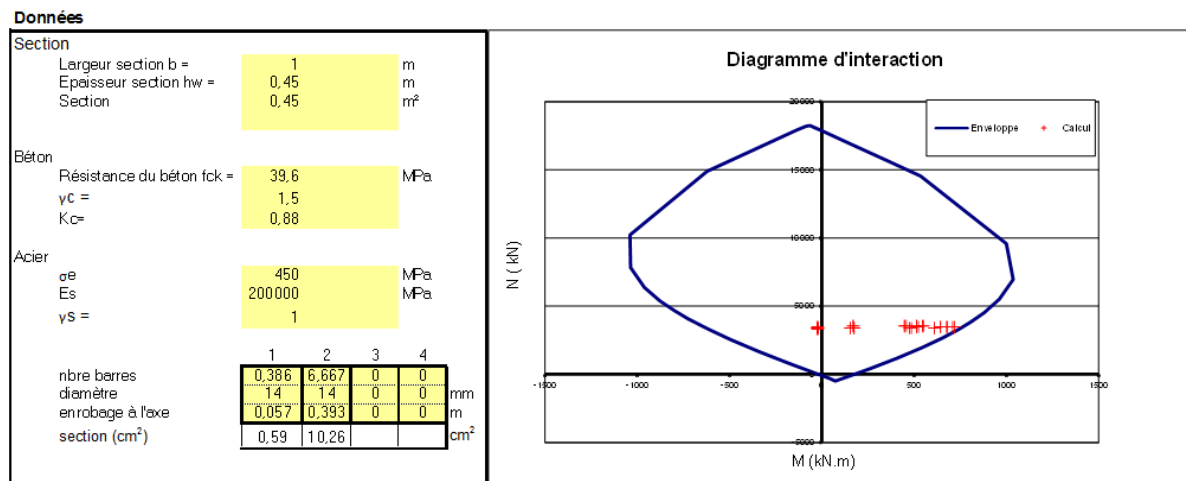


Figura 65: Diagramma di interazione della sezione A

La sezione è verificata con un fattore di sicurezza FS=1,06.

Ricapitolando, per la sezione A, si hanno le seguenti resistenze di calcolo minime, azioni sollecitanti massime/minime, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per le verifiche statiche ed al fuoco riportate in tabella:

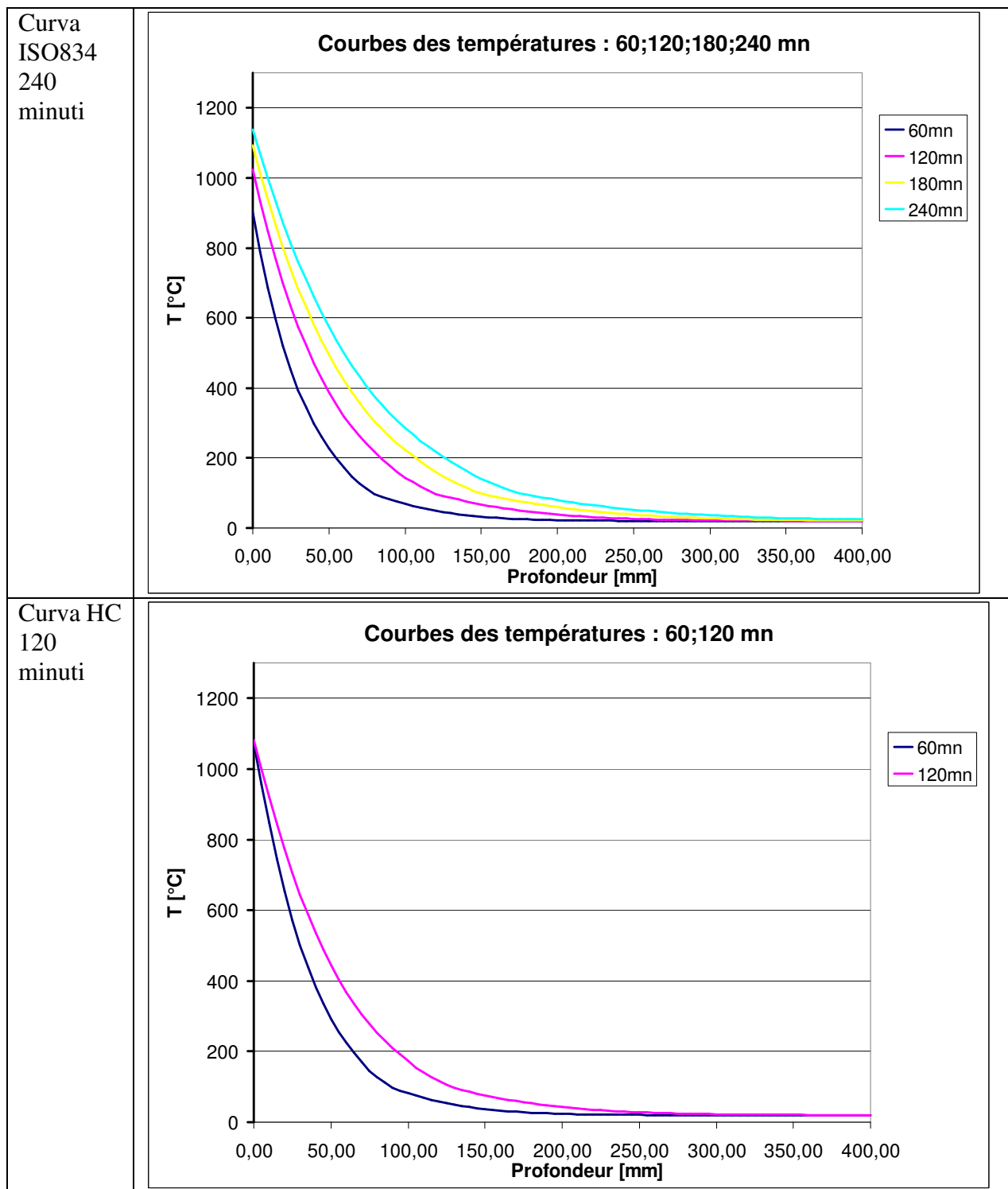
Resistenze di calcolo dei materiali	Verifiche statiche		Verifiche al fuoco	
	f _{cd} [MPa]	17	f _{cd, fi} [MPa]	39.6
f _{yd} [MPa]	391.3	f _{yd, fi} [MPa]	173.7/450	
Sezione resistente	Spessore (cm)	45	Spessore (cm)	45
Azioni sollecitanti considerate nel diagramma d'interazione	N _{max} [kN/m], M _{max} [kNm/m]	5391, -17	N _{max} [kN/m], M [kNm/m]	3563, 543
	N [kN/m], M _{max} [kNm/m]	5390, 178	N [kN/m], M _{max} [kNm/m]	3471, 717
	N [kN/m], M _{min} [kNm/m]	5245, -263	N [kN/m], M _{min} [kNm/m]	3367, -25
Armature in calotta e piedritti	Intradosso [mm]	14@150	Intradosso [mm]	14@150
	Estradosso [mm]	14@150	Estradosso [mm]	14@150
Misure di protezione al fuoco	-		Utilizzo di fibre di polipropilene	
FS	2.8		1.06	

Tabella 31: Resistenze della struttura, azioni sollecitanti, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per la sezione A

11.1.5 Sezione D

- Calcolo termico

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



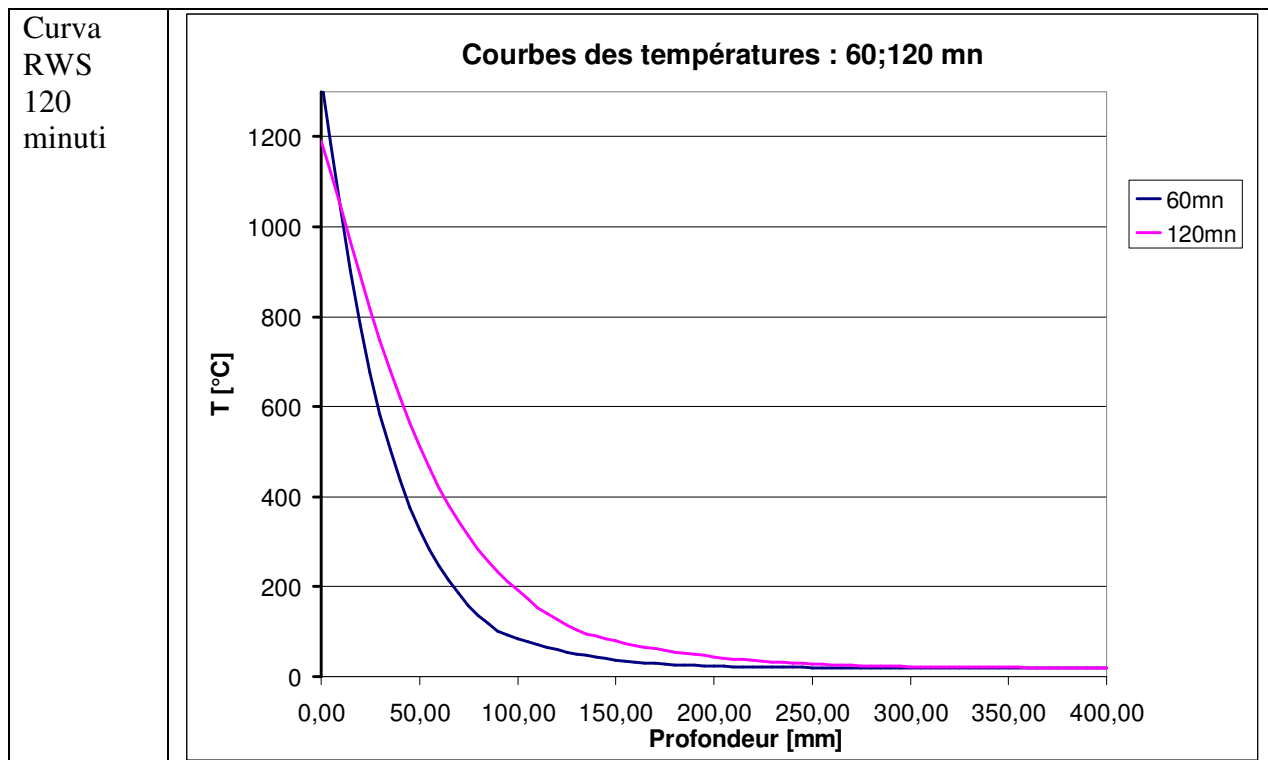


Figura 66: Andamento delle temperature nella sezione per le 3 curve di incendio considerate

- 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
E₀ [MPa]	34923	21474	25181	24744
I₀ [.10⁻³ m⁴]	5.33	4.79	4.51	5.50

Tabella 32: Caratteristiche della sezione riscaldata

- Sollecitazioni indirette legate all'incendio

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
ε_{th} [.10⁻⁵]	0	65	44	44
γ_{th} [.10⁻⁵ m⁻¹]	0	303	381	364
T_{inf} – T₀ [°C]	0	126	120	116
T_{sup} – T₀ [°C]	0	5	-33	-29

Tabella 33: Sollecitazioni termiche indotte dal riscaldamento del cls

Nella tabella seguente si riportano le coppie dimensionanti come fornite dal codice SCIA:

- 1) Nmax, Mmax.
- 2) Nmin, Mmin

Sforzi termici	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	1324	365	963	533	950	501
2	1240	-22	843	-25	834	-24

Tabella 34: Sforzi termici calcolati con SCIA

- Verifica delle sezioni riscaldate

	A T ambiente	ISO834 4h	HC 2h	RWS 2h
k_{θ,cls}	1	0,880	0,912	0,897
Intradosso k_{θ,acciaio}	1	0,386	0,656	0,568
Estradosso k_{θ,acciaio}	1	1	1	1

Tabella 35: Coefficienti di riduzione della resistenza

Per quanto riguarda le resistenze, si considerano i coefficienti di riduzione della curva di incendio ISO834 4h in quanto sono i più conservativi. Grazie alla presenza di fibre di polipropilene non vi è spalling e la totalità dello spessore della sezione può essere considerato.

$$f_{ck} = k_{\theta,cls} \cdot f_{ck} = 35.2 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,intradosso} = k_{\theta,acciaio} \cdot f_{sy} = 173.7 \text{ MPa}$$

$$f_{sy,estradosso} = k_{\theta,acciaio} \cdot f_{sy} = 450 \text{ MPa}$$

Siccome nel foglio di calcolo non è possibile inserire due resistenze diverse per le armature in estradosso e in intradosso, il coefficiente di riduzione è stato applicato sul numero di barre.

Per la verifica, agli sforzi statici sono stati introdotti nel modello ed opportunamente ridotti di un coefficiente 0.77.

Nella tabella seguente si riportano le 4 coppie dimensionanti per la situazione di incendio:

- 1) Nmax, M
- 2) Nmin, M
- 3) N, Mmin
- 4) N, Mmax.-12

Sforzi totali	ISO 834 4h		HC 2h		RWS 2h	
	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]	N [kN/m]	M [kNm/m]
1	3785	350	3791	528	3780	494
2	3740	-12	3716	-16	3712	-15
3	3742	-20	3718	-22	3714	-21
4	3779	376	3787	551	3775	518

Tabella 36: Sforzi dimensionanti

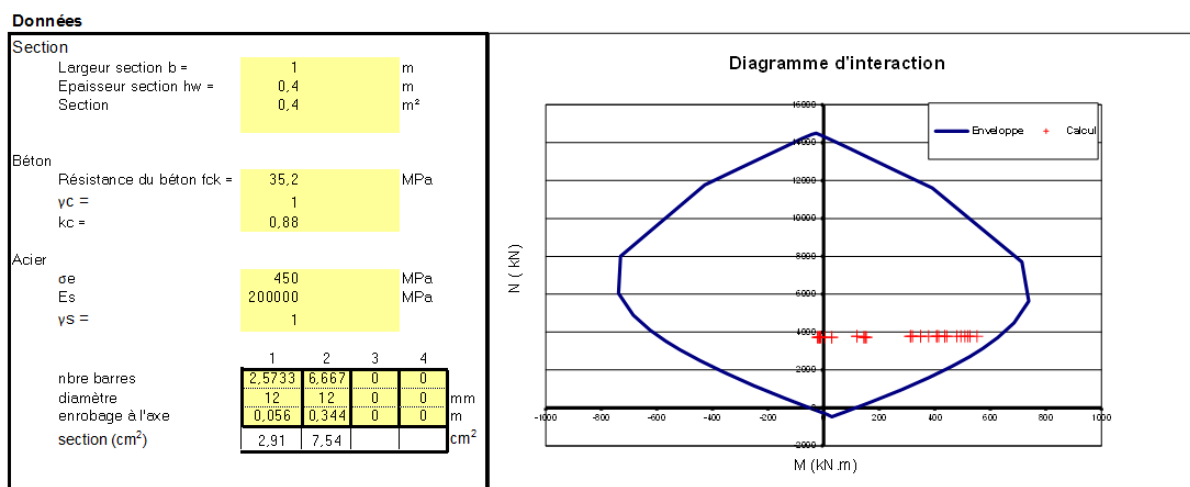


Figura 67: Diagramma di interazione della sezione D

La sezione è verificata con un fattore di sicurezza FS=1,26.

Ricapitolando, per la sezione D, si hanno le seguenti resistenze di calcolo minime, azioni sollecitanti massime/minime, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per le verifiche statiche ed al fuoco riportate in tabella:

Resistenze di calcolo dei materiali	Verifiche statiche		Verifiche al fuoco	
	f _{cd} [MPa]	17	f _{cd, fi} [MPa]	39.6
f _{yd} [MPa]	391.3	f _{yd, fi} [MPa]	173.7/450	
Sezione resistente	Spessore (cm)	45	Spessore (cm)	45
Azioni sollecitanti considerate nel diagramma d'interazione	N _{max} [kN/m], M _{max} [kNm/m]	6343, -25	N _{max} [kN/m], M _{max} [kNm/m]	3791, 527
	N [kN/m], M _{max} [kNm/m]	6290, 69	N [kN/m], M _{max} [kNm/m]	3787, 551
	N [kN/m], M _{min} [kNm/m]	6202, -63	N [kN/m], M _{min} [kNm/m]	3718, -22

Armature in calotta e piedritti	Intradosso [mm]	12@150	Intradosso [mm]	12@150
	Estradosso [mm]	12@150	Estradosso [mm]	12@150
Misure di protezione al fuoco	-		Utilizzo di fibre di polipropilene	
FS	5.8		1.26	

Tabella 37: Resistenze della struttura, azioni sollecitanti, armature considerate nei calcoli e fattori di sicurezza per la sezione D

11.2 Verifiche dei giunti tra conci

Come per il caso dei carichi statici, si verifica la resistenza a compressione del calcestruzzo nella sezione ridotta dei giunti.

Sezione	M [kNm]	N [kN]	e [mm]	t [mm]	t _{eff} [mm]	σ _M [MPa]	σ _N [MPa]	σ _{max} [MPa]	Verifica	FS
C	592,47	2611,33	226,88	350	219,99	73,45	11,87	85,32	KO	0,53
A	501,71	3471,20	144,54	350	201,89	73,85	17,19	91,05	KO	0,45
D	551,44	3786,78	145,62	300	201,50	81,49	18,79	100,28	KO	0,35

Per tutte le sezioni, il calcestruzzo raggiunge la plasticizzazione in corrispondenza dei giunti. Grazie all'iperstaticità del sistema, la comparsa di cerniere plastiche non compromette l'equilibrio della struttura. Peraltro si fa notare come l'ipotesi di modello continuo, senza riduzione dell'inerzia come proposto per es. da Muir-Wood (1975), risulta particolarmente conservativa, considerando anche che in fase definitiva i bulloni saranno ritirati.

Si è dunque considerato il modello con cerniere perfette e si è analizzata la distribuzione degli sforzi.

In corrispondenza dei giunti, si hanno i valori seguenti di tensione massima:

- Sezione C: $\sigma = \frac{3211 \text{ kN}}{0,35 \text{ m}^2} = 9.17 \text{ MPa}$
- Sezione A: $\sigma = \frac{3762 \text{ kN}}{0,35 \text{ m}^2} = 10.75 \text{ MPa}$
- Sezione D: $\sigma = \frac{4116 \text{ kN}}{0,30 \text{ m}^2} = 13.2 \text{ MPa}$

La tensione è dunque inferiore alla resistenza a compressione di calcolo del cls.

Come si può notare nei diagrammi in allegato 2, gli sforzi nelle sezioni dei conci sono minori rispetto a quelli verificati al § 8.1.3, 8.3.3 e 8.5.3, non occorre dunque effettuare nuovamente la verifica per i conci.

11.3 Protezione al fuoco per il sottoattraversamento del Cenischia

11.3.1 Generalità

Il tunnel è reso impermeabile alle venute d'acqua grazie ai giunti elastomerici inseriti nella scanalatura tra un concio e l'altro. Le tratte con impermeabilizzazione totale (full round) sono indicate nel profilo longitudinale PRV_C3A_3948_26-19-00_40-02 e riguardano una tratta nei

calcescisti piemontesi in prossimità della Val Cenischia, i depositi alluvionali al di sotto della Val Cenischia, la zona a scaglie e le unità di origine oceanica. Questi giunti devono resistere a pressioni fino a 10 bar. In caso di incendio, occorre prevedere degli accorgimenti al fine di non sottoporre il materiale di cui è composto il giunto (EPDM) a temperature elevate, studiando la trasmissione del calore nei giunti (intercapedine) tra un concio e l'altro.

In particolare, nel caso dei depositi alluvionali della Val Cenischia, molto permeabili, la degradazione dei giunti a causa dell'incendio può provocare delle venute d'acqua in galleria molto importanti e diffuse. Negli altri casi gli acquiferi sono più localizzati (solo in corrispondenza di fratture o di faglie) per cui il rischio concomitante di incendio e degradazione del giunto proprio in corrispondenza della venuta d'acqua è minore. Inoltre, le conseguenze dovute all'abbassamento della falda sotto la Val Cenischia (cedimenti in superficie) sono sicuramente più gravi rispetto al caso di venute d'acqua in ammassi rocciosi sotto maggiori coperture.

Il tema dell'effetto di un incendio sull'impermeabilizzazione dei giunti e delle possibili contromisure è stato trattato recentemente dalla tesi di De Clippelaar (2011) dell'Università di Delft anche tramite esperimenti a vera grandezza. Per affrontare questo tema in modo più completo ci si è riferiti a questo lavoro, a cui si rimanda per ogni dettaglio.

La tesi nonché la pratica corrente mostrano che i materiali dei giunti non possono resistere all'effetto diretto dell'incendio, in relazione alle caratteristiche del materiale del giunto e ad un'esposizione del giunto alle fiamme tramite l'intercapedine.

I calcoli effettuati per la sezione C (§ 11.1.3) mostrano che è necessaria una protezione al fuoco tra le PK 55+950 e 57+400, in corrispondenza del tratto in cui la macchina lavorerà in modalità chiusa, con dei fogli di protezione termica del tipo Promatect-T di spessore 35 mm o equivalente, come mostrato nella tavola PD2_C3A_4850_26-19-30_40-15.

Si è analizzato il problema della trasmissione del calore e si sono fornite delle soluzioni al fine di garantire in sicurezza la funzione di impermeabilizzazione del giunto per tutta la durata di vita dell'opera, come descritto nel seguito.

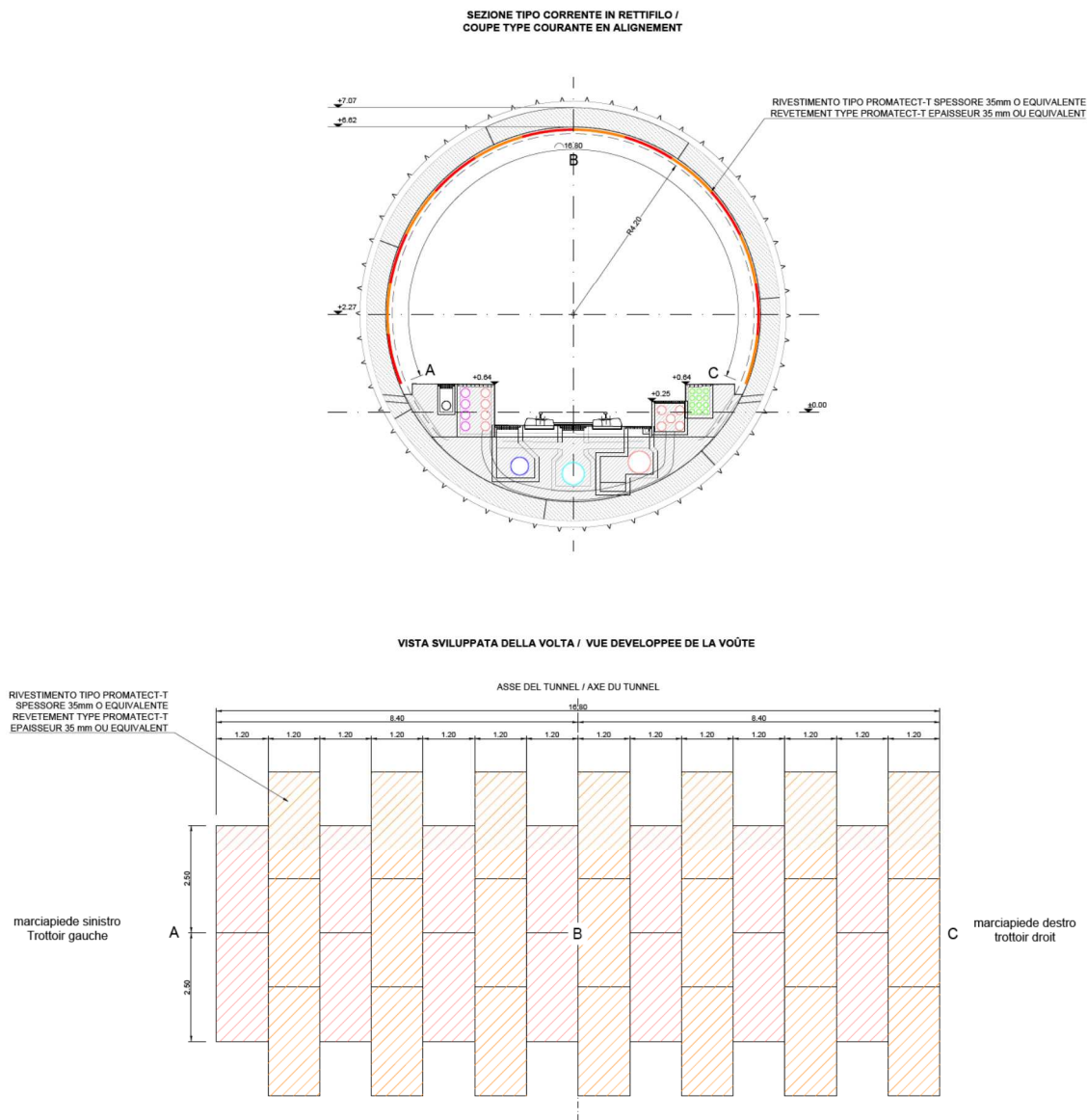


Figura 68: Protezione al fuoco

11.3.2 Propagazione del calore e soluzioni adottate

Propagazione del calore

L'andamento della temperatura nella sezione è determinato con il foglio Excel elaborato internamente da BG come mostrato al § 12.1.3 e descritto nell' allegato 1.

Il foglio di calcolo considera la presenza del cls dei conci dopo la protezione termica procedendo dall'intradosso verso l'estradosso. Se tuttavia si analizza la situazione in corrispondenza del giunto stesso, si può notare che questo implica la presenza di un'intercapedine che, seppur di spessore minimo, costituisce uno strato d'aria in cui il calore può propagarsi facilmente.

La tabella seguente fornisce i risultati ed in particolare il valore di temperatura all'estradosso della protezione.

Incendio	ISO 834	HC120	RWS120
Temperatura max	1153°C	1100°C	1350°C
Temperatura all'estradosso della protezione (tipo promatect-T)	291°C	192°C	229°C

Tabella 38: Temperature nella sezione

La propagazione del calore nell'intercapedine dei giunti (longitudinali e trasversali) può essere oggetto di modellazioni complesse, in funzione dello spessore effettivo.

Le prove realizzate dall'Università di Delft esposte nella tesi di De Clippelaar (2011) mostrano che, in presenza di protezione, la temperatura a livello dei giunti è di circa 100°. A questa temperatura, il materiale non si degrada e rimane intatto; tuttavia, con tale aumento di temperatura, il materiale diventa viscoso. I giunti EPDM svolgono la loro funzione quando compressi in un certo range di valori. Con il riscaldamento, tale compressione diminuisce. In queste condizioni, non si può garantire pienamente l'impermeabilizzazione dei giunti, specie a lungo termine.

Soluzioni

Al fine di assicurare la funzione di impermeabilizzazione, tra le varie soluzioni descritte da De Clippelaar (2011), se ne forniscono 2:

- Porre dei giunti tagliafuoco in un'apposita scanalatura tra i conci come mostrato nella figura seguente. Tali giunti tagliafuoco, del tipo Litafeu o equivalente, sono composti da fibre minerali incombustibili, inserite in una retina di fibre di vetro. Si utilizzano nella pratica corrente per queste funzioni. Lavorano in compressione in quanto sono più grandi rispetto alla spaziatura tra le lastre di cls (i conci, in questo caso). Ad esempio possono avere spessore di 20 mm per una spaziatura di 15 mm.
- Uso di materiali alternativi per i giunti (ad es. EPDM con vulcanizzazione o FKM – fluor carbon rubber) che possano garantire l'impermeabilizzazione per temperature di almeno 100° e pari a quelle indicate in tabella 38 (all'estradosso della protezione).

Si considera in progetto la prima soluzione.

I giunti di tipo Litafeu o equivalenti devono presentare le seguenti caratteristiche tecniche:

Proprietà	Valore	Unità
Temperatura di fusione (resistenza al fuoco)	> 1000	°C
Temperatura di servizio	< 780°	°C
Capacità termica C_p	840	J/kgK
Conduttività termica λ	F($\theta^\circ\text{C}$) 0.035 a 10°C	W/mK
Impermeabilizzazione all'acqua e al vapore μ	1.4	-

Figura 69: Caratteristiche tecniche/termiche dei giunti tagliafuoco

DETTAGLIO 1 GIUNTO TRASVERSALE E LONGITUDINALE /
DETAIL 1 JOINT TRANSVERSAL ET LONGITUDINAL
1:5

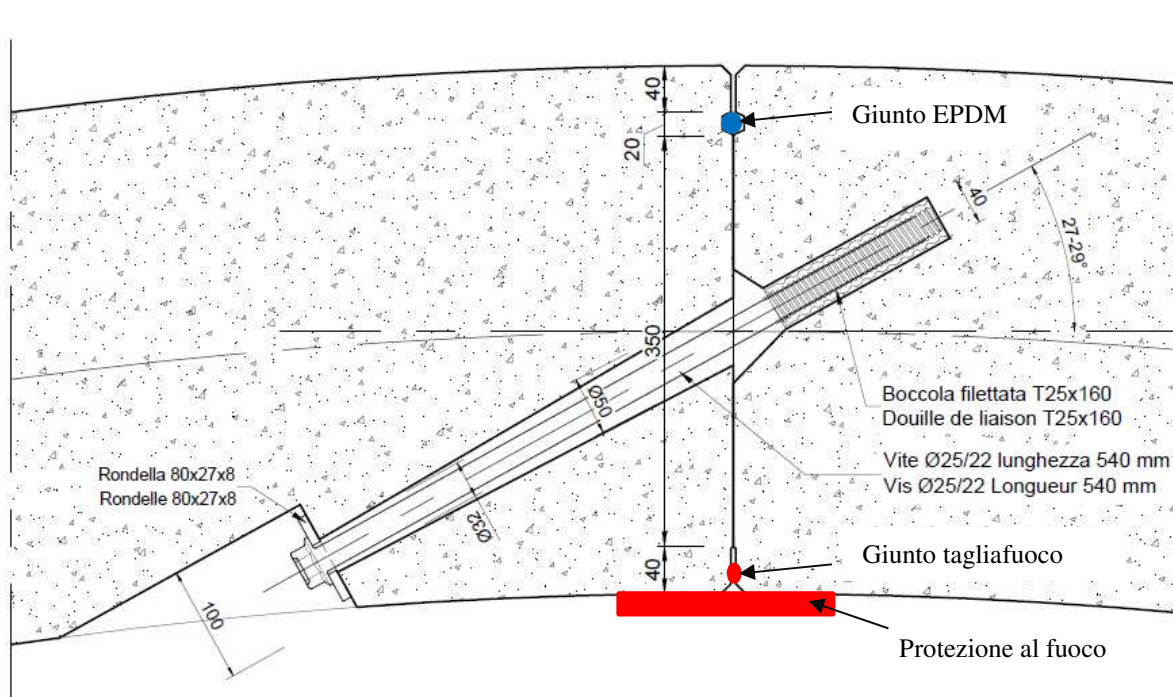


Figura 70: Posizione del giunto tagliafuoco

12. Verifiche di bulloni, connettori e guarnizioni

12.1 Bulloni

I bulloni tra conci (composti da vite, rondella e boccola filettata) per i giunti trasversali e longitudinali, mostrati in figura 3, non hanno funzione permanente, il loro ruolo è solo quello di aiuto al montaggio degli anelli. Sono posati al momento dell'assemblaggio dell'anello di conci (che avviene sotto la protezione dello scudo) e sono generalmente smontati alla fine del back-up per venire riutilizzati, salvo nelle zone di estremità della galleria in cui sono solitamente conservati per evitare dei movimenti tra conci a seguito del rilassamento delle guarnizioni in EPDM (come descritto da Wittke et al., 2007). Tuttavia, in questo caso, in prossimità dell'imbocco Susa sono realizzati i cameroni all'imbocco e la successiva galleria artificiale (con cls gettato in opera), mentre all'imbocco Maddalena vi è un tratto in tradizionale, anche in questo caso con rivestimento gettato in opera. Quindi questi elementi bloccano le deformazioni dell'anello di conci e rendono superflui i bulloni anche in queste zone di estremità. Si considera dunque che i bulloni saranno smontati in fase definitiva. Si possono smontare una volta realizzato l'anello di conci completo e l'intasamento a tergo di essi, quando si instaura una corretta trasmissione di forze tra ammasso roccioso e rivestimento e viceversa. Questo dipende dal modo operativo di riempimento del vuoto anulare; in generale si ha a circa 50-80 m dal

fronte. Lo smontaggio alla fine del back-up (> 200 m dal fronte) presenta quindi una distanza sufficiente dal punto di vista meccanico.

I bulloni devono riprendere le forze dovute al rilassamento delle guarnizioni dei giunti, ovvero, in altre parole, la resistenza a pull out messa in gioco per contrastare la reazione della guarnizione. Queste forze sono legate alla scelta del tipo di guarnizioni operata dall'impresa, per cui un dimensionamento preciso non può che essere effettuato in sede di Progetto Esecutivo. Tuttavia, siccome il modulo di elasticità delle guarnizioni è 10 000 volte inferiore rispetto a quello del cls e la sezione che rappresentano nei giunti rappresenta una porzione molto limitata della superficie di contatto, le forze necessarie alla chiusura del giunto sono generalmente limitate a qualche decina di kN/m. Tenuto conto di un rilassamento dell'ordine di 40-45%, la trazione che la vite di connessione deve riprendere rimane limitata a 125-180 kN, che è perfettamente compatibile con i bulloni disponibili sul mercato. Infatti, considerando la tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio pari a $f_{yk}=500$ MPa ed una sezione di diametro 25 mm, si ha $T_{yd}=233$ kN.

Ad una certa distanza dal fronte, quando si ha continuità tra gli anelli, si crea una compressione all'interno da rivestimento tale da contrastare automaticamente il rilassamento delle guarnizioni. Oltre a contrastare le forze dovute al rilassamento delle guarnizioni, il ruolo dei bulloni è dunque limitato alle azioni sollecitanti nella fasi iniziali che seguono il montaggio, ovvero relative all'iniezione del riempimento.

12.2 Connettori

I connettori biconici disposti nei giunti longitudinali risultano sollecitati in fase di montaggio dell'anello, in quanto devono sostenere il peso del concio appena posto nella sua posizione definitiva dall'erettore, prima che si formi l'anello completo di conci e quindi l'anello lavori in compressione.

Si considera il caso della sezione tipo TM45. Il peso di un concio generico è pari a 77.6 kN. Siccome si hanno due connettori per concio, lo sforzo di taglio su ciascun connettore è pari a 38.8 kN.

Si applica la combinazione a SLU seguente:

$$\gamma_{Q1} Q_{k1}$$

Con:

γ_{Q1} : coefficiente parziale delle azioni variabili, pari a 1.5;

Q_{k1} : azione variabile, dovuta al peso del concio.

Si ha quindi un'azione sollecitante pari a 58.2 kN.

I connettori biconici sono di tipo SOFRASAR o equivalente, generalmente in derivato di poliammide, e presentano una resistenza a taglio di almeno 400 kN.

In corrispondenza delle intersezioni con i rami di comunicazione, i connettori presentano un ruolo strutturale in fase provvisoria, durante l'apertura del ramo, in quanto permettono il trasferimento dei carichi dagli anelli aperti verso gli anelli non aperti, come si può vedere nella relazione PD2_C3A_2511_26-90-20_Relazione tecnica e di calcolo sul collegamento tra rivestimento in conci e rami, laddove si presenta la verifica di tali elementi in questa situazione. In fase definitiva, la creazione di un anello in c.a. di spessore 1 m all'intersezione rami-conci ristabilisce l'equilibrio sugli anelli di conci e quindi i connettori non presentano più un ruolo strutturale.

Questo significa che, in fase di esercizio della linea, i connettori non svolgono un ruolo strutturale e quindi non vi sono problemi nei confronti della resistenza al fuoco.

12.3 Guarnizioni

L'impermeabilità all'acqua alle varie pressioni idrostatiche dipende dall'apertura (gap) del giunto e dall'offset di posa tra conci attigui.

Quest'apertura deriva dai carichi esterni (pressione dell'ammasso e idrostatica).

Come descritto nel capitolo 8, per la verifica dei giunti si è considerata una struttura continua senza cerniere e si è calcolata l'eccentricità per valutare la sezione del giunto effettivamente compressa.

Fino a che l'eccentricità non raggiunge un sesto dello spessore del concio, non si ha nessuna apertura del giunto. Non appena si raggiunge questo valore, il giunto si apre e la superficie di contatto tra conci diminuisce.

Si è quindi svolto un calcolo semplificato basato sul metodo agli elementi finiti che mostra il comportamento del giunto tra conci sotto la variazione dell'eccentricità dello sforzo normale agente su questa superficie.

Il cls dei conci ed il giunto sono modellati rispettivamente da un elemento solido 2D e da un'interfaccia.

Il carico applicato comprende l'applicazione di una forza normale che comprime la superficie del giunto e di un momento flettente che induce eventualmente un'eccentricità nell'interfaccia dei conci.

Aumentando il momento, il modello analizza l'apertura del giunto e la profondità della zona di distacco in fz. dell'eccentricità.

La larghezza dei conci considerata è di 45 cm. Nel senso perpendicolare al giunto, si simulano 10 cm di concio.

Nella figura seguente si può vedere la mesh del modello, le condizioni al contorno, i carichi applicati ed i risultati del calcolo (spostamento verticale) applicando un'eccentricità di 0.2 m.

L'eccentricità massima calcolata al capitolo 8 è pari a 0.076 m nel caso della sezione C.

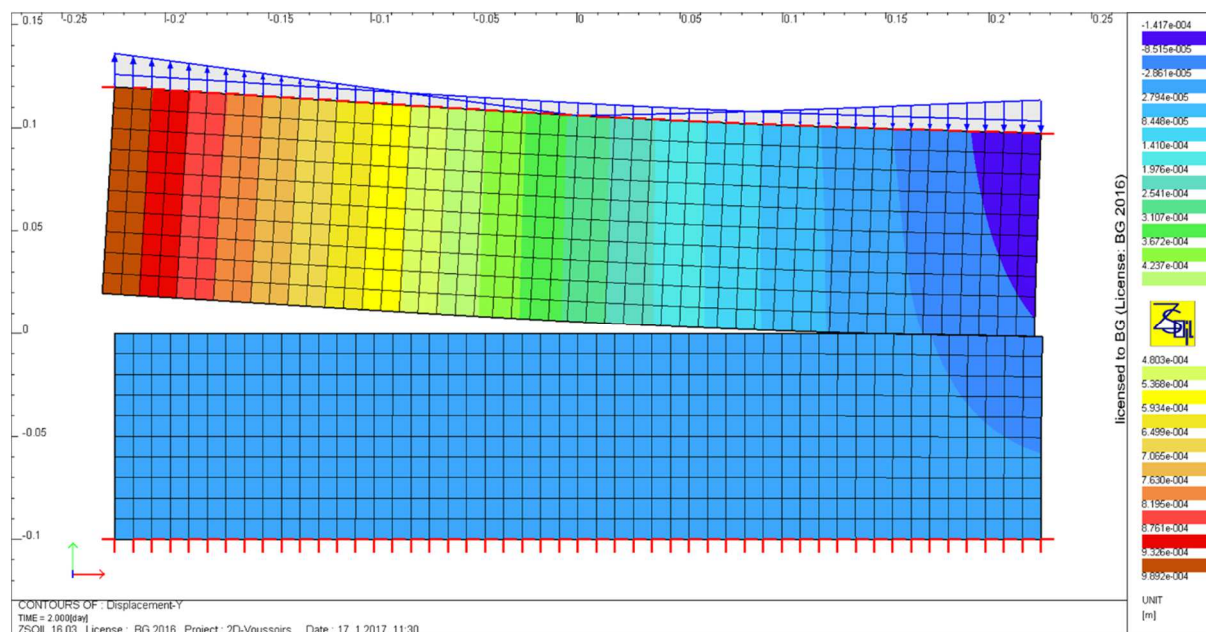


Figura 71: modello di calcolo e risultati nel caso di eccentricità di 0.2 m

Il grafico seguente presenta la profondità della zona di distacco (aperta) del giunto in fz. dell'eccentricità dello sforzo normale applicato.

Per tutte le eccentricità inferiori a 0.075 m (un sesto dello spessore del concio), in conformità con le regole della statica, non si ha apertura. Per eccentricità superiori a questa soglia, il giunto si apre e la profondità della zona di distacco cresce quasi monotonicamente fino a 0.3825 m all'eccentricità di 0.2 m.

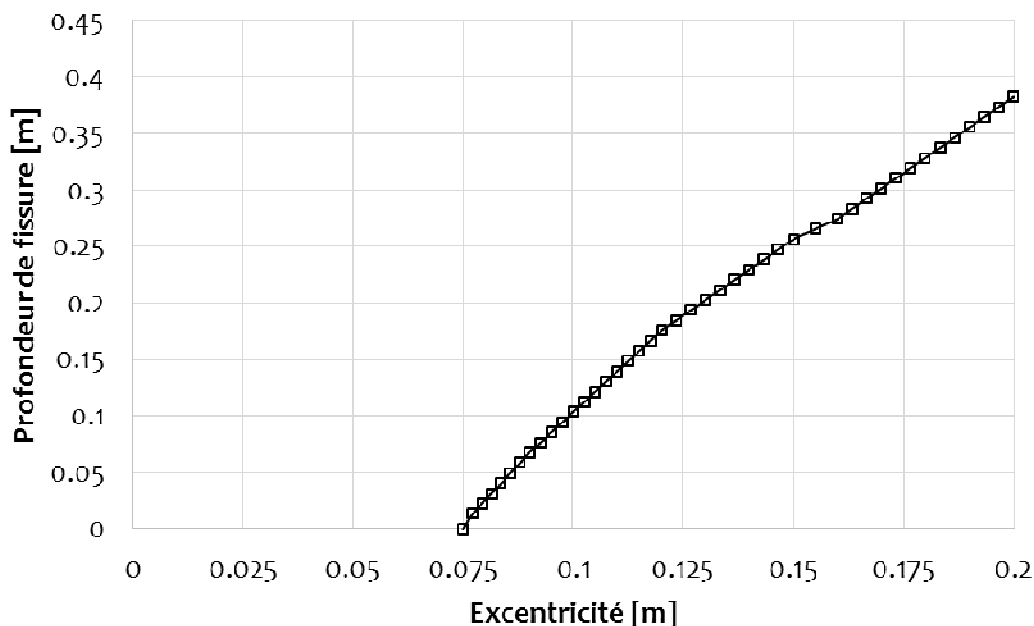


Figura 72: profondità delle zona di distacco in fz. dell'eccentricità

Il grafico seguente presenta l'apertura del giunto (ovvero l'apertura dell'elemento di interfaccia) ai due punti rappresentativi:

- A $x=t/2$ (estremità del concio) laddove si ha l'apertura massima;
- A $x=t/4$, un quarto dello spessore del concio.

"x" è la distanza del punto del centro del concio e "t" lo spessore di quest'ultimo.

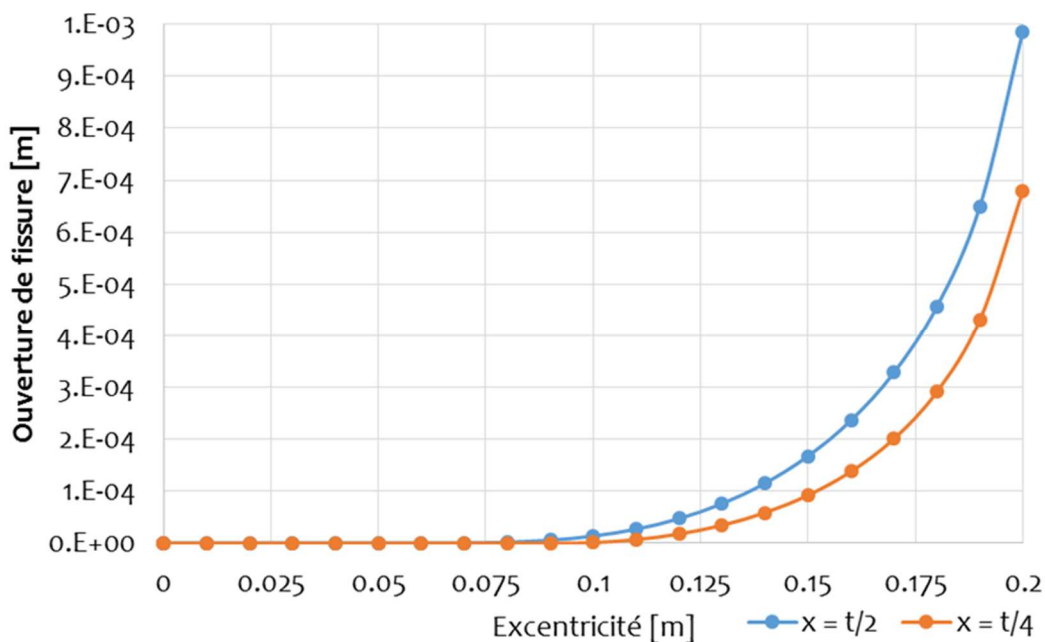


Figura 73: apertura del giunto in fz. dell'eccentricità

Si constata che l'apertura massima a $t/2$ vale 1 mm e a $t/4$ vale 0.7 mm. La guarnizione EPDM si trova tra $t/2$ e $t/4$.

L'offset legato alla precisione di realizzazione dei conci ed al gioco di posa è generalmente compreso tra 1 e 6 mm all'intersezione tra giunti radiali e longitudinali come previsto in questo caso (giunti radiali sfalsati). Il gioco massimo è limitato dai bulloni tra conci (9 mm di offset massimo). Il gioco si traduce con un'apertura dei giunti al massimo pari al 10% del suo valore (quindi da 0.1 a 0.6 mm)

La geometria del giunto di conci permette infatti di limitare al massimo l'apertura delle guarnizioni EPDM a seguito del gioco di posa, siccome queste ultime sono situate in una scanalatura dedicata. Solo l'irregolarità della superficie di contatto cls-cls (precisione di planarità di 0.2 a 0.5 mm) genera l'apertura del giunto.

Peraltro, per via di questa scanalatura destinata ad accogliere la guarnizione, le reazioni di pull out subite dalla vite di connessione in reazione alla messa in compressione delle guarnizioni sono parimenti limitate dalle dimensioni ridotte dall'intaglio. La forza necessaria per mettere in contatto le due superfici di cls è bassa.

Alla luce di queste considerazioni, i valori dell'apertura sono più che compatibili con le guarnizioni di tipo M385 87A tipo "Groene Hart" previste in progetto (si veda l'elaborato PRV_C3A_0896_33-02-02), che garantiscono, per pressioni idrostatiche molto elevate (>10 bar), un'apertura di 4 mm per un offset massimo teorico di 15 mm. Si riporta il grafico riportato nella scheda tecnica del fornitore.

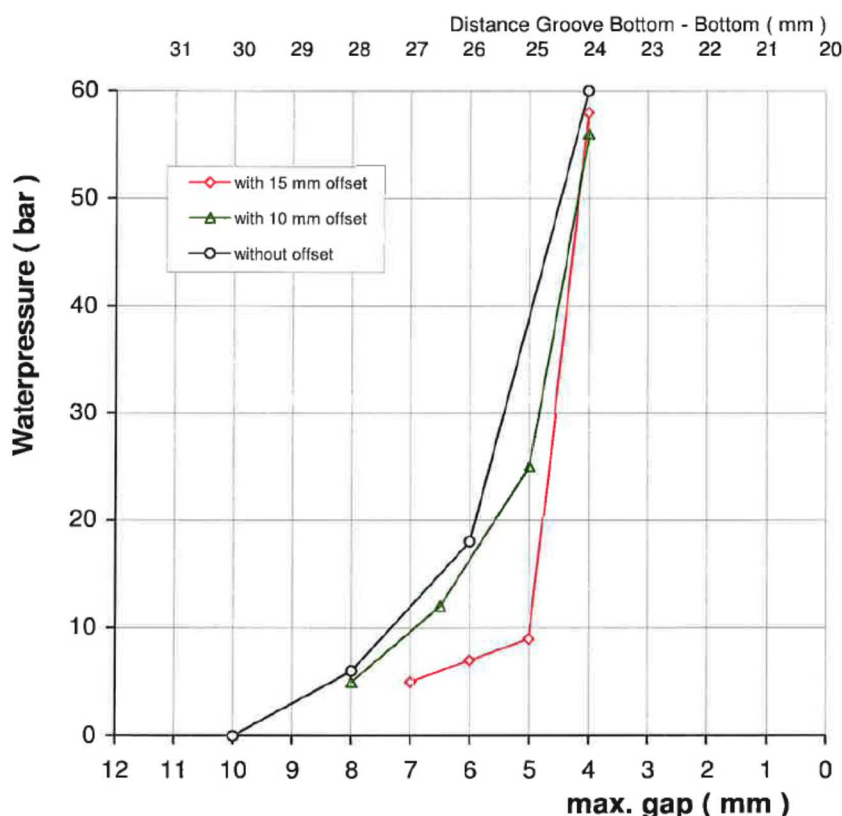


Figura 74: diagramma di impermeabilità all'acqua alle varie pressioni in funzione dell'offset tra i due conci attigui e del gap massimo nel giunto per il tipo di guarnizioni previsto in progetto

13. Ipotesi alla base del dimensionamento e rischi assunti

I calcoli presentati in questa relazione mostrano che le due sezioni tipo di conci previste, TM40 e TM45, risultano adeguate alle combinazioni di carico ed al contesto geomeccanico ed idrogeologico previsionale.

Le verifiche sono basate su un certo numero di ipotesi e di situazioni, che sono illustrate qui di seguito, al fine di evidenziare i limiti di validità dei presenti calcoli e, in alcuni casi, i rischi che implicano le scelte effettuate:

- Le verifiche sono basate sullo stato attuale delle conoscenze geologiche/geomeccaniche ed idrogeologiche. Il livello di affidabilità di tali previsioni è stimato tramite il metodo del R-index. Si vedano in merito gli elaborati PRV_C3B_0088e0089_00-06-00 relativi ai rischi geologici. In fase esecutiva, le ipotesi di calcolo dovranno essere convalidate sulla base di indagini complementari ed eventualmente riviste nel caso di condizioni più sfavorevoli di quelle previste. Al tempo stesso, si mette in evidenza come il dimensionamento dei conci nei micascisti di Clarea, in cui il grado di affidabilità è più alto data la presenza del cunicolo della Maddalena, è particolarmente prudentiale (vedere § 7).
- Nelle zone di faglia con notevole riduzione dell'indice GSI ($GSI < 45$), si è considerato l'uso di sovrascavi nella testa fresante (fino a 20 cm con dispositivi), al fine di prevenire o comunque limitare il più possibile il contatto tra scudo e ammasso roccioso, con conseguenti riduzioni della pressione sul rivestimento. Il controllo delle deformazioni e l'uso di sovrascavi dovrà essere oggetto di particolari attenzioni durante l'avanzamento della macchina.

- Nelle tratte drenate, si assume che il sistema di drenaggio, così come descritto nella relazione PRV_C3A_3956_26-19-40, sia completamente efficace tale da non generare pressione idrostatiche sul rivestimento. Nelle zone di maggior venute d'acqua, la spaziatura tra fori di drenaggio può essere ridotta rispetto ai 5.4 m previsti (si tratta di una spaziatura massima). Un'ispezione regolare di tali fori nelle zone con venute d'acqua, con conseguente intervento in caso di necessità, deve essere prevista per garantire che quest'ipotesi sia valida durante l'intera durata di vita dell'opera. Si veda la relazione PRV_C3A_0435_26-19-00 per le ragioni alla base del sistema di riempimento del vuoto anulare per le sezioni drenate e per le ipotesi generali relative al sistema di impermeabilizzazione e drenaggio.
- La stabilità della struttura (conci ed anelli) in caso di incendio è garantita per una durata di 4 ore secondo la curva di incendio ISO 834, 2 ore secondo la curva HC e 2 ore secondo la curva RWS, lungo tutta la tratta scavata con TBM scudata. Tali resistenze al fuoco sono state definite sulla base della normativa francese ITI 98-300 e della norma italiana UNI 11076. Questo in conformità con le STI (regolamento UE n° 1303/2014) per le quali "l'integrità della struttura deve mantenersi, in caso di incendio, **per un periodo sufficientemente lungo** per consentire l'autosoccorso e l'evacuazione dei passeggeri e del personale e l'intervento delle squadre di soccorso senza il rischio di crollo strutturale". Nelle NTC 2008 questo si traduce con il livello di prestazione III in caso di incendi che viene definito come "Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza". Specifiche verifiche sono state eseguite nelle sezioni di calcolo determinanti. Al fine di ottenere le prestazioni richieste, il cls deve contenere al suo interno fibre di polipropilene con tasso pari ad almeno 2 kg/m³. Inoltre, sotto la Val Cenischia è necessario applicare dei fogli di protezione termica del tipo Promatect-T di spessore 35 mm all'intradosso della galleria.
- In caso d'incendio, si garantisce che lungo tutta la tratta di TdB posta al di sotto del Val Cenischia (lunghezza: 1450 m), le guarnizioni sono protette con dispositivi adeguati (si veda il § 11.3) tali da mantenere intatta la loro funzione di impermeabilizzazione totale. E' l'unica tratta in cui si hanno acquiferi permeabili per porosità primaria ed inoltre presenta la copertura minore lungo il tracciato e le urbanizzazioni più importanti in superficie. Si ricorda che in prossimità dell'imbocco Est i cameroni presentano anch'essi una protezione al fuoco specifica.
- Per le altre tratte con impermeabilizzazione totale, in cui le venute d'acqua sono localizzate (venute di una certa importanza sono previste solo nelle carniolate della zona a scaglie), si ammette la possibilità che le guarnizioni possano perdere il loro ruolo di impermeabilizzazione in caso di incendio. Sussiste quindi il rischio di venute d'acqua nel tunnel, sebbene limitato dalla presenza della malta cementizia, con conseguenze sullo stato interno della galleria, compresi gli impianti, e sull'abbassamento della falda fino al ripristino delle condizioni iniziali. Si ricorda che in queste zone si ha già un abbassamento temporaneo della falda durante lo scavo. Inoltre si sottolinea come questo non implichi problemi strutturali per la durata necessaria alla gestione dell'emergenza.
- Per le tratte drenate, in caso di incendio, sussiste parimenti il rischio di fuoriuscite d'acqua in corrispondenza dei giunti, ma le venute d'acqua maggiori si concentreranno comunque sui fori di drenaggio.

14. Tassi d'armatura necessari e previsti

Nessuna armatura a taglio è richiesta. Le armature che risultano dai calcoli sono riportate per memoria nelle tabelle seguenti. Sono utilizzate per la verifica dei conci al di fuori della sezione corrente (ad es. nelle sezioni di innesto in Maddalena 2 o durante l'allargamento all'imbocco Susa).

Armature longitudinali	Armature circolari
9 cm ² /m ovvero 4.5 cm ² /m per lato	∅14@150, ovvero 10.2 cm ² /m

Tabella 39: Sezioni d'armatura circolari e longitudinali necessarie per TM45

Armature longitudinali	Armature circolari
8 cm ² /m ovvero 4 cm ² /m per lato	∅12@150 ovvero 7.54 cm ² /m

Tabella 40: Sezioni d'armatura circolari e longitudinali necessarie per TM40

Pressioni localizzate

Si sono determinate le armature di frettaggio superficiale e di fessurazione (cucitura di prima zona) secondo lo schema seguente:

	Orientazione	Frettaggio	Fessurazione
Giunti radiali	Spessore del concio	12.9 cm ²	55 cm ²
	Lunghezza del concio	12.9 cm ²	46 cm ²
Giunti longitudinali	Spessore del concio	12.27 cm ²	44 cm ²
	Larghezza del concio	12.27 cm ²	44.4 cm ²

Tabella 41: Armatura per frettaggio e fessurazione per TM45

	Orientazione	Frettaggio	Fessurazione
Giunti radiali	Spessore del concio	11.6 cm ²	43.2 cm ²
	Lunghezza del concio	11.6 cm ²	43.2 cm ²
Giunti longitudinali	Spessore del concio	5.1 cm ²	18.33 cm ²
	Larghezza del concio	5.1 cm ²	18.4 cm ²

Tabella 42: Armatura per frettaggio e fessurazione per TM40

Non bisogna disporre di armature a diffusione pura.

Sulla base delle armature richieste da tutte le combinazioni di carico analizzate sia nella zona centrale del concio sia nelle zone periferiche in prossimità dei giunti, si ottengono i seguenti tassi d'armatura:

- **TM45: 100 kg/m³**
- **TM40: 85 kg/m³**

15. Conclusione

Con la presente relazione si sono verificati i conci prefabbricati e l'anello completo sotto il carico permanente dell'ammasso, la pressione idrostatica laddove presente e i carichi variabili a SLE e SLU.

Le combinazioni considerate rappresentano l'involuppo dei carichi determinanti che gravano sui conci e sull'anello di rivestimento nelle fasi di costruzione e di esercizio, comprese le verifiche al fuoco (combinazione eccezionale).

I calcoli, condotti secondo le NTC 2008, hanno dimostrato che gli spessori dei conci di 40 cm per il TdB dalla pk 57+400 alla pk 61+076.5, associati ad una classe di resistenza del cls C40/50, e di 45 cm per il TdB dalla pk 53+514.8 BP / 53+690 BD alla pk 57+400 e nella galleria Maddalena 2, associati ad una classe di resistenza del cls C45/55, sono sufficienti per riprendere le sollecitazioni dovute all'ammasso ed alla pressione idrostatica laddove presente, sulla base delle ipotesi enunciate al § 13.

Si sono inoltre verificati i giunti, i bulloni e le guarnizioni, relativamente alla loro funzione strutturale nel corso della vita dell'opera.

Una tabella riepilogativa è presente per ciascuna sezione di verifica principale (TM45 e TM40) e presenta le azioni sollecitanti, le resistenze di calcolo, le sezioni resistenti, le armature considerate nei calcoli ed i fattori di sicurezza ottenuti. Tali tabelle sono contenute nel capitolo relativo alle verifiche al fuoco.

Allegato 1: Verifiche al fuoco – metodologia ed esempio

In questo allegato si richiamano i principi teorici relativi all'effetto di un incendio sulle strutture in c.a. e si illustra nel dettaglio la metodologia di verifica ed i fogli di calcolo usati per le sezioni tipo TM40 e TM45, nonché per le sezioni del Tunnel di Base lato Italia scavate in tradizionale o con TBM aperta che sono oggetto della relazione PRV_C3A_3949_26-19-00. Il caso rappresentativo illustrato è quello della sezione TM40 (sezione D) sottoposto alla curva di incendio ISO834 4h.

Principi di base

Le proprietà del cls variano con la temperatura. Una temperatura troppo elevata genera un'instabilità termiche del materiale che può eventualmente portare al collasso della struttura.

Il fuoco genera 3 effetti sulla struttura:

- Un abbassamento del modulo di Young dei materiali (fino a non avere più una fase elastica)
- Un abbassamento della resistenza dei materiali
- Una dilatazione termica.

La verifica al fuoco secondo le raccomandazioni del CETU, con l'ausilio dei files Excel e dei software disponibili da BG, si svolge in 4 grandi fasi:

1. Calcolo termico per determinare il campo di temperatura della sezione di cls esposta al fuoco;
2. Calcolo delle proprietà meccaniche della sezione riscaldata al fine di calcolare gli sforzi;
3. Calcolo numerico alle reazioni iperstatiche con il software SCIA per determinare gli sforzi termici nel rivestimento;
4. Verifica delle sezioni riscaldate a SLU secondo le NTC 2008.

Calcolo termico

Principi generali

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. Per maggiori dettagli sulla teoria in merito alle equazioni che reggono la propagazione del calore per convezione, conduzione ed irraggiamento, si veda la raccomandazione del CETU "comportement au feu des tunnel routiers".

Il calcolo è effettuato secondo il metodo delle differenze finite (discretizzando la sezione in un certo numero di elementi) ed i parametri utilizzati sono i seguenti:

- Conduzione:
 - C_p calore specifico del cls che varia in funzione della temperatura ($Jkg^{-1}K^{-1}$). Le variazioni sono quelle descritte nell'Eurocodice 2 – parte 1-2 con contenuto d'acqua dell' 1.5%;
 - ρ massa volumica del cls (kgm^{-3})

- λ conduttività termica del cls che varia in funzione della temperatura ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Le variazioni sono descritte nell'EC2-parte 1-2.
- Convezione:
 - α_c : coefficiente di scambio termico per convezione ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Conformemente alle raccomandazioni del CETU, α_c avrà il valore previsto dall'Eurocodice 1.
- Irraggiamento:
 - ε_m emissività della superficie delle pareti (cls)
 - ε_f emissività del fuoco
 - Φ fattore di forma

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

Le formule utilizzate per il calcolo della temperatura nell'elemento sono le seguenti:

- per l'elemento di superficie:

$$T_2(t+1) = T_0(t) + \left[\alpha_c \cdot (T_{gaz} - T_0(t)) + \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma_0 \Phi (T_{gaz}^4 - T_0(t)^4) - \lambda_c \frac{T_0(t) - T_1(t)}{\Delta_x} \right] \frac{\Delta_t}{\Delta_x \rho c_p}$$

- per l'elemento n°1 :

$$T_1(t+1) = T_1(t) + \left[\lambda_c \left(\frac{T_0(t) - T_1(t)}{2} - (T_1(t) - T_2(t)) \right) \right] \frac{\Delta_t}{\Delta_x^2 \rho c_p}$$

- per l'elemento n° n:

$$T_n(t+1) = T_n(t) + \lambda_c \left(T_{(n-1)}(t) - 2 T_{(n)}(t) + T_{(n+1)}(t) \right) \frac{\Delta_t}{\Delta_x^2 \rho c_p}$$

- per l'ultimo elemento (ad es. n° 29):

$$T_{29}(t+1) = T_{29}(t) + \left[\lambda_c \frac{T_{28}(t) - T_{29}(t)}{\Delta_x} - \alpha_c (T_{29}(t) - T_{air}) + \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma_0 \Phi (T_{29}(t)^4 - T_{air}^4) \right] \frac{\Delta_t}{\Delta_x \rho c_p}$$

con : $T_0(t)$: temperatura dell'elemento di superficie al tempo t [°C]
 $T_n(t)$: temperatura dell'elemento n al tempo t [°C]
 $T_{gaz}(t)$: temperatura del gas d'incendio al tempo t [°C]
 T_{air} : temperatura dell'aria sul lato freddo (estradosso del rivestimento della galleria) = 20 °C [°C]
 Δ_x : spessore degli elementi = $h/30 \leq 0,01$ m [m]
 Δ_t : divisione del tempo tra t et t+1 definito dall'utilizzatore [s]
 $\lambda_c, \alpha_c, \varepsilon_m, \varepsilon_f, \sigma_0, \Phi, \rho$ sono stati definiti in precedenza.

Si precisa che il flusso termico è la somma degli scambi per convezione e per irraggiamento:

- $\alpha_c (T_{gaz} - T_0) \Delta_t / (\rho c_p \Delta_x)$: : convezione
- $\varepsilon_m \varepsilon_f \sigma_0 \Phi (T_{gaz}^4 - T_0^4) \Delta_t / (\rho c_p \Delta_x)$: : scambio termico per irraggiamento.
- $\lambda_c (T_0 - T_1) \Delta_t / (\rho c_p \Delta_x^2)$: conduzione del calore nel cls.

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

C_p ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	ρ (kgm^{-3})	λ ($Wm^{-1}K^{-1}$)	α_c ($Wm^{-1}K^{-1}$) lato esposto al fuoco	α_c ($Wm^{-1}K^{-1}$) lato non esposto al fuoco	ε_m (-)	ε_f (-)	Φ (-)
F ($\theta^\circ C$) EC2	2300 (per θ 20 $^\circ C$)	F ($\theta^\circ C$) EC2	25 per ISO 834 e RWS 50 per HC	4	0.7	1	1

Tabella 43: Proprietà termiche

Nel caso di c.a. e tenuto conto della bassa percentuale di acciaio rispetto al cls, si ammette che le armature non partecipino alla propagazione del calore.

Dati di input

Si introducono prima di tutto i dati di input che riguardano il tipo di incendio (tipo di curva e sue caratteristiche) e dei materiali (calcestruzzo ed eventualmente protezione al fuoco – quando prevista). I dati di input sono inseriti nelle caselle gialle del foglio di calcolo (vedere figura seguente). La curva ISO 834 4h è definita nel foglio con l'altra sua dicitura ovvero CN (courbe normalisée).

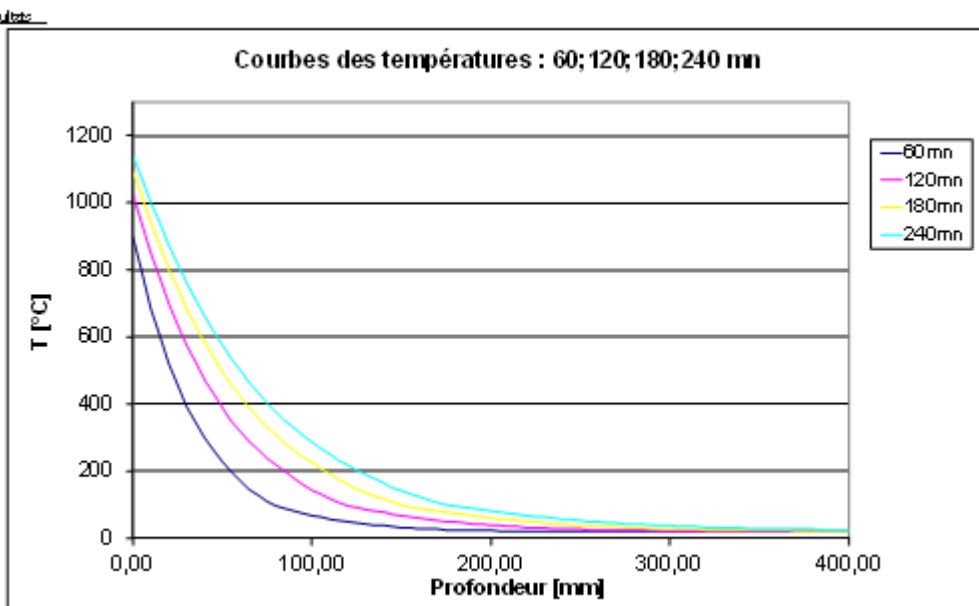
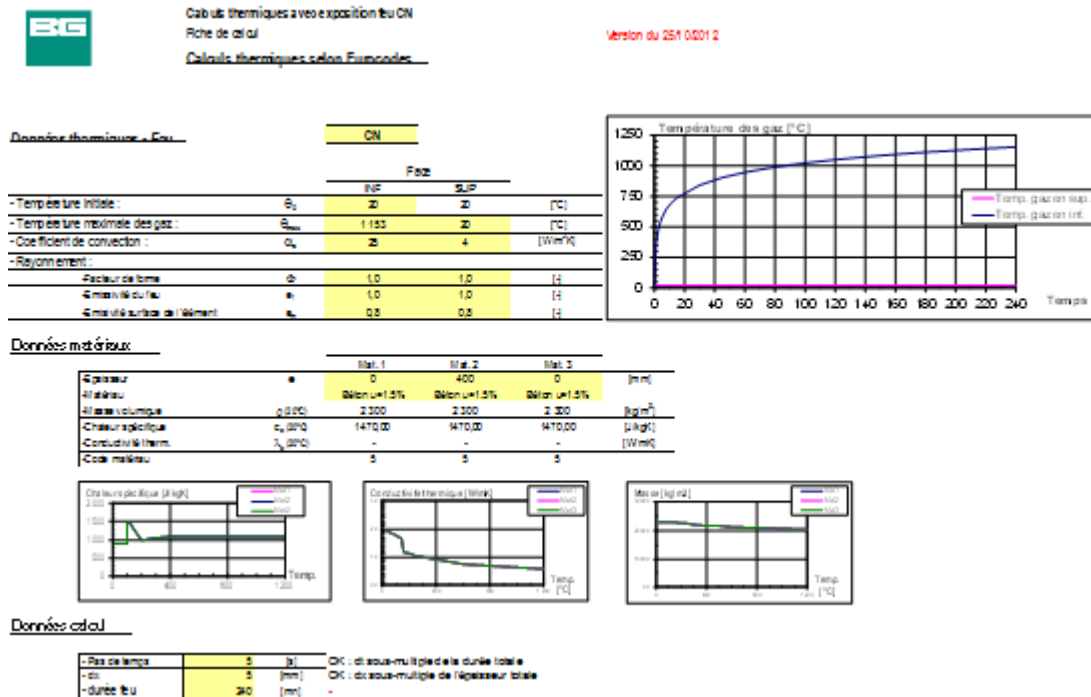


Figura 75: Dati di input per il calcolo termico (esempio curva ISO 834 4h)

Calcolo delle proprietà meccaniche

Una volta ottenuto il campo di temperatura l'obiettivo è di calcolare le caratteristiche meccaniche della sezione in cls, ev. armato da inserire come dati di input in SCIA.

Diminuzione delle proprietà meccaniche

Come spiegato in precedenza, 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:

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

dove:

k_{θ} 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:

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

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

Dilatazione termica

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:

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

$$\gamma_{th} = \frac{\iint_S yE_c(y)\alpha \times (T(y) - T_0)dS + \sum y_iE_s(y_i)\alpha \times (T(y) - T_0)A_i}{EI_j}$$

con :

ε_{th} la deformazione longitudinale dovuta agli effetti termici

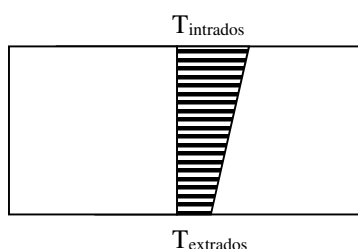
γ_{th} la curvatura dovuta agli effetti termici.

Quando impedita, questa dilatazione genera degli sforzi nella struttura.

Questi sforzi sono calcolati con il software SCIA Engineering 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 tratta delle temperature ottenute con le formule seguenti:

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

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



Dati di input

Operativamente, si usa un ulteriore foglio di calcolo sviluppato internamente da BG, nel quale si introducono naturalmente i risultati ottenuti dal precedente foglio di calcolo (calcolo termico). A questi dati si aggiungono le proprietà meccaniche e la geometria della struttura come mostrato in figura seguente.

Calcul Thermique - rigidité à froid

Données matériaux

Béton :

-Résistance caractéristique :	fck	C40	
-Module d'Young à froid :	Ecm(20°)	34 923	[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	0,4	[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	16			[mm]
-Enrobage :	e	50			[mm]
-Matériau n°	n°	2	2	2	

Armatures sup :

-Nb barres :	nb	6,666666667			[u]
-Diamètre :	f	16			[mm]
-Enrobage :	e	50			[mm]
		2	2	2	

Figura 76: Dati di input per il calcolo termico delle proprietà meccaniche: geometria e caratteristiche meccaniche dei componenti della struttura

Risultati

Si ricorda che tale calcolo ha lo scopo di determinare il modulo della sezione (EI) e la sua dilatazione termica (ϵ_{th} , γ_{th}).

Nella figura seguente sono presentati i dettagli del calcolo con:

y : profondità

T°: temperatura

E(T)/ E(T0): corrisponde al fattore di riduzione del modulo di Young (rilassamento)

E(T): modulo elastico del materiale.

I termini $E(y)*y^2$, $E(T)* E(T-20)*dy$ e $E(T)*y* (T-20)*dy$ corrispondono ai termini da integrare per la determinazione di (ϵ_{th} , γ_{th}).

Rapport de calcul du revêtement en voussoirs préfabriqués / Relazione di calcolo del rivestimento in conci prefabbricati

y	T	E(T)/E(T0)	E(T)	E(T)/E	E(T)/E ²	E(T)/(T-20) °C dy	E(T)/(T-20)°dy	armature		
								Diamètre	nb	coef.établissement
-0,2	1136	0,00	0	0	0,00	0	0,00			
-0,195	1068	0,00	0	0	0,00	0	0,00			
-0,19	1001	0,00	0	0	0,00	0	0,00			
-0,185	935	0,01	228	7,73	1033	1033	-191,15			
-0,18	873	0,01	442	14,33	1867	1867	-339,81			
-0,175	815	0,02	647	19,80	2570	2570	-449,87			
-0,17	760	0,02	839	24,23	3102	3102	-527,38			
-0,165	708	0,03	1018	27,72	3505	3505	-578,33			
-0,16	660	0,04	1225	32,91	4241	4241	-676,58			
-0,155	615	0,05	1458	39,25	4877	4877	-755,88			
-0,15	574	0,06	2025	49,01	66303	66303	-9445,38	16	0,000000007	0,388218708
-0,145	535	0,08	2885	60,88	7428	7428	-1070,78			
-0,14	498	0,10	3540	69,30	8470	8470	-1165,78			
-0,135	465	0,13	4804	83,91	10225	10225	-1381,79			
-0,13	433	0,16	5595	94,57	11558	11558	-1502,90			
-0,125	404	0,19	6922	101,90	12509	12509	-1563,83			
-0,12	378	0,22	7548	108,69	13445	13445	-1613,35			
-0,115	351	0,24	8521	112,88	14008	14008	-1621,31			
-0,11	327	0,27	9421	114,00	14484	14484	-1593,28			
-0,105	305	0,29	10257	113,08	14853	14853	-1536,59			
-0,1	286	0,32	11134	111,34	14782	14782	-1478,18			
-0,095	267	0,34	11988	108,18	14788	14788	-1404,88			
-0,09	249	0,37	12780	103,92	14650	14650	-1318,53			
-0,085	233	0,39	13519	97,88	14397	14397	-1223,75			
-0,08	218	0,41	14209	90,93	14053	14053	-1124,20			
-0,075	204	0,43	14852	83,94	13637	13637	-1022,74			
-0,07	190	0,45	15704	78,95	13261	13261	-935,27			
-0,065	177	0,48	16850	70,35	13038	13038	-847,49			
-0,06	163	0,50	17591	63,33	12590	12590	-755,42			
-0,055	151	0,53	18457	55,83	12090	12090	-653,82			
-0,05	141	0,55	19153	47,88	11590	11590	-578,32			
-0,045	132	0,57	19777	40,85	11080	11080	-497,71			
-0,04	123	0,58	20382	32,81	10515	10515	-420,82			
-0,035	115	0,60	20958	23,89	9938	9938	-347,84			
-0,03	107	0,62	21524	19,37	9345	9345	-280,35			
-0,025	99	0,63	22105	13,82	8771	8771	-219,28			
-0,02	95	0,65	22803	9,12	8555	8555	-171,11			
-0,015	91	0,67	23484	5,28	8323	8323	-124,85			
-0,01	87	0,69	24093	2,41	8077	8077	-80,77			
-0,005	83	0,71	24691	0,82	7820	7820	-39,10			
0	80	0,72	25261	0,00	7555	7555	0,00			
0,005	78	0,74	25805	0,85	7284	7284	38,42			
0,01	73	0,75	26323	2,83	7007	7007	70,07			
0,015	70	0,77	26817	8,03	6729	6729	100,93			
0,02	67	0,78	27288	15,92	6449	6449	128,99			
0,025	64	0,79	27736	17,34	6170	6170	154,28			
0,03	62	0,81	28182	25,35	5894	5894	178,81			
0,035	59	0,82	28597	35,00	5620	5620	196,71			
0,04	57	0,83	28952	46,32	5352	5352	214,08			
0,045	55	0,84	29318	59,37	5088	5088	228,97			
0,05	53	0,85	29681	74,15	4831	4831	241,58			
0,055	51	0,86	29998	90,71	4581	4581	251,95			
0,06	49	0,87	30297	109,07	4338	4338	260,30			
0,065	47	0,88	30589	129,24	4103	4103	266,72			
0,07	45	0,88	30855	151,24	3877	3877	271,38			
0,075	44	0,89	31125	175,08	3659	3659	274,42			
0,08	42	0,90	31371	200,77	3450	3450	275,97			
0,085	41	0,90	31601	228,32	3249	3249	276,18			
0,09	39	0,91	31819	257,73	3058	3058	275,19			
0,095	38	0,92	32022	289,00	2875	2875	273,14			
0,1	37	0,92	32214	322,44	2702	2702	270,18			
0,105	36	0,93	32393	357,13	2537	2537	266,38			
0,11	35	0,93	32561	393,98	2381	2381	261,92			
0,115	34	0,94	32717	432,88	2234	2234	256,91			
0,12	33	0,94	32863	473,23	2095	2095	251,45			
0,125	32	0,94	32999	515,81	1965	1965	245,87			
0,13	31	0,95	33125	559,81	1844	1844	239,88			
0,135	30	0,95	33242	605,83	1730	1730	233,52			
0,14	30	0,95	33350	653,88	1624	1624	227,35			
0,145	29	0,96	33449	703,27	1526	1526	221,24			
0,15	29	0,96	33541	754,88	1434	1434	215,04	16	0,000000007	1
0,155	28	0,96	33624	807,92	1352	1352	208,55			
0,16	28	0,96	33700	862,72	1278	1278	204,13			
0,165	27	0,97	33769	919,35	1207	1207	199,09			
0,17	27	0,97	33830	977,70	1144	1144	194,51			
0,175	26	0,97	33885	1037,74	1088	1088	190,45			
0,18	26	0,97	33934	1099,48	1039	1039	186,99			
0,185	26	0,97	33978	1162,84	996	996	184,18			
0,19	26	0,97	34013	1227,85	958	958	182,11			
0,195	25	0,97	34043	1294,48	927	927	180,81			
0,2	25	0,98	34069	1362,71	902	902	180,37			

Tabella 44: Dettagli del calcolo delle proprietà meccaniche

La sintesi dei risultati è mostrata in figura seguente.

Resultats

ϵ_{m}/α	65,46
ν_{m}/α	302,80

E	21474,23
EI	102,84
ES	8589,69
I	4,79E-03
l_0 (à froid)	5,33E-03
coef réduction sur I	8,98E-01

ΔT_{inf}	126,02
ΔT_{sup}	4,90

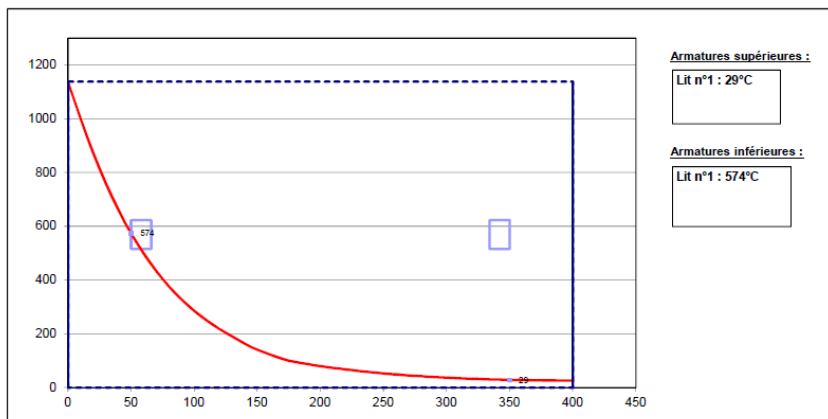


Figura 77: Sintesi dei risultati del calcolo delle proprietà meccaniche

I risultati da inserire in SCIA sono:

- il modulo "E" e "coef réduction sur I", che rappresentano il rilassamento della sez. riscaldata
- la dilatazione termica della sezione, che è caratterizzata da " ΔT_{inf} " e " ΔT_{sup} ".

Verifica delle sezioni riscaldate a SLU

Le verifiche al fuoco vengono condotte secondo l'Eurocodice 2 - parte 1 – 2. Si considera la combinazione eccezionale.

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:

- Cls: curva 1, cls ordinario per aggregati silicei
- 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:

$E_{d,fi} = \eta_{fi} \cdot E_f + A_d$ 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 calcolati secondo il metodo indicato in precedenza (si considerano le coppie Nmax, M-; Nmax, M+; N, Mmin; N, Mmax).

Allegato 2: Verifiche al fuoco - sforzi nella sezione con cerniere

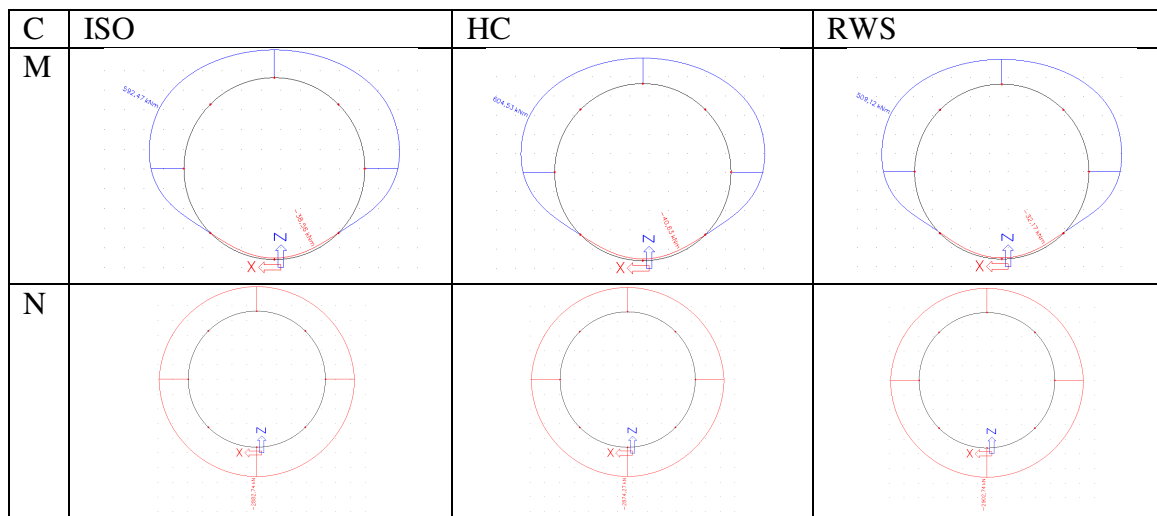


Tabella 45: Sforzi nella sezione C in caso di incendio

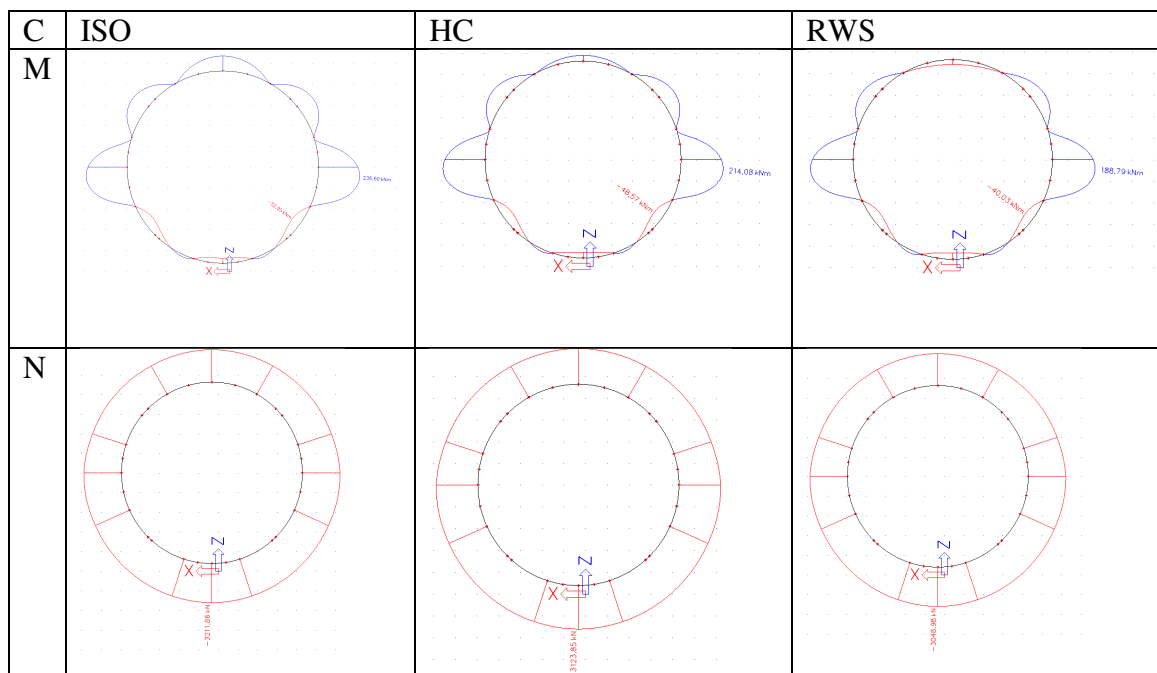


Tabella 46: Sforzi nella sezione C con cerniere in caso di incendio

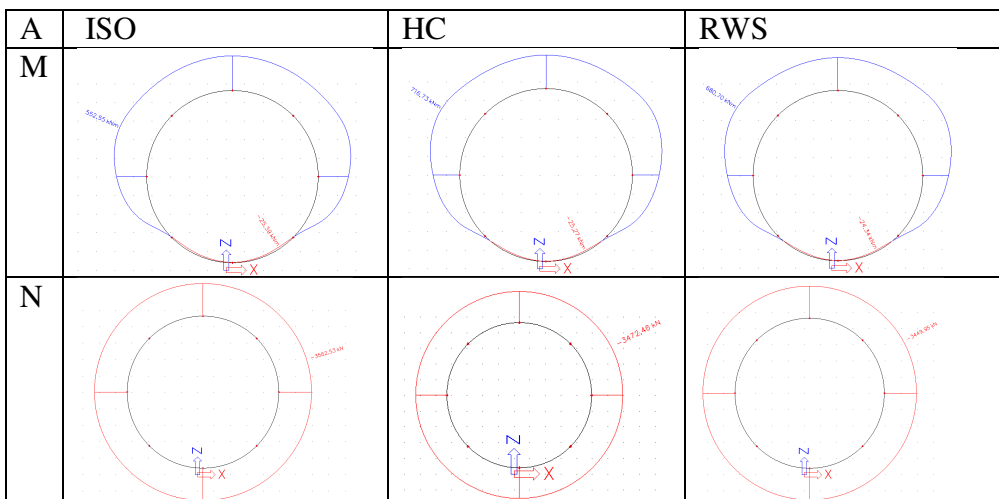


Tabella 47: Sforzi nella sezione A in caso di incendio

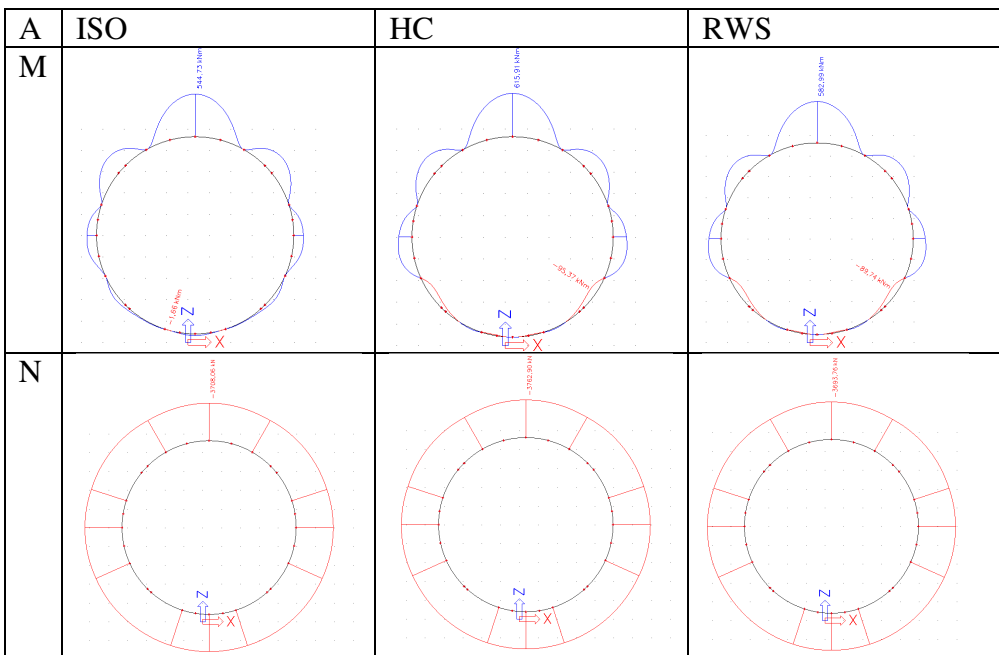


Tabella 48: Sforzi nella sezione A con cerniere in caso di incendio

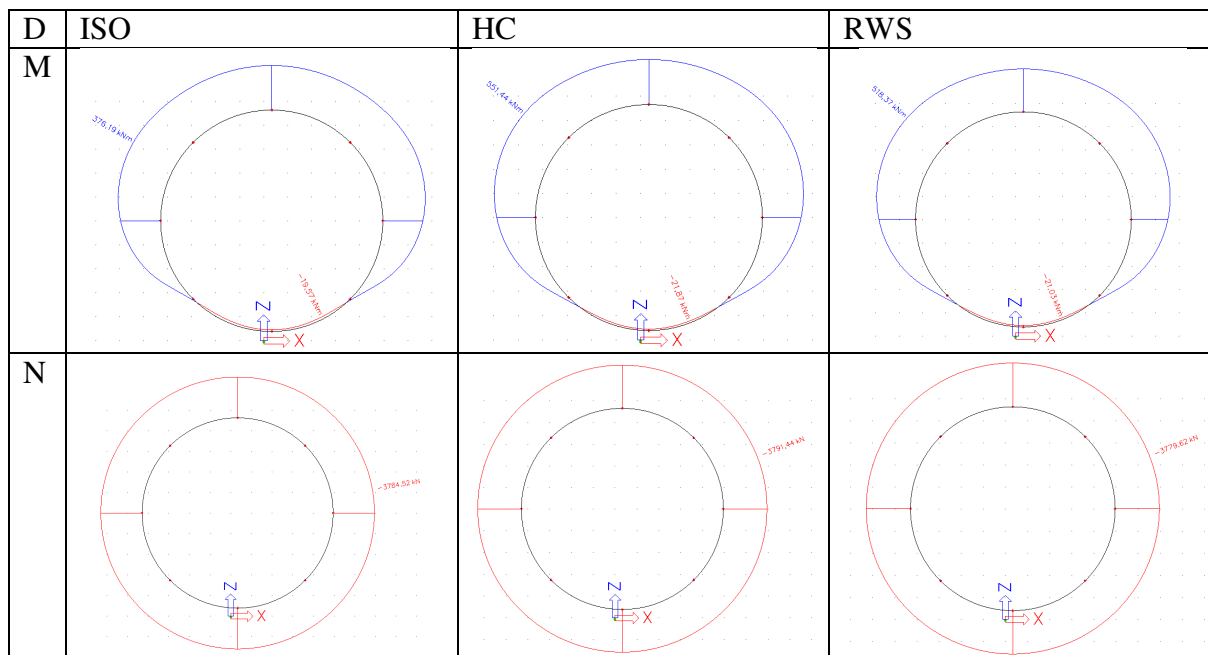


Tabella 49: Sforzi nella sezione D in caso di incendio

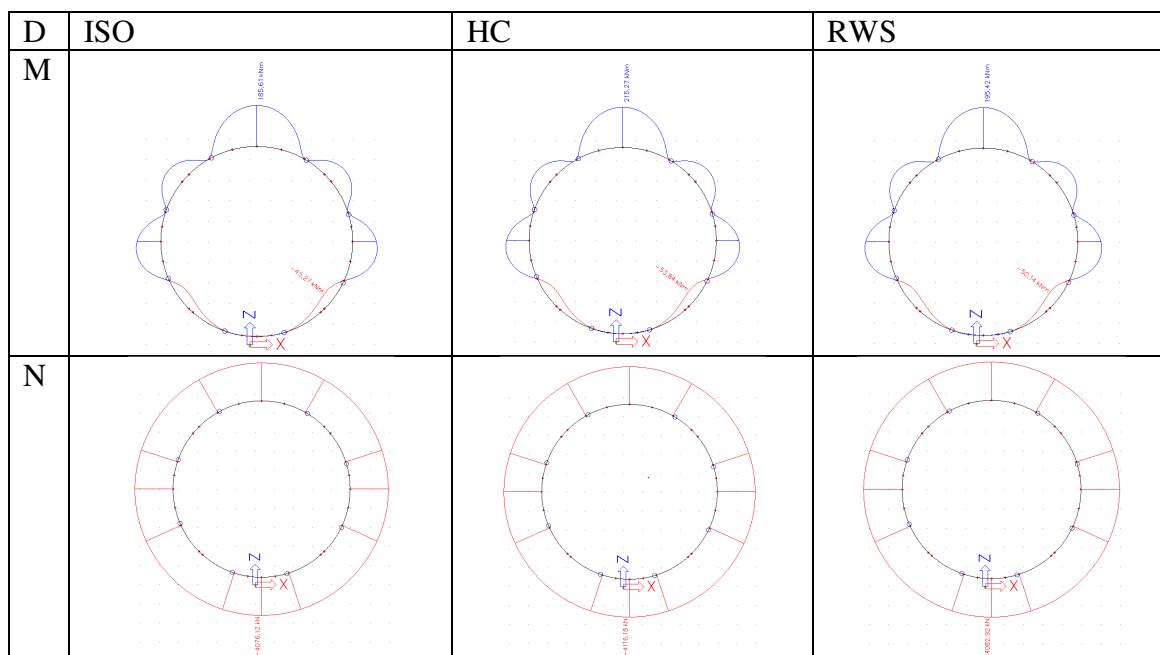


Tabella 50: Sforzi nella sezione D con cerniere in caso di incendio

Allegato 3: Diagrammi di interazione - sforzi nella sezione con cerniere



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 =	0,45	m																																
Section	0,45	m ²																																
Béton																																		
Résistance du béton fck =	45	MPa																																
yc =	1,5																																	
acc.pl et act.pl =	0,85																																	
Acier																																		
σe	450	MPa																																
Es	200000	MPa																																
ys =	1,15																																	
<table border="1"> <tr> <td>nbre barres</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td></td> </tr> <tr> <td>diamètre</td> <td>6,6667</td> <td>6,667</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>enrobage à l'axe</td> <td>14</td> <td>14</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>section (cm²)</td> <td>0,057</td> <td>0,393</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>cm²</td> </tr> <tr> <td></td> <td>10,26</td> <td>10,26</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					nbre barres	1	2	3	4		diamètre	6,6667	6,667	0	0	mm	enrobage à l'axe	14	14	0	0	mm	section (cm ²)	0,057	0,393	0	0	cm ²		10,26	10,26			
nbre barres	1	2	3	4																														
diamètre	6,6667	6,667	0	0	mm																													
enrobage à l'axe	14	14	0	0	mm																													
section (cm ²)	0,057	0,393	0	0	cm ²																													
	10,26	10,26																																

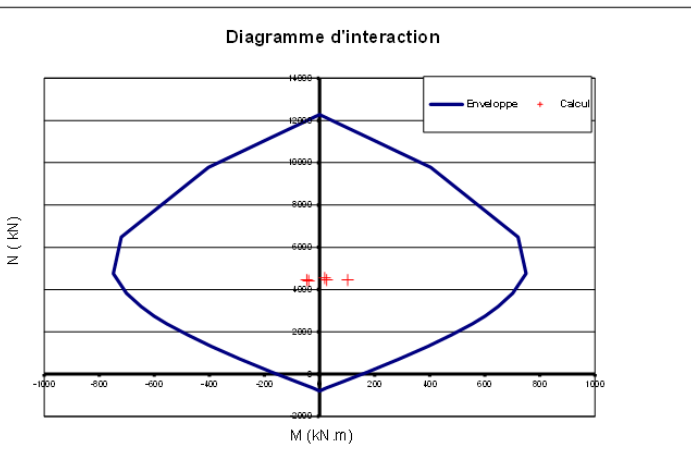


Figura 78: Verifica della sezione A con cerniere a SLU

FS=7.1



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 =	0,45	m																																
Section	0,45	m ²																																
Béton																																		
Résistance du béton fck =	45	MPa																																
yc =	1,5																																	
acc.pl et act.pl =	0,85																																	
Acier																																		
σe	450	MPa																																
Es	200000	MPa																																
ys =	1,15																																	
<table border="1"> <tr> <td>nbre barres</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td></td> </tr> <tr> <td>diamètre</td> <td>6,6667</td> <td>6,667</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>enrobage à l'axe</td> <td>14</td> <td>14</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>section (cm²)</td> <td>0,057</td> <td>0,393</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>cm²</td> </tr> <tr> <td></td> <td>10,26</td> <td>10,26</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					nbre barres	1	2	3	4		diamètre	6,6667	6,667	0	0	mm	enrobage à l'axe	14	14	0	0	mm	section (cm ²)	0,057	0,393	0	0	cm ²		10,26	10,26			
nbre barres	1	2	3	4																														
diamètre	6,6667	6,667	0	0	mm																													
enrobage à l'axe	14	14	0	0	mm																													
section (cm ²)	0,057	0,393	0	0	cm ²																													
	10,26	10,26																																

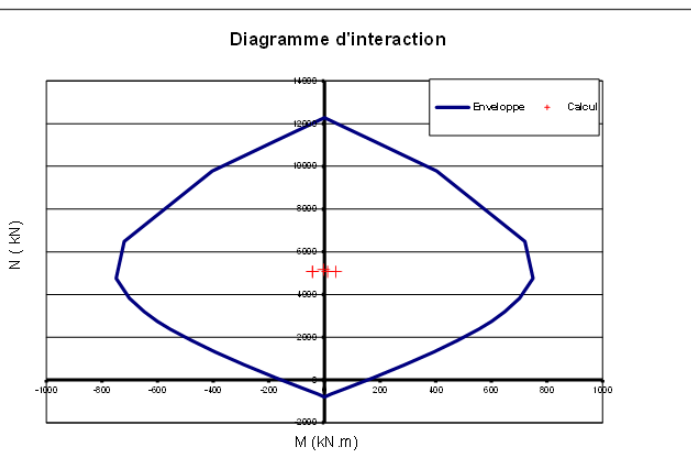


Figura 79: Verifica della sezione B con cerniere a SLU

FS=17.7



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

Données

Section				
Largueur section b =	1	m		
Epaisseur section hw =	0,45	m		
Section	0,45	m ²		
Béton				
Résistance du béton fck =	45	MPa		
γc =	1,5			
acc.pl et act.pl =	0,85			
Acier				
σe	450	MPa		
Es	200000	MPa		
γs =	1,15			
nbre barres	6,6667	6,667	0	0
diamètre	14	14	0	0
enrobage à l'axe	0,057	0,393	0	0
section (cm ²)	10,26	10,26		

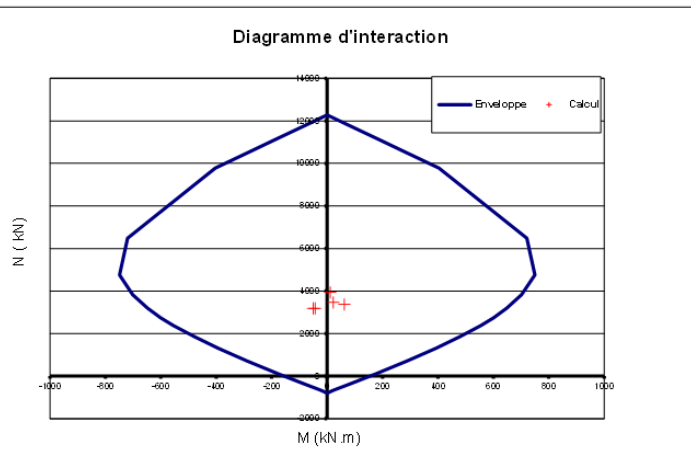


Figura 80: Verifica della sezione C con cerniere a SLU

FS=10.9



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

Données

Section				
Largueur section b =	1	m		
Epaisseur section hw =	0,4	m		
Section	0,4	m ²		
Béton				
Résistance du béton fck =	40	MPa		
γc =	1,5			
acc.pl et act.pl =	0,85			
Acier				
σe	450	MPa		
Es	200000	MPa		
γs =	1,15			
nbre barres	6,6667	6,667	0	0
diamètre	12	12	0	0
enrobage à l'axe	0,056	0,344	0	0
section (cm ²)	7,54	7,54		

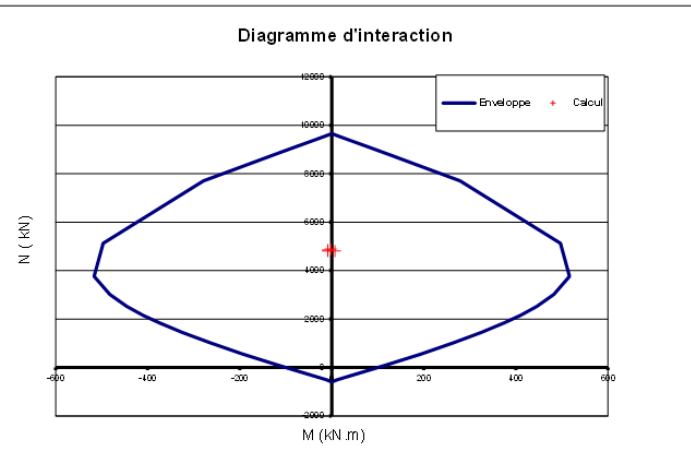


Figura 81: Verifica della sezione D con cerniere a SLU

FS=57.4