

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01

LINEA A.V. /A.C. TORINO – VENEZIA Tratta MILANO – VERONA
Lotto funzionale Brescia-Verona

PROGETTO ESECUTIVO

GA27 - GALLERIA ARTIFICIALE BRESCIA EST
DA PK 105+814 A PK 106+304

RELAZIONE DI VERIFICA DI RESISTENZA AL FUOCO GALLERIA ARTIFICIALE

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE LAVORI
Consorzio Cepav due	
Data: _____	Data: _____

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA/DISCIPLINA	PROGR	REV
I N O R	1 2	E	E 2	R O	G A 2 7 0 0	0 0 3	A

PROGETTAZIONE								IL PROGETTISTA
Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	
A	Emissione	F.MONACHELLO	19/07/19	C.BELTRAMI	19/07/19	Liani	19/07/19	Dott. Ing. Carlo M.A. BELTRAMI Ordine Ingegneri Milano n. A21004 Data: 19/07/19
B								
C								

CIG. 751447334A

File: INOR12EE2ROGA2700003A_10.docx



Progetto cofinanziato
dalla Unione Europea

CUP: F81H9100000008

INDICE

1.	INTRODUZIONE	4
1.1.	OGGETTO.....	4
1.2.	BREVE DESCRIZIONE DEL PROGETTO.....	4
2.	ELABORATI DI RIFERIMENTO.....	5
3.	NORMATIVE E SPECIFICHE DI RIFERIMENTO.....	7
3.1.	NORMATIVE.....	7
3.2.	SPECIFICHE TECNICHE.....	7
3.3.	ISTRUTTORIE DI RIFERIMENTO	7
4.	DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	8
4.1.	INQUADRAMENTO GENERALE	8
4.2.	GALLERIA GA27	8
5.	MATERIALI	12
5.1.	CALCESTRUZZO.....	12
5.2.	ACCIAIO.....	12
5.3.	DURABILITÀ.....	13
5.3.1.	<i>Ambiente di riferimento</i>	13
5.3.2.	<i>Copriferro di progetto</i>	13
6.	ASSUNZIONI DI CALCOLO	14
6.1.	GENERALITÀ.....	14
6.2.	ELEMENTI VERIFICATI.....	14
6.3.	COMBINAZIONI DI CARICO	14
6.4.	INCENDIO DI PROGETTO	14
6.5.	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	15
7.	VERIFICHE DI RESISTENZA AL FUOCO.....	16
7.1.	SOLLECITAZIONI.....	16
7.2.	FENOMENO DI SPALLING.....	18
7.3.	SEZIONI E GEOMETRIA	19



Doc. N.	Progetto INOR	Lotto 12	Codifica Documento E 2 RO GA 270 0 003	Rev. A	Foglio 3 di 32
---------	------------------	-------------	---	-----------	-------------------

7.4.	MODELLAMENTO DELLE DIVERSE SEZIONI.....	21
7.4.1.	<i>Geometria delle sezioni</i>	22
7.4.2.	<i>Condizioni al contorno</i>	22
7.4.3.	<i>Caratteristiche termiche del calcestruzzo</i>	23
7.4.4.	<i>Fattori di riduzione di resistenza dei calcestruzzi e le barre di armatura</i>	23
7.5.	VERIFICHE A PRESSO-FLESSIONE A T = 120 MIN	25
7.6.	VERIFICHE A TAGLIO A T = 120 MIN	31



1. INTRODUZIONE

1.1. OGGETTO

Oggetto specifico del documento è la relazione di verifica al fuoco della Galleria Artificiale Brescia Est (GA27) dalla pk 105+984.00 alla pk 106+234.00 prevista nel progetto della linea A.V. – A.C. Torino – Venezia lungo la tratta Milano – Verona, lotto funzionale Brescia-Verona.

1.2. BREVE DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'intervento è complessivamente suddiviso in tre diverse tratte:

- da pk 105+814.000 a pk 105+984.000: muro di controripa di lunghezza 170 m;
- da pk 105+984.000 a pk 106+100.000: galleria artificiale a singola canna di lunghezza 116 m;
- pk 106+100.000: cavalcaferrovia IV40;
- da pk 106+100.000 a pk 106+234.000: galleria artificiale a singola canna di lunghezza 134 m;
- da pk 106+234.000 a pk 106+304.000: muro di controripa di lunghezza 70 m.

L'opera è corrispondente alla WBS GA27. La progettazione del cavalcaferrovia IV40 viene trattata nella relativa WBS. Nel tratto in oggetto corre l'Interconnessione BS Est, con velocità di progetto $160 \text{ km/h} \leq V < 200 \text{ km/h}$ e interasse binari di 4.00 m.

La galleria artificiale è del tipo finestrata ed è collocata in adiacenza alla ferrovia esistente. È a sezione scatolare a singola canna, di larghezza 10.20 e altezza 8.35, con finestratura lato linea storica.

È prevista una nicchia al km 105+989 per remotizzatore, lato B.P., il cui asse è posto a 5m dall'inizio della GA27.

2. ELABORATI DI RIFERIMENTO

Nel seguito si riporta l'elenco elaborati della WBS GA27 da cui la presente relazione di calcolo costituisce parte integrante.

CODICE										DESCRIZIONE	
INOR	12	E	E2	R	O	GA	27	0	0	001	Relazione generale
INOR	12	E	E2	R	B	GA	27	0	0	001	Relazione geotecnica
INOR	12	E	E2	C	L	GA	27	0	0	001	Galleria artificiale - Relazione di calcolo
INOR	12	E	E2	C	L	GA	27	0	0	002	Galleria artificiale - Tabulati di calcolo
INOR	12	E	E2	R	O	GA	27	0	0	003	Relazione di verifica di resistenza al fuoco Galleria artificiale
INOR	12	E	E2	C	L	GA	27	0	0	003	Muri di imbocco - Relazione di calcolo
INOR	12	E	E2	C	L	GA	27	0	0	004	Muri di imbocco - Tabulati di calcolo
INOR	12	E	E2	C	L	GA	27	0	1	001	Opere di sostegno degli scavi - Relazione di calcolo
INOR	12	E	E2	C	L	GA	27	0	1	002	Opere di sostegno degli scavi - Tabulati di calcolo
INOR	12	E	E2	R	I	GA	27	0	6	001	Relazione di smaltimento acque di piattaforma
INOR	12	E	E2	4	T	GA	27	0	0	001	Tabella materiali
INOR	12	E	E2	P	8	GA	27	0	0	001	Planimetria di individuazione dell'opera
INOR	12	E	E2	F	6	GA	27	0	0	001	Profilo longitudinale generale dell'opera
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	0	001	Pianta e sezione longitudinale tav.1/6
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	0	002	Pianta e sezione longitudinale tav.2/6
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	0	003	Pianta e sezione longitudinale tav.3/6
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	0	004	Pianta e sezione longitudinale tav.4/6
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	0	005	Pianta e sezione longitudinale tav.5/6
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	0	006	Pianta e sezione longitudinale tav.6/6
INOR	12	E	E2	P	Z	GA	27	0	0	001	Planimetria di ubicazione delle indagini geognostiche
INOR	12	E	E2	F	6	GA	27	0	0	002	Profilo geotecnico in asse galleria
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	1	001	Pianta scavi Tav. 1/3
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	1	002	Pianta scavi Tav. 2/3
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	1	003	Pianta scavi Tav. 3/3
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	005	Sezioni tipo galleria
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	002	Sezioni tipo muri di linea
INOR	12	E	E2	P	Z	GA	27	0	0	002	Planimetria sistemazione definitiva
INOR	12	E	E2	W	A	GA	27	0	0	001	Sistemazione finale - Sezioni trasversali Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	W	A	GA	27	0	0	002	Sistemazione finale - Sezioni trasversali Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	A	GA	27	0	0	001	Carpenteria - Pianta, profilo e sezioni - Muri lato Ovest Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	A	GA	27	0	0	002	Carpenteria - Pianta, profilo e sezioni - Muri lato Ovest Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	A	GA	27	0	0	003	Carpenteria - Pianta, profilo e sezioni - Muri lato Est
INOR	12	E	E2	W	9	GA	27	0	1	001	Opere di sostegno e scavi - Sezioni trasversali Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	W	9	GA	27	0	1	002	Opere di sostegno e scavi - Sezioni trasversali Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	1	004	Planimetria di tracciamento opere di sostegno 1/3
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	1	005	Planimetria di tracciamento opere di sostegno 2/3
INOR	12	E	E2	P	A	GA	27	0	1	006	Planimetria di tracciamento opere di sostegno 3/3
INOR	12	E	E2	F	A	GA	27	0	1	001	Profilo longitudinale opere di sostegno - micropali Tav. 1/3
INOR	12	E	E2	F	A	GA	27	0	1	002	Profilo longitudinale opere di sostegno - micropali Tav. 2/3

Doc. N.

Progetto
INORLotto
12Codifica Documento
E E2 RO GA 270 0 003Rev.
AFoglio
6 di 32

INOR	12	E	E2	F	A	GA	27	0	1	003	Profilo longitudinale opere di sostegno - micropali Tav. 3/3
INOR	12	E	E2	F	A	GA	27	0	1	004	Profilo longitudinale opere di sostegno - paratia di pali 1/3
INOR	12	E	E2	F	A	GA	27	0	1	005	Profilo longitudinale opere di sostegno - paratia di pali 2/3
INOR	12	E	E2	F	A	GA	27	0	1	006	Profilo longitudinale opere di sostegno - paratia di pali 3/3
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	001	Concio 1 - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	002	Concio 1 - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	003	Conci 2-3-4-5-8-9-10-11 - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	004	Conci 2-3-4-5-8-9-10-11 - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	001	Concio 6 - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	004	Concio 6 - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	007	Concio 7 - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	008	Concio 7 - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	009	Concio 12 - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	010	Concio 12 - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	1	001	Palo tipo 1 - Armatura
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	1	002	Palo tipo 2 - Armatura
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	1	003	Palo tipo 3 - Armatura
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	1	004	Paratie di pali e micropali - Sezione tipo e dettagli
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	1	005	Paratie di pali e micropali - Armatura cordolo sommitale
INOR	12	E	E2	P	Z	GA	27	0	6	001	Pianta drenaggi di piattaforma
INOR	12	E	E2	P	Z	GA	27	0	6	002	Opere di drenaggio di superficie
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	9	001	Dettagli opere di impermeabilizzazione, barriere e recinzioni
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	019	Muri di imbocco lato Ovest - Concio A - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	006	Muri di imbocco lato Ovest - Concio A - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	012	Muri di imbocco lato Ovest - Concio B - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	006	Muri di imbocco lato Ovest - Concio B - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	013	Muri di imbocco lato Ovest - Conci C/D/E/F - Armatura Tav.1/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	008	Muri di imbocco lato Ovest - Conci C/D/E/F - Armatura Tav.2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	014	Muri di imbocco lato Ovest - Concio G - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	005	Muri di imbocco lato Ovest - Concio G - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	015	Muri di imbocco lato Est - Concio H - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	007	Muri di imbocco lato Est - Concio H - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	5	001	Muri di imbocco lato Ovest ed Est - Conci G/H - Armatura banchina e magrone
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	016	Muri di imbocco lato Est - Concio I - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	B	GA	27	0	0	003	Muri di imbocco lato Est - Concio I - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	017	Muri di imbocco lato Est - Concio L - Armatura Tav. 1/2
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	018	Muri di imbocco lato Est - Concio L - Armatura Tav. 2/2
INOR	12	E	E2	B	A	GA	27	0	1	001	Schema fasi costruttive
INOR	12	E	E2	P	6	GA	27	0	8	001	Interferenze con i sottoservizi
INOR	12	E	E2	C	L	GA	27	0	0	005	Vasca drenante ovest - Muro a L - Relazione di calcolo
INOR	12	E	E2	B	A	GA	27	0	0	004	Vasca drenante ovest - Muro a L - Pianta scavi e carpenteria muro
INOR	12	E	E2	B	Z	GA	27	0	0	011	Vasca drenante ovest - Muro a L - Armatura

3. NORMATIVE E SPECIFICHE DI RIFERIMENTO

3.1. NORMATIVE

- **Legge 05.11.1971 n. 1086** "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica"
- **D.P.R. n. 380/2001** e s.m.i. "Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia"
- **D. M. Infrastrutture 14 gennaio 2008 (NTC 2008)** "Nuove Norme tecniche per le costruzioni"
- **CIRCOLARE 2 febbraio 2009, n. 617** "Istruzione per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008"
- **UNI EN 1992-1-1 novembre 2005 (EC2)** "Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1: Regole generali e regole per edifici"
- **UNI EN 1992-1-2 aprile 2005 (EC2 "Progettazione strutturale contro l'incendio")** "Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio"
- **UNI EN 1998-5 gennaio 2005 (EC8)** "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica– Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici"
- **Regolamento U.E. nr. 1303/2014 della commissione del 18 novembre 2014** relativo alla specifica tecnica di interoperabilità concernente la «sicurezza nelle gallerie ferroviarie» del sistema ferroviario dell'Unione europea (*norma STI*)
- **AICAP-AGI (2012). Ancoraggi nei terreni e nelle rocce.** Raccomandazioni

3.2. SPECIFICHE TECNICHE

- Manuale di Progettazione delle Opere Civili. Parte II – Sezione 4 – Gallerie (RFI DTC SI GA MA IFS 001 A). Emissione 30/12/2016;
- Manuale di Progettazione delle Opere Civili. Parte II – Sezione 3 – Corpo Stradale (RFI DTC SI CS MA IFS 001 A). Emissione 30/12/2016;
- Manuale di Progettazione delle Opere Civili. Parte II – Sezione 6 – Sagome e Profilo minimo degli ostacoli (RFI DTC SI CS MA IFS 003 A). Emissione 30/12/2016;
- Manuale di Progettazione delle Opere Civili. Parte II – Sezione 2 – Ponti e strutture (RFI DTC SI PS MA IFS 001 A). Emissione 30/12/2016;
- "Criteri per il dimensionamento e verifiche delle gallerie artificiali D.M. 2008" rev. 01 del 26.01.2017 – ITALFERR U.O. Gallerie

3.3. ISTRUTTORIE DI RIFERIMENTO

- IN0500D09ISGAXX00001A_IN05-RV-0000000565
- IN0500D11ISGA0000201B_IN05-RV-0000000779
- IN0500D11ISGA2700107B_IN05-RV-0000000773
- IN0500D11ISID0000004A_IN05_RV_0000000626
- IN0500D11ISGA000X101A_IN05-RV-0000000570

4. DESCRIZIONE DELL'OPERA

4.1. INQUADRAMENTO GENERALE

L'opera in progetto, posta tra le progressive 105+814.000 e 106+304.000, attraversa la collina di Ciliverghe, incidendola a Sud della ferrovia esistente che le corre in affiancamento.

La galleria artificiale è stata inserita come opera di mitigazione ambientale richiesta in Conferenza dei Servizi dal Comune di Mazzano (BS): per garantire un miglior inserimento ambientale nei pressi della collina in zona Lazzareto, si prevede un ripristino morfologico in continuità con la collina esistente mediante ritombamento di circa 1m di spessore al di sopra della galleria.

Per ridurre lo sbancamento durante la fase realizzativa, sono state previste opere di sostegno provvisoria. Alla luce del profilo geotecnico, al fine di migliorare le prestazioni meccaniche del terreno, si prevede una bonifica di spessore pari a circa 2,50 m dalla base dello strato di magrone su cui appoggiano le fondazioni dei manufatti. La quota di intradosso della bonifica dovrà essere verificata ed eventualmente definita in dettaglio localmente alla luce delle effettive condizioni del terreno riscontrate durante lo scavo. Per eventuali sovrascavi, le opere provvisorie degli scavi andranno riverificate di conseguenza.

4.2. GALLERIA GA27

La galleria artificiale è a sezione scatolare a singola canna, di larghezza 10.20 e altezza 8.35. La distanza tra P.F. e soletta superiore è 6.80m, mentre la distanza tra P.F. e fondazione è pari a 1.55m: tale distanza è superiore a quella prevista dal Manuale di Progettazione (scheda n°88 dell'Allegato 2 RFI DTC SI GA MA IFS 001 A), pari a 1.40m, per consentire l'approfondimento della quota della canaletta idraulica centrale e garantire lo smaltimento delle acque meteoriche, dal momento che la livelletta ha quota costante ed ha pendenza pressoché nulla; il piano del ferro è pari a 144.27m s.l.m.

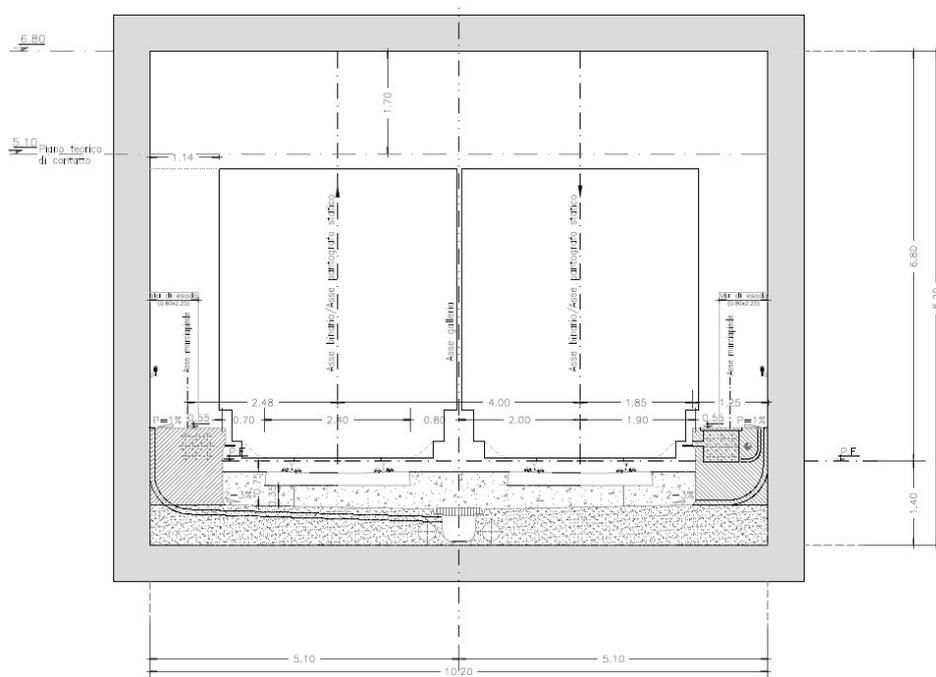


Figura 1. Sezione in rettifilo da Manuale di Progettazione (scheda n°88 dell'Allegato 2 RFI DTC SI GA MA IFS 001 A)

I piedritti e la copertura hanno spessore pari a 1.20 m, mentre la fondazione ha spessore pari a 1.60 m e appoggia su uno strato di magrone di 15 cm, necessario per la regolarizzazione del fondo scavo e la protezione dell'impermeabilizzazione.

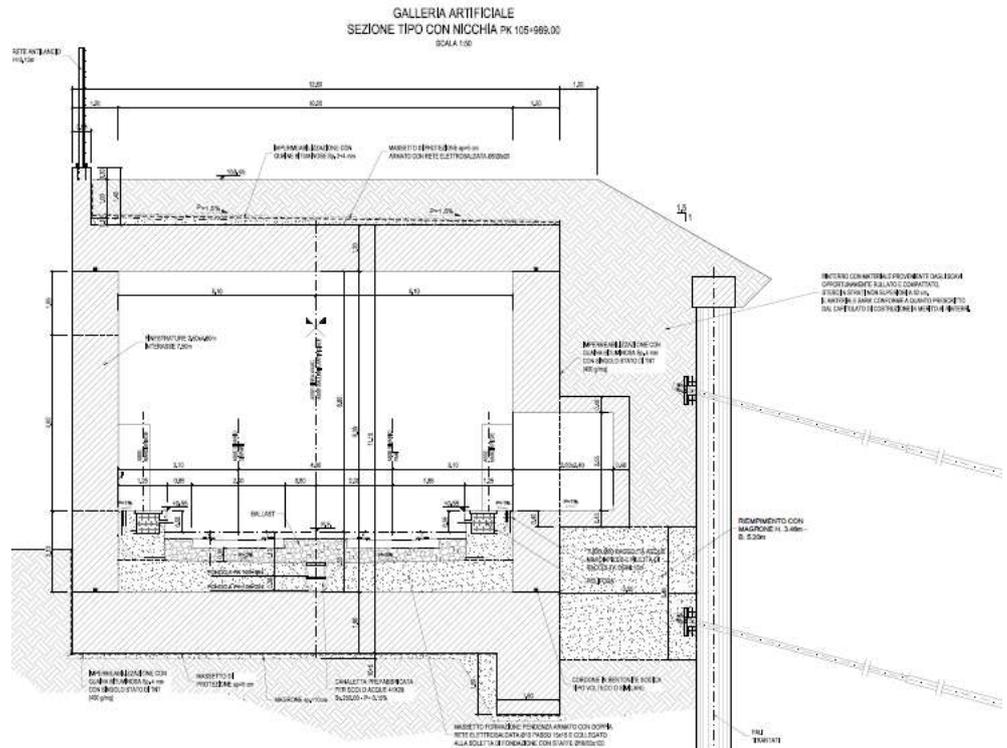


Figura 3. GA27-sezione tipo in corrispondenza della nicchia

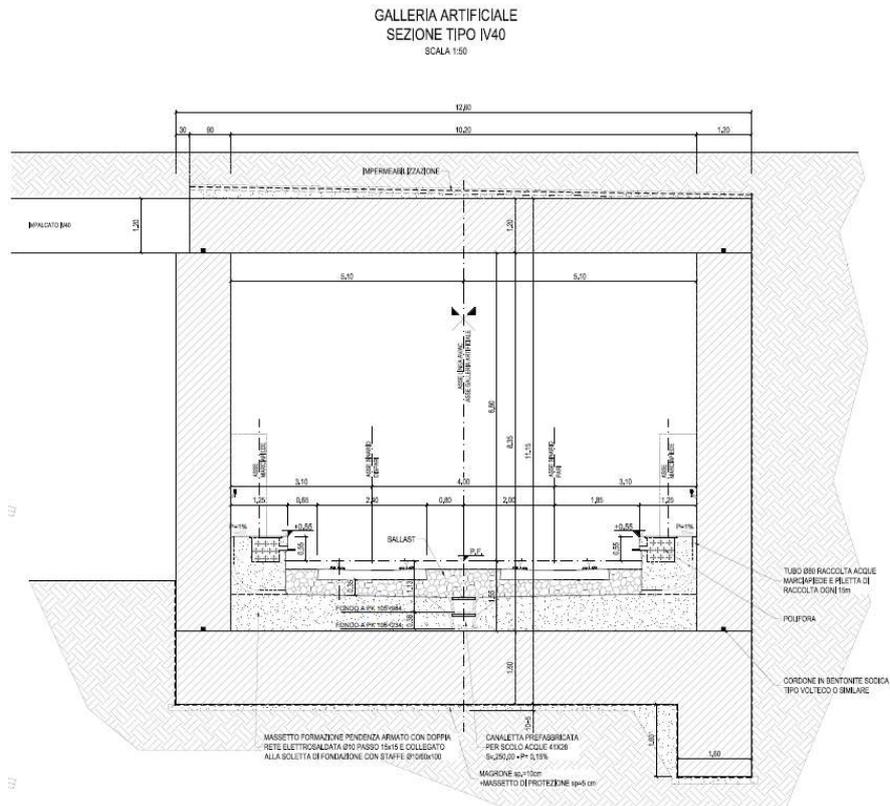


Figura 4. GA27-sezione tipo in corrispondenza del cavalcaferrovia IV40

Tabella 1. Dimensioni sezione trasversale tipo – Galleria GA27.

Larghezza totale scatolare	L	[m]	12.60
Larghezza utile scatolare	l	[m]	10.20
Altezza totale scatolare	H	[m]	11.15
Altezza utile scatolare	h	[m]	8.35
Spessori soletta, piedritti e fondazione	S _s , S _p , S _i	[m]	1.2;1.2;1.6
Profondità del modello a striscia	t	[m]	1.00
Altezza ricoprimento superiore	H _{ric,sup}	[m]	1.18
Altezza al piano ferro	H _{r,int}	[m]	1.55
Altezza massetto	H _{mass}	[m]	0.75
Altezza ballast	H _{ballast}	[m]	0.80
Altezza marciapiede	H _{marciap}	[m]	2.10
Profondità dente	H _{dente}	[m]	1.60
Larghezza dente	B _{dente}	[m]	1.60

Tabella 2. Dimensioni concio tipo – Galleria GA27.

			Piedritto SX	Piedritto DX
Sviluppo	L _{concio}	[m]	22.5	22.5
Altezza finestra	H _{fin.}	[m]	-	4.6
Lunghezza finestra	L _{fin.}	[m]	-	2.5

5. MATERIALI

5.1. CALCESTRUZZO

Calcestruzzo per elevazione:

Classe di resistenza		C30/37	
Classe di esposizione		XC2	
Resistenza caratteristica cubica a compressione	R_{ck}	37.0	N/mm ²
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	f_{ck}	30.7	N/mm ²
Resistenza media a compressione	f_{cm}	38.7	N/mm ²
Resistenza cilindrica a compressione di progetto	f_{cd}	17.4	N/mm ²
Resistenza media a trazione	f_{ctm}	2.94	N/mm ²
Resistenza caratteristica a trazione (frattile 5%)	$f_{ctk,5\%}$	2.06	N/mm ²
Modulo elastico istantaneo medio (secante)	E_{cm}	33019.43	N/mm ²
Tensione massima di compressione in esercizio (comb.RARA)	σ_c	16.89	N/mm ²

Calcestruzzo per fondazione:

Classe di resistenza		C30/37	
Classe di esposizione		XC2	
Resistenza caratteristica cubica a compressione	R_{ck}	37.0	N/mm ²
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	f_{ck}	30.7	N/mm ²
Resistenza media a compressione	f_{cm}	38.7	N/mm ²
Resistenza cilindrica a compressione di progetto	f_{cd}	17.4	N/mm ²
Resistenza media a trazione	f_{ctm}	2.94	N/mm ²
Resistenza caratteristica a trazione (frattile 5%)	$f_{ctk,5\%}$	2.06	N/mm ²
Modulo elastico istantaneo medio (secante)	E_{cm}	33019.43	N/mm ²
Tensione massima di compressione in esercizio (comb.RARA)	σ_c	16.89	N/mm ²

5.2. ACCIAIO

Acciaio d'armatura:

Classe di acciaio		B450	
Tensione caratteristica di rottura	f_{tk}	540	N/mm ²
Tensione caratteristica di snervamento	f_{yk}	450	N/mm ²
Resistenza di progetto	f_{yd}	391.3	N/mm ²
Sovra-resistenza	f_{tk} / f_{yk}	≥1.15	-
Modulo di elasticità	E_s	210000	N/mm ²
Tensione massima di trazione in esercizio (comb.SLE)	σ_s	360.00	N/mm ²



5.3. DURABILITÀ

5.3.1. Ambiente di riferimento

In fase progettuale, si ritiene che le condizioni ambientali alle quali la struttura in esame possa essere sottoposta siano diversificate in relazione al fatto che la parte esaminata sia in fondazione oppure sia in elevazione. In particolare, si assume:

- Elevazione (Piedritti e copertura) **XC2**
- Fondazione **XC2**

5.3.2. Copriferro di progetto

Il valore del copriferro di progetto viene definito in accordo al paragrafo C.4.1.6.1.3 della circolare spiegativa. In particolare, i valori minimi di copriferro (c_{min}) previsti da tale norma sono:

- Elevazione (Piedritti e copertura) **c_{min} 20 mm**
- Platea di fondazione **c_{min} 20 mm**

A partire da tali valori minimi di copriferro si definiscono i copriferri di progetto, in relazione alle classi ambientali riferite a ciascuna parte esaminata e la vita nominale di progetto. In particolare, si considera ordinaria la classe ambientale per la platea di fondazione e aggressiva la classe ambientale per gli elementi in elevazione e una vita nominale di 100 anni. Si considera anche una tolleranza di posa pari a 10 mm come indicato in normativa. Dunque, i copriferri di progetto (c_d) risultano:

- Elevazione (Piedritti e copertura) **c_d 20+10+10 = 40 mm**
- Platea di fondazione **c_d 20+10+10 = 40 mm**

6. ASSUNZIONI DI CALCOLO

6.1. Generalità

La verifica di resistenza al fuoco è svolta mediante il software agli elementi finiti ThermoCAD. L'azione del fuoco è schematizzata con un'azione di temperatura agente al contorno, variabile nel tempo, trasmessa all'interno della sezione. L'ipotesi alla base delle verifiche svolte è l'assenza di fenomeni di spalling, ovvero la sezione di calcestruzzo è integra durante tutta l'analisi (120 minuti).

6.2. Elementi verificati

Gli elementi verificati al fuoco sono:

- Soletta di copertura
- Muro a monte
- Muro a valle

Le sezioni di verifiche coincidono con quelle considerate nell'analisi statico e sismico della struttura. Queste sono sezioni di larghezza unitaria e hanno una altezza di 120 cm.

6.3. Combinazioni di carico

In accordo con le NTC 2008, § 2.1 e § 2.5.1.3, il carico di incendio rappresenta un'azione eccezionale, pertanto segue la relativa combinazione:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} * Q_{k1} + \dots$$

In accordo con quanto riportato in Tabella 5.1.VI della Normativa il coefficiente ψ_{21} è nullo meno per il carico di traffico, pertanto si esamineranno gli effetti dei carichi peso proprio, permanenti, spinta del terreno, ritiro e traffico. Le combinazioni di carico considerate sono:

Tabella 3. Combinazioni di carico eccezionali.

	NLECC1	NLECC2	NLECC3
PROPRIO	1	1	1
PERM SUP	1	1	1
PERM INF	1	1	1
SPTSX	1	1	1
RITIRO	1	1	1
TRENO_SX	0.2	0.2	0
TRENO_DX	0.2	0	0.2
SERPEGGIO_SX	0.2	0.2	0
SERPEGGIO_DX	0.2	0	0.2

6.4. Incendio di progetto

In accordo con le NTC 2008, § 3.6.1.5.1, l'andamento delle temperature viene determinato in riferimento ad una curva di incendio.

Nella presente relazione si adotta la curva temperatura/tempo UNI 11076, raccomandata dal DM 2005 §1.2: "Per le gallerie di lunghezza superiore a 2000 m, le strutture delle opere in sotterraneo dovranno avere caratteristiche di resistenza al fuoco non inferiore a R120, da valutare con la curva di incendio UNI 11076".

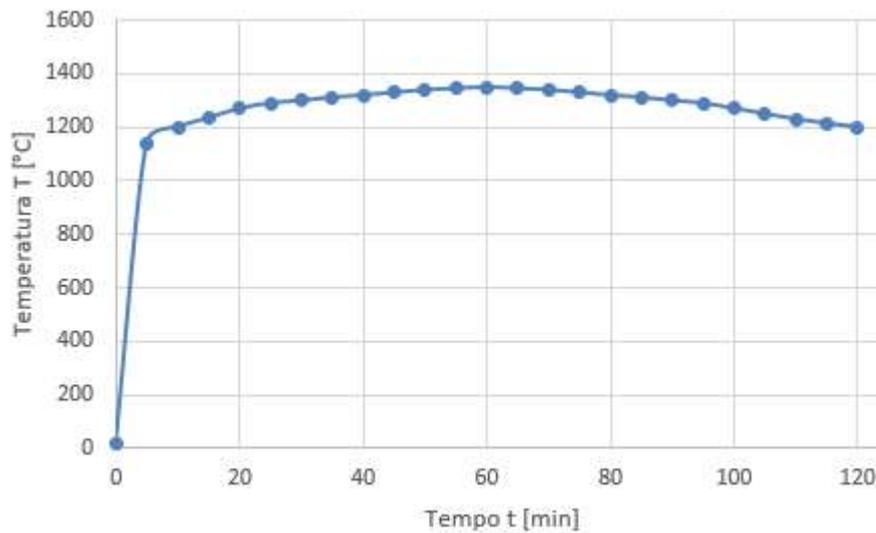


Figura 5. Diagramma nominale UNI 11076 T (DM 28/10/2005) – Galleria GA27.

6.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno nelle sezioni verificate possono essere:

- temperatura ambiente (20°C): dove il contorno è esposto all'aria esterna o al terreno
- esposizione al fuoco: dove il contorno è investito direttamente dal gas riscaldato.
- condizione di adiabaticità: lungo il limite della sezione strutturale

7. VERIFICHE DI RESISTENZA AL FUOCO

Di seguito si riportano le sezioni di verifiche con le sue rispettive geometrie. Le verifiche di resistenza al fuoco vengono condotte per diverse sezioni del concio tipo della GA27 considerando le sollecitazioni eccezionali a freddo e la resistenza penalizzata a caldo. In più si considera la condizione di spalling nelle zone più critiche del manufatto.

7.1. Sollecitazioni

Le sollecitazioni in combinazione eccezionale si riportano di seguito. Si ha considerato anche la seguente convenzioni di segni:

- Momento in [kN.m/m] positivo se tende la fibra esterna.
- Sforzo assiale in [kN/m] positivo se induce trazione nella sezione.

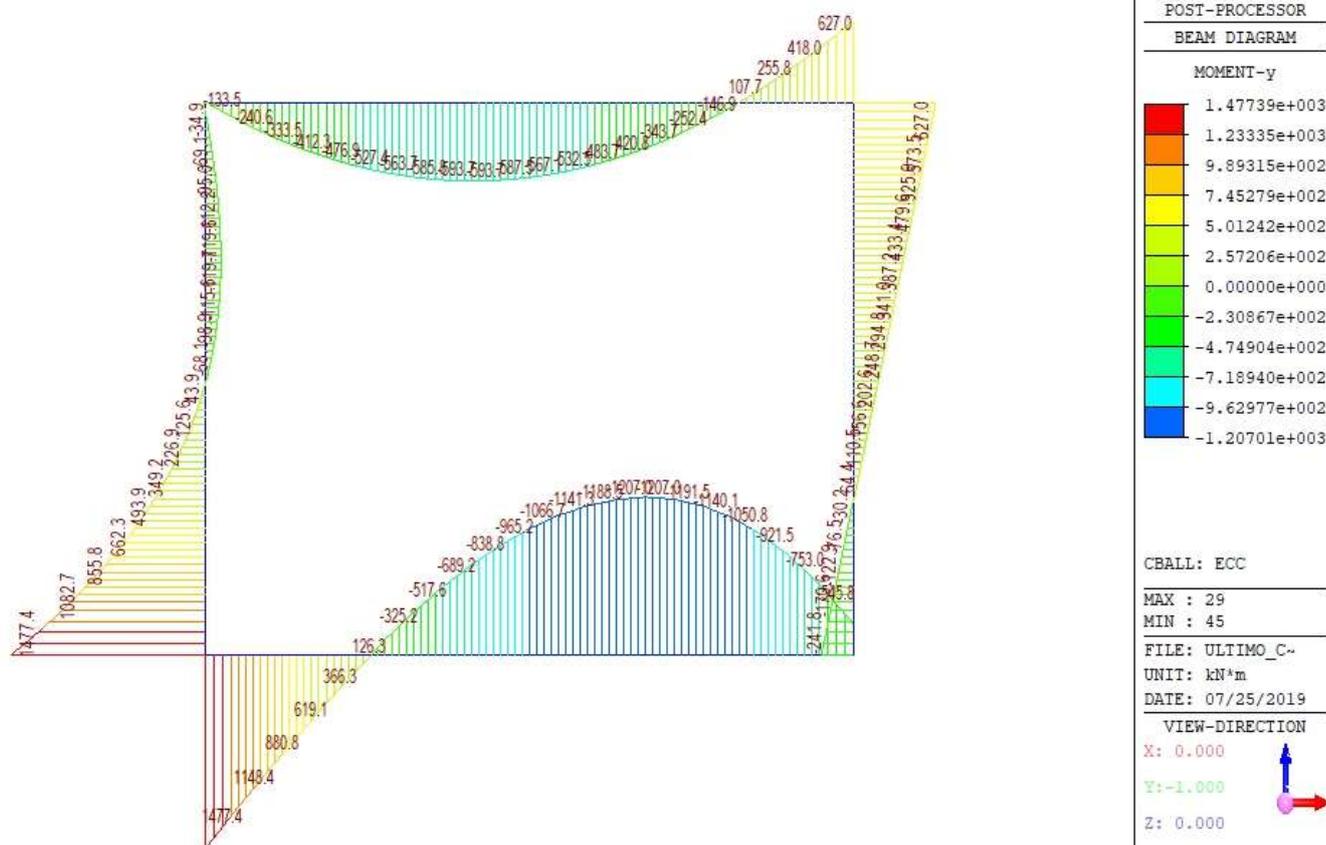


Figura 6. Diagramma di momento flettente – Combinazione Eccezionale – Galleria GA27.

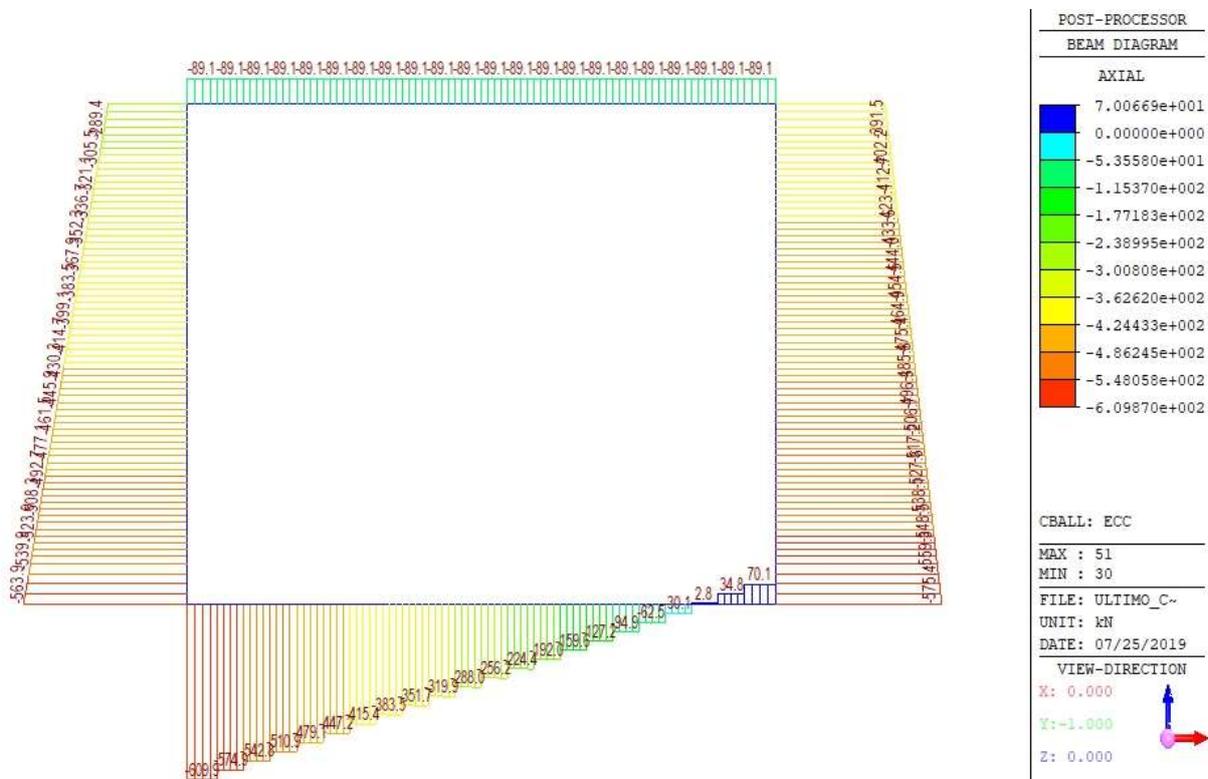


Figura 7. Diagramma di sforzo assiale – Combinazione Eccezionale – Galleria GA27.

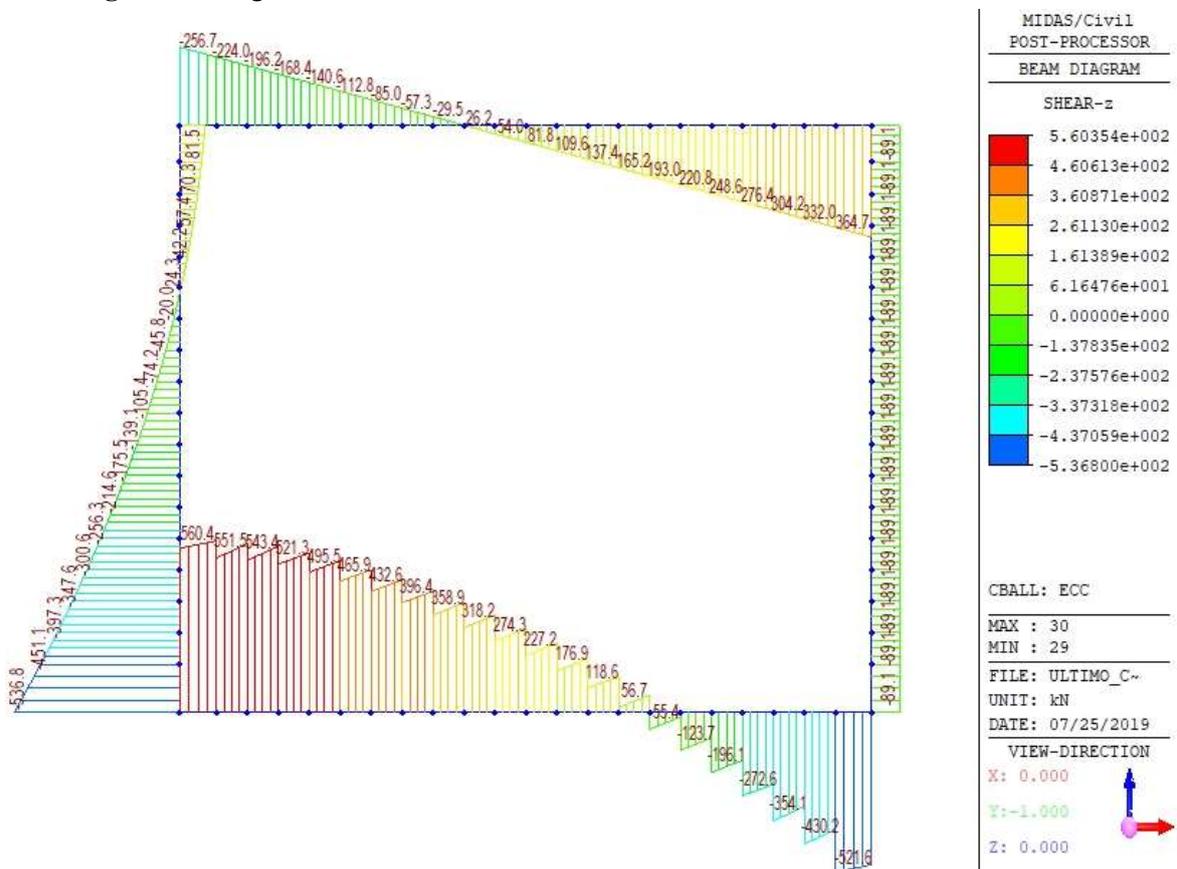


Figura 8. Diagramma di taglio – Combinazione Eccezionale – Galleria GA27.



7.2. Fenomeno di Spalling

Il procedimento sopra esposto andrà percorso anche valutando l'influenza del fenomeno dello spalling sulla risposta strutturale. A tal proposito, infatti, l'Eurocodice 2 [2] (UNI EN 1992-1-2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-2 - Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio, Sezione 4 Procedure di progettazione, p.to 4.1 Generalità) richiede che "...il distacco del calcestruzzo deve essere evitato per mezzo di misure appropriate oppure si deve tenere conto della sua influenza sui requisiti prestazionali (R e/o E I)...".

Pertanto, al fine di quantificare l'entità dello spalling da considerare nelle analisi, si potrà far riferimento al criterio sviluppato, per conto di RFI, nel documento "*Considerazioni sul fenomeno dello spalling ai fini dell'esecuzione delle verifiche in condizioni di incendio delle strutture di rivestimento di opere in sotterraneo*" (E. Cartapati - maggio 2012).

Tale criterio, basato su evidenze sperimentali e di incendi realmente avvenuti, che hanno coinvolto strutture prive di accorgimenti nei riguardi del fenomeno dello spalling, definisce che:

- per le strutture non armate la riduzione media di spessore da utilizzare nelle analisi e verifiche può essere valutata pari a 15 cm;
- per le strutture armate la riduzione media di spessore da utilizzare nelle analisi e verifiche è ricavabile dalla formula: $s = c + \sigma_r + \sigma_f + i/10$; dove c è il copriferro e i l'interasse delle armature di forza; σ_r e σ_f sono rispettivamente i diametri delle armature di ripartizione (r) e di forza (f).

Tale valore è determinato dalla somma di diversi contributi:

- distacco del calcestruzzo per tutto lo spessore del copriferro;
- distacco del calcestruzzo per tutto lo spessore corrispondente all'ingombro delle armature (somma dei diametri dei due ordini di armature: principali e trasversali);
- spessore medio aggiuntivo che tiene conto del possibile distacco di schegge di calcestruzzo non contrastato dalla presenza delle barre di armatura; tale spessore aggiuntivo può essere valutato mediamente dell'ordine di 1/10 dell'interasse fra le armature principali,

La profondità massima non può essere superiore a quella di sezioni non armate ($s \leq 150$ mm).

L'applicazione del criterio presuppone che l'armatura principale abbia un comportamento favorevole, ovvero armatura sufficientemente ripartita ed efficacemente trattenuta da staffe e spillature dirette verso l'interno della sezione. La validità del criterio è riferita ad un intervallo di variabilità dell'interasse fra le armature dell'ordine di 100 ÷ 250 mm; per interassi superiori a 200 mm è opportuno incrementare (fino al 50%) il contributo dello spessore medio aggiuntivo.

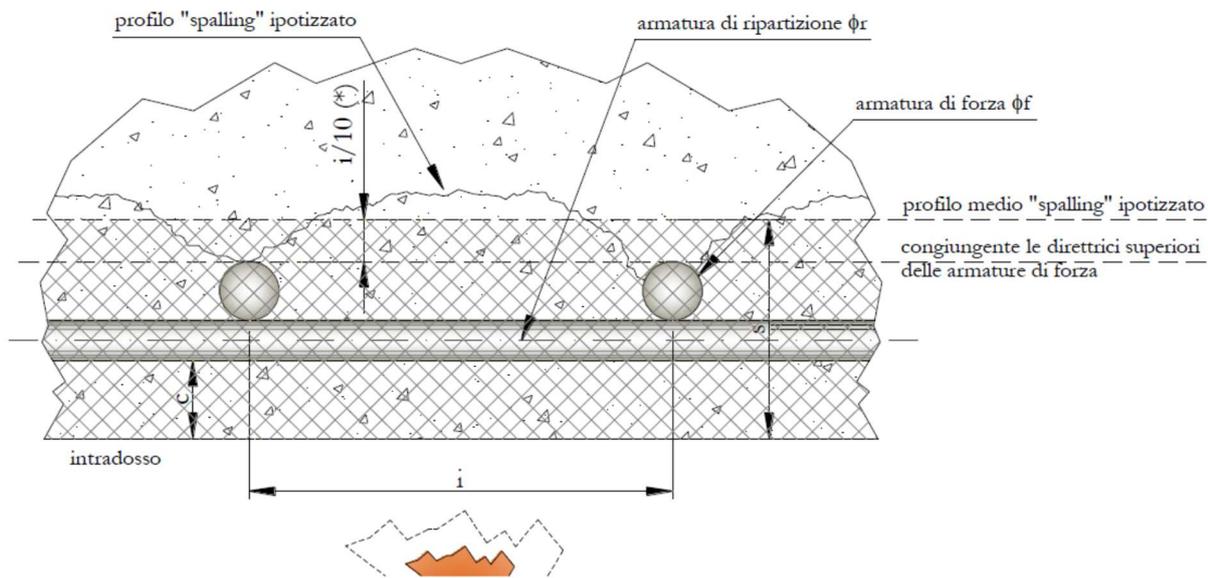


Figura 9. Schema per la valutazione della profondità di “spalling” per sezioni armate

7.3. Sezioni e geometria

Le sezioni di verifica senza considerare il fenomeno di spalling sono le stesse considerate nelle verifiche statiche e sismiche escludendo però, le sezioni in fondazione giacché queste non sono sposte all’aria calda. Sebbene le sezioni inferiori dei muri a filo in fondazione non sono neanche sposte agli effetti termici, queste vengono anche verificate a modo cautelativo.

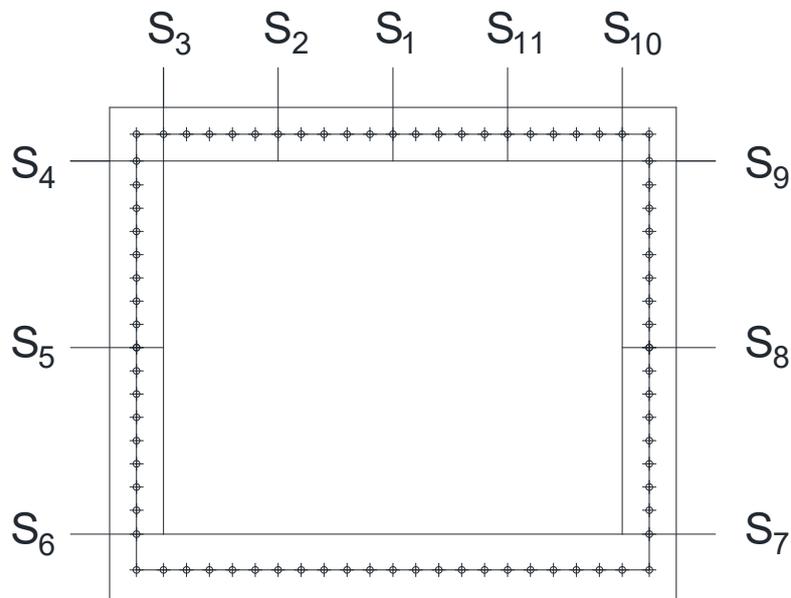


Figura 10. Sezioni di verifica al fuoco senza fenomeno di spalling – Galleria GA27.

Al tenere in conto il fenomeno di spalling si considera una perdita della sezione utile di:

$$s = c + \phi_r + \phi_f + i/10 = 40 + 20 + 26 + 10 = 96 \text{ mm}$$

Questo valore implica che le sezioni con il lembo a trazione esposto al fuoco perdono il primo strato di armatura di forza rendendo la sezione incapace di resistere le sollecitazioni. In vista di questa situazione la sezione in oggetto diventa una cerniera plastica e le sollecitazioni vengono ricomputate dal modello di calcolo. Non ostante a modo di scelta progettuale si preferisce inserire un secondo strato di armatura capace di prevenire la formazione di cerniere e rendere utile la struttura dopo l'evento di incendio in più viene considerato lo strato di armatura intermedio. Le sezioni di interesse in questo caso si illustrano in figura. Le proprietà geometriche e l'armatura si sintetizzano in tabella.

Tabella 4. Proprietà geometriche delle sezioni considerate nelle verifiche a pressoflessione.

		Senza spalling			Con spalling		
		B	H	A _r	B	H	A _r
		[cm]	[cm]	[-]	[cm]	[cm]	[-]
S1	TOP	100	120	5φ26	100	110.4	5φ26
	BOTTOM	100	120	10φ26 + 10φ26	100	110.4	10φ26 + 10φ26
S2	TOP	100	120	5φ26	100	110.4	5φ26
	BOTTOM	100	120	10φ26 + 10φ26	100	110.4	10φ26 + 10φ26
S3	TOP	100	120	10φ26	100	110.4	10φ26
	BOTTOM	100	120	10φ26 + 10φ26	100	110.4	10φ26 + 10φ26
S4	ESTERIORE	100	120	10φ26	-	-	-
	INTERIORE	100	120	5φ26	-	-	-
S5	ESTERIORE	100	120	10φ26	-	-	-
	INTERIORE	100	120	5φ26	-	-	-
S6	ESTERIORE	100	120	10φ26 + 5φ20	-	-	-
	INTERIORE	100	120	5φ26	-	-	-
S7	ESTERIORE	100	120	5φ26	-	-	-
	INTERIORE	100	120	10φ26	-	-	-
S8	ESTERIORE	100	120	5φ26	-	-	-
	INTERIORE	100	120	5φ26	-	-	-
S9	ESTERIORE	100	120	10φ26 + 5φ20	-	-	-
	INTERIORE	100	120	5φ26	-	-	-
S10	TOP	100	120	10φ26	-	-	-
	BOTTOM	100	120	10φ26	-	-	-
S11	TOP	100	120	5φ26	-	-	-
	BOTTOM	100	120	10φ26	-	-	-

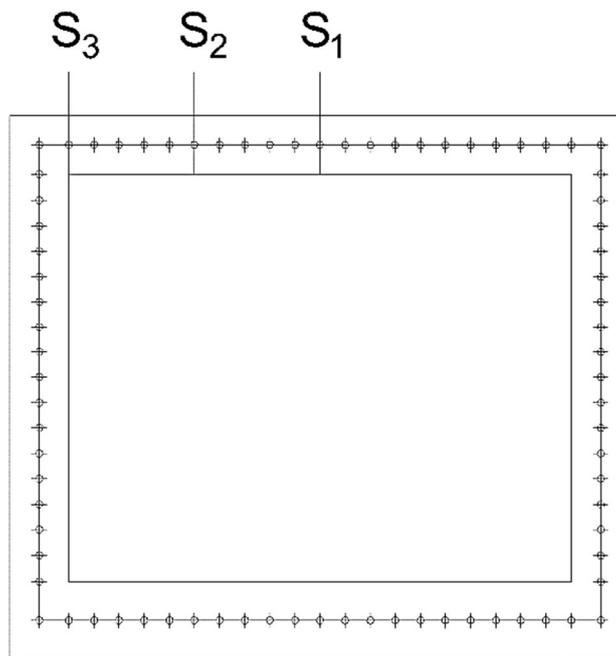


Figura 11. Sezioni di verifica al fuoco con fenomeno di spalling – Galleria GA27.

Sempre nella condizione di spalling viene verificata la resistenza a taglio delle sezioni a incastro in copertura. Le sezioni A e B sono prese a una distanza $0.5 d = 0.5$ m dal filo piedritto a modo cautelativo e on a 1.0 m come fatto nelle analisi in condizioni statica e sismica. Queste vengono illustrate di seguito.

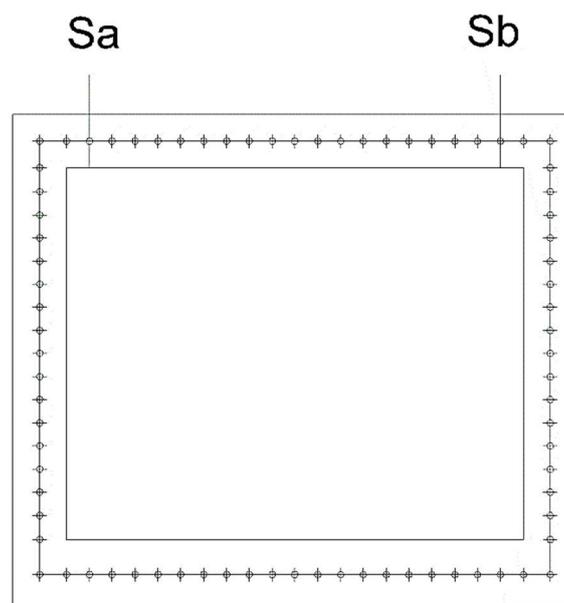


Figura 12. Sezioni di verifica al fuoco con fenomeno di spalling – Galleria GA27.

7.4. Modellamento delle diverse sezioni

Di seguito si descrive il modellamento delle sezioni usate nelle verifiche a caldo.

7.4.1. Geometria delle sezioni

Si riproduce la sezione di verifica in base a quelle reale del manufatto.

Tabella 5. Coordinate delle sezioni senza spalling.

Punto n.	X	Y
1	-50.00	-60.00
2	-50.00	60.00
3	50.00	60.00
4	50.00	-60.00

Tabella 6. Coordinate delle sezioni con spalling.

Punto n.	X	Y
1	-50.00	-55.20
2	-50.00	55.20
3	50.00	55.20
4	50.00	-55.20

7.4.2. Condizioni al contorno

Si impongono le condizioni termiche al contorno:

Condizione di esposizione al fuoco

La linea del poligono di calcestruzzo viene esposta al cambio di temperatura segnalato nella curva di temperatura contro tempo.

Tabella 7. Coordinate della linea di condizione.

	Punto	X	Y
	[-]	[cm]	[cm]
Senza Spalling	1	-50	-60
	2	50	-60
Con Spalling	1	-50	-55.2
	2	50	-55.2

Condizione di dispersione nell'ambiente

La linea del poligono di calcestruzzo inizia con una temperatura ambiente indicata di 20°C.

Tabella 8. Coordinate della linea di condizione.

	Punto	X	Y
	[-]	[cm]	[cm]
Senza Spalling	1	-50	60
	2	50	60
Con Spalling	1	-50	55.2
	2	50	55.2

Condizione di adiabaticità

La condizione di adiabaticità viene imposta nelle altre linee della sezione.

Tabella 9. Coordinate della linea di condizione.

	Punto	X	Y
	[-]	[cm]	[cm]

Senza Spalling	1	±50	60
	2	±50	-60
Con Spalling	1	±50	55.2
	2	±50	-55.2

7.4.3. Caratteristiche termiche del calcestruzzo

Materiale:	Calcestruzzo siliceo
Coefficiente di convezione per esposizione al fuoco:	25.0 W/m ² °C
Coefficiente di convezione per ambiente:	9.0 W/m ² °C
Coefficiente di remissività risultante:	0.70
Coefficiente di irraggiamento:	0.0000000397 W/m ² °K ⁴
Comportamento in fase di verifica:	Calcestruzzo siliceo

Tabella 10. Caratteristiche termiche del calcestruzzo.

Temperatura (°C)	Massa	Conducibilità	Calore specifico
°C	Kg	W/m ^{°C}	J/Kg°C
0	2300.0	1.680	900.0
99	2300.0	1.499	900.0
100	2300.0	1.498	1653.0
115	2300.0	1.472	1653.0
200	2254.0	1.332	1000.0
300	2219.5	1.182	1050.0
400	2185.0	1.049	1100.0
500	2164.3	0.932	1100.0
600	2145.9	0.832	1100.0
700	2125.2	0.748	1100.0
800	2104.5	0.680	1100.0
900	2083.8	0.629	1100.0
1000	2065.4	0.595	1100.0
1100	2044.7	0.576	1100.0
1200	2024.0	0.574	1100.0

7.4.4. Fattori di riduzione di resistenza dei calcestruzzi e le barre di armatura

Per coefficienti F_i si intendono i fattori di riduzione di resistenza del materiale (acciaio e calcestruzzo) se compresso o teso, in funzione della condizione di esercizio. I coefficienti vengono descritti tramite una curva caratteristica di valori adimensionali su temperatura tramite curva spezzata, come da normativa.

Tabella 11. Fattori di riduzione del calcestruzzo a compressione.

Temperatura (°C)	F_i compresso
20	1.000
100	1.000
200	0.950
300	0.850
400	0.750

500	0.600
600	0.450
700	0.300
800	0.150
900	0.080
1000	0.040
1100	0.010
1200	0.000

Tabella 12. Fattori di riduzione del calcestruzzo a trazione.

Temperatura (°C)	Fi teso
20	1.000
100	1.000
600	0.000

Tabella 13. Fattori di riduzione per il modulo elastico del calcestruzzo.

Temperatura (°C)	Fi
0	1.000
50	1.000
200	0.500
400	0.150
600	0.050

Vengono riportate le curve di riduzione in forma analitica solo per i tipi di barre di armatura effettivamente utilizzati nella sezione.

Tabella 14. Fattori di riduzione delle barre di acciaio.

Temperatura (°C)	(K _{s1})
20	1.000
100	1.000
200	1.000
300	1.000
400	0.900
500	0.700
600	0.470
700	0.230
800	0.110
900	0.060
1000	0.040
1100	0.020
Temperatura (°C)	(K _{s1 comp.})
20	1.000
100	1.000
400	0.800
500	0.600
600	0.330

700	0.150
800	0.080
900	0.050
1000	0.040
1200	0.000

7.5. Verifiche a presso-flessione a t = 120 min

Di seguito si riportano le verifiche al fuoco al minuto t = 120.

Tabella 15. Verifiche al fuoco senza spalling – galleria GA27.

			M	Ncon	Comb	As	C.S M=cte.	C.S N=cte.
	Lembo		[kN.m/m]	[kN/m]	[-]	[-]	[-] t = 120 min	[-] t = 120 min
Copertura	S1	top	-	-	-	5φ26	-	-
		bottom	-567.06	0	NLECC3	10φ26 + 10φ26	8.57	8.57
	S2	top	-	-	-	5φ26	-	-
		bottom	-527.38	0	NLECC3	10φ26 + 10φ26	9.21	9.21
	S3	top	-	-	-	10φ26	-	-
		bottom	-133.49	0	NLECC2	10φ26 + 10φ26	36.6	36.6
Piedritto a monte	S4	esteriore	-	-	-	10φ26	-	-
		interiore	-34.92	-289.31	NLECC2	5φ26	109.3	40.7
	S5	esteriore	-	-	-	10φ26	-	-
		interiore	-21.8	-414.58	NLECC1	5φ26	81.97	68.31
	S6	esteriore	1082.65	-539.92	NLECC3	10φ26 + 5φ20	3.54	3.07
		interiore	-	-	-	5φ26	-	-
Piedritto a valle	S7	esteriore	-	-	-	5φ26	-	-
		interiore	-254.552	-834.716	NLECC1	10φ26	24.08	11.88
	S8	esteriore	302.4627	-709.328	NLECC3	5φ26	15.4	5.3
		interiore	-	-	-	5φ26	-	-
	S9	esteriore	856	-584.224	NLECC1	10φ26 + 5φ20	4.86	3.9
		interiore	-	-	-	5φ26	-	-
Copertura	S10	top	417.99	0	NLECC1	10φ26	5.99	5.99
		bottom	-	-	-	10φ26	-	-
	S11	top	-	-	-	5φ26	-	-
		bottom	-252.36	0	NLECC3	10φ26	9.9	9.91

Doc. N.

Progetto
INOR

Lotto
12

Codifica Documento
E E2 RO GA 270 0 003

Rev.
A

Foglio
26 di 32

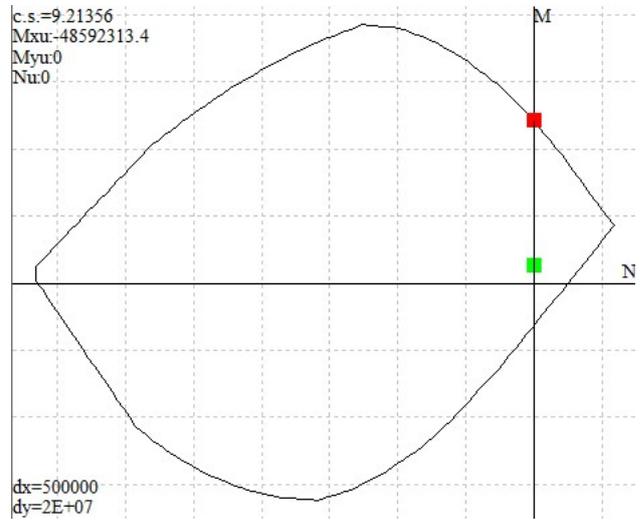
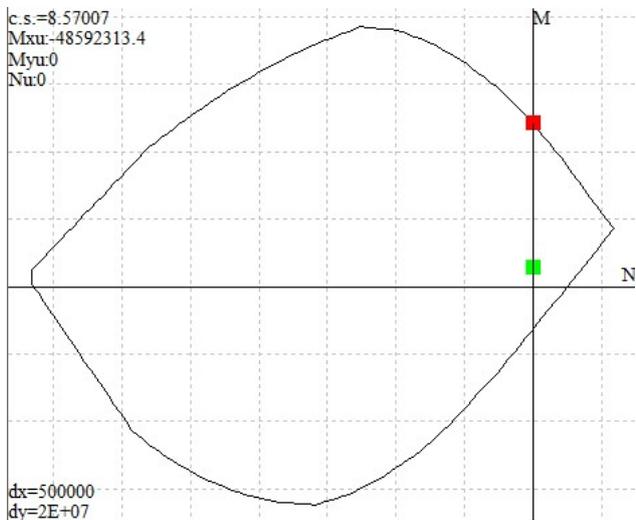


Figura 13. Diagramma M-N caldo senza spalling a t = 120 min – Sezioni S1 e S2 – Galleria GA27.

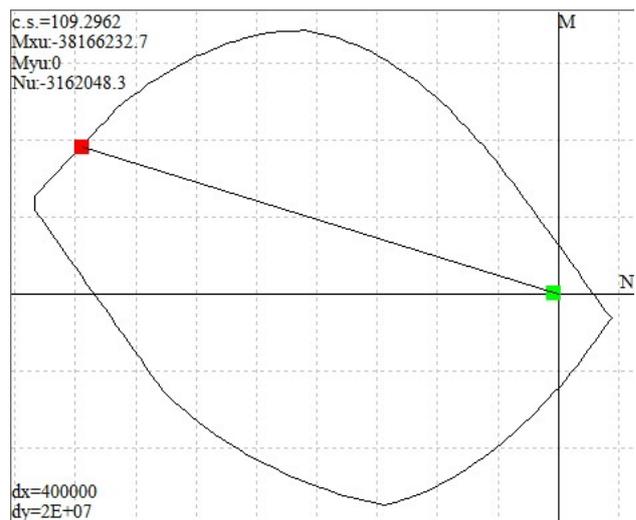
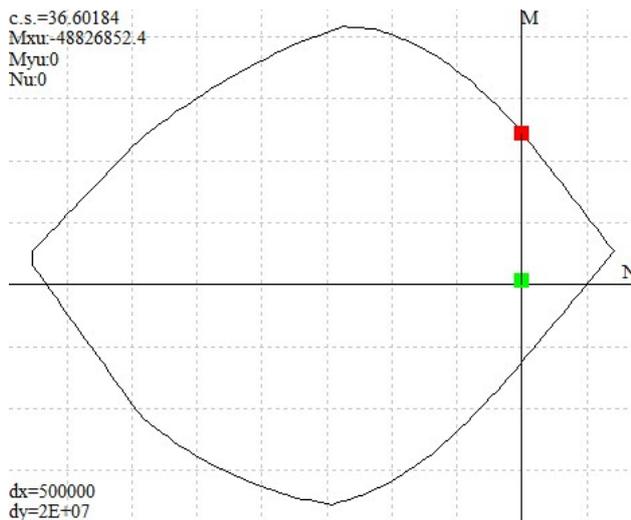


Figura 14. Diagramma M-N caldo senza spalling a t = 120 min – Sezioni S3 e S4 – Galleria GA27.

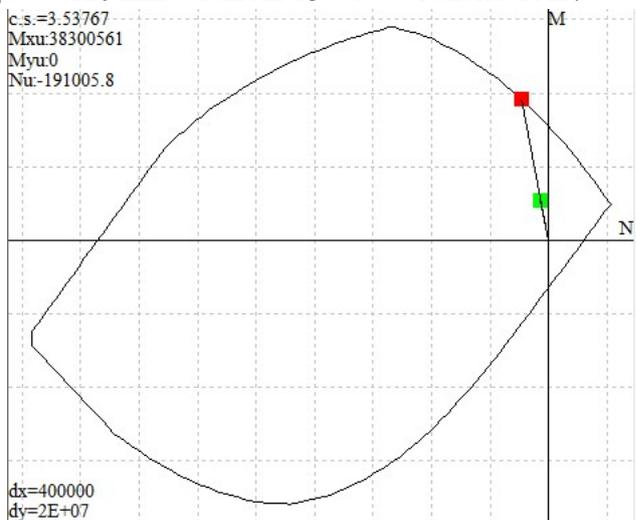
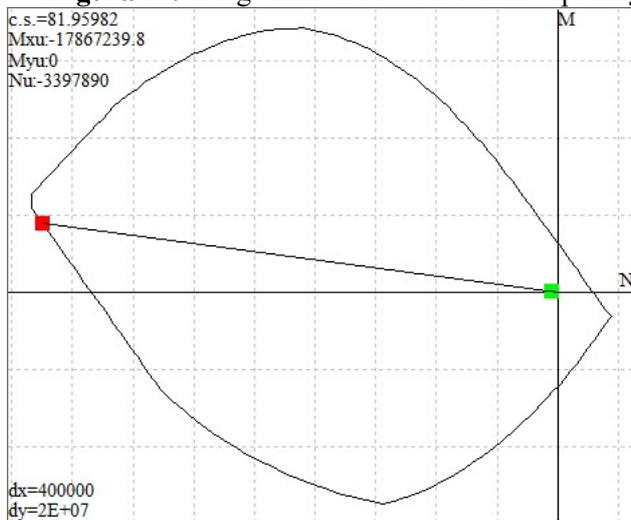


Figura 15. Diagramma M-N caldo senza spalling a t = 120 min – Sezioni S5 e S6 – Galleria GA27.

Doc. N.

Progetto
INOR

Lotto
12

Codifica Documento
E E2 RO GA 270 0 003

Rev.
A

Foglio
27 di 32

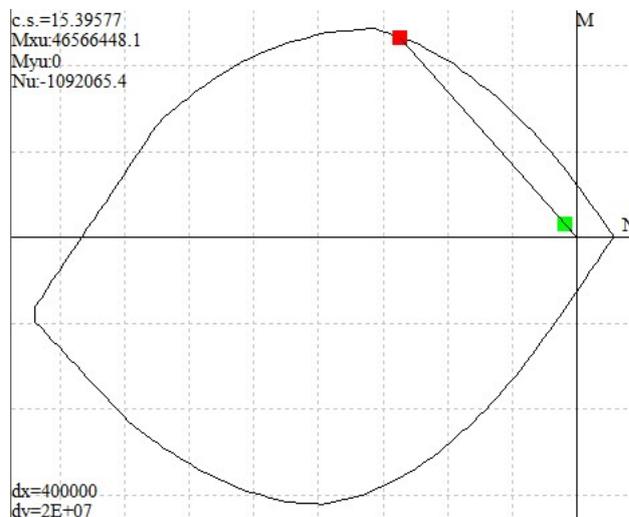
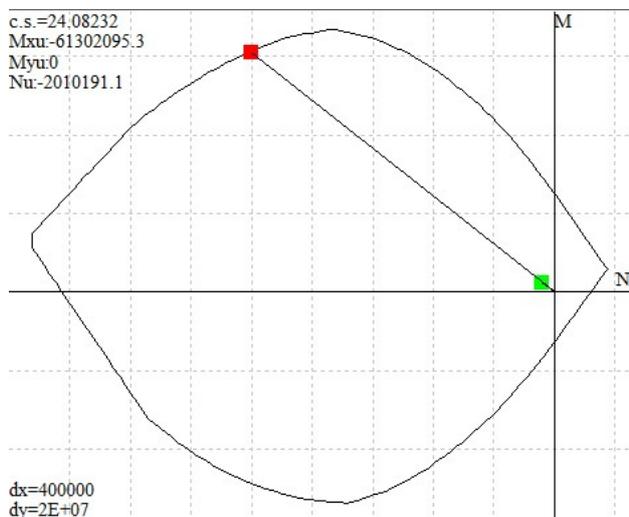


Figura 16. Diagramma M-N caldo senza spalling a $t = 120$ min – Sezioni S7 e S8 – Galleria GA27.

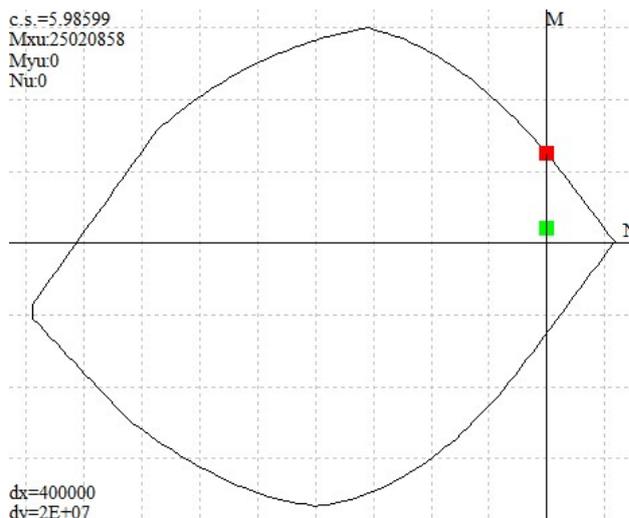
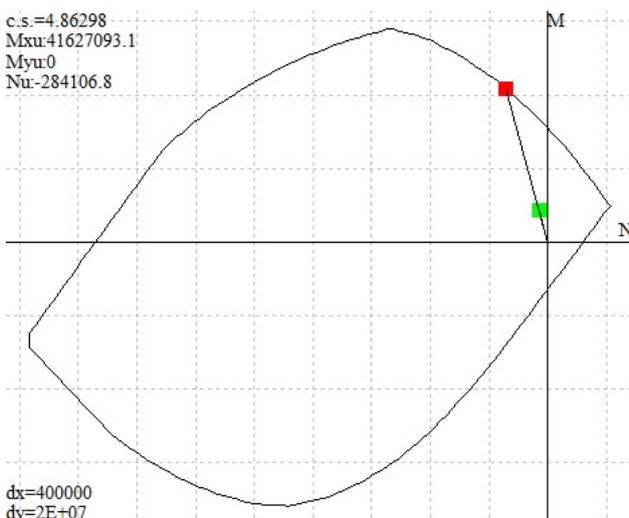


Figura 17. Diagramma M-N caldo senza spalling a $t = 120$ min – Sezioni S9 e S10 – Galleria GA27.

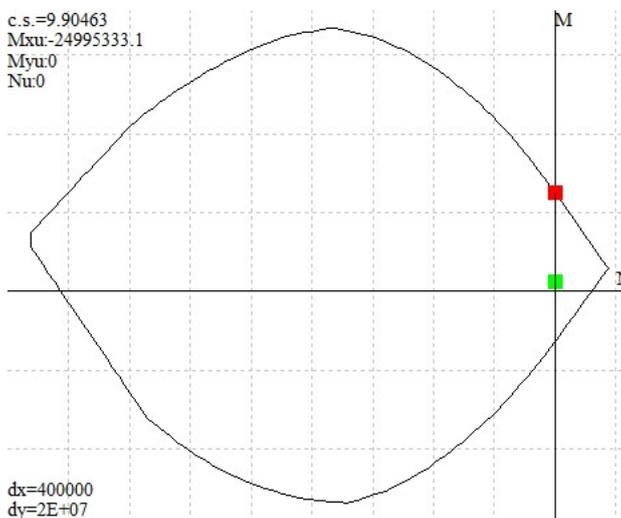


Figura 18. Diagramma M-N caldo senza spalling a $t = 120$ min – Sezione S11 – Galleria GA27.

Di seguito si riporta la distribuzione termica delle diverse sezioni a $t = 120$ min.

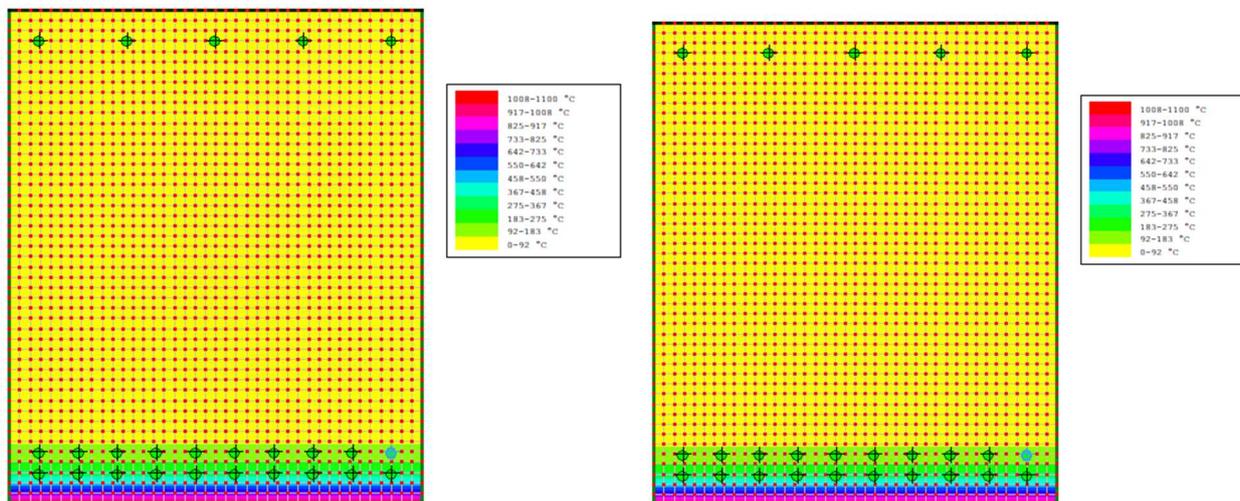


Figura 19. Diagramma termico senza spalling a $t = 120$ min – Sezione S1 e S2 – Galleria GA27.

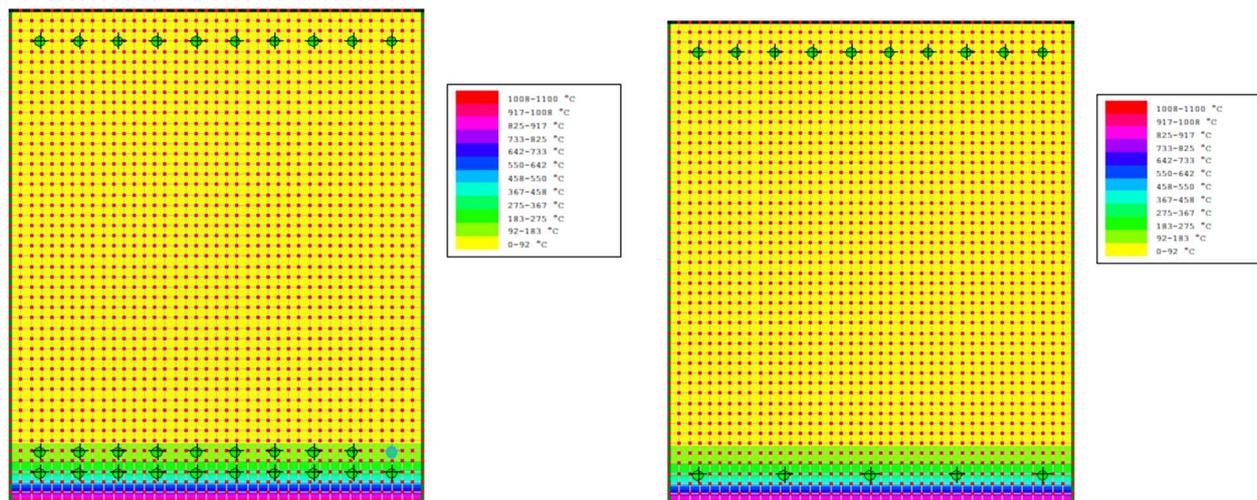


Figura 20. Diagramma termico senza spalling a $t = 120$ min – Sezione S3 e S4 – Galleria GA27.

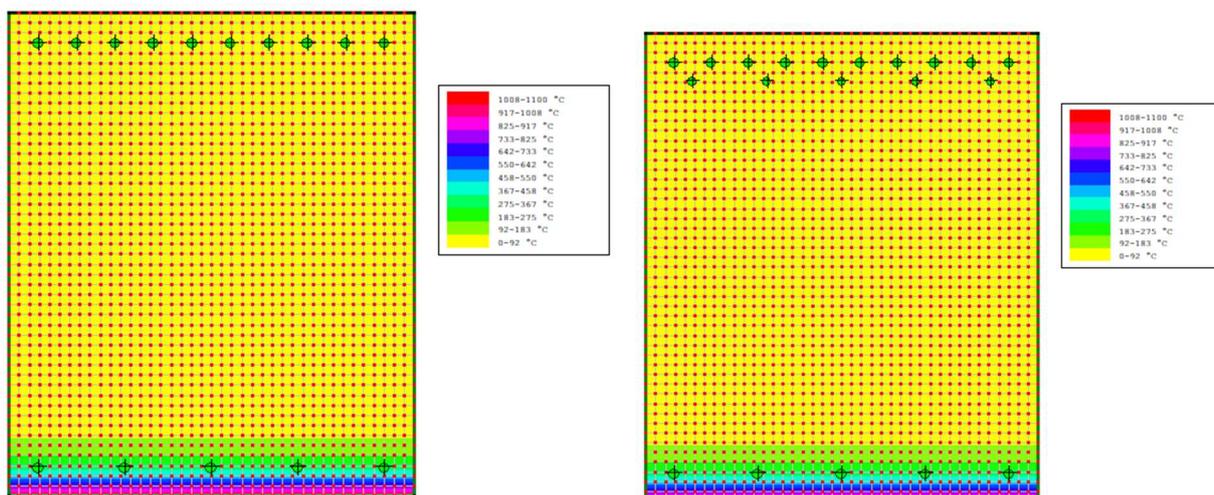


Figura 21. Diagramma termico senza spalling a $t = 120$ min – Sezione S5 e S6 – Galleria GA27.

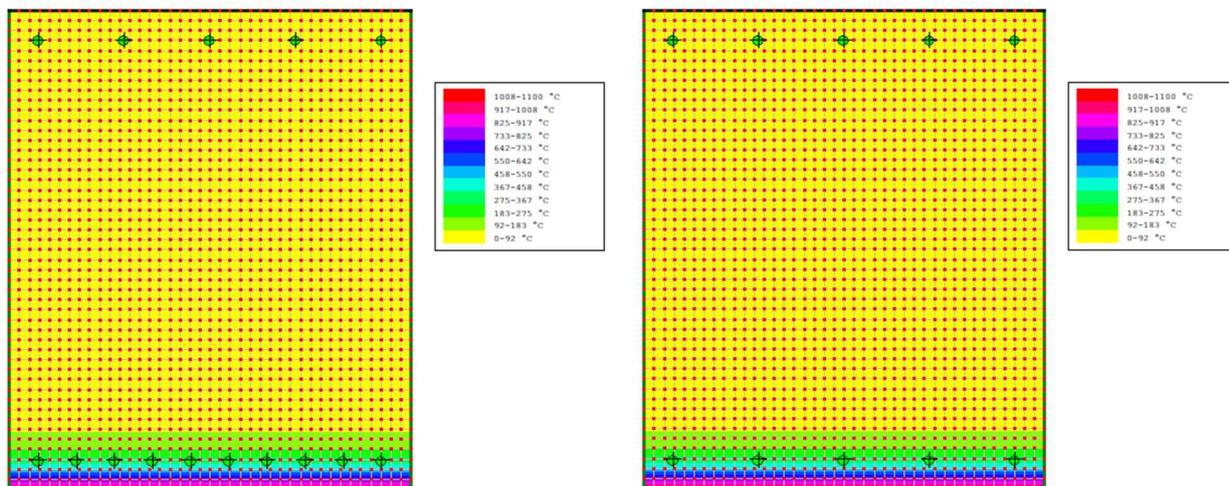


Figura 22. Diagramma termico senza spalling a $t = 120$ min – Sezione S7 e S8 – Galleria GA27.

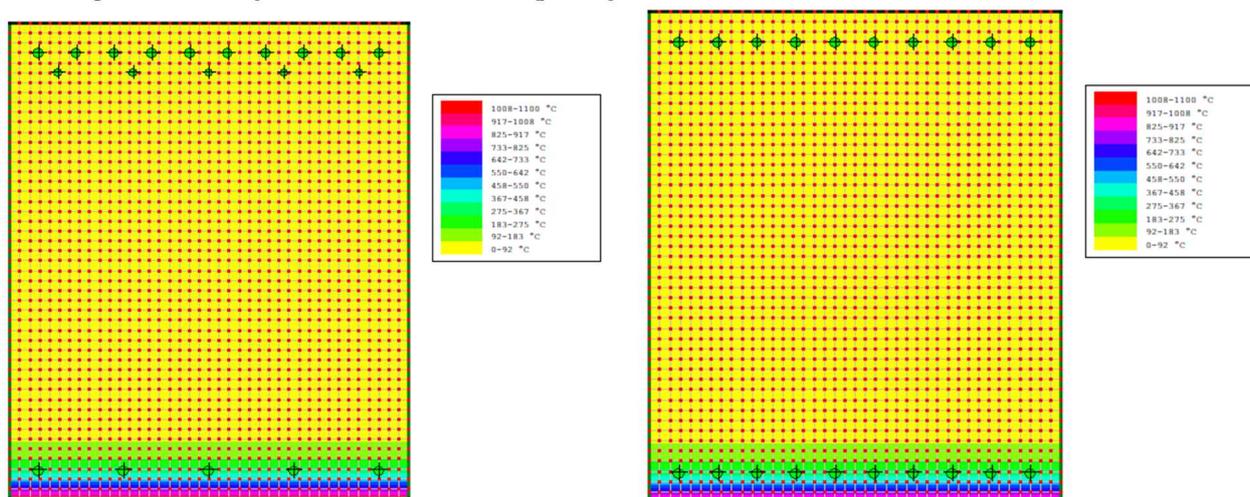


Figura 23. Diagramma termico senza spalling a $t = 120$ min – Sezione S9 e S10 – Galleria GA27.

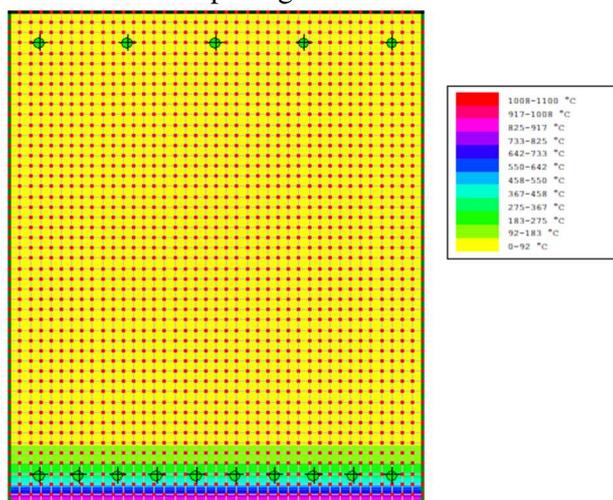


Figura 24. Diagramma termico senza spalling a $t = 120$ min – Sezione S11 – Galleria GA27.

Tabella 16. Verifiche al fuoco con spalling – galleria GA27.

	Lembo	M	N _{con}	Comb	A _s	C.S M = cte.	C.S N = cte.	
		[kN.m/m]	[kN/m]	[-]	[-]	[-] t = 120 min	[-] t = 120 min	
Copertura	S1	top	-	-	-	5φ26	-	-
		bottom	-567.06	0	NLECC3	10φ26 + 10φ26	1.02	1.02
	S2	top	-	-	-	5φ26	-	-
		bottom	-527.38	0	NLECC3	10φ26 + 10φ26	1.1	1.1
	S3	top	-	-	-	10φ26	-	-
		bottom	-133.49	0	NLECC2	10φ26 + 10φ26	4.35	4.35

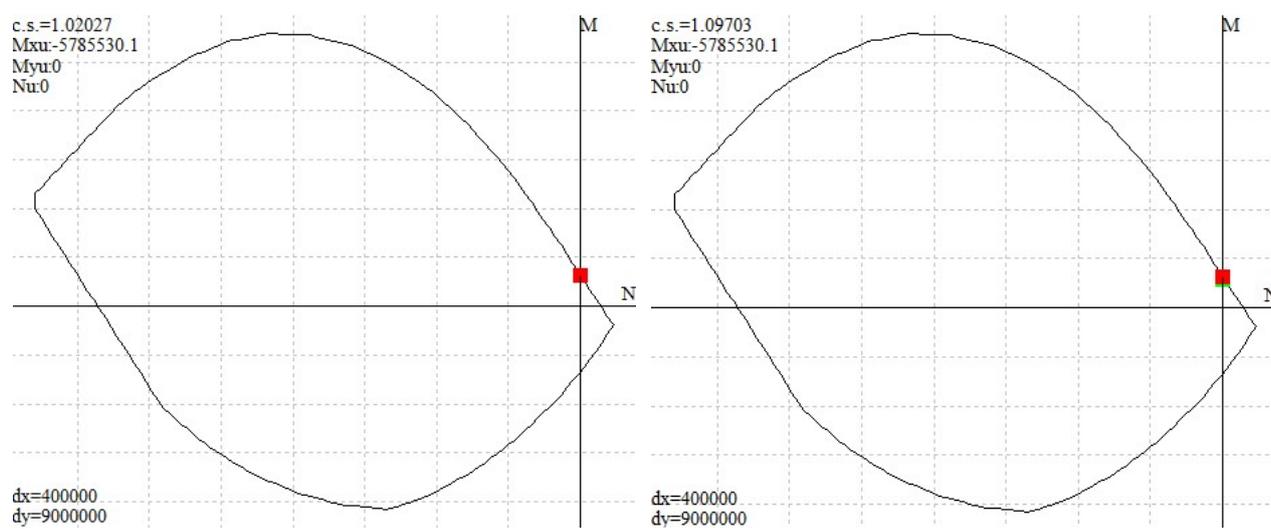


Figura 25. Diagramma M-N caldo con spalling a t = 120 min – Sezione S1 e S2 – Galleria GA27.

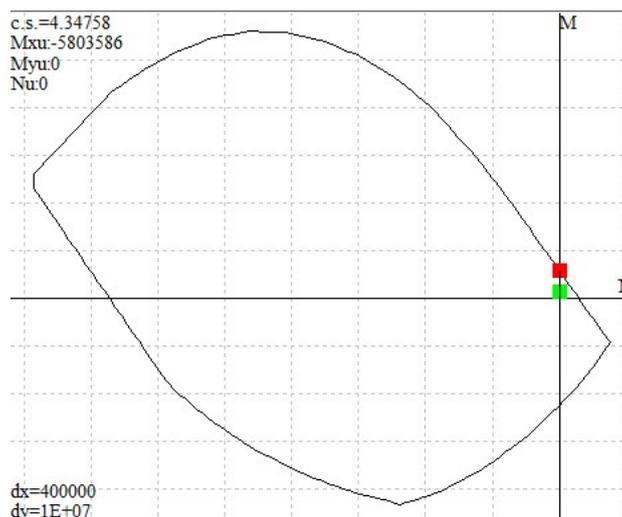


Figura 26. Diagramma M-N caldo con spalling a t = 120 min – Sezione S3 – Galleria GA27.

Di seguito si riporta la distribuzione termica delle diverse sezioni a t = 120 min.

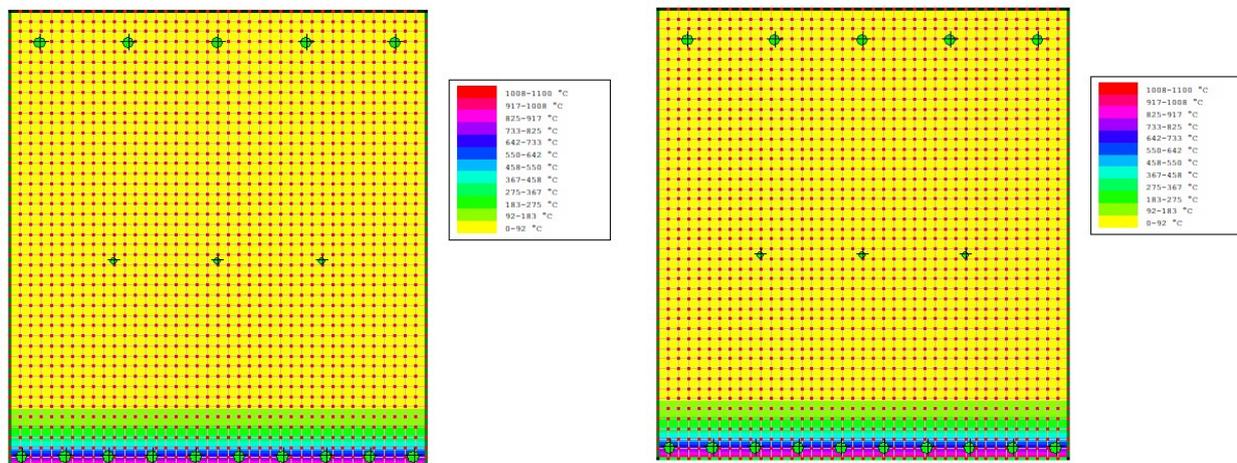


Figura 27. Diagramma termico con spalling a $t = 120$ min – Sezioni S1 e S2 – Galleria GA27.

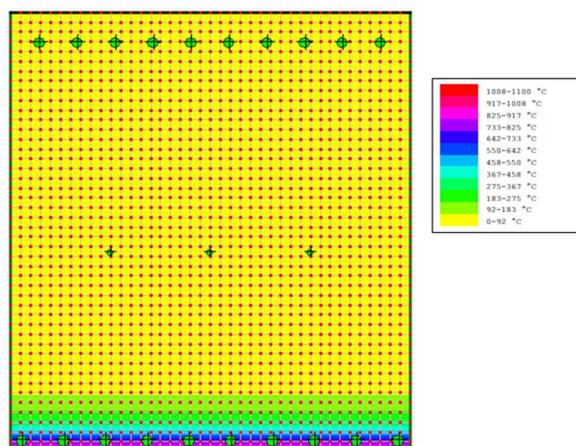


Figura 28. Diagramma termico con spalling a $t = 120$ min – Sezione S3 – Galleria GA27.

7.6. Verifiche a taglio a $t = 120$ min

Di seguito si riportano le verifiche a taglio nella situazione di spalling. Si valuta la resistenza a taglio senza armatura in accordo alle prescrizioni riportate nel paragrafo 4.1.2.1.3.1 delle NTC 2008. In modo cautelativo non si considera nessuna compressione a favore della resistenza al taglio, né armatura longitudinale e la zona calda di calcestruzzo a $t = 120$ viene trascurata. Secondo quanto illustrato in figura 21 e 22 questa zona corrisponde a 15 cm dato che la mesh utilizzata è di 2.5 cm.

Tabella 17. Verifiche a taglio delle sezioni non armate – galleria GA27.

Sezione		S_a	S_b	
H	[mm]	954	954	Altezza della sezione
d	[mm]	925	925	Altezza utile della sezione
b_w	[mm]	1000	1000	Larghezza della sezione
k	[-]	1.46	1.46	Vedi NTC08
v_{min}	[-]	0.34	0.34	VEDI NTC08
A_{sl}	[-]	-	-	Armatura di flessione a trazione
	[mm ²]	0.0	0.0	
ρ	[-]	0.0	0.0	Rapporto di armatura
σ_{cp}	[N/mm ²]	0.0	0.0	Sforzo normale a compressione

V_{Rdmin}	[kN/m]	318.13	318.13	Resistenza minima della sezione a taglio
V_{RdMax}	[kN/m]	0.00	0.00	Resistenza massima della sezione a taglio
V_{Rd}	[kN/m]	318.13	318.13	Resistenza di progetto a Taglio
$V_{SLU, SOLL}$	[kN/m]	196.20	304.20	Sollecitazione a Taglio
C.S	[-]	1.62	1.05	Coefficiente di sicurezza