

PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO

EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)
 SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)
 COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)
 SACYR S.A.U. (MANDANTE)
 ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)
 A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

| | | | |
|--|---|--|---|
| <p>IL PROGETTISTA Ing E.M.Veje  Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408 </p> | <p>IL CONTRAENTE GENERALE Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p> | <p>STRETTO DI MESSINA Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p> | <p>STRETTO DI MESSINA Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p> |
|--|---|--|---|

| | |
|--|-------------------------|
| <p><i>Unità Funzionale</i> OPERA DI ATTRAVERSAMENTO <i>Tipo di sistema</i> SOVRASTRUTTURE <i>Raggruppamento di opere/attività</i> IMPALCATO <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i> Generale <i>Titolo del documento</i> Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso</p> | <p>PS0076_F0</p> |
|--|-------------------------|

| | |
|--------|---|
| CODICE | C G 1 0 0 0 P R G D P S V I 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 F 0 |
|--------|---|

| REV | DATA | DESCRIZIONE | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |
|-----|------------|------------------|-----------------------------|------------|-----------|
| F0 | 20-06-2011 | EMISSIONE FINALE | JESO,HEAE,AMOL PGSC,MLSA | HPO | HPO/LSJ |
| | | | | | |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

INDICE

| | |
|---|----|
| INDICE | 3 |
| 1 Introduzione | 7 |
| 1.1 Scopo e campo di applicazione | 7 |
| 1.2 Elevazione del ponte, pianta e sezione trasversale dell'impalcato sospeso | 8 |
| 1.3 Riferimenti | 9 |
| 1.3.1 Specifiche di progetto | 9 |
| 1.3.2 Codici di progettazione | 9 |
| 1.3.3 Specifiche dei materiali | 10 |
| 1.3.4 Disegni | 11 |
| 1.3.5 Relazioni per l'impalcato sospeso | 13 |
| 1.4 Nomenclatura | 14 |
| 1.5 Modifiche progettuali | 15 |
| 1.5.1 Cassoni stradali | 15 |
| 1.5.2 Cassone ferroviario | 17 |
| 1.5.3 Traversi | 19 |
| 1.5.4 Intersezioni fra cassoni stradali, ferroviari e trasversi | 21 |
| 2 Stati limite | 22 |
| 2.1 Stati Limite di Servizio (SLS) | 23 |
| 2.2 Stati Limite Ultimi | 24 |
| 2.3 Stati Limite di Fatica | 25 |
| 2.4 Stati Limite di Integrità Strutturale | 26 |
| 3 Materiali | 26 |
| 3.1 Acciaio strutturale | 26 |
| 3.2 Bulloni ad alta resistenza | 27 |
| 3.3 Consumabili per saldatura | 28 |
| 4 Articolazione | 28 |
| 4.1 Sistema statico complessivo | 28 |
| 4.2 Collegamento tra gli elementi dell'impalcato sospeso | 29 |
| 5 Basi progettuali e combinazioni dei carichi | 29 |
| 5.1 Classificazione del ponte sospeso | 29 |
| 5.2 Livelli di danni consentiti dell'impalcato sospeso | 30 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3 | Carico e combinazioni di carichi | 31 |
| 6 | Analisi strutturale FE globale | 33 |
| 6.1 | Modello globale IBDAS ad elementi “beam” e modello semi-locale ad elementi “shell”... .. | 34 |
| 7 | Verifica – Acciaio longitudinale | 34 |
| 7.1 | ADVERS | 34 |
| 7.1.1 | Introduzione | 34 |
| 7.1.2 | Base per la verifica | 35 |
| 7.1.3 | Proprietà della sezione | 36 |
| 7.1.4 | Proprietà effettive della sezione trasversale | 37 |
| 7.1.5 | Sollecitazioni | 44 |
| 7.1.6 | Verifica ULS generale | 45 |
| 7.1.7 | Respirazione dell'anima | 48 |
| 7.1.8 | Input e Output | 49 |
| 7.1.9 | Verifica ULS generale con sollecitazioni trasversali | 53 |
| 8 | Fogli elettronici di verifica – Acciaio trasversale | 54 |
| 8.1 | Diaframmi | 54 |
| 9 | Verifica con i modelli FE locali | 56 |
| 9.1 | Introduzione | 56 |
| 9.2 | Condizioni limite e calibrazione | 58 |
| 9.2.1 | Sistemi di coordinate locali e globali | 61 |
| 9.2.2 | Concetto di base | 62 |
| 9.3 | Modello FE locale dell'impalcato del ponte | 64 |
| 9.3.1 | Geometria | 64 |
| 9.3.2 | Carichi e combinazioni dei carichi | 70 |
| 9.4 | Modello FE locale dei diaframmi del cassone stradale e ferroviario | 76 |
| 9.4.1 | Cassone stradale | 76 |
| 9.5 | Cassone ferroviario | 86 |
| 9.5.1 | Geometria | 86 |
| 9.5.2 | Reticolo | 89 |
| 9.5.3 | Carichi e combinazioni dei carichi | 91 |
| 9.6 | Ancoraggio dei pendini | 95 |
| 10 | Valutazione della fatica | 100 |
| 10.1 | Introduzione | 100 |

| | | | | |
|---|---|---|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | <i>Rev</i> <i>F0</i> | <i>Data</i> <i>20-06-2011</i> |

| | | |
|---------|---|-----|
| 10.2 | Applicazione dei carichi | 101 |
| 10.3 | Carichi non generati dall'uomo | 101 |
| 10.4 | Limite di fatica ad ampiezza costante..... | 105 |
| 10.5 | Variazione della sollecitazione ad ampiezza variabile..... | 106 |
| 10.6 | Particolari dell'impalcato di ponte sospeso..... | 107 |
| 10.7 | Metodo della durata illimitata | 109 |
| 10.7.1 | Principi di progettazione | 110 |
| 10.7.2 | Carico di fatica stradale..... | 110 |
| 10.7.3 | Carico di fatica ferroviario..... | 112 |
| 10.7.4 | Effetto del carico di fatica stradale e ferroviario | 113 |
| 10.8 | Metodo dell'accumulo di danni | 115 |
| 10.8.1 | Principi di progettazione | 115 |
| 10.8.2 | Carico di fatica stradale..... | 115 |
| 10.8.3 | Carico di fatica ferroviario..... | 117 |
| 10.8.4 | Effetto del carico di fatica stradale e ferroviario | 118 |
| 10.9 | Dettagli di fatica | 120 |
| 10.9.1 | Le categorie di fatica sono state tratte da EN 1993-1-9:2005, dalla tabella 8.1 alla 8.10, ed EN 1993-2:2006. Dettagli della piattabanda stradale | 120 |
| 10.9.2 | Ancoraggio dei pendini..... | 122 |
| 10.9.3 | Dettagli dell'impalcato stradale..... | 123 |
| 10.9.4 | Dettagli della piattabanda ferroviari | 126 |
| 10.9.5 | Dettagli dell'impalcato ferroviario | 127 |
| 10.9.6 | Dettagli del traverso | 129 |
| 10.9.7 | Miglioramento delle categorie di dettagli di fatica..... | 130 |
| 10.10 | Modelli di verifica della fatica | 131 |
| 10.10.1 | Modello globale IBDAS..... | 131 |
| 10.10.2 | Modello locale IBDAS di impalcato ortotropo | 131 |
| 10.10.3 | Modello FE stradale locale | 137 |
| 10.10.4 | Modello FE ferroviario locale | 138 |
| 10.10.5 | Modello FE locale dell'ancoraggio del pendino..... | 139 |
| 11 | Strutture di supporto..... | 140 |
| 11.1 | Introduzione..... | 140 |
| 11.2 | Ancoraggi dei pendini | 140 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 11.3 | Buffer, vincoli laterali e appoggi alle torri | 141 |
| 11.3.1 | Introduzione..... | 141 |
| 11.3.2 | Estensioni dei trasversi | 142 |
| 11.3.3 | Mensole di supporto della campata drop-in | 143 |
| 11.3.4 | Taglio e disposizione del supporto del giunto di dilatazione..... | 143 |
| 11.3.5 | Supporto verticale della struttura triangolare dei pilastri | 144 |
| 11.4 | Appoggi e giunti di dilatazione alle strutture terminali..... | 144 |
| 11.4.1 | Appoggi all'ingresso della struttura terminale..... | 145 |
| 11.4.2 | Appoggi all'estensione del cassone ferroviario | 147 |
| 11.4.3 | Giunto di dilatazione stradale | 147 |
| 11.4.4 | Giunti di dilatazione ferroviari | 148 |
| 11.5 | Estensione dell'impalcato stradale a incroci/aree di servizio..... | 149 |
| 11.6 | Supporto delle strutture secondarie..... | 149 |
| 12 | Indagini speciali a progetto | 150 |
| 12.1 | Sostituzione dei pendini..... | 150 |
| 12.2 | Rottura dei pendini | 151 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

1 Introduzione

La presente relazione descrive la progettazione dei seguenti elementi strutturali per l'impalcato sospeso.

- Cassone stradale: incluse le sezioni in acciaio irrigidite attraverso nervature longitudinali e diaframmi trasversali. Cassoni individuali collegati ai trasversi di sostegno. I cassoni sono completati da carenature aerodinamiche.
- Cassone ferroviario: formato da piastre esterne in acciaio irrigidite da irrigidimenti longitudinali e diaframmi trasversali; in particolare, gli elementi strutturali longitudinali sono disposti al di sotto di ciascun binario. Le sezioni di cassone ferroviario sono connesse ai trasversi di sostegno.
- Traversi: disposti a distanza di 30 m, e sostenuti dai pendini, sorreggono i cassoni stradali e ferroviari; realizzati come sezioni scatolari di altezza variabile.

In generale la progettazione è basata su quella illustrata nel Progetto di Gara.

1.1 Scopo e campo di applicazione

La presente relazione descrive i principi di progettazione per gli elementi strutturali in acciaio, dalle strutture terminali lato Sicilia (picchetto 88.49) alle strutture terminali lato Calabria (picchetto 3,723.99). L'impalcato sospeso ha una larghezza di 60 m ed è realizzato interamente in acciaio. È formato da tre cassoni longitudinali indipendenti, due per la strada e uno centrale per la ferrovia. I cassoni sono collegati da trasversi scatolari a distanza di 30 m.

In generale il Progetto Definitivo dell'impalcato sospeso si basa sulla Progettazione di Gara. Il Progetto Definitivo specifica gli aspetti progettuali più importanti e altri argomenti tecnici considerati importanti e/o speciali soluzioni per le esigenze progettuali.

Le verifiche di progetto sono riassunte nella "Relazione Tecnica Specialistica - Impalcato Sospeso". Calcoli più dettagliati sono illustrati nelle relazioni di calcolo per ciascun componente strutturale.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

1.2 Elevazione del ponte, pianta e sezione trasversale dell'impalcato sospeso

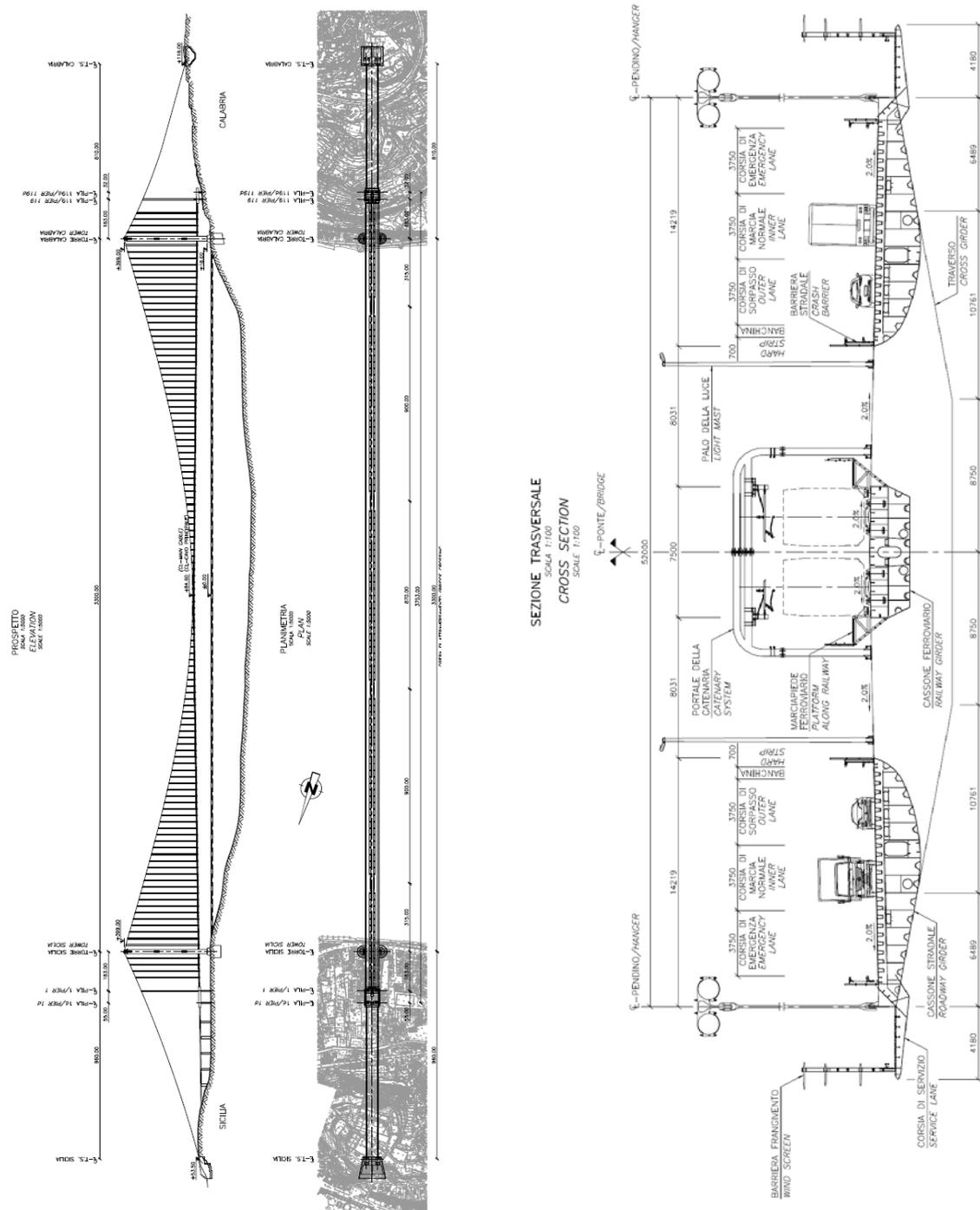


Figura 1-1 Elevazione del ponte, pianta e sezione trasversale dell'impalcato sospeso

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

1.3 Riferimenti

1.3.1 Specifiche di progetto

GCG.F.04.01 "Engineering – Definitive and Detailed Design: Basis of Design and Expected Performance Levels," Stretto di Messina, 27 ottobre 2004.

GCG.F.05.03 "Design Development – Requirements and Guidelines," Stretto di Messina, 22 ottobre 2004.

GCG.G.03.02 "Structural Steel Works and Protective Coatings," Stretto di Messina, 30 luglio 2004.

CG.10.00-P-RG-D-P-GE-00-00-00-00-02 "Design Basis, Structural, Annex."

1.3.2 Codici di progettazione

"Norme tecniche per le costruzioni," 2008 (NTC08).

EN 1991 Eurocode 1: Azioni sulle strutture - Parte 2: Carichi di traffico sui ponti

EN 1993 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings

EN 1993 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-5: Plated structural elements

EN 1993 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8: Design of joints

EN 1993 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: Fatigue

EN 1993 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-10: Selection of steel for fracture toughness and through thickness properties

EN 1993 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 2: Steel Bridges

Rete Ferroviaria Italia - Istruzione No. 44F "Verifiche a fatica dei ponti ferroviari"

Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, International Institute of Welding (IIW), doc. XIII-2151-07/XV-1254-07, Maggio 2007

Recommendations on Post Weld Fatigue Life Improvement of Steel and Aluminium Structures, International Institute of Welding (IIW), doc. XIII-2200r7-07, 06 Luglio 2010

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Eurocode, Design Manual, 1-9CL_Pics-v40, Settembre 2010

1.3.3 Specifiche dei materiali

EN 10025-1:2004 Hot-rolled products of structural steels – Part 1: General delivery conditions.

EN 10025-2:2004 Hot-rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels.

EN 10025-3:2004 Hot-rolled products of structural steels – Part 3: Technical delivery conditions for normalised / normalised weldable fine grain structural steels.

EN 10025-4:2004 Hot-rolled products of structural steels – Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels.

EN 10164:2004 Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product – Technical delivery conditions.

EN ISO 898-1:2009 Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel – Part 1: Bolts, screws and studs.

EN ISO 3506-1:2009 Mechanical properties of corrosion-resistance stainless-steel fasteners – Part 1: Bolts, screws and studs

EN ISO 3506-2:2009 Mechanical properties of corrosion-resistance stainless-steel fasteners – Part 2: Nuts

EN 20898-2:1994 Mechanical properties of fasteners – Part 2: Nuts with special proof load values – coarse thread (ISO 898-2:1992).

UNI EN 14399:2005-3 High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 3: System HR - Hexagon bolt and nut assemblies

EN ISO 14555:1998 Welding-Arc stud welding of metallic materials. Maggio 1995.

EN ISO 13918:1998 Welding-Studs for arc stud welding-Gennaio 1997.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

1.3.4 Disegni

Nella Tabella 1-1 sono elencati i disegni di progettazione dell'impalcato sospeso che corredano la presente relazione.

Tabella 1-1 Disegni di riferimento relativi all'impalcato sospeso

| Titolo del disegno | Numero del disegno |
|---|--|
| Generale, Elevazione | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-01_0 |
| Pianta generale, Sicilia | CG.10.00-P-PX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-01_0 |
| Pianta generale, Calabria | CG.10.00-P-PX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-04_0 |
| Campata principale, pianta e sezione | CG.10.00-P-PX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-02_0 |
| Ubicazione torre, pianta | CG.10.00-P-PX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-03_0 |
| Ubicazione torre, sezioni | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-01_0 |
| Campata laterale, pianta e sezione | CG.10.00-P-LX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-01_0 |
| Estremità ponte Sicilia, pianta e sezione | CG.10.00-P-LX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-02_0 |
| Estremità ponte Sicilia, sezioni | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-02_0 |
| Estremità ponte Calabria, pianta e sezione | CG.10.00-P-LX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-03_0 |
| Estremità ponte Calabria, sezioni | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-03_0 |
| Piano stradale - Campata principale e laterale - Sezione | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-CS-00-00-00-01_0 |
| Piano stradale - Campata principale e laterale - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CS-00-D0-00-01_0 |
| Piano stradale - Campata principale e laterale - Dettagli 1 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-CS-00-00-00-01_0 |
| Piano stradale - Campata principale e laterale - Dettagli 2 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-CS-00-00-00-02_0 |
| Piano stradale - Posizione torre - Sezione ed elevazione | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CS-00-00-00-01_0 |
| Piano stradale - Posizione torre - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CS-00-0D-00-02_0 |
| Piano stradale - Posizione torre - Dettagli | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-CS-00-00-00-03_0 |
| Piano stradale - Estremità ponte - Sezione | CG.10.00-P-LX-D-P-SV-I3-CS-00-00-00-01_0 |
| Piano stradale - Estremità ponte - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CS-00-D0-00-03_0 |
| Linea ferroviaria - Campata principale - Sezione | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-01_0 |
| Linea ferroviaria - Campata principale - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CF-00-D0-00-01_0 |
| Linea ferroviaria - Campata principale - Dettagli 1 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-01_0 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

| | |
|---|--|
| Linea ferroviaria - Campata principale - Dettagli 2 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-02_0 |
| Linea ferroviaria - Posizione torre - Sezione | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-02_0 |
| Linea ferroviaria - Posizione torre - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CF-00-D0-00-02_0 |
| Linea ferroviaria - Posizione torre - Dettagli | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-03_0 |
| Linea ferroviaria - Campata laterale - Sezione | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-03_0 |
| Linea ferroviaria - Campata laterale - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CF-00-D0-00-03_0 |
| Linea ferroviaria - Estremità ponte - Sezione | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-04_0 |
| Linea ferroviaria - Estremità ponte - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CF-00-D0-00-04_0 |
| Linea ferroviaria - Estremità ponte - Elevazione | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-01_0 |
| Linea ferroviaria - Estremità ponte - Intersezione | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-CF-00-00-00-02_0 |
| Traverso - Campata principale - Sezione 1 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-01_0 |
| Traverso - Campata principale - Sezione 2 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-02_0 |
| Traverso - Campata principale - Diaframmi 1 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-01_0 |
| Traverso - Campata principale - Diaframmi 2 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-06_0 |
| Traverso - Campata principale - Dettagli 1 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-01_0 |
| Traverso - Campata principale - Dettagli 2 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-02_0 |
| Traversi - Posizione torre – Sezione 1 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-03_0 |
| Traversi - Posizione torre – Sezione 2 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-07_0 |
| Traversi - Posizione torre – Sezione 3 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-04_0 |
| Traversi - Posizione torre – Diaframmi 1 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-02_0 |
| Traversi - Posizione torre – Diaframmi 2 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-03_0 |
| Traversi - Posizione torre – Diaframmi 3 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-07_0 |
| Traversi - Posizione torre – Diaframmi 4 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-08_0 |
| Traverso - Campata laterale - Sezione 1 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-05_0 |
| Traverso - Campata laterale - Sezione 2 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-08_0 |
| Traverso - Campata laterale - Diaframmi 1 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-04_0 |
| Traverso - Campata laterale - Diaframmi 2 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-09_0 |
| Traversi - Estremità ponte – Sezione 1 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-06_0 |
| Traversi - Estremità ponte – Sezione 2 | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-09_0 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

| | |
|---|--|
| Traversi - Estremità ponte - Diaframmi | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-D0-00-05_0 |
| Traversi - Ancoraggi pendini 1 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-03_0 |
| Traversi - Ancoraggi pendini 2 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-04_0 |
| Traversi - Ancoraggi pendini 3 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-05_0 |
| Traversi - Ancoraggi pendini 4 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-TP-00-00-00-06_0 |
| Incrocio - Pianta e sezione | CG.10.00-P-WX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-04_0 |
| Incrocio – Dettagli 1 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-01_0 |
| Incrocio – Dettagli 2 | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-02_0 |
| Incrocio - Console | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-06_0 |
| Portale per segnali stradali – Console | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-07_0 |
| Piastrine di base | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-05_0 |
| Accessi 1 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-02_0 |
| Accessi 2 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-03_0 |
| Accessi 3 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-04_0 |
| Deumidificazione - Planimetria generale | CG.10.00-P-PX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-05_0 |
| Deumidificazione – Planimetria traverso n° 1 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-08_0 |
| Deumidificazione – Planimetria traverso n° 2 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-09_0 |
| Deumidificazione – Planimetria traverso n° 3 | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-10_0 |
| Portacavi e transiti – Planimetria traverso | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-11_0 |
| Portacavi e straniti – Planimetria cassone stradale | CG.10.00-P-AX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-12_0 |
| Portacavi e straniti – Dettagli | CG.10.00-P-BX-D-P-SV-I3-00-00-00-00-03_0 |

1.3.5 Relazioni per l'impalcato sospeso

Le relazioni specialistiche e di calcolo elencate forniscono tutte le informazioni riguardo i principi di progettazione e le verifiche dell'impalcato sospeso.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Tabella 1-2 Relazioni di riferimento per l'impalcato sospeso

| Titolo della relazione | Numero di relazione |
|---|--|
| Impalcato sospeso - Relazione Tecnica Specialistica | CG.10.00-P-RX-D-P-SV-I3-IM-00-00-00-01_0 |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | CG.10.00-P-RG-D-P-SV-I3-IM-00-00-00-01_0 |
| Relazione di progetto – Cassone stradale, ferroviario e trasversi | CG.10.00-P-CL-D-P-SV-I3-00-00-00-00-01_0 |
| Relazione di progetto - Strutture di supporto | CG.10.00-P-CL-D-P-SV-I3-00-00-00-00-02_0 |
| Relazione di progetto - Modello FE locale di impalcato sospeso | CG.10.00-P-CL-D-P-SV-I3-00-00-00-00-03_0 |
| Relazione di progetto - Valutazione della fatica dell'impalcato sospeso | CG.10.00-P-CL-D-P-SV-I3-00-00-00-00-04_0 |
| Relazione di progetto – Indagini speciali a progetto | CG.10.00-P-CL-D-P-SV-I3-00-00-00-00-05_0 |

1.4 Nomenclatura

La sezione fornisce le descrizioni dei termini comunemente usati nella relazione per vari componenti dell'impalcato sospeso:

Cassone stradale - cassone ortotropo in acciaio per il traffico stradale, collegato dai trasversi.

Cassone ferroviario - cassone ortotropo in acciaio per il traffico ferroviario, collegato dai trasversi.

Trasverso - travi trasversali che collegano il cassone ferroviario e i cassoni stradali ogni 30 m.

Irrigidimenti longitudinali - elementi longitudinali di lamiera utilizzati per rinforzare la piastra verticale dell'impalcato sospeso, le anime e le piastre di fondo, così come le anime e piastre di fondo e dell'impalcato dei trasversi.

Diaframmi trasversali - diaframmi realizzati su cassoni stradali, ferroviari e trasversi.

Ancoraggio pendini - il collegamento dei pendini ai trasversi.

Sistema di fissaggio della ferrovia - il collegamento dei binari ferroviari al cassone ferroviario.

Trave a T - travi longitudinali a T collocate al di sotto delle quattro rotaie per sostenere i carichi locali dei treni.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Campata drop-in - campata con cassone stradale da 60 metri sulle torri.

1.5 Modifiche progettuali

Per alcune parti delle strutture dell'impalcato sospeso si è ritenuto vantaggioso apportare modifiche alla progettazione; tali modifiche saranno descritte nella presente relazione.

1.5.1 Cassoni stradali

1. Rispetto alla sezione trasversale della documentazione di gara la modifica principale è costituita dall'inclinazione del 2,0% verso l'esterno della piastra superiore che in precedenza era inclinata verso l'interno. A seguito di questa modifica il pozzetto di drenaggio della pavimentazione viene spostato sul bordo esterno della piastra dell'impalcato, la posizione delle barriere spartitraffico viene leggermente modificata in quanto il canale di scolo longitudinale è posizionato sul bordo esterno della piastra dell'impalcato.
2. Oltre alla modifica principale della sezione trasversale, è stata invertita la direzione del traffico stradale, la qual cosa influisce sullo spessore della piastra dell'impalcato per la configurazione delle corsie.
3. A seguito dell'ottimizzazione della sezione trasversale complessiva, della semplificazione dell'ancoraggio del pendino e dei dettagli di collegamento alla corsia di servizio la larghezza complessiva del cassone stradale è stata ridotta. La piastra al lato esterno del cassone stradale è stata inclinata maggiormente per facilitare la connessione agli ancoraggi dei pendini e il raggio di collegamento tra la piastra dell'impalcato stradale e la piastra del bordo è stato modificato per fornire più spazio al canale di scolo longitudinale. L'ampiezza orizzontale teorica del cassone stradale diventa quindi 14.227 m.
4. I due irrigidimenti a L al di sotto della piastra del bordo sono stati sostituiti da irrigidimenti piani per conformarsi all'ottimizzazione della fabbricazione. La prima nervatura dell'impalcato sotto le barriere spartitraffico nella corsia di emergenza è sostituita da due irrigidimenti piatti, così come la nervatura sotto il corridoio di ispezione, a scopo di conformità con le esigenze delle categorie di dettagli di fatica elevata. Per far fronte alle esigenze di fatica, la piastra dentata che supporta le nervature dei diaframmi è aumentata da 10 a 15 mm nelle corsie dei veicoli lenti e veloci e le forme dei tagli sono state modificate.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

5. Le verifiche sono eseguite supponendo che lo spessore della pavimentazione possa essere portato da 12 mm a 40 mm; lo spessore di 12 mm viene utilizzato per la verifica della concentrazione delle sollecitazioni nell'impalcato ortotropo e lo spessore di 40 mm sarà utilizzato per il carico fisso globale.
6. Preparazioni eseguite per altri 3 incroci da realizzare in seguito
7. I fattori di sicurezza per la resistenza a fatica sono stati incrementati producendo aumenti negli spessori dei piatti. La piattabanda superiore dell'impalcato stradale nelle due corsie di traffico è aumentata da 16 mm a 17 mm e le nervature sottostanti sono aumentate da 7 mm a 9 mm.
8. Per fare fronte alle esigenze di fatica dei giunti delle nervature, le nervature sotto la piastra dell'impalcato sono aumentate localmente a una larghezza di 7.3 m. Lo spessore è aumentato da 9 mm a 10 mm e 14 mm ai giunti del traverso da 9 mm a 11 mm e 13 mm ai giunti di erezione.
9. Per far fronte alle esigenze di fatica ai giunti nella piattabanda, lo spessore è in generale aumentato localmente da 8 a 13 mm ai giunti del traverso e ai giunti di erezione (ogni 60m).
10. Le piastre di collegamento per le nervature inferiori sono rimosse e sostituite da un collegamento diretto delle nervature ai diaframmi. Le lunette angolari sono mantenute in corrispondenza della flangia della nervatura stessa.
11. Le piastre di base della barriera spartitraffico stradale sono state modificate passando dalla soluzione saldata a quella imbullonata per conformarsi alle esigenze delle categorie di dettagli a fatica elevata.
12. Per fare fronte alle esigenze di fatica, il fissaggio dei pozzetti è stato modificato passando dalla soluzione saldata a quella imbullonata con due sigillature a giunto.
13. Il numero di tubi di drenaggio all'interno del cassone stradale è stato ridotto da 3 ad 1 tubo e i fori nei diaframmi stradali per i cavi sono stati rilocati.
14. Le dimensioni dei passi d'uomo all'interno del cassone stradale sono state modificate a 1300x800 mm a causa delle forze di taglio nei diaframmi.

| | | | | |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 | |

15. La terminazione di irrigidimenti e diaframmi sono state migliorate, in generale, aggiungendo piastre finali con raggio min. di 150 mm. In tal modo, la categoria di fatica dei dettagli può essere migliorata rispettando le esigenze di fatica.

16. Per fare fronte alle esigenze di fatica, è stato introdotto in generale anche il miglioramento della saldatura tramite levigatura dei 6 giunti inferiori a flangia/diaframma tra i traversi.

Le suddette modifiche hanno modificato la geometria generale della sezione trasversale, come mostrato in Figura 1-2.

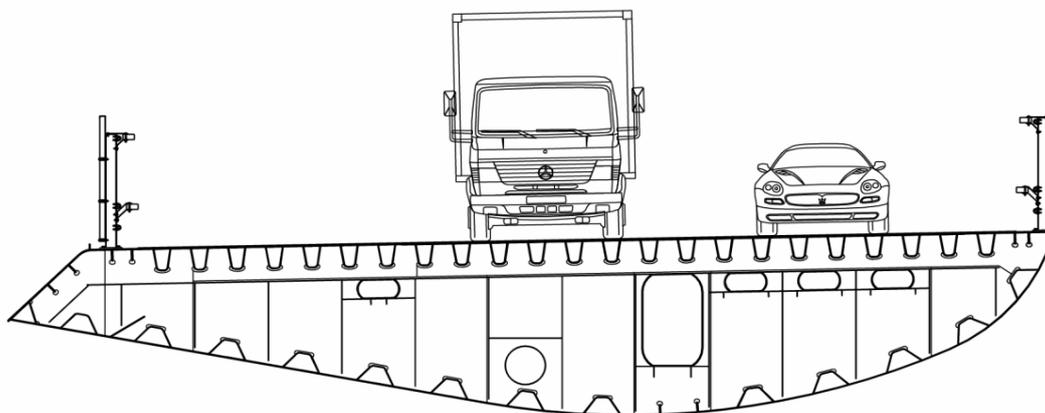


Figura 1-2 Sezione trasversale modificata per il cassone stradale (la corsia di servizio non è raffigurata)

1.5.2 Cassone ferroviario

1. La forma complessiva del cassone in acciaio è stata modificata rispetto al progetto di gara. L'angolo dell'anima inclinata è cambiato da 44° a 63°, mentre la piastra dell'anima verticale resta invariata. Lo spessore della piattabanda inferiore è ridotto da 12 mm a 10 mm per mantenere invariate le proprietà della sezione trasversale.
2. Gli angolari previsti nella progettazione di gara per irrigidire la piastra dell'impalcato, la piattabanda inclinata e le piastre delle anime sono sostituiti da irrigidimenti piani che consentono di conformarsi all'ottimizzazione di fabbricazione.
3. Le nervature sotto la piastra dell'impalcato sono state inoltre sostituite da irrigidimenti piani per conformarsi alle esigenze delle categorie di dettagli a fatica elevata. L'acciaio extra con

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

irrigidimenti piani è quasi bilanciato riducendo lo spessore della piastra dell'impalcato da 16 a 15 mm.

4. Le travi a T, gli irrigidimenti piani e di nervatura sono continui lungo i diaframmi, in modo da eliminare i problemi di fatica dovuti all'interruzione. Il diaframma al supporto degli irrigidimenti a T è rinforzato localmente da 10 a 15 mm.
5. I fattori di sicurezza per la resistenza a fatica sono stati incrementati producendo aumenti negli spessori delle piastre.
6. Il sistema di fissaggio rotaie è stato modificato rispetto al progetto di gara passando a una soluzione interamente saldata con irrigidimento addizionale per 1250 mm. I profili a L della sovrastruttura del binario ferroviario consentiranno inoltre il drenaggio per 10 m.
7. La distanza tra gli irrigidimenti intermedi che supportano la sovrastruttura ferroviaria è stata modificata da 1875 mm a 1250 mm, con conseguente raddoppio del numero di irrigidimenti.
8. Per fare fronte alle esigenze di fatica, la piastra inferiore è stata aumentata localmente da 10 a 15 mm ai giunti di erezione (ogni 60 m). La piattabanda è inoltre rinforzata localmente su tutte le campate ai 4 diaframmi centrali sulle anime inclinate. Per le campate in prossimità delle torri, si richiede un ulteriore incremento parziale della piattabanda attraverso il traverso.
9. Le barriere spartitraffico ferroviarie sono state realizzate nella piattaforma lungo la ferrovia e le relative piastre di base modificate passando dalla soluzione saldata a quella imbullonata per conformarsi alle esigenze delle categorie di dettagli a fatica elevata. Lo stesso ragionamento si applica al fissaggio dei pozzetti, modificato passando dalla soluzione saldata a quella imbullonata con due sigillature a giunto.
10. Le terminazioni di irrigidimenti e diaframmi sono state migliorate, in generale, aggiungendo piastre finali con raggio min. di 150 mm. In tal modo, la categoria di fatica dei dettagli può essere migliorata rispettando le esigenze di fatica.
11. Sono state apportate modifiche al diaframma con variazioni alla disposizione di saldature e irrigidimenti. I fori nei diaframmi ferroviari dei cavi sono stati riposizionati e i cavi dell'alta tensione rimossi dal cassone ferroviario. Il numero di tubi di scarico nel cassone ferroviario è stato inoltre ridotto da 4 a 2.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

12. Per fare fronte alle esigenze di fatica, è stato introdotto in generale anche il miglioramento della saldatura tramite levigatura dei 2 giunti centrali del diaframma. I due diaframmi, con i due supplementari, sono completamente saldati.

Le suddette modifiche hanno modificato la geometria generale della sezione trasversale, come mostrato in Figura 1-3.

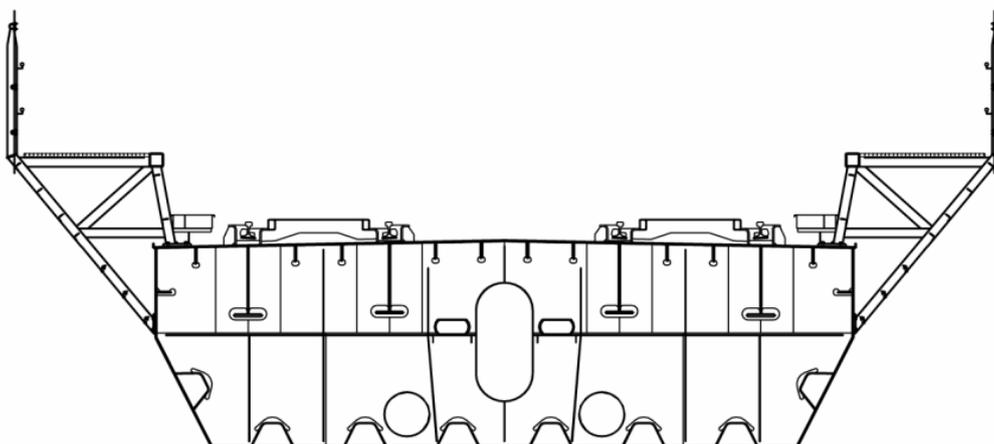


Figura 1-3 Sezione trasversale modificata per il cassone ferroviario compresa la passerella lungo la ferrovia

1.5.3 Traversi

1. Rispetto alla progettazione di gara è stata invertita la direzione del traffico stradale. Questa modifica ha portato ad una pendenza continua verso l'esterno del 2,0 % della piastra superiore per tutta la lunghezza dei trasversi, si veda la Figura 1-4 (mostrato tipo T1-T3).
2. La soluzione del progetto di gara presentava i diaframmi vicino al cassone ferroviario a una distanza di 2.5 m. Tale configurazione è stata consolidata da un ulteriore irrigidimento trasversale, dimezzando così la lunghezza di imbozzamento della piastra come indicato in Figura 1-4.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

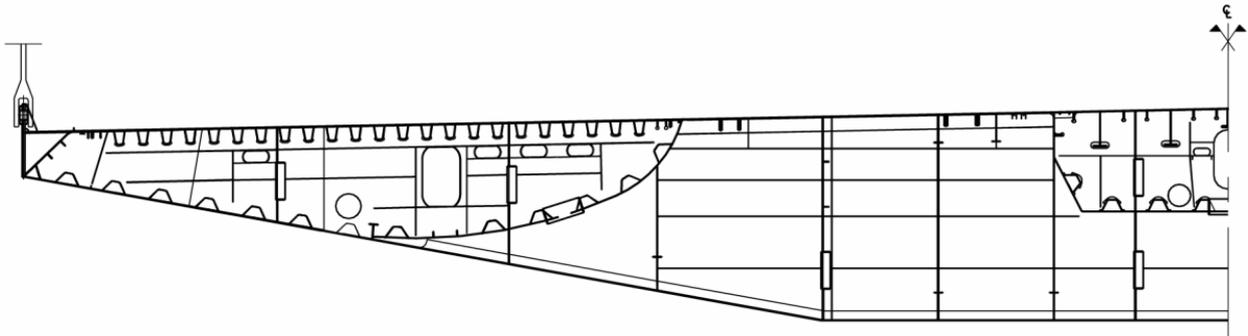


Figura 1-4 Pendenza continua del trasverso verso l'esterno

3. I due irrigidimenti a T sulle anime e sulla piattabanda sono stati sostituiti da irrigidimenti piani per conformarsi all'ottimizzazione di fabbricazione, vedere Figura 1-5. Nei trasversi gli irrigidimenti a T e gli irrigidimenti piani sono preferibili ai normali profili delle nervature in quanto sono più facilmente realizzabili nella geometria complessa.
4. Lo spessore di 4.4 m centrali della piattabanda è stato incrementato di 8 mm, mentre le due piastre vicine (2 x 4.05 m) sono state aumentate di 3 mm. Anche la piastra superiore in prossimità del cassone ferroviario ha subito un aumento di spessore di 3-4 mm. Tutte le modifiche sono state eseguite per conformarsi alle esigenze di fatica.
5. La geometria dell'ancoraggio dei pendini è stata in generale alterata per ottimizzare la progettazione con una distribuzione del carico dalla piastra di ancoraggio principale direttamente nell'anima del traverso.

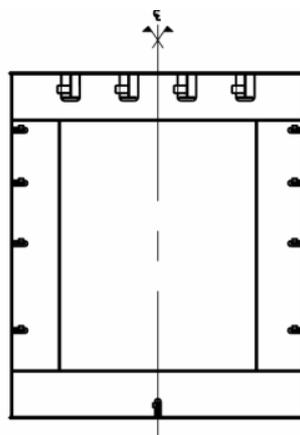


Figura 1-5 Irrigidimenti piani su anime del traverso e piattabanda

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

6. Per fare fronte alle esigenze di fatica, è stato introdotto in generale anche il miglioramento della saldatura tramite levigatura di tutti i diaframmi situati sulla piattabanda orizzontale. Piattabanda e piastra superiore sono state trattate insieme a 500 mm delle relative anime.
7. Le terminazioni di irrigidimenti e diaframmi sono state migliorate, in generale, aggiungendo piastre finali con raggio min. di 150 mm. In tal modo, la categoria di fatica dei dettagli può essere migliorata rispettando le esigenze di fatica.
8. Sono state apportate modifiche anche al traverso T7 alla struttura terminale. La forte esigenza di capacità torsionale dovuta alle campate adiacenti ha condotto a un ampliamento della sezione trasversale da 1700 a 2700 mm. La larghezza è stata inoltre determinata per fare fronte al movimento del giunto di dilatazione.

1.5.4 Intersezioni fra cassoni stradali, ferroviari e trasversi

1. Gli irrigidimenti nel trasverso sono disposti in modo che tutti gli irrigidimenti dell'impalcato stradale e ferroviario attraversino l'interno del traverso. Questo ha lo scopo di facilitare l'interconnessione con le sezioni del cassone stradale e ferroviario e migliorare la resistenza a fatica. Inoltre questa soluzione, grazie alla rigidità uniforme dell'impalcato, assicura un elevato comfort di guida quando si passa sul trasverso. Nella parte restante del trasverso, gli irrigidimenti longitudinali a T si applicano alla piastra dell'impalcato in direzione longitudinale del traverso stesso.
2. L'anima e le nervature inferiori sul cassone stradale sono interrotte all'anima del traverso, ma sono state introdotte sezioni delle nervature extra ridotte su ambo i lati dell'anima da saldare all'anima stessa tramite doppie saldature a penetrazione completa. In tal modo, si evitano i tagli nell'anima verso l'ancoraggio dei pendini e si mantiene l'esigenza di una categoria di dettaglio a fatica elevata.
3. Per far fronte alle esigenze di fatica, la piastra dentata che supporta le nervature all'anima del cassone stradale è aumentata da 10 a 25 mm nelle corsie dei veicoli lenti e veloci e le forme dei tagli sono state modificate.
4. Piattabanda, anime inclinate e relative nervature attraversano l'anima del traverso, mentre le piastre verticali dell'anima sono interrotte.

|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
|---|---|---|--|------------|-------------|----|------------|
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table> | <i>Rev</i> | <i>Data</i> | F0 | 20-06-2011 |
| <i>Rev</i> | <i>Data</i> | | | | | | |
| F0 | 20-06-2011 | | | | | | |

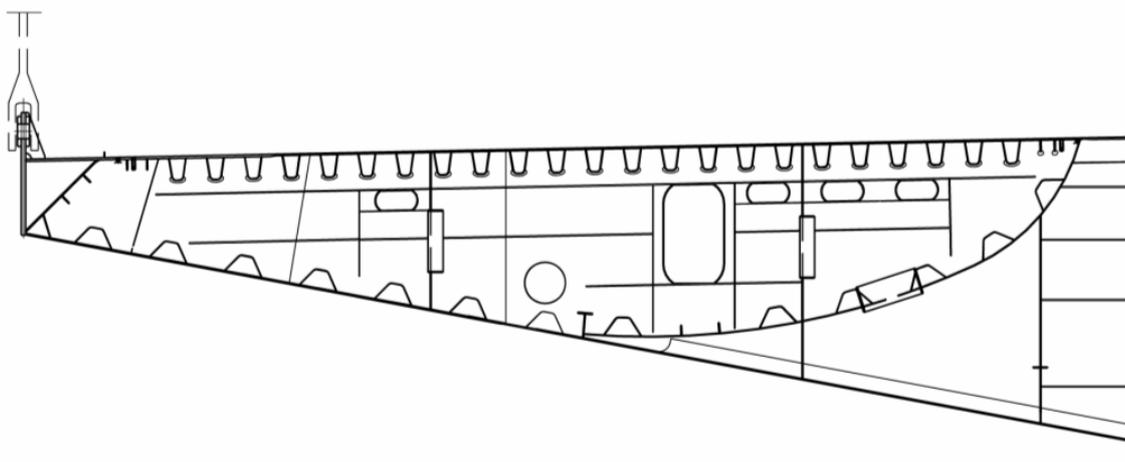


Figura 1-6 *Nervature stradali - dettaglio dell'intersezione dell'anima del trasverso*

Le intersezioni del traverso ai cassoni stradali e ferroviari sono riportate in Figura 1-6 e 1-7.

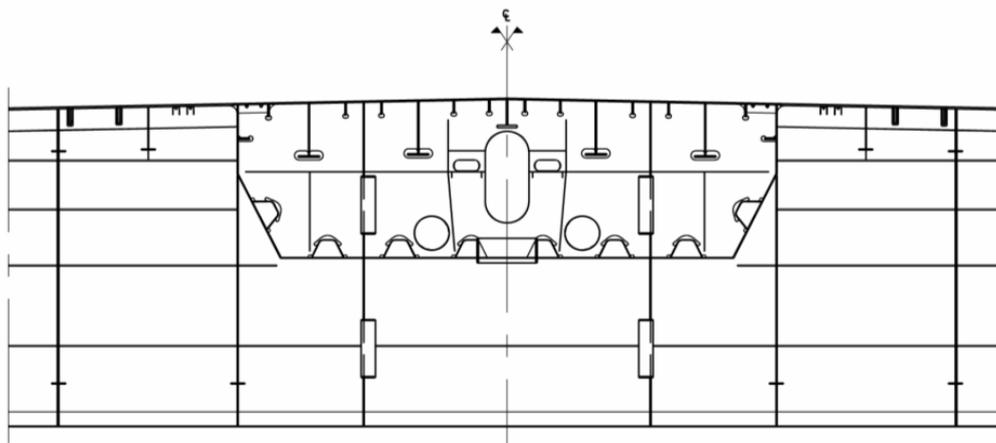


Figura 1-7 *Nervature ferroviarie - dettaglio dell'intersezione dell'anima del trasverso*

2 Stati limite

Questa sezione descrive gli stati limite e i corrispondenti requisiti prestazionali che regolano il proporzionamento dei componenti dell'impalcato sospeso secondo i principi base del progetto GCG.F.04.01 e NTC08. Le prestazioni dei componenti dell'impalcato vengono verificate agli Stati Limite di Servizio (SLS 1 e SLS2) e agli Stati Limite Ultimi (ULS).

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

2.1 Stati Limite di Servizio (SLS)

NTC08 Capitolo 2.2.2 definisce i seguenti stati limite di servizio (SLS) che devono essere valutati in una progettazione strutturale:

- Danni locali che possono ridurre la durata della struttura
- Spostamenti o deformazioni che potrebbero limitare l'utilizzo della struttura, l'efficienza e l'aspetto
- Spostamenti o deformazioni che potrebbero compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti e macchinari
- Vibrazioni che potrebbero compromettere l'utilizzo della struttura
- Danni causati da fatica che potrebbero compromettere la durata
- Corrosione e/o eccessivo deterioramento dei materiali a seguito dell'esposizione agli agenti atmosferici

I principi base del progetto GCG.F.04.01 Capitolo 3.1 specificano i requisiti prestazionali per la struttura con due livelli di servizio o con i carichi per l'utilizzo normale. I requisiti prestazionali SLS sono indicati alla Tabella 2-1.

Tabella 2-1 *Requisiti prestazionali SLS*

| Stato limite | Requisito prestazionale |
|--------------|--|
| SLS1 | È garantita la percorribilità di strada e ferrovia. Nessun danno strutturale. La struttura rimane elastica e tutte le deformazioni sono reversibili. |
| SLS2 | Come per SLS1, con la sola differenza che è garantita solamente la percorribilità della strada. |

Lo stato limite SLS2 è usato per verificare le condizioni provvisorie di costruzione dei componenti dell'impalcato sospeso e i particolari componenti del ponte a costruzione terminata.

Gli SLS specifici verificati per i componenti dell'impalcato sospeso sono:

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

- Sollecitazioni sulle sezioni trasversali effettive tutte inferiori alla resistenza allo snervamento dei materiali.
- Deformazione dell'impalcato e delle rotaie anche in relazione al comfort e alla sicurezza dei veicoli in viaggio.

2.2 Stati Limite Ultimi

NTC08 Capitolo 2.2.1 definisce i seguenti Stati Limite Ultimi (ULS) che devono essere valutati in una progettazione strutturale:

- Perdita di equilibrio della struttura o parte di essa
- Eccesso di spostamento o deformazione
- Raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti della struttura, giunti o fondazioni
- Raggiungimento della massima capacità di resistenza della struttura in toto
- Raggiungimento dei meccanismi di cedimento del terreno
- Cedimento di strutture e giunti per fatica
- Cedimento di strutture e giunti per altri effetti correlati al tempo
- Instabilità di parti della struttura o della struttura in toto

I principi base del progetto GCG.F.04.01 Capitolo 3.1 specificano i requisiti prestazionali per la struttura con carichi ultimi o rari. I requisiti prestazionali sono indicati alla Tabella 2-2.

Tabella 2-2 *Requisiti prestazionali ULS.*

| Stato limite | Requisito prestazionale |
|--------------|---|
| ULS | È ammessa la perdita temporanea del livello di servizio Il sistema strutturale principale mantiene la sua piena integrità. I danni strutturali ai componenti secondari possono essere riparati tramite lavori di manutenzione straordinaria |

| | | | | |
|---|---|---|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | <i>Rev</i> <i>F0</i> | <i>Data</i> <i>20-06-2011</i> |

Gli ULS specifici valutati per i componenti dell'impalcato sospeso sono:

- Le sollecitazioni sulle sezioni trasversali effettive sono generalmente inferiori al limite di snervamento del materiale. È comunque consentito lo snervamento di aree locali di dimensioni limitate.
- I giunti saldati assicurano sufficiente capacità.
- Le sollecitazioni attraverso lo spessore sulle piastre sono inferiori alle sollecitazioni consentite per il tipo di acciaio specificato.

Per l'impalcato sospeso, si considera la sostituzione dei pendini nelle normali combinazioni di carico ULS. Nell'ULS per l'impalcato sospeso viene preso in considerazione anche il caso di un carico accidentale con rottura dei pendini, onde assicurare che l'impalcato del ponte possa mantenere la sua piena integrità in caso di perdita di un pendino.

2.3 Stati Limite di Fatica

NTC08 Capitoli 2.2.1 e 2.2.2 non distingue gli stati limite di fatica (FLS) dagli stati limite di servizio e dagli stati limite ultimi con conseguenze e requisiti prestazionali analoghi. Tuttavia in NTC08 Capitolo 4.2.2.1 vengono distinti gli stati limite di fatica (FLS) perché i carichi e le combinazioni di carico utilizzate per la verifica sono differenti, come pure i mezzi con cui vengono verificati gli elementi. NTC08 Capitoli 2.2.1 e 2.2.2 definisce i seguenti ULS e SLS correlati alla fatica che devono essere valutati in una progettazione strutturale:

- Danni provocati dalla fatica che potrebbero compromettere la durata (SLS)
- Cedimento di strutture e giunti per fatica (ULS)

Gli FLS specifici che vengono valutati per i componenti dell'impalcato sospeso sono:

- Imbozzamento elastico allo stato limite di servizio, noto come “plate breathing” (“respirazione della piastra”)
- Le sollecitazioni dell'acciaio con carico di fatica sono inferiori ai limiti delle sollecitazioni per la categoria di dettaglio corrispondente e al numero calcolato di cicli di sollecitazione.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

2.4 Stati Limite di Integrità Strutturale

Per l'impalcato non vi sono requisiti riguardanti gli Stati Limite di Integrità Strutturale (SILS).

3 Materiali

In questa sezione sono descritte le proprietà meccaniche dei materiali da costruzione per l'impalcato sospeso.

3.1 Acciaio strutturale

Innanzitutto è previsto che i componenti strutturali dell'impalcato sospeso siano realizzati con acciai strutturali di classe S355ML, S420ML e S460 ML, prodotti in conformità con EN 10025-4. Si presuppone che gli acciai abbiano le proprietà meccaniche indicate nella Tabella 3-1, in conformità con NTC08 Capitolo 11.3.4.1. Il fabbricante dell'acciaio ha confermato che le proprietà meccaniche non cambieranno nel caso di materiali con spessore inferiore a 100 mm, com'è tipico dei prodotti in acciaio laminato.

Tabella 3-1 Proprietà meccaniche degli acciai strutturali per spessori inferiori a 100 mm.

| Classe | Resistenza allo snervamento, f_{yk} (MPa) | Resistenza alla trazione, f_{tk} (MPa) |
|--------|---|--|
| S355ML | 355 | 470 |
| S420ML | 420 | 520 |
| S460ML | 460 | 540 |

Si presuppone inoltre che tutti gli acciai strutturali abbiano le seguenti proprietà, in conformità con NTC08 Capitolo 11.3.4.1:

- Modulo di elasticità: $E=210,000$ MPa
- Rapporto di Poisson: $\nu = 0.3$
- Modulo di taglio: $G=77,000$ MPa
- Coefficiente di dilatazione termica: $\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Densità: $\rho = 7850$ kg/m³

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

I fattori parziali del materiale (coefficienti di sicurezza) utilizzati per verificare gli elementi strutturali sono conformi a NTC08 Capitoli 4.2.4.1.1, 4.2.4.1.4 e sono elencati nella Tabella 3-2.

Tabella 3-2 Fattori parziali del materiale per l'acciaio strutturale (ULS)

| Verifica | Fattore parziale |
|---|----------------------|
| Resistenza delle sezioni di classe 1, 2, 3 e 4 | $\gamma_{M0} = 1.05$ |
| Resistenza all'instabilità degli elementi nei ponti stradali e ferroviari | $\gamma_{M1} = 1.10$ |
| Resistenza alla frattura delle sezioni sotto tensione (indebolite da fori) | $\gamma_{M2} = 1.25$ |
| Resistenza alla fatica della piastra dell'impalcato stradale (vita sicura ("safe life") con ridotte conseguenze in caso di rottura) | $\gamma_{mf} = 1.15$ |
| Resistenza alla fatica del cassone stradale (vita sicura ("safe life") con elevate conseguenze in caso di rottura) | $\gamma_{mf} = 1.35$ |
| Resistenza alla fatica di tutti i componenti del cassone ferroviario e dei trasversi (vita sicura ("safe life") con elevate conseguenze in caso di rottura) | $\gamma_{mf} = 1.35$ |

Fattori parziali del materiale per l'acciaio strutturale in situazioni di carico accidentale entro ULS
 $\gamma_M = 1.00$

3.2 Bulloni ad alta resistenza

Per tutte le giunzioni bullonate si usano bulloni strutturali ad alta resistenza di classe 8.8 o 10.9, prodotti in conformità con EN ISO 898. Si presuppone che i bulloni ad alta resistenza abbiano le proprietà meccaniche elencate nella Tabella 3-3, in conformità con NTC08 Capitolo 11.3.4.6.1. Ove appropriato, si utilizzeranno bulloni in acciaio inox di classe A4-70 o A4-80 per il fissaggio della struttura ausiliaria all'esterno dell'impalcato sospeso.

Tabella 3-3 Proprietà meccaniche dei bulloni strutturali

| Classe | Resistenza allo snervamento, f_{yb} (MPa) | Resistenza alla trazione, f_{tb} (MPa) |
|--------|---|--|
| 8.8 | 640 | 800 |
| 10.9 | 900 | 1000 |
| A4-70 | 450 | 700 |
| A4-80 | 600 | 800 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

I fattori parziali del materiale (coefficienti di sicurezza) utilizzati per verificare le giunzioni bullonate e i giunti assiali sono conformi a NTC08 Capitolo 4.2.8.1.1 e sono elencati nella Tabella 3-4.

Tabella 3-1 Fattori parziali del materiale per collegamenti imbullonati (ULS)

| Verifica | Fattore parziale |
|--------------------------------------|--|
| Resistenza al taglio del bullone | $\gamma_{M2} = 1.25$ |
| Resistenza alla tensione del bullone | |
| Resistenza locale appoggi/piastra | |
| Resistenza allo scivolamento ULS | $\gamma_{M2} = 1.25$ |
| Resistenza allo scivolamento SLS | $\gamma_{M2} = 1.15$ |
| Forza di pre-caricamento del bullone | $\gamma_{M2} = 1.10$ |

Fattori parziali del materiale per le giunzioni imbullonate in situazioni di carico accidentale entro ULS $\gamma_M = 1.00$

3.3 Consumabili per saldatura

I consumabili per saldatura dovranno essere conformi ai requisiti di EN 1993-1-8 Capitolo 4.2.

Il fattore parziale materiale in ULS, $\gamma_{M2} = 1.25$, utilizzato per verificare le sezioni e i collegamenti saldati è conforme al capitolo 4.2.8.1.1 di NTC08. Fattori parziali del materiale per le saldature in situazioni di carico accidentale entro ULS $\gamma_M = 1.00$.

4 Articolazione

4.1 Sistema statico complessivo

In generale per l'impalcato sospeso è stato adottato il sistema statico della Progettazione di Gara.

- I cassoni stradali sono continui tra le strutture terminali, salvo in corrispondenza dei due giunti di dilatazione situati a +/- 30 m da ciascuna delle torri.
- Il cassone ferroviario è continuo tra una struttura terminale e l'altra. Nelle strutture terminali sono sistemati degli appoggi in due punti, in modo da assicurare che vengano rispettati i requisiti di allineamento sia verticale che orizzontale del cassone ferroviario.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

- Tra i due trasversi nella zona della torre è installata una struttura speciale formata da due triangoli interconnessi e da un collegamento di ammortizzazione con le gambe di torre. La struttura garantisce che le flessioni trasversali non vengano in alcun modo trasferite dalla campata principale e attraverso il dispositivo alla campata laterale. La struttura a X è sostenuta verticalmente da un collegamento a perni con il cassone ferroviario e progettata dal gruppo che si occupa delle articolazioni
- I cassoni stradali e ferroviari sono collegati tramite trasversi chiusi.

4.2 Collegamento tra gli elementi dell'impalcato sospeso

I trasversi chiusi in acciaio hanno una grande rigidità torsionale. Il collegamento con i cassoni longitudinali è realizzato con diaframmi chiusi, in modo che sia possibile il trasferimento dei momenti in tutte e 3 le direzioni. Questo vale per le analisi effettuate e anche per la progettazione dei giunti illustrata nei disegni. In questo modo i carichi mobili sui cassoni vengono distribuiti il più possibile su tutte le strutture dell'impalcato, riducendo al minimo flessioni contrarie.

5 Basi progettuali e combinazioni dei carichi

5.1 Classificazione del ponte sospeso

Secondo i Principi Base (GCG.F.04.01) Capitolo 2, il ponte sospeso è classificato come segue:

Tabella 5-1 Classificazione dei componenti strutturali del ponte sospeso

| Livello macro | Livello meso | | Componenti primari (C1) | Componenti secondari (C2) |
|--------------------------------|-------------------------|--|-------------------------|---------------------------|
| | Strutture | Sotto-strutture | | |
| Sistema strutturale principale | Impalcato standard | Traversi | X | |
| | | Cassone ferroviario | | X |
| | | Cassone stradale | | X |
| | Zone speciali impalcato | Strutture finali e giunti di dilatazione | | X |
| | | Vicinanza delle torri e | | X |

| | | | | |
|---|---|--|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

| | | | | |
|--|--|---------------------|--|--|
| | | sistema di ritenuta | | |
|--|--|---------------------|--|--|

Componenti primari (C1): critici, non-riparabili o che impongono la messa fuori servizio del ponte per un periodo prolungato a scopo di riparazione;

Componenti secondari (C2): riparabili, con eventuali limitazioni dell'attività del ponte.

Dalla Tabella 5-2 si evince che i traversi sono classificati componenti primari, mentre la parte restante del ponte sospeso si classifica come formata da componenti secondari.

5.2 Livelli di danni consentiti dell'impalcato sospeso

La Tabella 5-2 mostra i danni consentiti dei componenti dell'impalcato sospeso in funzione dello stato limite associato; fare riferimento ai Principi Base, Capitolo 4.1.

Tabella 5-2 Decomposizione strutturale e livelli di danni consentiti dell'impalcato sospeso

| Livello macro | Livello meso | | SLS ↓ | ULS ↓ | SILS ↓ | |
|--------------------------------|-------------------------|---|----------|----------|-----------|----|
| | Strutture | Sotto-strutture | | | | |
| Sistema strutturale principale | Impalcato standard | Traverso | ND | MD | SD | SD |
| | | Cassone ferroviario | ND | MD | SD | SD |
| | | Cassone stradale | ND | MD | SD | SD |
| | Zone speciali impalcato | Strutture finali e giunti di dilatazione | DD | MD | SD | SD |
| | | Vicinanza delle torri e sistema di ritenuta | DD | MD | SD | SD |

ND: Nessun danno, DD: Danno da degrado, MD: Danno minimo, SD: Danno significativo.

La Tabella 5-2 evidenzia che per l'impalcato sospeso in generale, non sono consentiti danni nelle combinazioni di carico SLS, mentre sono consentiti danni da degrado dei componenti meccanici fissati all'impalcato sospeso nelle combinazioni di carico SLS. Per le combinazioni di carico SLS (SLS1 & SLS2) si richiede inoltre che i componenti dell'impalcato sospeso restino allo stato elastico e le deformazioni siano reversibili, come indicato anche al capitolo 2.1.

Per le combinazioni di carico ULS, è consentito il danno minimo per i componenti dell'impalcato sospeso. Per le combinazioni di carico ULS si richiede inoltre che il sistema strutturale principale mantenga la propria integrità completa, in questo caso i traversi. I danni strutturali ai componenti

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

secondari come cassone ferroviario e stradale possono essere riparati tramite lavori di manutenzione straordinaria.

Per le combinazioni di carico SILS, è consentito il danno significativo per i componenti dell'impalcato sospeso. Non si considerano quindi le combinazioni di carico SILS per i componenti dell'impalcato sospeso.

5.3 Carico e combinazioni di carichi

Le azioni variabili generate dall'uomo di cui si debba tenere conto nella progettazione dei componenti strutturali dell'impalcato sospeso sono riportate in QL secondo i Principi Base (GCG.F.04.01) Capitolo 5.2. I carichi QL saranno utilizzati per la progettazione del sistema strutturale locale a livello micro e meso. I componenti strutturali dell'impalcato sospeso sono verificati per le combinazioni di carichi QL elencate nei Principi Base, Capitolo 6.8. Le combinazioni di carichi QL per SLS e ULS sono riportate in Tabella 5-3 e 5-4.

Tabella 5-3 Combinazioni corrispondenti agli Stati Limite di Servizio (SLS) caratteristici in considerazione del carico QL

| | | | | | |
|---|---|--|--|---|------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | | |
| | | Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 |

| | PP | PN | QL | | | | | | | VV | VT | VR | VS | |
|-------------------|------|------|-----------------------|------|-------|--|-----------------|-----------------|-----------|------|------|------|------|--|
| | | | Strada | | | | Ferrovia | | | | | | | |
| | | | LM1 | LM2 | Freno | LM71, SW/0, SW/2, HLMS ⁽³⁾ | Senza carico | Freno e acc. | Serpeggio | | | | | |
| 1 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | - | 0.80 | - | 0/0.40 | 0/0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | - | 0.40/0.80 | - | 0.80 | 0/0.40 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 3 | 1.00 | 1.00 | - | 1.00 | - | 0.80 | - | 0/0.40 | 0/0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 4 | 1.00 | 1.00 | - | 1.00 | - | 0.40/0.80 | - | 0.80 | 0/0.40 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 5 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | 1.00 | 0.80 | - | 0/0.40 | 0/0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 6 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | 1.00 | 0.40/0.80 | - | 0.80 | 0/0.40 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 7 | 1.00 | 1.00 | - | 0.75 | 1.00 | 0.80 | - | 0/0.40 | 0/0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 8 | 1.00 | 1.00 | - | 0.75 | 1.00 | 0.40/0.80 | - | 0.80 | 0/0.40 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 9 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | 1.00 | - | 0/0.50 | 0/1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 10 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | - | 1.00 | - | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 11 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | 0.50/1.00 | - | 1.00 | 0/0.50 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 12 ⁽²⁾ | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | 0.60 | - | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 13 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | - | - | - | - | 1.00 | 0.60 | 0.60 | - | |
| 14 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | 0.80 | - | 0/0.40 | 0/0.80 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | - | |
| 15 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | 0.40/0.80 | - | 0.80 | 0/0.40 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | - | |
| 16 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | 0.80 | - | 0/0.40 | 0/0.80 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | - | |
| 17 | 1.00 | 1.00 | 0.75(TS) 0.40(UDL) | - | - | 0.40/0.80 | - | 0.80 | 0/0.40 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | - | |
| 18 | 1.00 | 1.00 | 0.2 | - | - | 0.30 ⁽¹⁾ | - | - | - | - | 0.60 | - | 1.00 | |

⁽¹⁾ Deve essere caricato solo un binario e il modello di carico SW/2 è trascurabile.

⁽²⁾ Il caso di carico si applica soltanto alle indagini sull'incrinatura del cemento.

⁽³⁾ Applicare i gruppi di carichi come indicato in Tabella 23A-1

Tabella 5-4 Combinazioni stradali e ferroviarie ULS per carico QL

| | | | | | |
|---|---|---|--|--|-----------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | | |
| | | Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 |

| | PP | PN | QL | | | | VV | VT | VR | VS | A | | | |
|----|--------|-------|-----------------------|------|-------|--|-----------------|-----------------|---------------|------|------|------|---|---|
| | | | Strada | | | Ferrovia | | | | | | | | |
| | | | LM1 | LM2 | Freno | LM71, SW/0, SW/2, HLSM ⁽²⁾ | Senza carico | Freno e acc. | Serpeg gio | | | | | |
| 1 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.35 | - | - | 1.16 | - | 0/0.58 | 0/1.16 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 2 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.35 | | - | 0.58/1.16 | - | 1.16 | 0/0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 3 | 1/1.35 | 1/1.5 | - | 1.35 | - | 1.16 | - | 0/0.58 | 0/1.16 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 4 | 1/1.35 | 1/1.5 | - | 1.35 | - | 0.58/1.16 | - | 1.16 | 0/0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 5 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | 1.35 | 1.16 | - | 0/0.58 | 0/1.16 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 6 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | 1.35 | 0.58/1.16 | - | 1.16 | 0/0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 7 | 1/1.35 | 1/1.5 | - | 1.01 | 1.35 | 1.16 | - | 0/0.58 | 0/1.16 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 8 | 1/1.35 | 1/1.5 | - | 1.01 | 1.35 | 0.58/1.16 | - | 1.16 | 0/0.58 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 9 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | 1.45 | - | 0/0.73 | 0/1.45 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 10 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | - | 1.45 | - | 1.45 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 11 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | 0.73/1.45 | - | 1.45 | 0/0.73 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 12 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | 0.87 | - | 0.87 | 0.87 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 13 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | - | - | - | - | 1.00 | 0.60 | 0.60 | - | - |
| 14 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | 1.16 | - | 0/0.58 | 0/1.16 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | - | - |
| 15 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | 0.58/1.16 | - | 1.16 | 0/0.58 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | - | - |
| 16 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | 1.16 | - | 0/0.58 | 0/1.16 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | - | - |
| 17 | 1/1.35 | 1/1.5 | 1.01(TS) 0.54(UDL) | - | - | 0.58/1.16 | - | 1.16 | 0/0.58 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | - | - |
| 18 | 1 | 1 | 0.20 | - | - | 0.30 ⁽¹⁾ | - | - | - | - | 0.50 | - | 1 | - |
| 19 | 1 | 1 | 0.20 | - | - | 0.30 ⁽¹⁾ | - | - | - | - | 0.50 | - | - | 1 |

⁽¹⁾ Deve essere caricato solo un binario e il modello di carico SW/2 è trascurabile.

⁽²⁾ Applicare i gruppi di carichi come indicato in Tabella 23A-1

La combinazione di carico n. 12 si utilizza soltanto nelle indagini sull'incrinatura del cemento.

6 Analisi strutturale FE globale

Il ponte sullo Stretto di Messina è modellizzato e analizzato nel programma di analisi IBDAS (Sistema Integrato per l'Analisi e la Progettazione del Ponte) sviluppato da COWI. Questa sezione descrive l'approccio adottato per particolari aspetti dell'analisi strutturale che influiscono sulla

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

progettazione dell'impalcato sospeso. Il modello del ponte e l'analisi strutturale, in generale, sono descritti nella relazione "CG.10.00-P-RG-D-P-CG-S5-00-00-00-00-01 Modello IBDAS Globale, Descrizione."

6.1 Modello globale IBDAS ad elementi "beam" e modello semi-locale ad elementi "shell"

Nel modello globale IBDAS FE la struttura dell'impalcato sospeso è generalmente modellata con gli elementi "beam". Questo modello viene utilizzato per la verifica complessiva degli elementi della struttura sospesa. Inoltre è stato sviluppato e introdotto nel modello globale FE ad elementi "beam" un modello semi-locale IBDAS FE ad elementi "shell". È quindi possibile studiare più dettagliatamente il flusso di sollecitazioni all'interno della struttura dell'impalcato sospeso, con il vantaggio di ricavare automaticamente le condizioni limite dal modello globale ad elementi "beam". Durante il processo di progettazione, è stato utilizzato un modello semi-locale IBDAS ad elementi "shell" a scopo di confronto con il foglio elettronico di verifica ADVERS e i modelli FE locali.

Tutti i calcoli effettuati con il peso intrinseco strutturale (PP), incluso il peso intrinseco degli elementi non strutturali (PN), sono basati sulla teoria dell'elasticità e sull'analisi di secondo ordine (analisi geometrica non lineare). I momenti flettenti addizionali dovuti a effetti globali di secondo ordine delle azioni progettuali di PP e PN sono quindi inclusi direttamente nei risultati del modello di analisi globale IBDAS.

7 Verifica – Acciaio longitudinale

7.1 ADVERS

7.1.1 Introduzione

Per strutturare e generalizzare i calcoli relativi all'acciaio longitudinale del cassone stradale e ferroviario e dei traversi del Ponte sullo Stretto di Messina è stato sviluppato un Foglio Elettronico di Verifica Avanzata dell'Acciaio (ADVERS – **A**dvanced **S**teel **V**erification **S**preadsheet) basato sugli Eurocodici. La verifica dei cassoni longitudinali in acciaio è basata sulle analisi computerizzate (IBDAS), sul dimensionamento degli elementi, sulla verifica delle sezioni, sul

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

controllo delle sollecitazioni e dell'imbozzamento. La progettazione è effettuata in conformità con i Principi Base specifici del progetto e con le basi indicate negli Eurocodici (EC).

La verifica complessiva dell'impalcato sospeso viene effettuata sulla base delle forze derivate della sezione ricavate dal modello globale IBDAS FE.

7.1.1.1 Codici

La verifica dell'acciaio longitudinale si basa sui Principi Base e sui codici in essi indicati. I codici principali per le verifiche dell'acciaio sono:

- EC3 1993-1-1:2005 "Regole generali e regole per gli edifici".
- EC3 1993-1-5:2006 "Elementi strutturali tipo piastra".
- EC3 1993-2:2006 "Ponti in acciaio".

7.1.2 Base per la verifica

Il foglio elettronico di verifica è sviluppato secondo le linee guida indicate negli Eurocodici per le strutture in acciaio. Il foglio elettronico è appositamente studiato per un cassone chiuso in acciaio con qualsiasi tipo di geometria esterna e con qualsiasi posizione degli irrigidimenti longitudinali. Il foglio elettronico calcola le caratteristiche effettive della sezione per un determinato set di parametri, compresa la geometria della sezione, lo spessore della piastra, il tipo di irrigidimenti e la distanza tra di essi, la distanza tra i diaframmi e la lunghezza del diagramma dei momenti. I calcoli sono basati sulle forze della sezione ricavate dal modello globale IBDAS FE ad elementi "beam".

Il foglio elettronico permette di verificare simultaneamente, per tutta la lunghezza del ponte, un numero di sezioni a piacere, con diverso spessore della piastra o con diversa qualità dell'acciaio a parità di geometria esterna.

7.1.2.1 Carichi

Il foglio elettronico è strutturato in modo che la verifica dipenda dall'output del modello IBDAS ad elementi "beam" con forze della sezione intorno all'"asse principale IBDAS" nel sistema globale di coordinate. Il valore massimo e il valore minimo per le 6 sollecitazioni caratteristiche dell'elemento

| | | | | | | | |
|---|---|---|--|------------|-------------|----|------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </table> | <i>Rev</i> | <i>Data</i> | F0 | 20-06-2011 |
| <i>Rev</i> | <i>Data</i> | | | | | | |
| F0 | 20-06-2011 | | | | | | |

della trave (N_s , M_y , M_z , V_y , V_z , M_t) sono utilizzati per i calcoli secondo il sistema di coordinate della mano sinistra IBDAS, si veda la Figura 7-1.

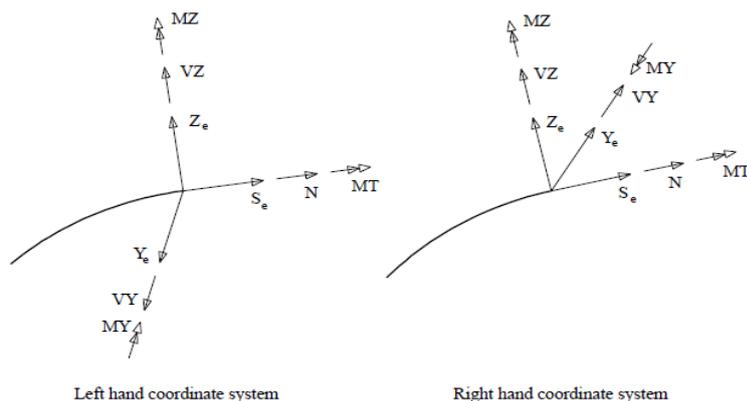


Figura 7-1 Definizione delle forze della sezione

7.1.3 Proprietà della sezione

In base alla geometria definita dall'utente, nel foglio elettronico vengono calcolate le proprietà generali ed effettive della sezione secondo un sistema globale di coordinate di riferimento. Qualora la sezione definita sia asimmetrica rispetto ad entrambi gli assi, l'asse principale verrà ruotato secondo il sistema di riferimento globale usato in IBDAS. Quindi nel foglio elettronico il calcolo delle proprietà e delle sollecitazioni della sezione viene corretto in base a questo effetto.

Le proprietà della sezione sono calcolate prima di tutto considerando separatamente ogni singola piastra e ogni singolo irrigidimento e poi usando il teorema dell'asse parallelo (Huygens-Steiner) che li mette in relazione con il baricentro della sezione trasversale. Questo metodo permette inoltre di effettuare nel foglio elettronico la verifica locale delle piastre e dei pannelli con irrigidimento.

In ADVERS vengono calcolate le seguenti proprietà:

- A , I_y , I_z e I_{yz} vengono calcolati per le sezioni effettive secondo il sistema di coordinate di riferimento
- L'angolo tra l'asse principale e l'asse di inerzia viene calcolato per tutte le proprietà delle sezioni
- I_1 e I_2 vengono calcolati per le sezioni effettive secondo l'asse principale

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

- Vengono calcolate le aree di taglio A_y , A_z secondo l'asse principale e l'area di torsione A_0

7.1.4 Proprietà effettive della sezione trasversale

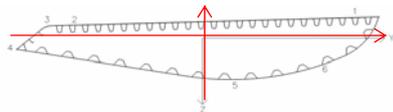
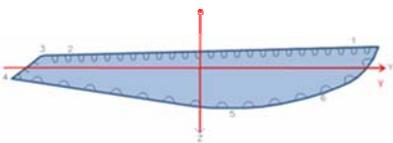
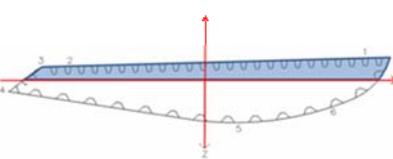
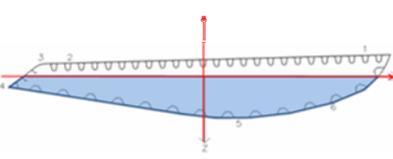
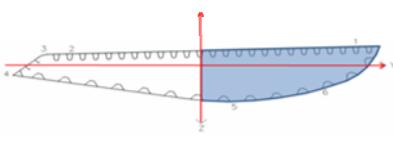
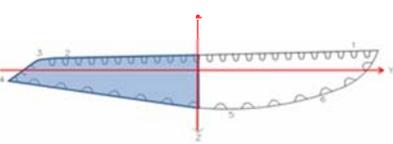
Per le sezioni trasversali di classe 4 che non sono in grado di ottenere il carico di snervamento completo sotto carico, le proprietà effettive della sezione sono calcolate con il metodo della "larghezza ridotta", descritto in EN 1993-1-5:2006, tenendo conto dell'effetto dello "shear lag" ("ritardo del taglio") e dell'imbozzamento della piastra. Questo metodo viene preferito al "metodo delle sollecitazioni ridotte" perché avrà una maggiore economia strutturale in quanto tiene conto del benefico distacco del carico dai pannelli sottoposti a sollecitazioni eccessive. Dal momento che la sezione trasversale considerata ha degli irrigidimenti longitudinali, la sezione effettiva viene ricavata tenendo conto dell'imbozzamento locale (imbozzamento a colonna) dei sotto-pannelli della piastra, dei pannelli con irrigidimenti e dell'imbozzamento complessivo delle piastre con irrigidimenti.

La larghezza effettiva (es. area effettiva) di una piastra/pannello viene calcolata separatamente per i carichi assiali e la flessione, in quanto questi varieranno nelle diverse situazioni di carico, come prescritto in EN 1993-1-5:2006 Capitolo 4.3.

Pertanto vengono presi in considerazione i seguenti casi secondo la regola della mano sinistra IBIDAS:

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

Tabella 7-1 *Illustrazione delle differenti situazioni di carico usate come base per calcolare le proprietà*

| | |
|--|--|
| Proprietà generali della sezione |  |
| Proprietà effettive della sezione <i>Intera sezione in compressione $N < 0$</i> |  |
| Proprietà effettive della sezione <i>Momento positivo $M_y > 0$</i> |  |
| Proprietà effettive della sezione <i>Momento negativo $M_y < 0$</i> |  |
| Proprietà effettive della sezione <i>Momento verticale $M_z > 0$</i> |  |
| Proprietà effettive della sezione <i>Momento verticale $M_z < 0$</i> |  |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

7.1.4.1 Imbozzamento locale

Viene effettuata una verifica locale di ogni singolo elemento di compressione della sezione trasversale (sotto-pannello ed elementi con irrigidimenti). Il comportamento di imbozzamento del tipo a colonna viene calcolato secondo EN 1993-1-1:2005 Capitolo 6.3 usando le proprietà effettive (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}) come prescritto nei Capitoli 4.2 e 4.3 di EN 1993-1-5:2006 e i fattori di riduzione della piastra ρ secondo EN 1993-1-5:2006 Capitolo 4.4, quindi: $A_{c,eff} = A_c \cdot \rho$

La distribuzione dell'area effettiva all'interno dell'elemento è determinata secondo la Tabella 4.1 e 4.2 al Capitolo 4.4 di EN 1993-1-5:2006.

Per ogni singolo sotto-pannello ed elemento con irrigidimenti viene calcolata una sollecitazione assiale critica in base all'area ridotta, comparata alla sollecitazione effettiva calcolata per la sezione trasversale nella rispettiva posizione, verificando in tal modo ogni problema di instabilità locale. Su alcuni pannelli si avrà anche un imbozzamento locale dovuto al carico di traffico locale. La sollecitazione critica viene quindi calcolata secondo EN 1993-1-1:2005 Capitolo 6.3.3 per la combinazione di forza assiale e imbozzamento.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Le Tabelle B1 e B3 di EN 1993-1-1:2005 sono utilizzate per calcolare il fattore di momento equivalente uniforme C_m determinato per il carico concentrato e il fattore di interazione k_{yy} adottando un approccio iterativo.

7.1.4.2 Shear Lag (“Ritardo del taglio”)

L'area della sezione trasversale che deve essere tralasciata nel calcolo delle proprietà della sezione a causa dello “shear lag” è calcolata in base a EN 1993-1-5:2006 Capitolo 3. I valori necessari per L_e che definiscono la lunghezza tra i punti a momento flettente zero vengono ricavati dal modello globale di verifica IBDAS e utilizzati per calcolare i fattori di “shear lag” β tenendo conto del rapporto larghezza-campata e degli irrigidimenti. Per lo Stato Limite di Servizio (SLS) la larghezza effettiva $b_{eff} = b_0 \beta$ per lo “shear lag” in condizioni di elasticità viene calcolata come indicato in 1993-1-5:2006 Capitolo 3.2; si veda la figura seguente per la flangia superiore.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

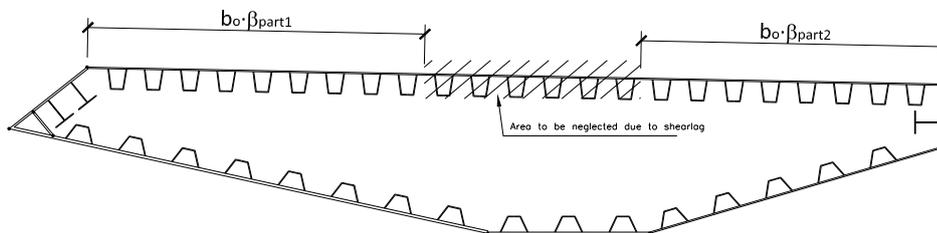


Figura 7-2 Illustrazione dell'area che deve essere tralasciata a causa dello "shear lag"

L'area effettiva che tiene conto sia dell'imbozzamento della piastra che degli effetti dello "shear lag" è l'area effettiva della piastra all'interno di b_{eff} .

Per lo Stato Limite Ultimo (ULS) si applica EN 1993-1-5:2006 Capitolo 3.3, Nota 3 utilizzando $A_{eff} = A_{c,eff} \beta^k$ sull'intera area della piastra tenendo conto della redistribuzione plastica.

7.1.4.3 Imbozzamento della piastra

Per le piastre irrigidite viene studiata l'interazione tra piastra e imbozzamento a colonna, secondo EN 1993-1-5 cap. 4.5, per ogni piastra all'interno della sezione trasversale utilizzando la formula del fattore di riduzione della piastra ρ_c (4.13) al capitolo 4.5.4. Viene calcolata una sollecitazione critica $\sigma_{Ed, Cr}$ per la piastra considerando la piastra e gli irrigidimenti come una piastra ortotropa equivalente secondo EN 1993-1-5:2006 Appendice A1. Per le piastre con meno di tre irrigidimenti longitudinali nella zona di compressione, si può semplificare il metodo dell'Appendice A1 utilizzando l'Appendice 2. In ADVERS si sceglie sempre di utilizzare il metodo riportato all'Allegato A1 di EN 1993-1-5:2006. La sollecitazione critica calcolata viene comparata con la sollecitazione assiale σ_1 nella piastra e viene determinato il rapporto di utilizzo.

Dal momento che un irrigidimento aperto ha una capacità molto ridotta dopo l'imbozzamento, come è stato presupposto nel calcolo della resistenza all'imbozzamento della piastra sopra illustrato, ogni singolo irrigidimento viene studiato per verificarne l'imbozzamento torsionale. Dal momento che l'imbozzamento torsionale può provocare un collasso rapido, questo viene evitato in generale per tutti gli irrigidimenti quando si considera il metodo della larghezza effettiva per una sezione di classe 4.

La verifica dell'imbozzamento torsionale viene effettuata secondo EN 1993-1-5:2006 Capitolo 9.2.2 per gli irrigidimenti longitudinali utilizzando la formula (9.3) del Capitolo 9.2.1.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

$$\frac{I_T}{I_P} \geq 5.3 \frac{f_y}{E}$$

Questa formula è valida per gli irrigidimenti a bulbo e per quelli piani, ma è ritenuta troppo conservativa nel caso di irrigidimenti con resistenza all'ingobbamento, come gli irrigidimenti a T e a L. In tal caso la resistenza alla torsione viene calcolata in ADVERS con la seguente formula:

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_y}{\frac{1}{I_P} \left[GI_T + \frac{\pi^2 EC_w}{L^2} \right]}} \leq 0.4$$

dove L è la distanza tra gli incastri trasversali dell'irrigidimento

I_P è il momento polare dell'area del solo irrigidimento intorno al punto di attacco alla piastra

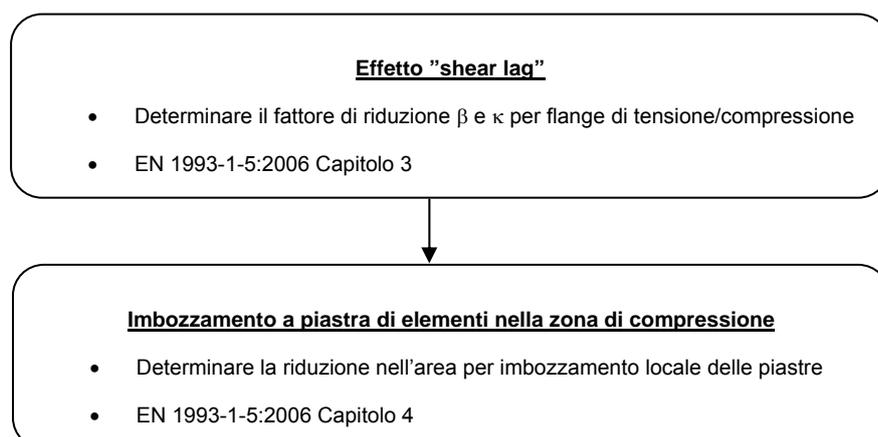
I_T è la costante di torsione di St. Vernant per il solo irrigidimento

C_w è la costante di ingobbamento dell'irrigidimento intorno alla linea di attacco alla piastra.

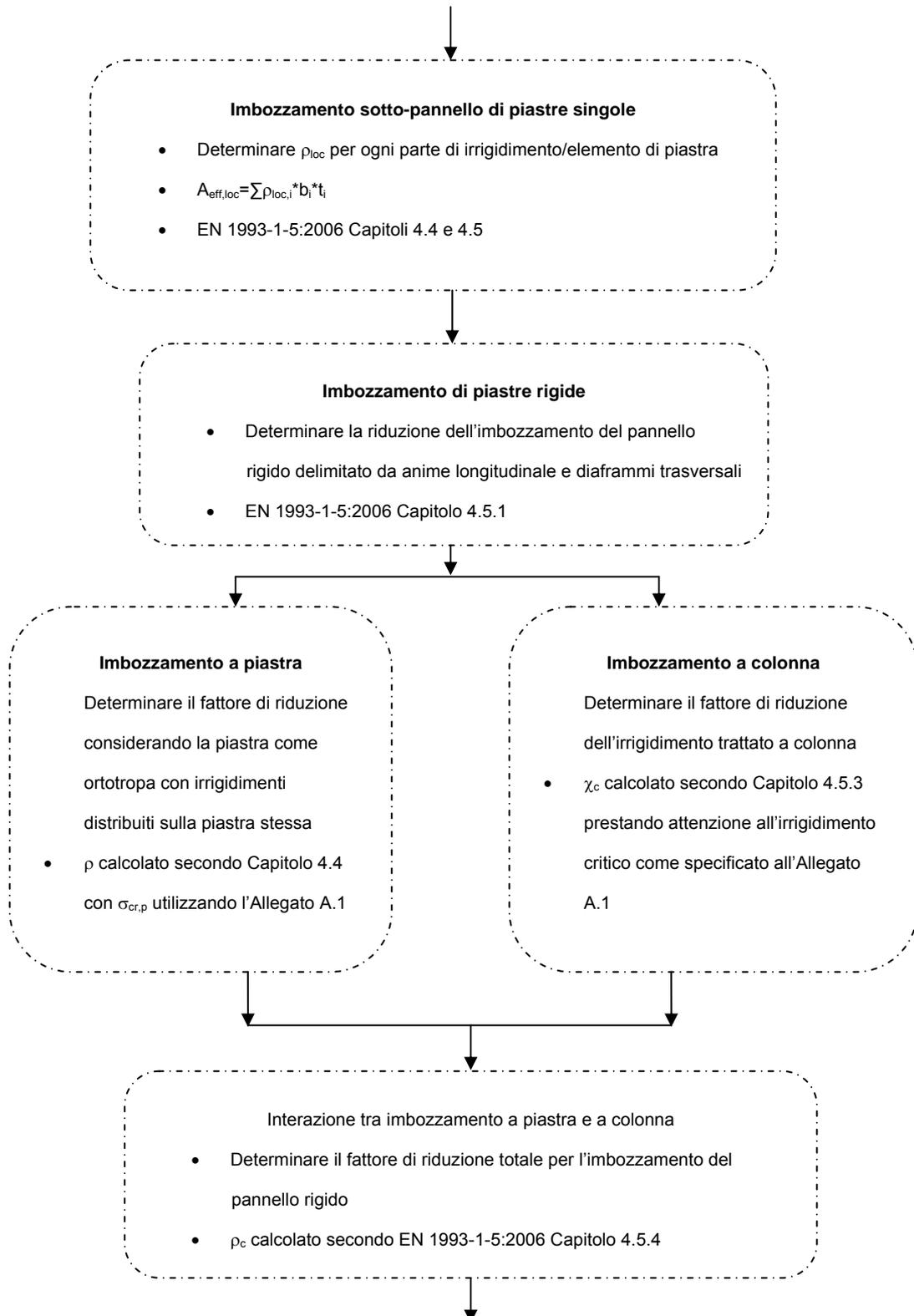
Nel determinare il limite di 0.4 si considera che il comportamento di questi irrigidimenti sia in parte del tipo "a piastra" e in parte del tipo "a colonna".

7.1.4.4 Proprietà

Il seguente diagramma di flusso illustra la procedura utilizzata per calcolare le proprietà effettive della sezione.



| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |



| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Determinare l'area effettiva totale

- $A_{c,eff}$ = area effettiva totale dei pannelli considerando l'imbozzamento a piastra
- A_{lorda} = area lorda del pannello
- β e β^k = fattore di riduzione dello "shear lag" in SLS/ULS
- Per elementi in compressione $A_{eff} = A_{c,eff}\beta^k$ (ULS)
- Per elementi in tensione $A_{eff} = A_{gross}\beta^k$ (ULS)

Utilizzando le aree effettive sopra indicate, vengono quindi calcolate le proprietà effettive della sezione in base al diagramma riportato di seguito in Figura 7-3 per il caso del momento positivo. Tutti gli elementi sul lato di compressione dell'asse neutro sono trattati come elementi di compressione ridotti per effetto dello "shear lag" e dell'imbozzamento della piastra. Inoltre l'asse neutro è, di conseguenza, le proprietà effettive della sezione sono determinate in base alla flessione pura della sezione come è consentito da EN 1993-1-5:2006 Capitolo 4.3(4). L'area effettiva calcolata per ciascun elemento della piastra è utilizzata per determinare uno spessore equivalente della piastra, per poi calcolare le proprietà effettive della sezione di ogni singolo elemento della piastra.

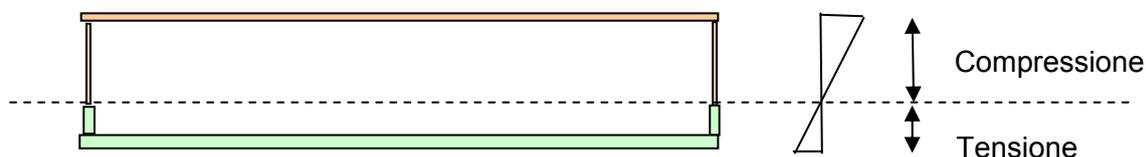


Figura 7-3 Illustrazione del presupposto adottato per calcolare le proprietà effettive di una sezione trasversale del cassone del ponte (solo piastre)

Per quanto concerne l'effetto degli irrigidimenti sulle proprietà della sezione, questo viene calcolato a seconda della loro posizione specifica nella sezione. Quindi, se un irrigidimento è situato all'esterno della larghezza effettiva b_{eff} calcolata per lo "shear lag", viene completamente ignorato sia per gli elementi di compressione che per quelli di tensione. Per gli irrigidimenti all'interno della zona di compressione b_{eff} si devono calcolare le proprietà locali ridotte della sezione a causa degli

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

effetti dell'imbozzamento. Pertanto si tiene conto del contributo dell'inerzia locale degli irrigidimenti all'inerzia globale della sezione. Un approccio analogo è stato adottato per il calcolo delle proprietà della sezione intorno all'asse verticale.

7.1.5 Sollecitazioni

Le sollecitazioni nei punti presi in considerazione lungo tutta la sezione trasversale sono calcolate in base alle proprietà effettive della sezione. Si calcolano le sollecitazioni estreme minime e massime σ_1 e τ , torsione inclusa. Per verificare le sollecitazioni, nel foglio elettronico si può scegliere manualmente qualsiasi posizione nelle piastre, insieme agli irrigidimenti selezionati, ecc.

Dal momento che l'equazione di Navier è valida solamente per una sezione trasversale simmetrica, le sollecitazioni assiali sono calcolate secondo l'effetto intorno all'asse principale:

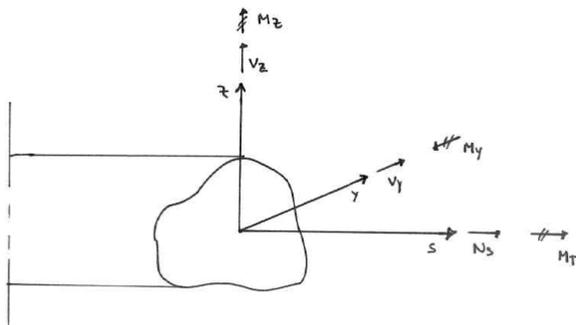


Figura 7-4 Asse e orientamento della forza della sezione utilizzati in IBDAS e per il calcolo delle sollecitazioni

$$\sigma = \frac{N}{A} + M_y \frac{I_{yz}Y - I_zZ}{I_yI_z - I_{yz}^2} + M_z \frac{I_{yz}Z - I_yY}{I_yI_z - I_{yz}^2}$$

dove I_y e I_z sono in funzione dell'asse principale.

La sollecitazione di taglio si calcola in modo conservativo in tutti i punti di sollecitazione applicando la formula riportata sotto

$$\tau = |\tau_{Vy}| + |\tau_{Vz}| + |\tau_{MT}|$$

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

7.1.6 Verifica ULS generale

Oltre al controllo della stabilità all'imbozzamento locale/globale e al calcolo delle sollecitazioni, nel foglio elettronico viene effettuata la seguente verifica dell'ULS della sezione trasversale come elemento; tale verifica è illustrata nei capitoli seguenti:

- 7.1.6.1: Elemento in tensione/compressione
- 7.1.6.2: Elemento in flessione
- 7.1.6.2: Flessione complessiva verticale, flessione laterale e forza assiale
- 7.1.6.2: Flessione complessiva verticale, flessione laterale, forza assiale (resistenza all'imbozzamento dell'elemento)
- 7.1.6.3: Taglio e torsione
- 7.1.6.3: Taglio, flessione e forza assiale combinate
- 7.1.6.4: Controllo della resistenza all'imbozzamento di taglio per le piastre

7.1.6.1 Elementi in tensione/compressione

Viene considerata la resistenza di progetto della sezione trasversale in tensione secondo EN 1993-1-1:2005 Capitolo 6.2.3

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

Viene considerata la resistenza di progetto della sezione trasversale in compressione uniforme secondo EN 1993-1-1:2005 Capitolo 6.3.1, considerando la resistenza all'imbozzamento utilizzando le proprietà effettive della sezione

$$N_{pl,Rd} = \frac{\chi_{eff}^A f_y}{\gamma_{M1}}$$

dove il fattore di riduzione per la modalità di imbozzamento è calcolato utilizzando il fattore di imperfezione $\alpha=0.34$.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

7.1.6.2 Flessione e forza assiale

A causa dell'effetto combinato di flessione biassiale e forza assiale nella sezione trasversale, viene controllata la capacità secondo i requisiti di EN 1993-1-1:2005, Capitolo 6.3.3, formule (6.61) e (6.62); vedere sotto. I fattori di interazione sono calcolati secondo la Tabella B.1 dell'Appendice B. Data la geometria della sezione, che è un cassone chiuso, è improbabile che si verifichi l'imbozzamento torsionale laterale e si ha quindi di default $\chi_{LT}=1,0$.

Dal momento che la sezione trasversale è considerata in compressione, ci sarà uno spostamento e_N nel baricentro della sezione effettiva rispetto al baricentro della sezione trasversale generale in entrambe le direzioni dell'asse, il che provocherà dei momenti aggiuntivi. Nei calcoli si tiene conto anche dello spostamento e_N e quindi si avrà:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

Le formule riportate sopra si applicano considerando il cassone del ponte come un elemento. Viene comunque calcolata, secondo EN 1993-1-1:2005 cap. 6.2.9, anche la capacità della sezione trasversale per la combinazione di forza assiale e momento flettente. Secondo EN 1993-1-5:2006 Capitoli 4.3 e 4.6, tenendo conto dello "shear lag", si dovrebbe utilizzare il metodo specificato in EN 1993-1-1:2005 Capitolo 6.2.9 per verificare la combinazione di forza assiale e momento flettente. Questa verifica si applica a ogni sezione trasversale del ponte ed è stata utilizzata come controllo combinato insieme alla verifica di cui sopra. Sono stati considerati gli utilizzi massimi di entrambe.

Il Capitolo 6.2.9 di EN 1993-1-1:2005 stabilisce che la sollecitazione longitudinale massima debba corrispondere a quanto indicato di seguito, utilizzando le proprietà effettive nel caso di sezioni di classe 4:

$$\sigma_{s,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Con questa equazione il momento critico può essere calcolato considerando la sollecitazione massima che si avrà nel punto di sollecitazione (SP) più esterno, es. note le coordinate y,z nella sezione trasversale secondo l'asse principale. Pertanto ogni determinato punto della sezione trasversale può essere studiato direttamente per individuare questo effetto. Quindi:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{f_y I_{y,eff}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{f_y I_{z,eff}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\gamma_{M1} z} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\gamma_{M1} y}$$

Il calcolo dipende quindi dalla situazione di carico (differenti proprietà effettive della sezione) e dalla posizione considerata.

7.1.6.3 Flessione, forza assiale e taglio

Data la presenza della torsione, che produce ulteriori sollecitazioni di taglio nella sezione trasversale, viene considerato l'effetto combinato. La resistenza di progetto al taglio e alla torsione è determinata secondo EN 1993-1-1:2005 capitoli 6.2.3 e 6.3.1.

Senza torsione: $V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$; A_v è l'area di taglio nella direzione dell'asse

Con torsione:
$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3})} \right] V_{pl,Rd}$$

In linea di principio ADVERS si occupa della suddetta verifica utilizzando le sollecitazioni di taglio calcolate come descritto nel Capitolo 7.1.5 adottando il valore massimo per ogni determinato punto della sezione trasversale e confrontandolo con la capacità di taglio in quel punto:

Capacità: $\tau_{pl,Rd} = \frac{(f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \Rightarrow UR_i = \frac{\tau_i}{\tau_{pl,Rd}}$

La resistenza, considerando l'effetto combinato di flessione, forza assiale e taglio, viene calcolata secondo EN 1993-1-1:2005 Capitolo 6.2.10. In caso di $UR_i > 0.5$ la capacità di snervamento è ridotta per l'area di taglio, come descritto nel capitolo 6.2.10(3) di EN 1993-1-1:2005.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Per le piastre, l'interazione tra sollecitazione da taglio, momento flettente e forza assiale è stata esaminata in ADVERS secondo il Capitolo 7.1 di EN 1993-1-5:2006. Quindi, qualora il rapporto tra resistenza di taglio e sollecitazione di taglio superi il 50%, si riduce la resistenza di progetto per momento flettente e forza assiale per consentire la sollecitazione di taglio utilizzando:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1.0$$

$V_{bw,Rd}$ è determinato secondo il capitolo 5.2 di EN 1993-1-5:2006.

Lo stesso metodo descritto sopra si utilizza per verificare le flange nei cassoni con $M_{f,Rd}=0$.

7.1.6.4 Resistenza all'imbozzamento di taglio

In ADVERS si tiene conto delle regole sulla resistenza di taglio delle piastre nell'imbozzamento di taglio all'ULS. Viene verificato se occorre controllare la resistenza all'imbozzamento di taglio di un'anima irrigidita in conformità con il requisito indicato in EN 1993-1-5:2006 Capitolo 5.1:

$$\frac{h_w}{t} \leq \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \quad \text{e per anime non rigide} \quad \frac{h_w}{t} \leq \frac{72}{\eta} \varepsilon$$

Tuttavia, qualora tale richiesta non sia soddisfatta, la resistenza di progetto si verifica secondo EN 1993-1-5:2006 Capitolo 5.2.

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

In ADVERS il contributo della flangia $V_{bf,Rd}$ è stato trascurato in modo conservativo. I contributi delle anime sono calcolati secondo EN 1993-1-5:2006 Capitolo 5.3, supponendo per i calcoli montanti finali non rigidi.

7.1.7 Respirazione dell'anima

Per prevenire la respirazione eccessiva con conseguente fatica nelle piastre, la respirazione dell'anima è considerata in ADVERS secondo EN 1993-2 Capitolo 7.4. Il calcolo è trascurato se sono soddisfatti i seguenti criteri, dove L è la lunghezza della campata di almeno 20m:

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

$$b/t \leq 30 + 4.0 \cdot L \leq 300 \quad \text{per ponti stradali}$$

$$b/t \leq 55 + 3.3 \cdot L \leq 300 \quad \text{per ponti ferroviari}$$

L'indicazione riportata sopra viene esaminata per sotto-pannelli e piastre senza irrigidimenti.

Qualora i suddetti criteri non siano soddisfatti, si analizzano i seguenti criteri, considerando le sollecitazioni per la combinazione di carichi frequente (SLS):

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,ED,ser}}{k_{\sigma} \cdot \sigma_E}\right)^2 + \left(\frac{1.1 \cdot \tau_{x,ED,ser}}{k_{\tau} \cdot \sigma_E}\right)^2} \leq 1.1 ; \quad \sigma_E = 19000 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

I coefficienti di sollecitazioni elastica, k , sono determinati utilizzando rispettivamente la clausola 4 e 5 di EN 1993-1-5.

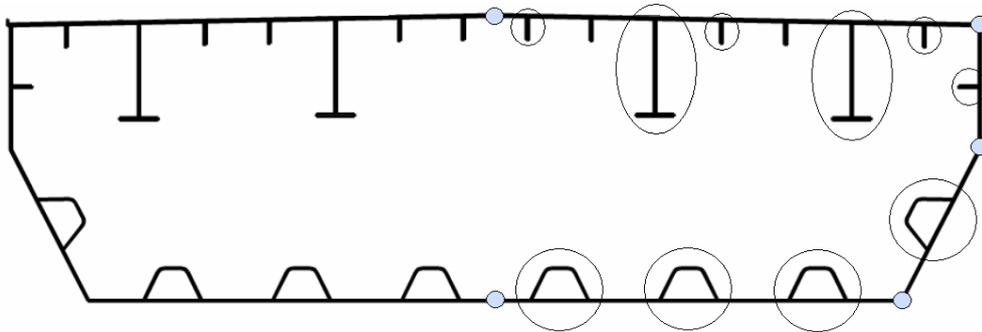
7.1.8 Input e Output

Adottando i principi sopra esposti, vengono calcolate le sollecitazioni e la stabilità locale verificando complessivamente l'acciaio longitudinale per l'intera lunghezza del ponte in ADVERS. Le aree ULS delle forze della sezione create in IBDAS sono utilizzate per sezioni di analisi selezionate (coordinate specifiche s).

Con input dell'utente, si definisce la geometria esatta della sezione trasversale insieme a tipo e ubicazione degli irrigidimenti. L'input geometrico è fisso per tutti i calcoli, sebbene si possano definire sezioni trasversali diverse al variare degli spessori. Le forze di sezione sono state applicate dal modello IBDAS globale secondo coordinate selezionate s (sezioni di analisi) e per ognuna di queste ubicazioni è stato definito come input un tipo di sezione.

Dal momento che è possibile avere momenti sia positivi che negativi nella maggior parte delle aree del ponte e nelle nervature stradali, vengono considerate le sollecitazioni minime e massime in diversi punti critici. Un input per ADVERS è la definizione dei punti in cui si debbano considerare le sollecitazioni e le ubicazioni in cui si verifica la stabilità locale e globale degli irrigidimenti; vedere l'esempio riportato in Figura 7-5.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |



- Punti di sollecitazione (SP)
- Elementi di rinforzo selezionati

Figura 7-5 Illustrazione dei punti di sollecitazione ed irrigidimenti selezionati per la verifica.

La selezione illustrata in Figura 7-5 è riportata in ADVERS come mostrato in Figura 7-6.

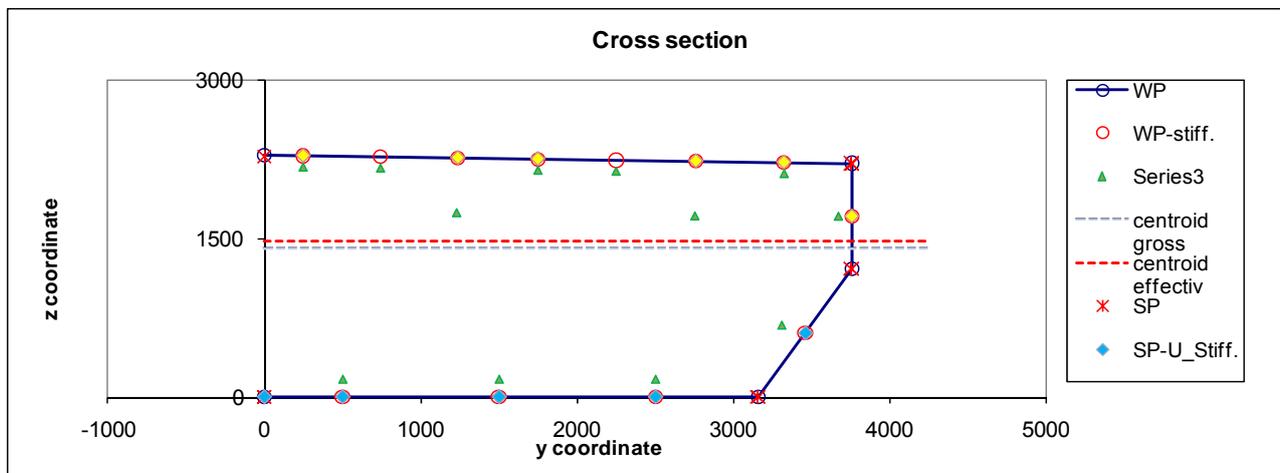


Figura 7-6 Schema dell'ubicazione dei punti di sollecitazione ed irrigidimenti selezionati per la verifica completa in ADVERS.

Nella figura è riportato lo schizzo di mezza sezione trasversale simmetrica ricavato da ADVERS. La geometria è definita dai punti contrassegnati con un cerchio. I punti di sollecitazione contrassegnati con croci rosse sono le posizioni estreme nella geometria del perimetro verificata. Il baricentro è contrassegnato con linee tratteggiate sia per la sezione trasversale generale che per quella effettiva (compressione completa). Le posizioni dei baricentri degli irrigidimenti sono contrassegnate con triangoli verdi, mentre gli irrigidimenti selezionati per la verifica completa sono

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

contrassegnati con quadrati blu e gialli, rispettivamente per gli irrigidimenti passanti e per le travi a T.

Per ogni ubicazione selezionate, è stata eseguita una verifica completa secondo i metodi descritti al Capitolo 7.1. I risultati di tali verifiche sono una serie di tabelle e figure che tracciano i rapporti di utilizzo di ogni sezione di analisi. I valori selezionati sono riportati in Figura 7-7.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

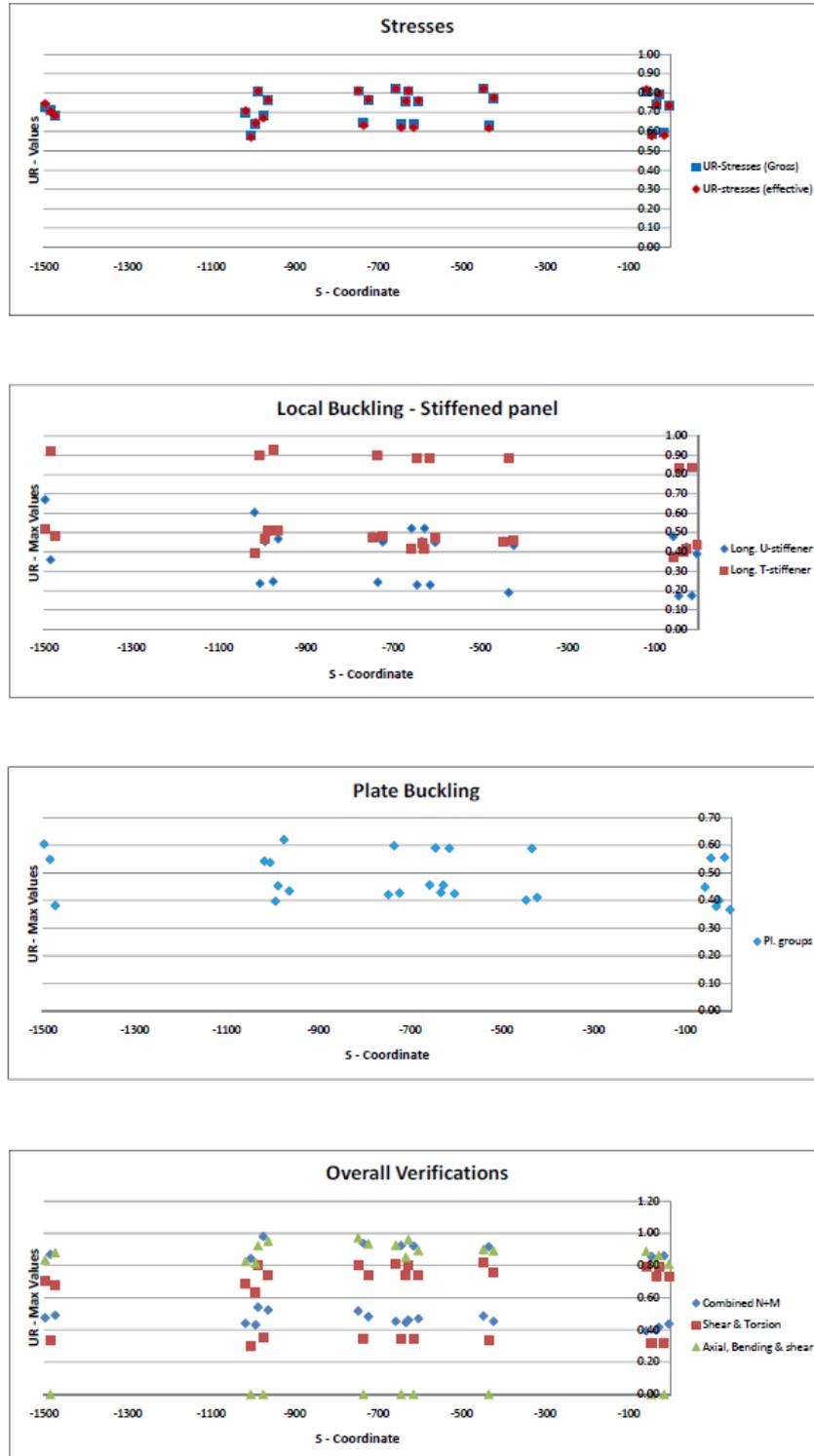


Figura 7-7 Illustrazione dei risultati ottenuti di ADVERS (solo valori)

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

7.1.9 Verifica ULS generale con sollecitazioni trasversali

Dal momento che il metodo della “larghezza effettiva” utilizzato in ADVERS non è direttamente applicabile qualora le sollecitazioni longitudinali siano accompagnate da sollecitazioni trasversali uniformi, in questa situazione viene applicato il “metodo delle sollecitazioni ridotte”. Questo tipo di analisi delle sollecitazioni si basa sulle caratteristiche generali della sezione e su successive verifiche dell'imbozzamento della piastra secondo EN1993-1-5:2006 Capitolo 10.

Nel collegamento tra traverso e cassone stradale e ferroviario, la piastra superiore è soggetta a sollecitazioni da compressione in due direzioni. Nei collegamenti, si utilizzano un foglio elettronico e un programma di calcolo per l'imbozzamento elastico delle piastre allo scopo di studiare la stabilità dei diversi campi della piastra stessa. Le sollecitazioni da compressione sono state calcolate nel modello FE locale all'ubicazione esterna alle piastre considerate.

I campi delle piastre considerati sono modellizzati in un programma di imbozzamento elastico, vedere Figura 7-8. Per il cassone stradale, la piastra superiore è divisa in tre campi di piastre separati dai diaframmi del traverso. La piastra verso il cassone ferroviario è denominata “Piastra 1”. Per il cassone ferroviario si considera una sola piastra.

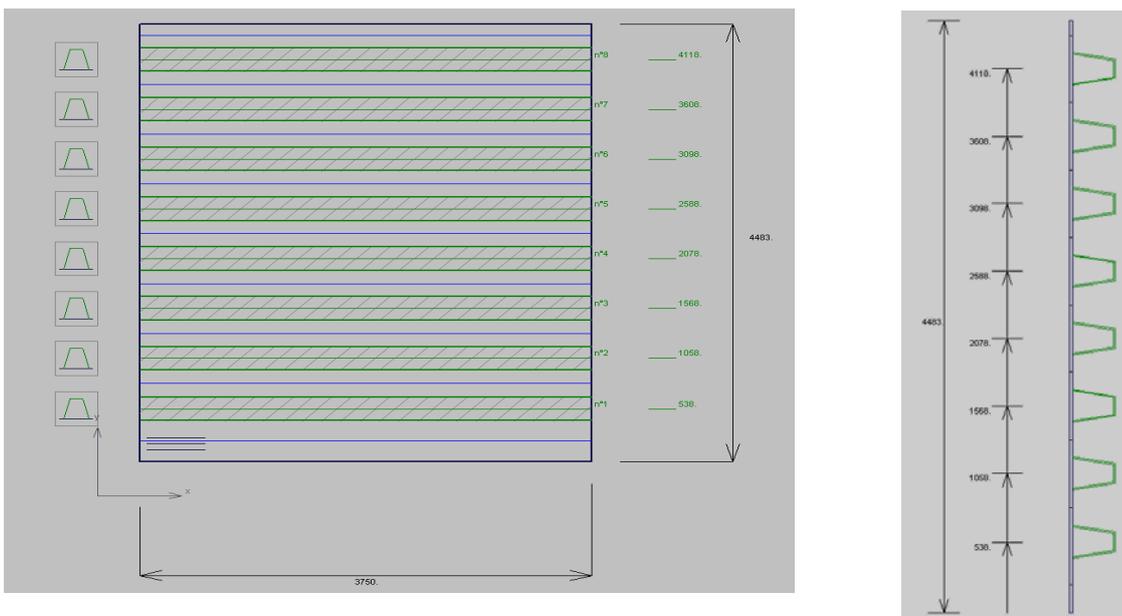


Figura 7-8 Illustrazione di un campo di piastra del cassone stradale dimensioni incluse

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Anche le modalità di imbozzamento critico sono state calcolate e la determinazione della piastra illustrata è riportata in Figura 7-9.

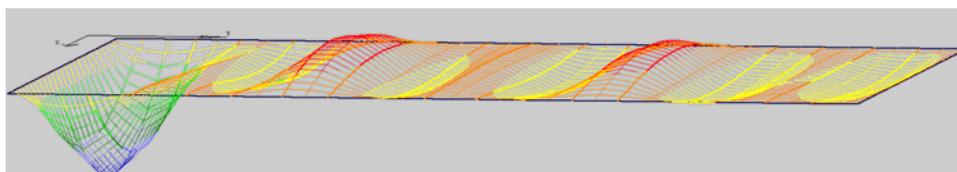


Figura 7-9 Illustrazione della modalità di imbozzamento critico per la determinazione delle sollecitazioni critiche

Le sollecitazioni critiche sono calcolate dal programma di imbozzamento elastico considerando la piastra come ortotropa corrispondono ai limiti di sollecitazione applicati nel “metodo delle sollecitazioni ridotte” di EN 1993-1-5:2006, Capitolo 10, impiegato per determinare i rapporti di utilizzo delle piastre considerate.

8 Fogli elettronici di verifica – Acciaio trasversale

8.1 Diaframmi

L'acciaio longitudinale del cassone stradale e ferroviario e dei trasversi viene complessivamente verificato tramite ADVERS, ma questo foglio elettronico non considera i diaframmi trasversali. Per verificare i diaframmi vengono presi in considerazione due diversi metodi: in primo luogo vengono realizzati in ROBOT i modelli FE locali di una sezione del ponte, si veda il Capitolo 9. Questi modelli forniranno i diversi flussi delle sollecitazioni nel diaframma e studieranno il comportamento per le aperture di servizio. In secondo luogo sono stati utilizzati un foglio elettronico e un programma di calcolo per l'imbozzamento elastico delle piastre allo scopo di studiare la stabilità dei diversi sotto-pannelli dei diaframmi.

Il diaframma è suddiviso in sotto-pannelli mediante irrigidimenti verticali distribuiti. Viene verificato che questi irrigidimenti abbiano capacità sufficiente per sostenere i pannelli del diaframma. La capacità di questi irrigidimenti viene verificata secondo EN 1993-1-1:2005 capitolo 6.3. Ogni sotto-pannello del diaframma è sottoposto alla distribuzione delle sollecitazioni prodotte dal carico di

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

traffico, sia globale che locale, nella sua posizione specifica, come è illustrato nella Figura 8-1. In base a questa distribuzione delle sollecitazioni è possibile calcolare un fattore di sollecitazione critica ϕ che indica l'aumento di sollecitazioni ammissibile prima che si raggiunga il carico elastico critico. Il metodo utilizzato tiene conto anche degli effetti stabilizzanti, come gli eventuali limiti alla rotazione sui bordi.

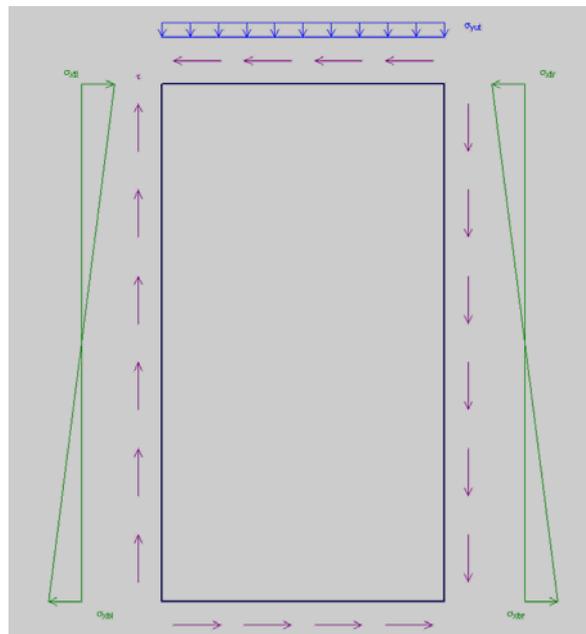


Figura 8-1 Distribuzione delle sollecitazioni sul pannello del diaframma per l'indagine sull'imbozzamento

È noto che le sollecitazioni di flessione (es. sollecitazioni di tensione) possono avere un leggero effetto stabilizzante sul pannello; pertanto vengono analizzate diverse situazioni di carico per determinare la situazione di carico più critica per i pannelli.

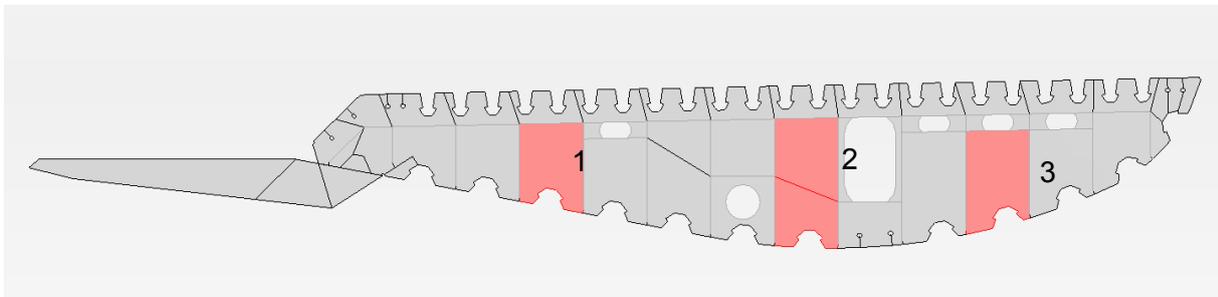


Figura 8-2 Pannelli critici selezionati per la verifica di stabilità, diaframma del cassone stradale

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

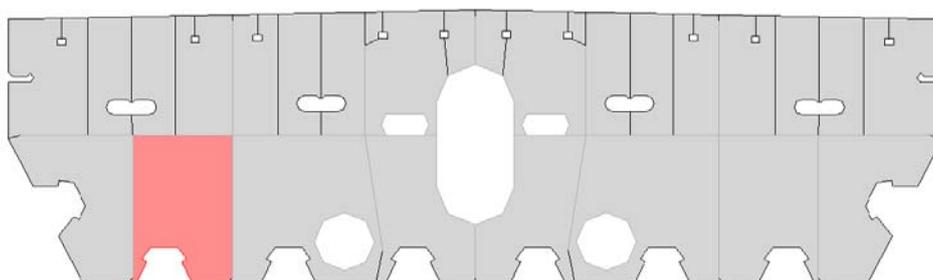


Figura 8-3 Pannelli critici selezionati per la verifica, diaframma del cassone ferroviario

A seconda dei pannelli, vedere le Figure 8-2 e 8-3, è stato calcolato il fattore di sollecitazione critica ϕ_{cr} per calcolare la distribuzione delle sollecitazioni dai modelli FE locali del ponte. Il fattore di sollecitazione critica equivale ad α_{cr} (utilizzato nel metodo delle sollecitazioni ridotte di EN 1993-1-5:2006, capitolo 10) ed è stato quindi impiegato direttamente nel metodo delle sollecitazioni ridotte per verificare i pannelli, tenendo conto del comportamento di imbozzamento sia a colonna sia della piastra. A scopo di verifica, sono stati selezionati i pannelli determinanti, per piegatura e taglio rispettivamente, in combinazione con l'altezza massima del pannello.

9 Verifica con i modelli FE locali

9.1 Introduzione

I modelli FE locali sono realizzati con il software Robot Millennium 2010, un programma grafico integrato usato per la modellizzazione, l'analisi e la progettazione di vari tipi di strutture. In totale sono stati realizzati quattro diversi modelli:

- Modello FE locale per l'impalcato del ponte, che si occupa del trasverso, del cassone longitudinale stradale e ferroviario e ha lo scopo di determinare la concentrazione delle sollecitazioni negli elementi delle piastre, con particolare attenzione alla sollecitazioni nelle piastre esterne dei traversi, nei diaframmi e nell'intersezione dei cassoni

| | | | | |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 | |

- Modello FE locale stradale, che descrive il flusso di sollecitazioni nel diaframma del cassone stradale con riferimento alla concentrazione delle sollecitazioni sulle nervature, sulle lunette angolari, sugli irrigidimenti dei diaframmi e sulle aperture.
- Modello FE locale ferroviario, che descrive il flusso di sollecitazioni nei diaframmi del cassone ferroviario con riferimento alla concentrazione delle sollecitazioni sulle nervature, sugli irrigidimenti dei diaframmi e sulle aperture.
- Modello Locale FE dell'ancoraggio del pendino, che analizza il regime delle sollecitazioni nelle piastre per gli ancoraggi dei pendini.

La finalità generale dei modelli locali è quella di verificare le soluzioni proposte per l'elemento e di documentare che il flusso delle sollecitazioni sia accettabile rispetto alla combinazione di carico ULS.

Inoltre, i diagrammi dei profili dei modelli FE locali sono stati confrontati con i risultati del modello IBDAS semi-locale. Quest'ultimo è stato sviluppato nell'ambito del modello di analisi globale, quindi utilizzando il modello globale IBDAS per la maggior parte del ponte, ma si utilizza una modellizzazione più dettagliata per componenti selezionati, con elementi "shell" e diaframmi, per garantire condizioni limite corrette per il modello dettagliato. La figura 9-1 riporta l'ubicazione e la geometrica del modello IBDAS semi-locale.

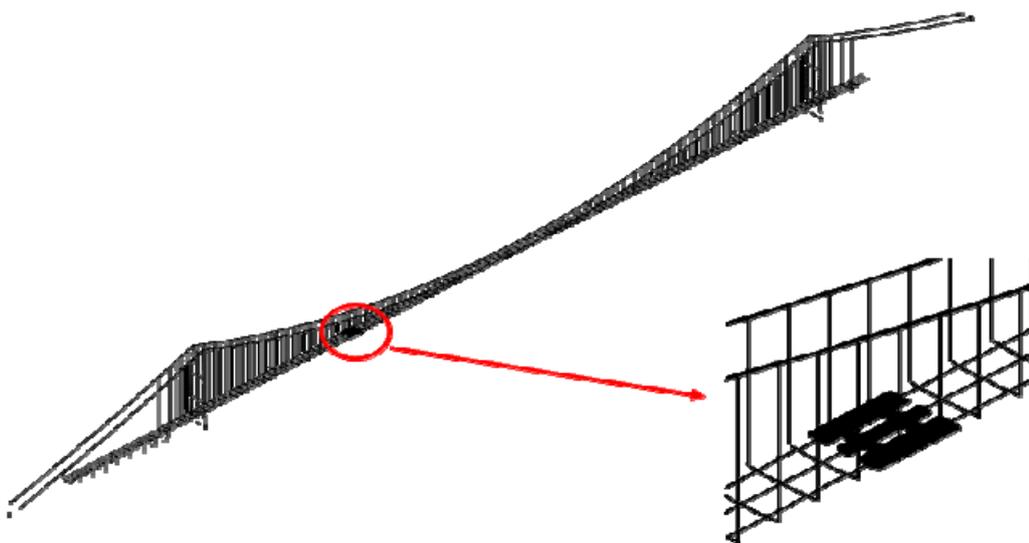


Figura 9-1 Ubicazione del modello IBDAS semi-locale nell'ambito del modello di analisi globale

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Il modello dell'involucro è formato da 3 cassoni longitudinali singoli collegati tramite due traversi. La vista renderizzata del modello è riportata nella Figura 9-2.

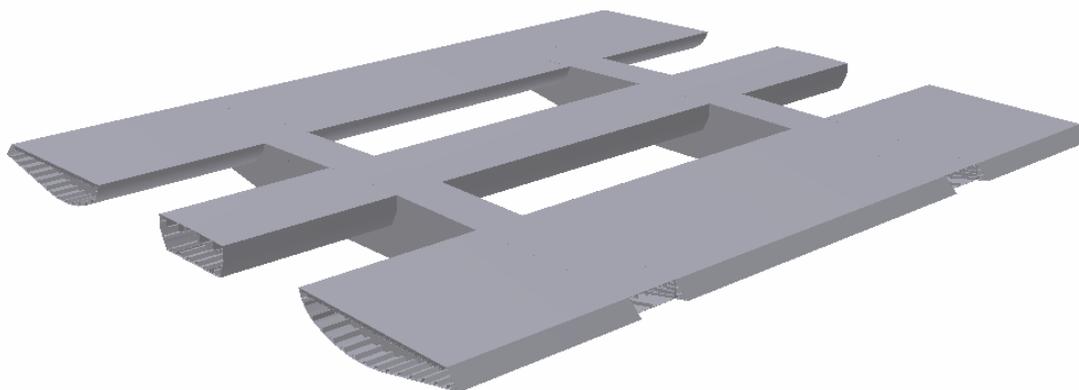


Figura 9-2 Immagine renderizzata del modello IBDAS semi-locale di impalcato sospeso

La copertura longitudinale in acciaio dei cassoni, compresi gli irrigidimenti, è modellizzata con precisione secondo la geometria e lo spessore della soletta. La descrizione dettagliata del modello è reperibile nella relazione “Modello IBDAS semi-locale, impalcato sospeso”.

Sono state eseguite ulteriori comparazioni con valori di sollecitazioni forniti dalla verifica delle sezioni trasversali realizzata con ADVERS.

I confronti delle sollecitazioni di cui sopra, nonché i relativi diagrammi dei profili riferiti alle sollecitazioni dei dettagli modellizzati tramite modelli FE locali, sono disponibili in “Relazione di progetto – Modello FE semi-locale di impalcato sospeso”.

9.2 Condizioni limite e calibrazione

Le condizioni limite globali sono applicate agli elementi delle travi per i quali le forze della sezione sono state determinate con punti Gauss appositamente posizionati secondo il modello IBDAS globale per il ponte. Gli elementi della trave creano una connessione tra le forze in sezione applicate secondo IBDAS e il baricentro del cassone attraverso collegamenti rigidi su ciascuna estremità del modello “shell”. I collegamenti rigidi tra l'elemento “beam” e gli elementi “shell”, in combinazione con la campata relativamente lunga prevista per il modello, assicurano una corretta distribuzione delle forze sezionali applicate secondo IBDAS durante la verifica dei diaframmi e degli elementi nei cassoni longitudinali e nei traversi di intersezione. Nella Figura 9-3 è riportata

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

una descrizione generale della planimetria di modellizzazione applicata, che riporta l'esempio del modello FE locale dell'impalcato del ponte.

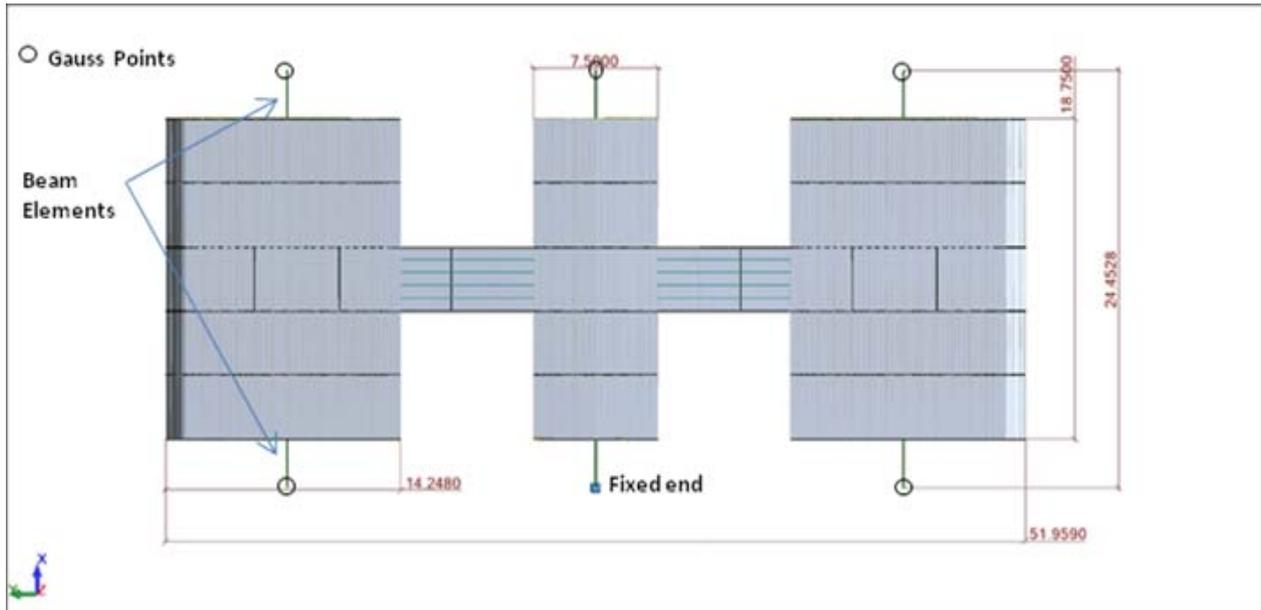


Figura 9-3 Condizioni limite e geometria generale

Le forze sezionali di IBDAS sono state applicate nei punti di Gauss agli elementi della trave, mentre le estremità fisse garantiscono una tenuta per i sei gradi di libertà. Gli elementi della trave sono posizionati nel baricentro dei cassoni longitudinali in acciaio e le proprietà della sezione corrispondono alle proprietà sezionali generali degli elementi cui sono collegati. Gli elementi "beam" sono collegati agli elementi "shell" attraverso collegamenti rigidi a ciascun nodo del reticolo dell'elemento "shell", come illustrato nella Figura 9-5.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

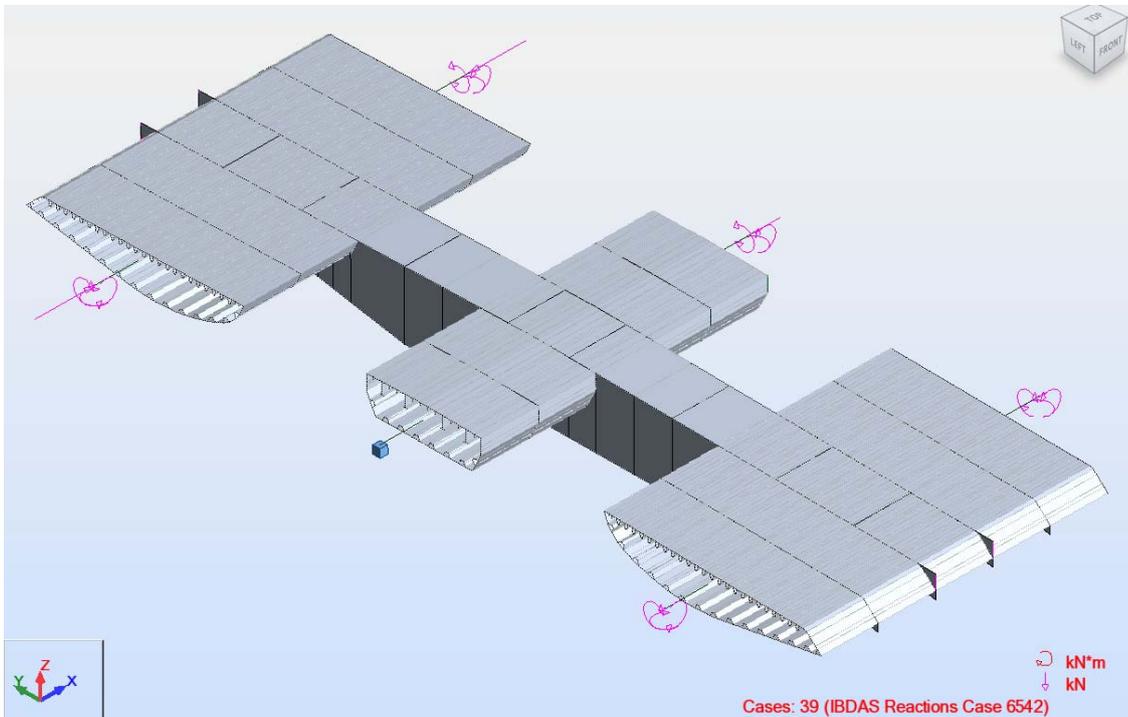


Figura 9-4 Forze sezionali IBDAS come forze esterne Robot e sistema di coordinate globale

Le condizioni limite applicate al modello Robot prevedono tre forze assiali e tre momenti flettenti per ciascun nodo. Ciò riflette le forze sezionali presenti nel modello IBDAS globale nella stessa posizione, con conversione in forze esterne nel modello locale Robot per rispettare la differenza della regola della mano, sinistra per IBDAS e destra per Robot. La Figura 9-4 riporta un esempio di applicazione di condizione limite.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

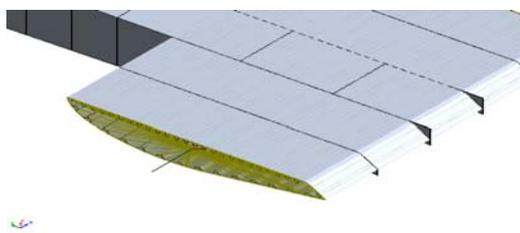


Figura 9-5 Collegamenti rigidi tra elementi “shell” ed elementi “beam”

I modelli sono calibrati confrontando le forze dell'estremità fissa alle forze sezionali IBDAS nella stessa ubicazione per la combinazione di carichi che considera soltanto i pesi morti (PP+PM), in particolare nel caso della condizione di riferimento. I carichi esterni attivi sono dati da peso intrinseco (PP) e carichi statici sovrapposti (PN) e le forze sezionali sono attuate considerando i segni convenzionali tra software. L'indagine sul flusso di sollecitazioni implica una combinazione di carichi specifici in grado di ottimizzare gli effetti (criteri) considerati. IBDAS è in grado di determinare automaticamente gli effetti dei carichi utili sul ponte in base al calcolo della linea di influenza e la planimetria di carico risultante è stata quindi implementata nei modelli ROBOT.

9.2.1 Sistemi di coordinate locali e globali

In Robot l'orientamento positivo di forze e spostamenti è coerente con l'orientamento positivo degli assi del sistema di coordinate. Gli orientamenti positivi di angoli, rotazioni o momenti nel sistema di coordinate locale o globale sono determinati dalla regola della mano destra. Tale convenzione definisce i segni di forze esterne, forze nodali, spostamenti e rotazioni. I segni convenzionali sono utilizzati nella definizione strutturale, durante il calcolo strutturale e la visualizzazione dei risultati.

I carichi sono definiti nel sistema di coordinate globale, utilizzato a scopo di riferimento, per es. di spostamenti e reazioni, riportato in Figura 9-4 e definito come segue:

- L'asse **X** (1° asse) si estende lungo il modello strutturale con lo stesso orientamento dell'asse S IBDAS
- L'asse **Y** (2° asse) è ortogonale all'asse **X** e all'asse **Z** formando un sistema di coordinate destrorso con orientamento opposto all'asse Y IBDAS

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

- L'asse **Z** (3° asse) è verticale e si estende in positivo verso l'alto con lo stesso orientamento dell'asse Z IBDAS

Ogni pannello ha un sistema di coordinate locale in cui si calcolano le sollecitazioni. La Figura 9-6 riporta un esempio di sistema locale corrispondente alla regola della mano destra come il sistema globale.

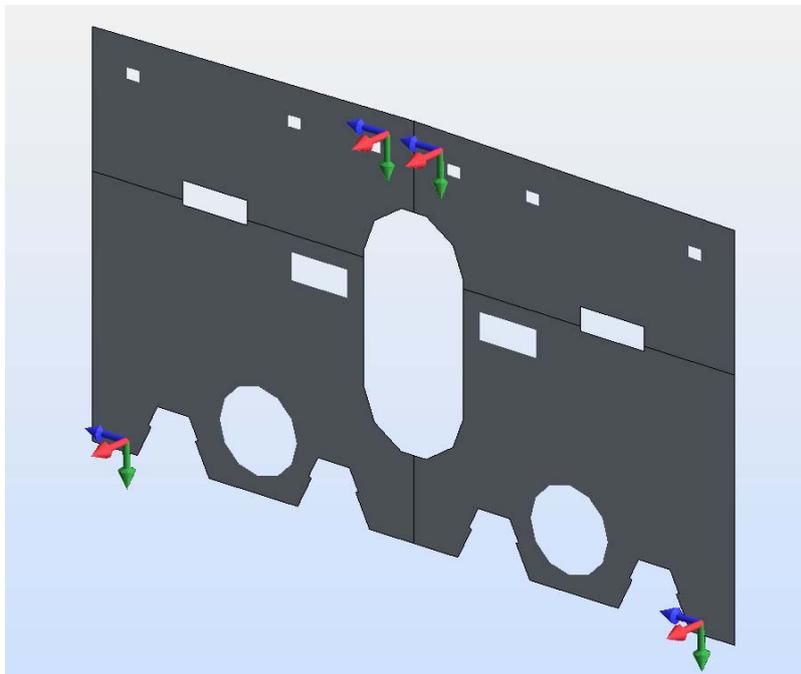


Figura 9-6 Pannello del sistema di coordinate locale

Gli assi locali **X** e **Y** sono sempre ubicati sul piano del pannello, mentre l'asse locale **Z** è sempre orientato perpendicolarmente al pannello.

9.2.2 Concetto di base

I modelli ROBOT prevedono l'utilizzo delle seguenti proprietà dei materiali:

Acciaio da costruzione: Densità: 77.0 kN/m³

Modulo di Young: 210000 Mpa

Elementi longitudinali grado acciaio:

f_{yk} : 460 Mpa (modello FE locale impalcato del ponte)

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

f_{yk} : 420 Mpa (modello FE locale strada)

f_{yk} : 355 Mpa (modello FE locale ferrovia)

f_{yk} : 460 Mpa (modello FE locale ancoraggio pendini)

Elementi trasversali grado acciaio:

f_{yk} : 460 Mpa (modello FE locale impalcato del ponte)

f_{yk} : 420 Mpa (modello FE locale strada)

f_{yk} : 355 Mpa (modello FE locale ferrovia)

f_{yk} : 460 Mpa (modello FE locale ancoraggio pendini)

Le proprietà delle sezioni utilizzate per gli elementi della trave nei modelli FE locali sono riportati alla Tabella 9-1.

Tabella 9-1 Proprietà delle sezioni per gli elementi della trave utilizzati nei modelli FE locali.

| Sezione | Distanza y da C.G. [m] | Distanza z da C.G. [m] | Area [m ²] | I _y [m ⁴] | I _z [m ⁴] | J [m ⁴] |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| CS1 | 8.484 | 2.866 | 0.565 | 0.405 | 9.214 | 0.967 |
| CS2 | 8.485 | 2.834 | 0.581 | 0.431 | 9.498 | 1.042 |
| CF1 | 0 | 1.401 | 0.365 | 0.316 | 2.037 | 0.642 |

La posizione dell'origine del baricentro è riportata in Figura 9-7.

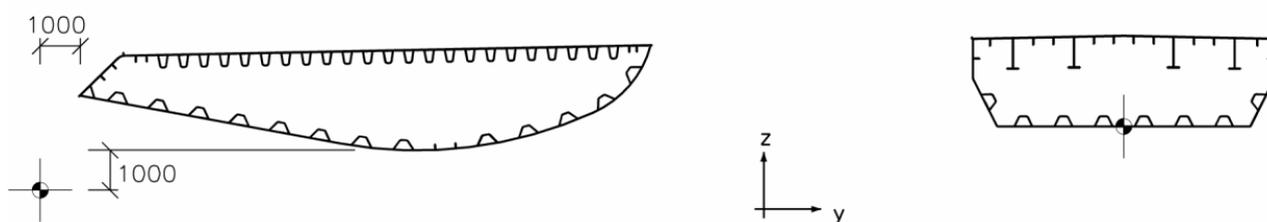


Figura 9-7 Posizione dell'origine del baricentro.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

9.3 Modello FE locale dell'impalcato del ponte

Sarà realizzato un modello FE locale del trasverso e dei cassoni stradali e ferroviari adiacenti per determinare il regime e la concentrazione delle sollecitazioni nelle diverse piastre, con particolare attenzione agli elementi dei traversi e all'intersezione tra cassoni longitudinali e trasverso. Il modello si utilizza inoltre per valutare la sollecitazione delle piastre dell'impalcato all'intersezione con i traversi soggetti a sollecitazioni in due direzioni, rendendo possibile la verifica della stabilità dei diversi campi delle piastre. Inoltre, il diagramma delle sollecitazioni sarà confrontato con quello determinato dal modello IBDAS semi-locale e con i risultati delle sollecitazioni di ADVERS.

9.3.1 Geometria

Le dimensioni complessive del modello coprono l'intera larghezza dell'impalcato del ponte e si estendono in cinque moduli, ciascuno lungo 3.75 m, e due elementi della trave per ogni lato, per una dimensione complessiva in pianta di circa 24.5 m x 52 m (coordinata s IBDAS -432 e -417), come si può vedere nella Figura 9-8. Comprende il cassone stradale e ferroviario per consentire la determinazione delle concentrazioni delle sollecitazioni di tali elementi all'intersezione con il trasverso, nonché una valutazione dettagliata del regime delle sollecitazioni in piastre esterne e diaframmi del trasverso.

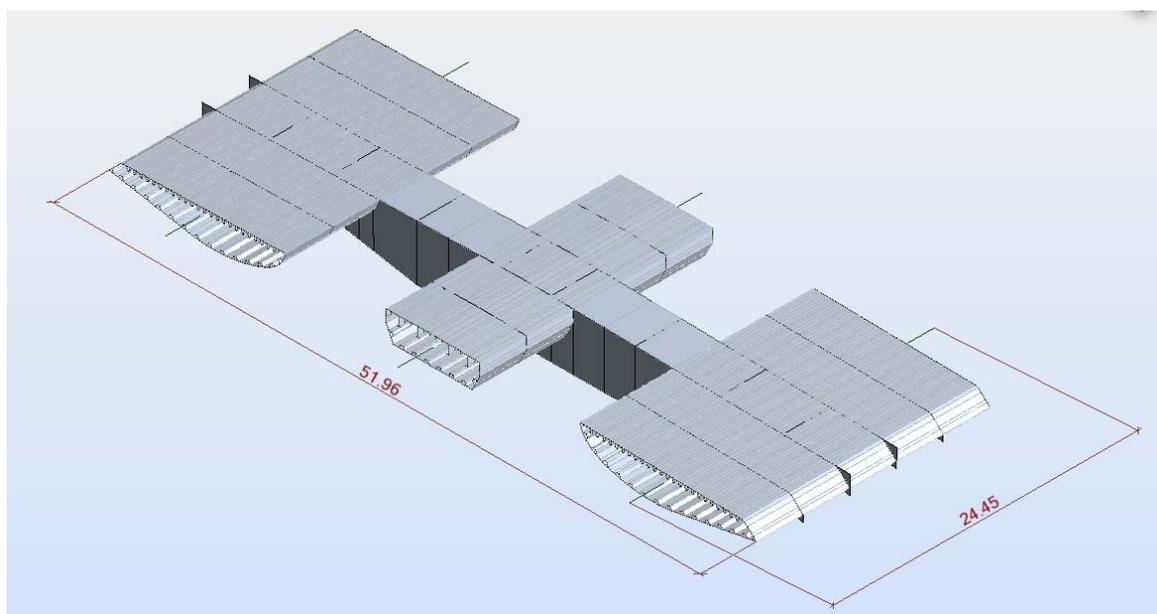


Figura 9-8 Geometria generale

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

L'ubicazione del modello è stata determinata selezionando una sezione con rapporto di utilizzo massimo tra i traversi nella campata principale. Al fine di realizzare un progetto conservativo, il traverso modellizzato è in corrispondenza della posizione dell'incrocio che conduce a un incremento del peso intrinseco. Si possono eseguire ulteriori analisi del traverso con carico tipico che condurranno in ogni modo a un rapporto di utilizzo inferiore e quindi a concentrazioni di sollecitazioni di minore intensità. Il modello comprende l'elemento CS1 per i cassoni stradali e CF1 per i cassoni ferroviari, quindi il grado di acciaio in uso nel modello è S460 in conformità con il progetto. Allo stato attuale i portelli nelle anime dei traversi sono trascurabili. Tali traversi saranno comunque oggetto di ulteriori indagini nella fase successive del progetto. Per una descrizione dei portelli e dei diversi accessi previsti per il ponte sospeso, fare riferimento al documento "Specifiche delle prestazioni – Infrastrutture di accesso generali".

Il modello è formato da cinque elementi "shell" (pannelli FE) con spessori coerenti in termini di valore e denominazioni come indicato nei disegni progettuali alla Tabella 9-2.

Tabella 9.2 Disegno utilizzato come base geometrica del modello

| | | | | | | | | | | | |
|--------|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | CS | 00 | 00 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | AX | D | P | SV | I3 | CS | 00 | D0 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | CF | 00 | 00 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | AX | D | P | SV | I3 | CF | 00 | D0 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | TP | 00 | 00 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | TP | 00 | 00 | 00 | 02 |
| CG1000 | P | AX | D | P | SV | I3 | TP | 00 | D0 | 00 | 01 |

Il diagramma del modello con i diversi spessori evidenziati per piastre superiori e inferiori è riportato in Figura 9-9 e 9-10. Gli spessori di diaframmi ed irrigidimenti sono riportati in Figura 9-11 e 9-12 (per chiarezza si riporta soltanto metà del ponte per i diaframmi e un modulo lungo 3.75 m per gli irrigidimenti).

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

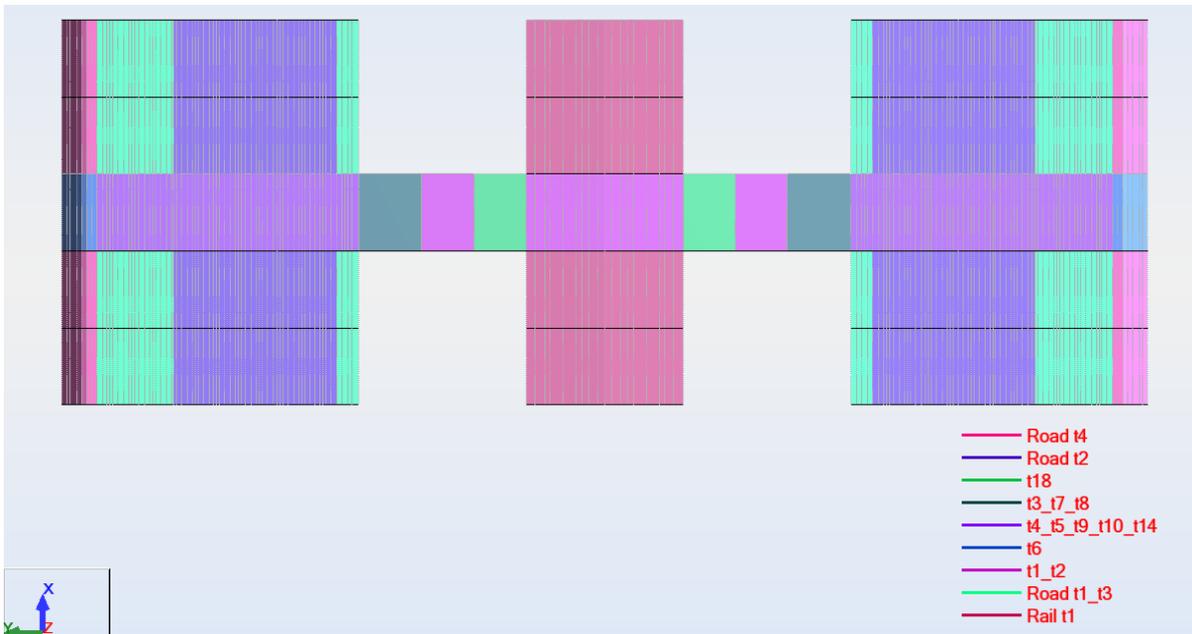


Figura 9-9 Spessori evidenziati tramite colori – piastre superiori

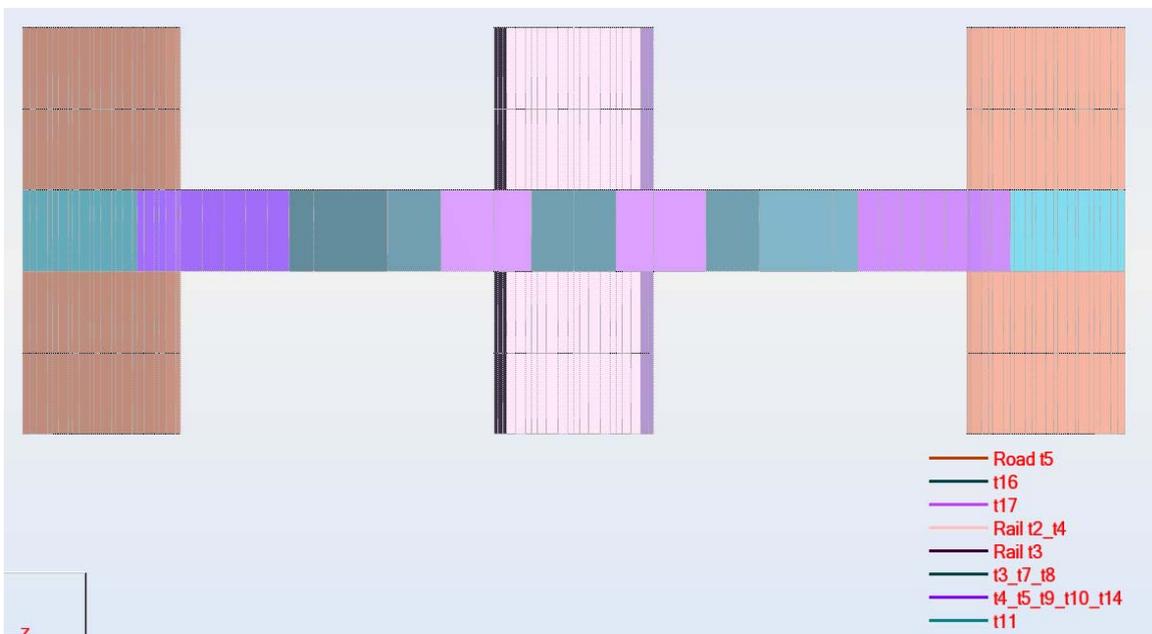


Figura 9-10 Spessori evidenziati tramite colori – piattebande

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

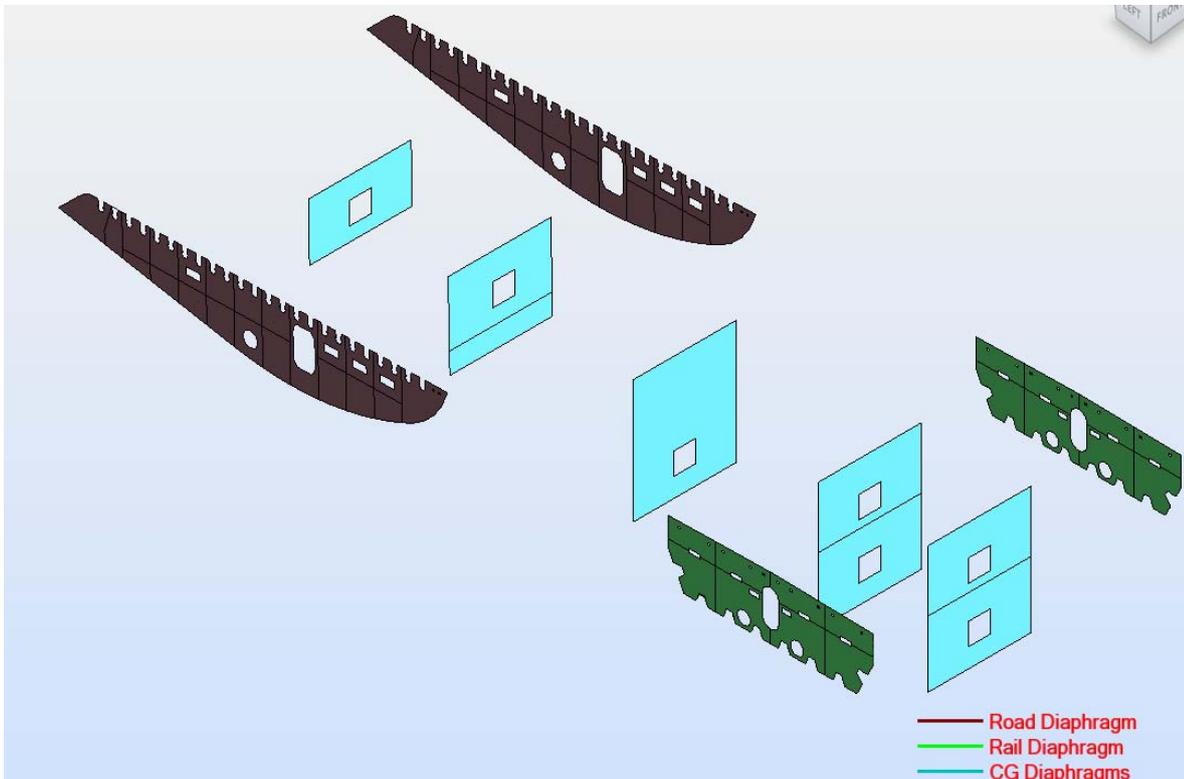


Figura 9-11 Spessori evidenziati tramite colori – diaframmi

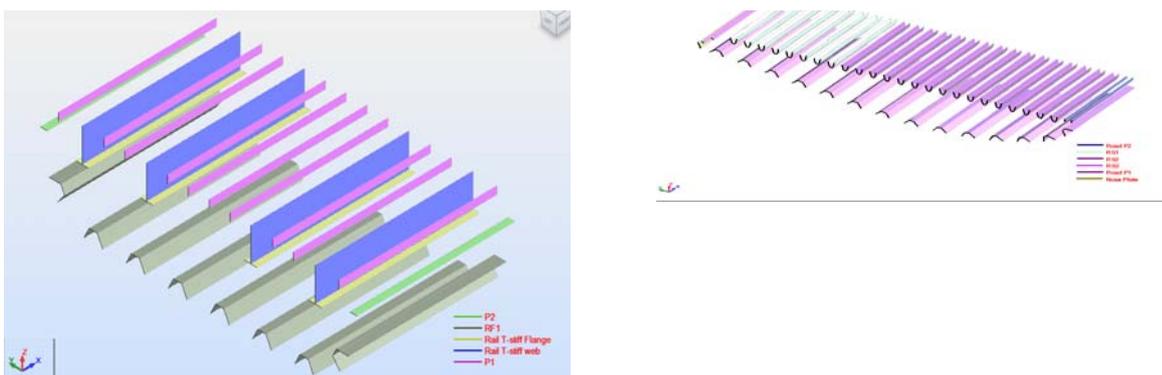


Figura 9-12 Spessori evidenziati tramite colori – irrigidimenti

Per i diaframmi si è supposto uno spessore equivalente, in quanto il modello non comprende gli irrigidimenti attorno ai fori di servizio. L'irrigidimento dei passi d'uomo è stato invece realizzato con elementi delle travi, in grado di garantire la rigidità necessaria a prevenire la concentrazione critica di sollecitazioni che si verificherebbe altrimenti. Il modello è inoltre composto da elementi "shell"

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

(pannelli FE”) sui cassoni longitudinali interni, mentre gli irrigidimenti, anche quelli trasversali nei traversi, sono modellizzati tramite elementi delle travi collegati alle piastre; vedere Figura 9-13; questa supposizione ha lo scopo di ridurre notevolmente la complessità e il tempo di calcolo, senza compromettere l’accuratezza dell’analisi.

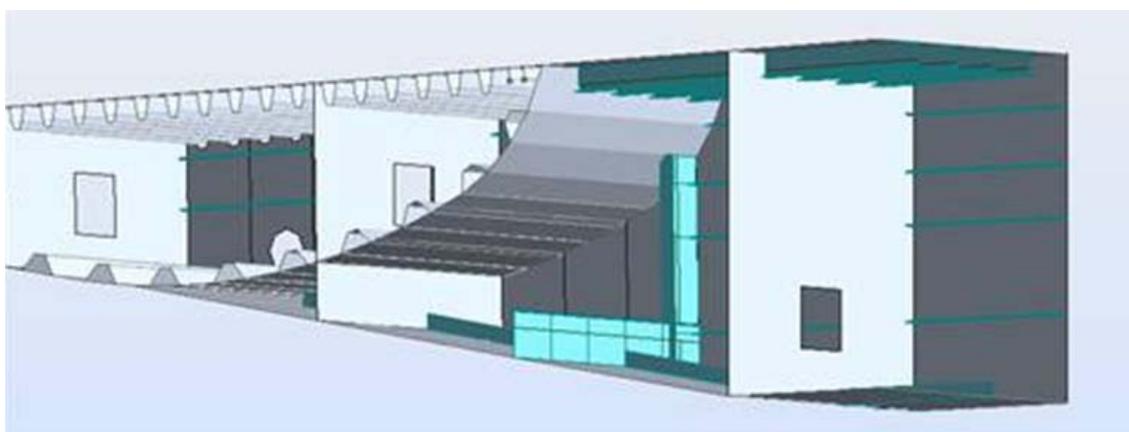


Figura 9-13 Dettaglio del traverso: irrigidimenti del traverso, irrigidimenti longitudinali e diaframmi

Data la generale uniformità geometrica in direzione longitudinale, gli elementi longitudinali sono stati generati tramite estrusione in base a una determinata sezione trasversale con reticolo di dimensioni pari a 75 cm in lunghezza (il modulo di 3.75 m è stato suddiviso in 5 parti) e da 40 a 100 cm circa in larghezza. Il reticolo prodotto comprende 26517 nodi ed è riportato in Figura 9-14.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

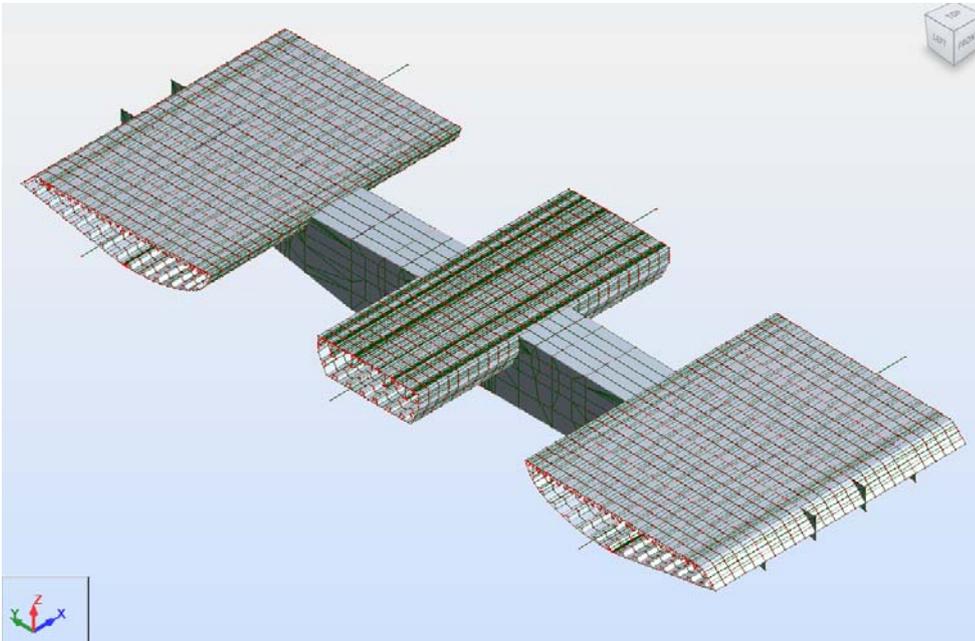


Figura 9-14 Planimetria generale del reticolo

Altri dettagli del reticolo sono visibili in Figura 9-15 e 9-16 relativi rispettivamente ai diaframmi del cassone longitudinale e del trasverso.

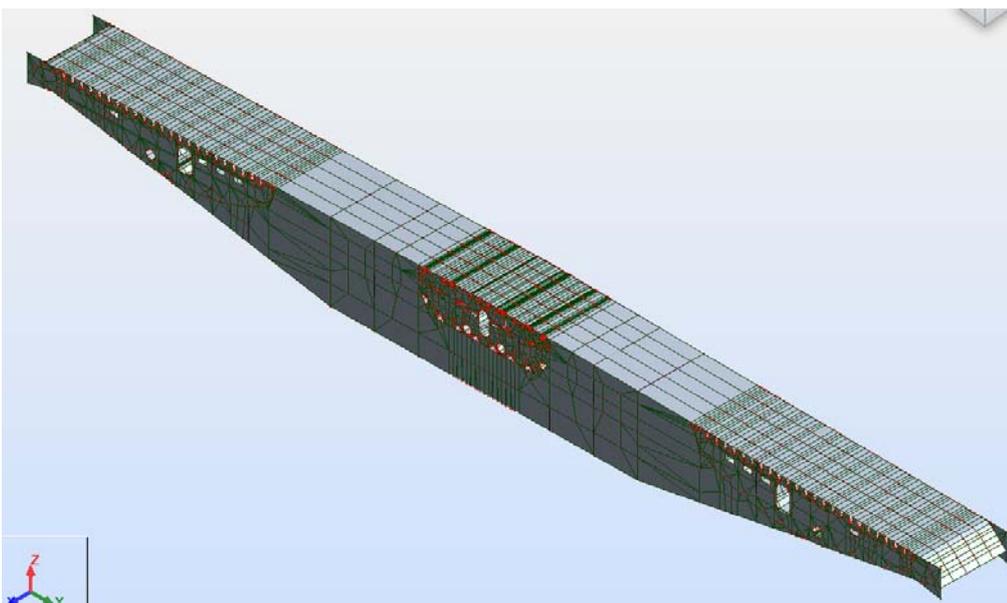


Figura 9-15 Reticolo del trasverso

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

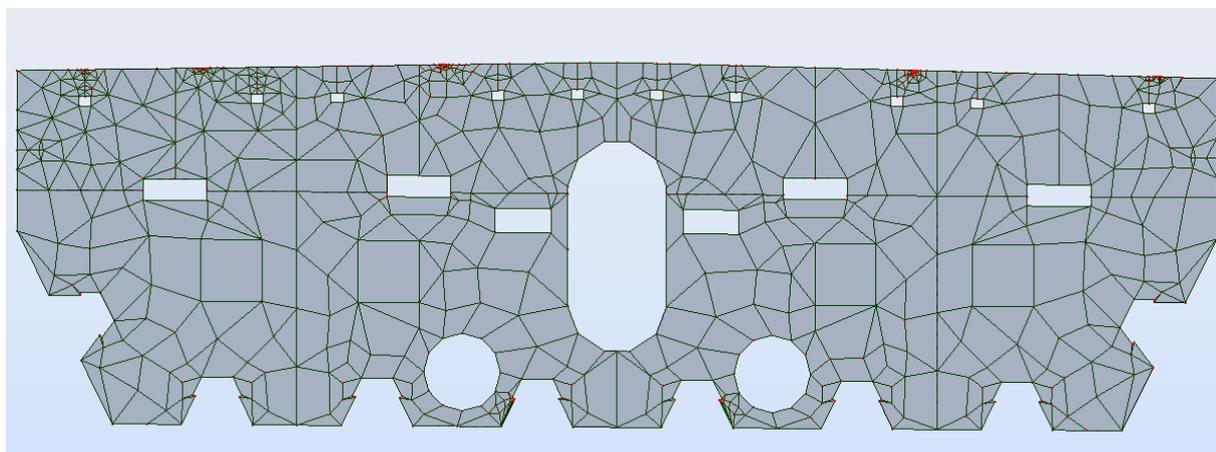
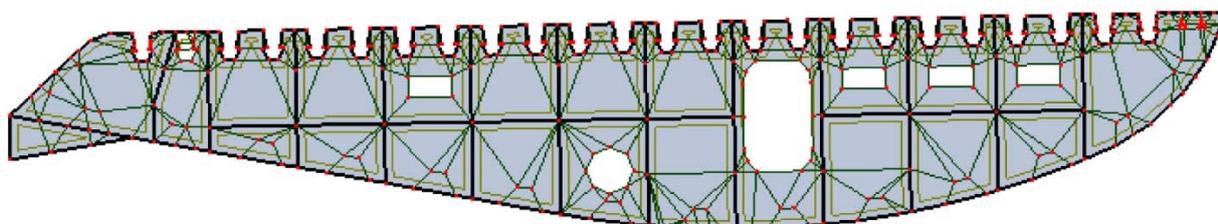


Figura 9-16 Reticolo dei diaframmi di strada e ferrovia

9.3.2 Carichi e combinazioni dei carichi

I carichi applicati sono sia carichi statici sovrapposti sia carichi utili. In generale i carichi sono applicati specificatamente agli elementi portanti, per es. cavi e tubi di scarico supportati da parapetti dei diaframmi, pali per l'illuminazione e frangivento sui bordi della piastra del ponte, ecc. La Tabella 9-3 riporta una descrizione dei carichi statici.

Tabella 9-3 Carichi statici e applicazione

| Carico | Tipo di carico | Applicazione del carico |
|--------------------------|-------------------------------------|--|
| 1: PP TUTTI | Peso intrinseco | Calcolato automaticamente da ROBOT |
| 7: Pavimentazione 40 mm | Distribuzione uniforme del carico | Impalcato stradale |
| 8: PN corsie di servizio | Lineare su bordi pannelli e carichi | Bordi esterni dei diaframmi di strada e ferrovia |

| | | | | |
|---|---|--|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

| | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---|
| | concentrati | |
| 9: PN ferrovia | Distribuzione uniforme del carico | Piastre impalcato ferroviario/diaframmi cassone ferroviario |
| 10:PN strada | Lineare su bordi pannelli | Piastre impalcato stradale/diaframmi cassone stradale |
| 15: Sistema di smaltimento | Lineare su bordi pannelli | Diaframmi cassoni |

I carichi utili sono stati applicati come carichi di collegamento considerando l'impatto reale dei carichi sulla piastra dell'impalcato.

Tabella 9-4 Carichi utili e applicazione

| Carico | Tipo di carico | Valore [kN/m ²] |
|---|---|-----------------------------|
| 31:Strada LM1 - TS 6542 | Planare su profilo 0.4 m x 0.4 m | 312.5 – 625 – 937.5 |
| 32:Strada LM1 - UDL 6542 | Planare su profilo. Carico fascia | 2.5 – 9 |
| 33:L71 - Assali 6542 | Planare su profilo 0.2 m x 0.4 m per binario | 1821.9 |
| 34:LM 71 - UDL 6542 | Planare su profilo. Carico fascia larghezza 0.2 m per binario | 233.2 |
| 35:LM71 Frenata/accelerazione 6542/6532 | Planare su profilo. Carico fascia larghezza 0.2 m per binario | 14.6 |
| 36:Forza di serpeggio 6542/6532 | Planare su profilo 0.2 m x 0.4 m per binario | 2750 |
| 45:SW2 - 6532 | Planare su profilo. Carico fascia larghezza 0.2 m per binario | 397.5 |
| 48:Vento 6532 | Lineare su bordi pannelli | variabile |

La Figura 9-17 riporta a titolo di esempio una serie di carichi utili impiegati per la combinazione di carichi; per maggiore chiarezza, non sono indicate le forze di frenata e accelerazione.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

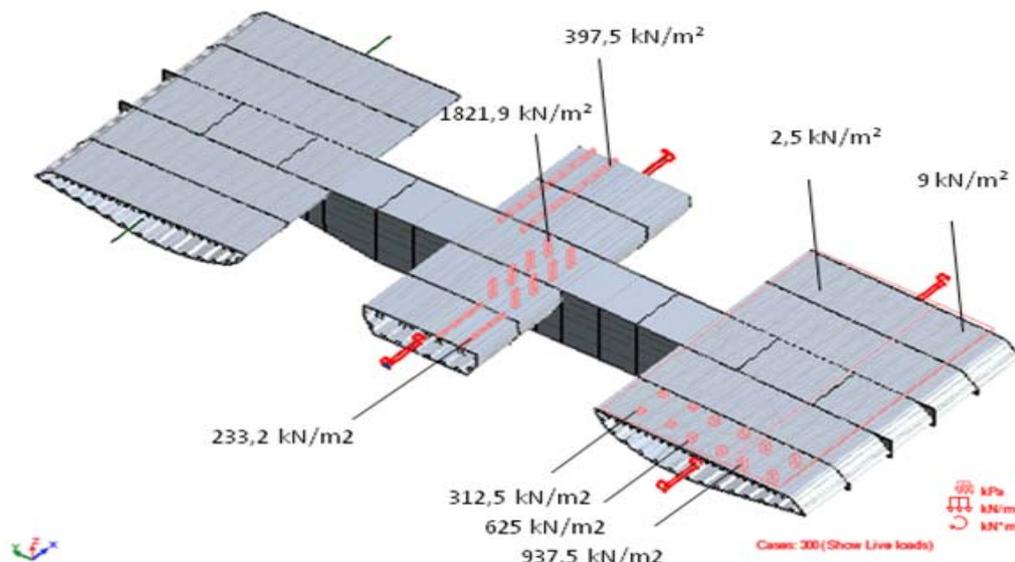


Figura 9-17 Planimetria dei carichi utili

Sono state selezionate tre combinazioni di carichi attestanti diversi criteri e sono stati determinati i regimi di sollecitazioni ottenuti dei relativi elementi di piastra. La descrizione delle combinazioni di carichi e i relativi criteri esaminati sono riportati in Tabella 9-5. Ogni combinazione è stata analizzata realizzando un'adeguata planimetria dei carichi utili secondo la configurazione di carichi individuata da IBDAS in grado di ottimizzare la forza sezionale esaminata

Tabella 9-5 Combinazioni di carichi e relativi criteri

| Combinazioni di carichi | Sezione | Criteri | Descrizione |
|-------------------------|---------------------|---------|---|
| 6542 | Pendino | Max Ns | Tensione massima al pendino |
| 6532 | Traverso | Max My | Momento flettente massimo del cassone ferroviario all'intersezione con il traverso |
| 6524 | Cassone ferroviario | Max Mt | Momento torsionale massimo del cassone ferroviario all'intersezione con il traverso |

Le Tabelle 9-6 e 9-7 riportano una descrizione dei pesi implementati e i relativi coefficienti parziali per ogni combinazione di carichi con carico e fattori di carico conformi ai Principi Base.

| | | | | |
|---|---|--|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

Tabella 9-6 Combinazione di carichi 6542 – Carichi implementati e fattori parziali

| Carico | Tipo di carico | Descrizione | Fattore di carico |
|--------------------------------|--|---|-------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN | Carico lineare su bordi pannelli e distribuzione uniforme del carico | Carico statico sovrapposto | 1.5 |
| Condizioni limite | Forze sezionali del modello globale IBDAS | Forze sezionali applicate all'estremità di ogni elemento della trave | 1.0 |
| QL: Carico stradale LM1 | Carichi di collegamento - Distribuzione uniforme del carico | Carico secondo il relativo modello LM1. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.35 |
| QL: Carico ferroviario LM71 | Carichi di collegamento | Carico secondo il relativo modello LM71. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.16 |
| QL: Forza di frenata binario | Carichi di collegamento | Carico di frenata. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.16 |
| QL: Forza di serpeggio binario | Carichi di collegamento | Forza di serpeggio. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 0.58 |
| VV: Vento | Carico lineare su bordi pannelli | Carico da binari secondo il relativo modello SW/2 applicato sull'intera lunghezza del binario 2. | 0.6 |
| Carico di calibrazione | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso supplementare applicato all'intera struttura con una frazione della densità - calcolato dalla condizione del caso di riferimento | 1.45 |

Tabella 9-7 Combinazione di carichi 6532 – Carichi implementati e fattori parziali

| Carico | Tipo di carico | Descrizione | Fattore di carico |
|--------|------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN | Carico lineare su bordi | Carico statico sovrapposto | 1.5 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

| | | | |
|--------------------------------|---|---|-------------------------|
| | pannelli e distribuzione uniforme del carico | | |
| Condizioni limite | Forze sezionali del modello globale IBDAS | Forze sezionali applicate all'estremità di ogni elemento della trave | 1.0 |
| QL: Carico stradale LM1 | Carichi di collegamento - Distribuzione uniforme del carico | Carico secondo il relativo modello LM1. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.01 (TS) 0.54 (UDL) |
| QL: Carico binario SW/2 | Carichi di collegamento | Carico secondo il relativo modello SW/2. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.45 |
| QL: Carico ferroviario LM71 | Carichi di collegamento | Carico secondo il relativo modello LM71. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.45 |
| QL: Forza di frenatura binario | Carichi di collegamento | Carico di frenata. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.45 |
| QL: Forza di serpeggio binario | Carichi di collegamento | Forza di serpeggio. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 0.73 |
| VV: Vento | Carico lineare su bordi pannelli | Carico da binari secondo il relativo modello SW/2 applicato sull'intera lunghezza del binario 2. | 0.6 |
| Carico di calibrazione | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso supplementare applicato all'intera struttura con una frazione della densità - calcolato dalla condizione del caso di riferimento | 1.45 |

| | | | | |
|---|---|---|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | <i>Rev</i> <i>F0</i> | <i>Data</i> <i>20-06-2011</i> |

Tabella 9-8 Combinazione di carichi 6524 – Carichi implementati e fattori parziali

| Carico | Tipo di carico | Descrizione | Fattore di carico |
|--------------------------------|--|---|-------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN | Carico lineare su bordi pannelli e distribuzione uniforme del carico | Carico statico sovrapposto | 1.5 |
| Condizioni limite | Forze sezionali del modello globale IBDAS | Forze sezionali applicate all'estremità di ogni elemento della trave | 1.0 |
| QL: Carico stradale LM1 | Carichi di collegamento - Distribuzione uniforme del carico | Carico secondo il relativo modello LM1. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.35 |
| QL: Carico binario SW/2 | Carichi di collegamento | Carico secondo il relativo modello SW/2. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.16 |
| QL: Carico ferroviario LM71 | Carichi di collegamento | Carico secondo il relativo modello LM71. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.16 |
| QL: Forza di frenatura binario | Carichi di collegamento | Carico di frenata. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 0.58 |
| QL: Forza di serpeggio binario | Carichi di collegamento | Forza di serpeggio. Posizione conforme al modello globale IBDAS | 1.16 |
| VV: Vento | Carico lineare su bordi pannelli | Carico da binari secondo il relativo modello SW/2 applicato sull'intera lunghezza del binario 2. | 0.6 |
| Carico di calibrazione | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso supplementare applicato all'intera struttura con una frazione della densità - calcolato dalla sola calibrazione del carico statico | 1.45 |

In “Modelli FE locali dell'impalcato del ponte” si riportano i diagrammi delle combinazioni di carichi e la documentazione integrale sulle sollecitazioni di von Mises, comprendenti un confronto con i risultati del modello IBDAS semi-locale.

| | | | | |
|---|---|---|--------------------|--|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 | |

9.4 Modello FE locale dei diaframmi del cassone stradale e ferroviario

9.4.1 Cassone stradale

Il modello FE del cassone stradale è formato da elementi “shell” con spessori coerenti con quanto attestato per la sezione stradale CS2 nei disegni progettuali indicati alla Tabella 9-9.

Tabella 9-9 Disegno utilizzato come base geometrica del modello

| | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|---|
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | CS | 00 | 00 | 00 | 01 | B |
| CG1000 | P | AX | D | P | SV | I3 | CS | 00 | D0 | 00 | 01 | B |
| CG1000 | P | AX | D | P | SS | R4 | 00 | 00 | 00 | 00 | 01 | B |

La geometria generale del modello FE locale della strada è riportata in Figura 9-18 con elementi “shell” primari del cassone stradale, elemento della trave sostenuto e collegamento rigido. Secondariamente, le travi di supporto a sbalzo della corsia di servizio sono modellizzate come elementi “shell” collegati alla struttura primaria.

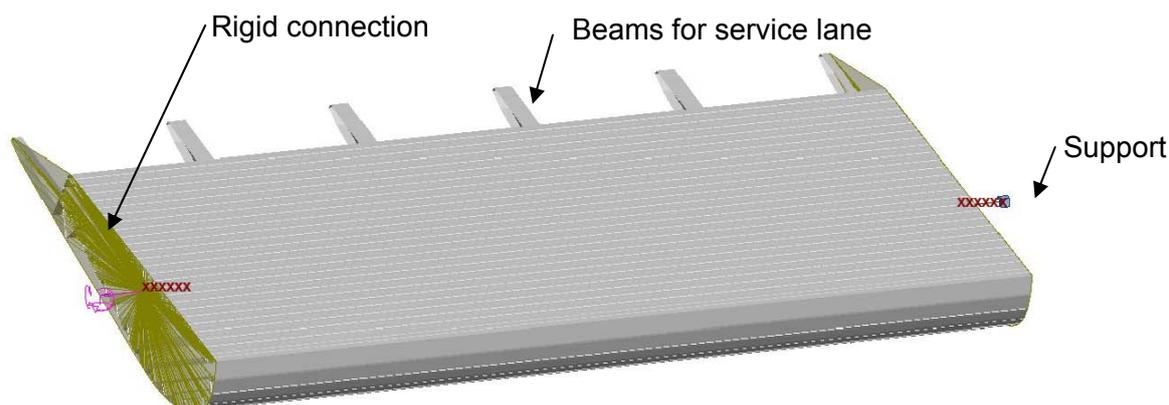


Figura 9-18 Diagramma della geometria generale del modello FE con elemento della trave sostenuto e collegamento rigido

Gli spessori della piastra di acciaio longitudinale esterno sono riportati in Figura 9-19. Gli irrigidimenti longitudinali sono riportati in Figura 9-20. La Figura 9-21 mostrano la trave di supporto

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

a sbalzo della corsia di servizio. Il diaframma è riportato nella Figura 9-22. La variazione di spessore delle piastre è indicata a colori in tutti i diagrammi.

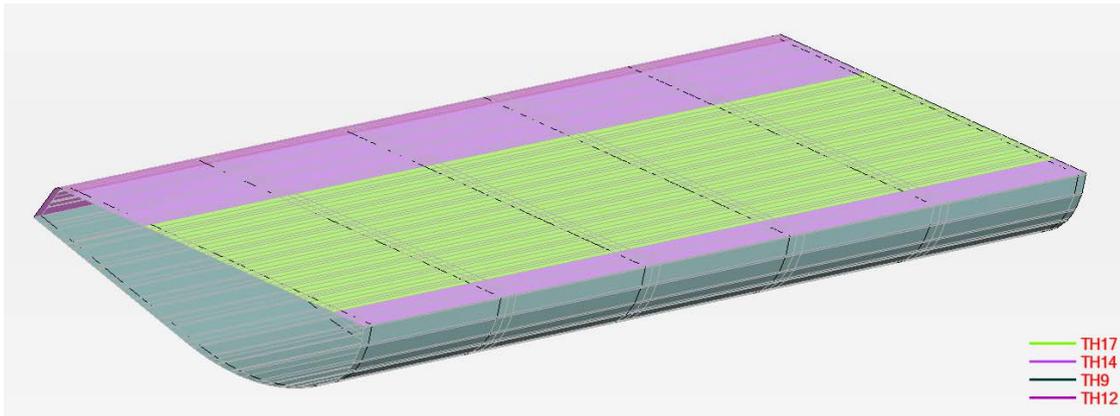


Figura 9-19 Diagramma dell'acciaio longitudinale esterno con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

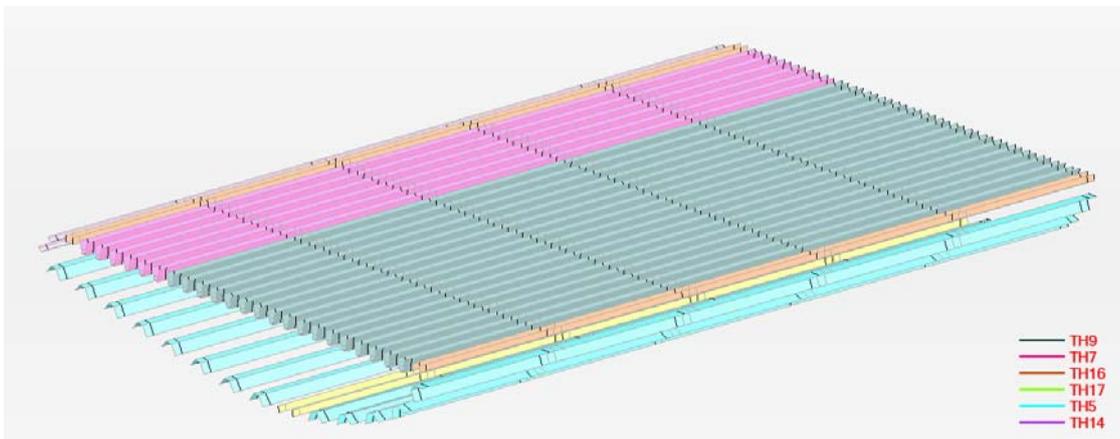


Figura 9-20 Diagramma degli irrigidimenti con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

| | | | | |
|---|---|---|--------------------|--|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 | |

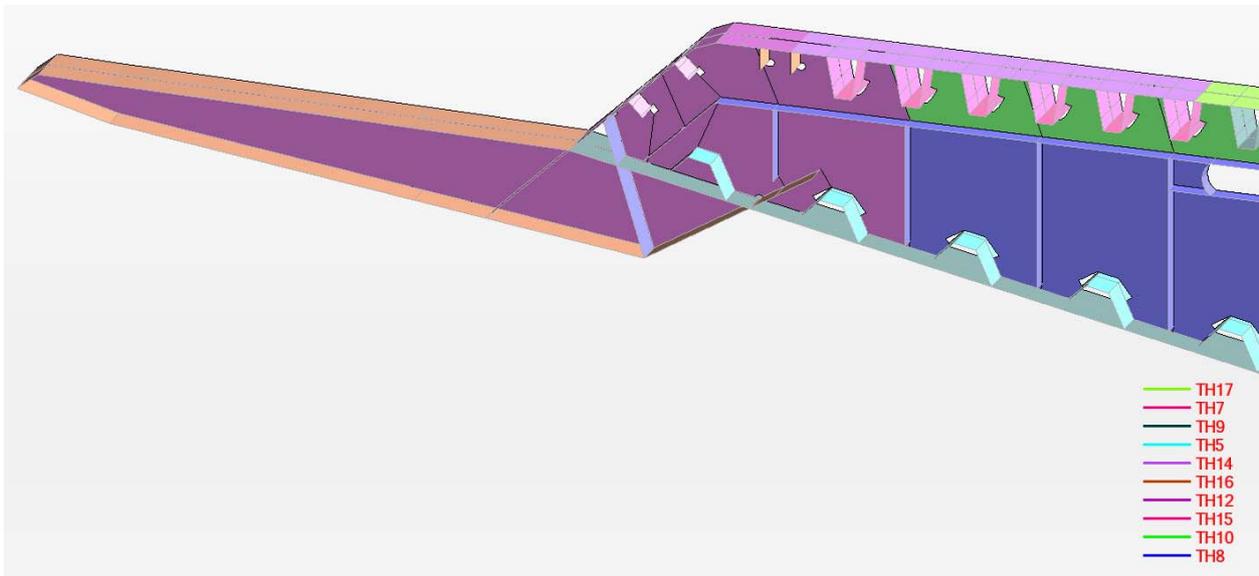


Figura 9-21 Diagramma della trave a sbalzo della corsia di servizio con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

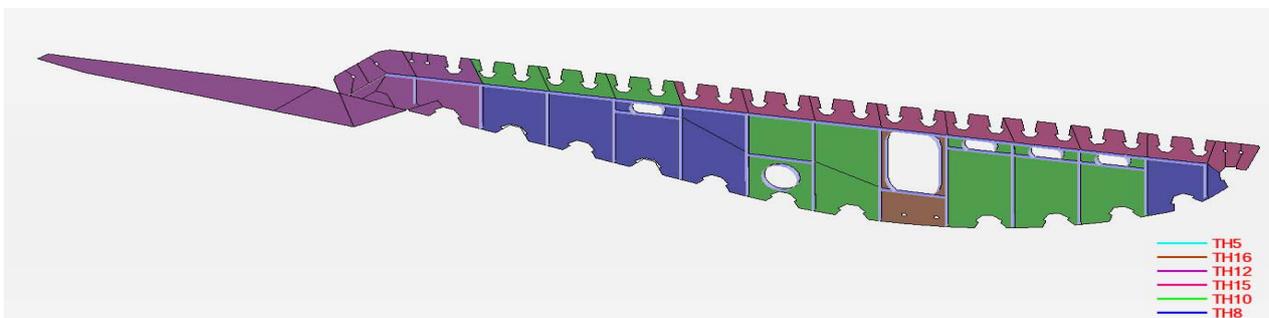


Figura 9-22 Diagramma dei diaframmi con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

Data la generale uniformità geometrica in direzione longitudinale, gli elementi longitudinali “shell” sono stati generati tramite estrusione in base a una determinata sezione trasversale con reticolo di densità relativa a ogni diaframma. Il reticolo, generato automaticamente, comprende 25392 nodi ed è riportato in Figura 9-23 e 9-24 per piastra esterna e diaframma.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

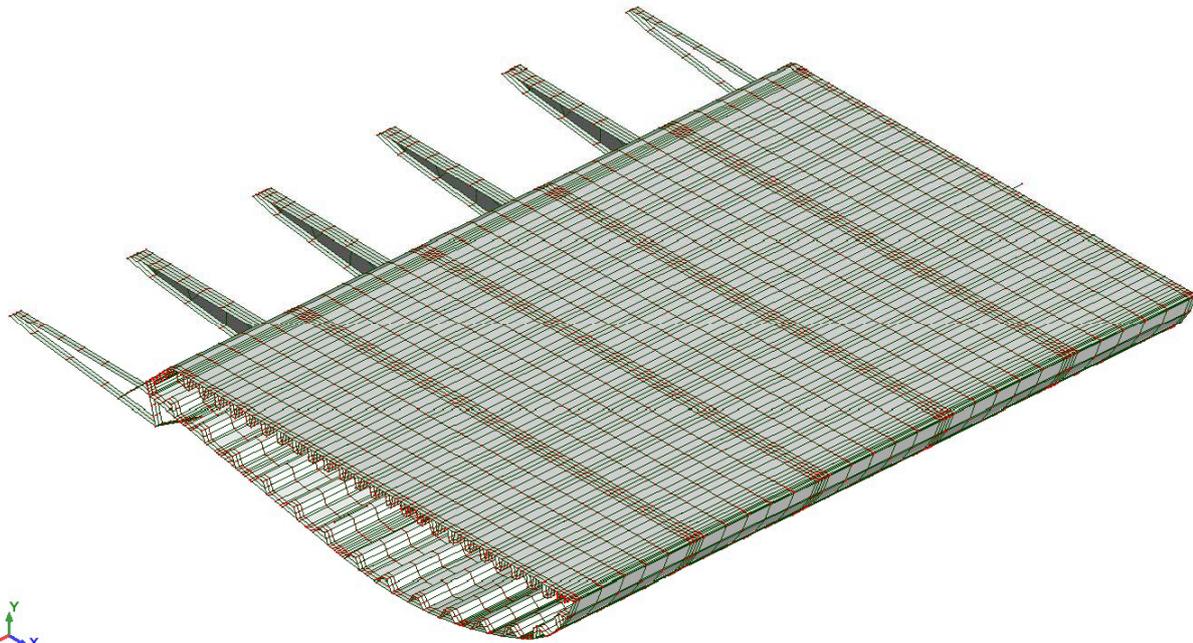


Figura 9-23 Diagramma del reticolo dell'acciaio longitudinale esterno

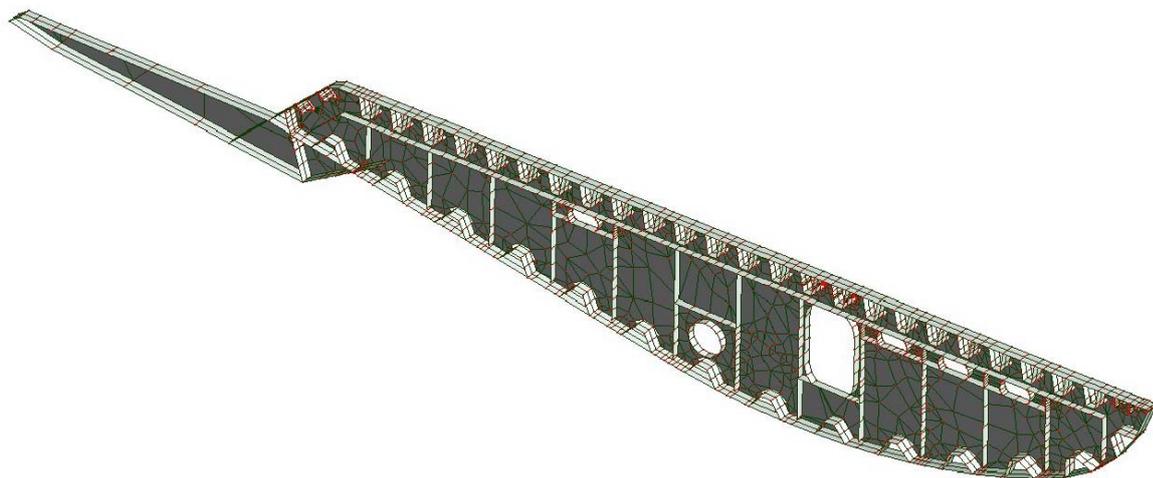


Figura 9-24 Diagramma del reticolo del diaframma

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

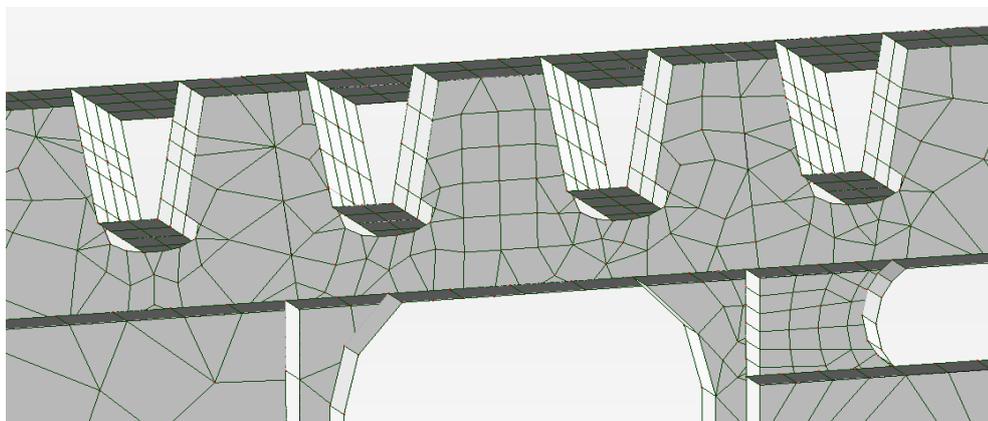


Figura 9-25 Diagramma del reticolo in aperture e nervature sotto la piastra dell'impalcato

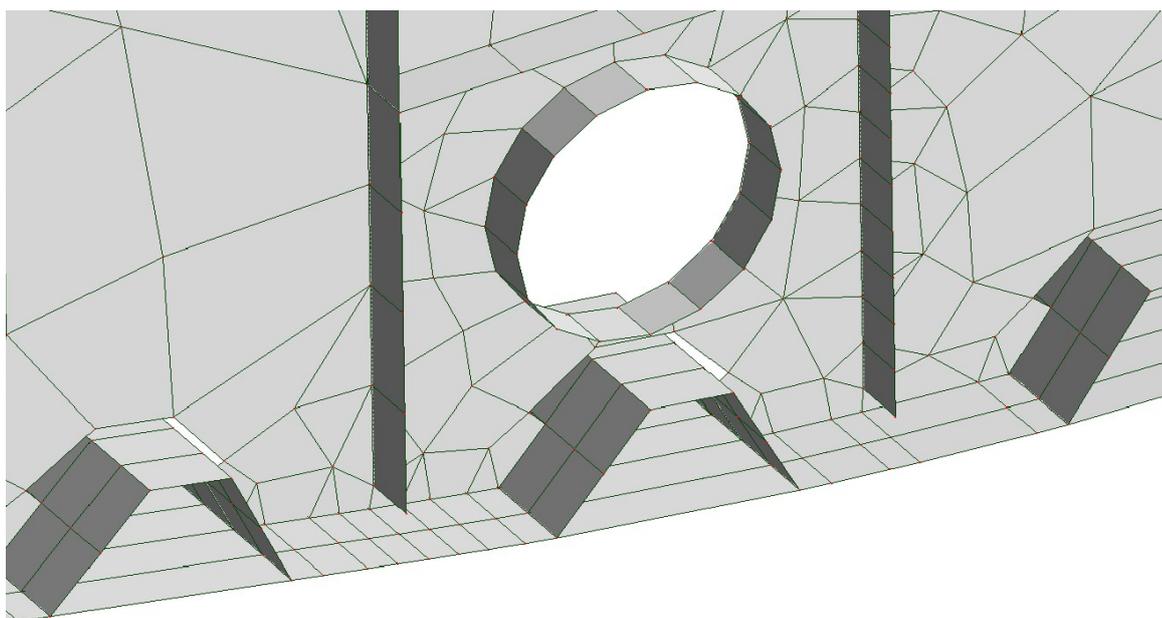


Figura 9-26 Diagramma del reticolo in aperture e nervature della piattabanda

I tre casi di carico ULS riportati di seguito sono stati implementati nel modello FE per il cassone stradale:

1. My massimo al centro della campata
2. Vz massimo al centro della campata
3. Ms massimo nel diaframma

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Il carico di traffico è stato fissato nel modello globale IBDAS, per ottimizzare le forze sezionali M_y e V_z al centro della campata. Il carico agente con il modello locale FE è stato applicato in base ai diagrammi della linea di influenza del modello globale IBDAS.

Nel terzo caso di carico (M_s+), solo il carico utile è stato applicato direttamente al modello locale FE per ottenere il momento positivo del diaframma. Inoltre, la corsia con carico massimo nella maggior parte dei fissaggi coincide con la posizione più lontana dal centro del ponte e, per ottenere una maggiore veridicità nella verifica, questo esempio di carico è stato aggiunto alla verifica del modello locale FE. Le condizioni limite del modello in questo esempio di carico sono quindi le reazioni del modello calibrato in modo che le azioni abbiano lo stesso valore numerico delle reazioni. Le sollecitazioni del carico di traffico applicato non sono quindi sovrapposte alle sollecitazioni sezionali globali. I tre esempi di carico implementati sono specificati nelle Tabelle da 9-10 a 9-12 con i fattori di carico.

*Tabella 9-10 Carichi e fattori di carico applicati al modello locale FE per M_y massima al centro della campata (*i fattori di carico sono compresi nei risultati IBDAS)*

| Carichi | Tipo di carico | Descrizione | Fattori di carico |
|-----------------------------|--|---|-------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN UDL su piastra del ponte | Distribuzione uniforme del carico di linea | Parapetti, pali illuminazione, carriponte traffico, frangivento applicati come carico di linea sul bordo della piastra dell'impalcato nelle rispettive posizioni. | 1.50 |
| PN interno | Carichi concentrati | Cavi, impalcato interno, passerelle di accesso, sistema di scarico e interno applicati sui diaframmi nelle rispettive posizioni. | 1.50 |
| PN corsia di servizio | Carichi concentrati | Carico concentrato applicato su travi a sbalzo per corsia di servizio. | 1.50 |
| Condizioni limite | Forze sezionali ricevute dal modello globale IBDAS per M_y max nella campata centrale (LC6561) | Forze sezionali applicate al baricentro all'estremità della sezione trasversale dell'impalcato del ponte. | 1.0* |

| | | | | |
|---|---|--|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

| | | | |
|---------------------------|--|---|------|
| Autostrada Carico-asse | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBIDAS | Carico utile secondo il relativo modello 1. | 1.35 |
| Autostrada UDL | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBIDAS | Carico utile secondo il relativo modello 1. | 1.35 |

Tabella 9-11 Carichi e fattori di carico applicati al modello locale FE per Vz massima al centro della campata

| Carichi | Tipo di carico | Descrizione | Fattori di carico |
|--------------------------------|--|---|-------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN UDL su piastra del ponte | Distribuzione uniforme del carico di linea | Parapetti, pali illuminazione, carriponte traffico, frangivento applicati come carico di linea sul bordo della piastra dell'impalcato nelle rispettive posizioni. | 1.50 |
| PN interno | Carichi concentrati | Cavi, impalcato interno, passerelle di accesso, sistema di scarico e interno applicati sui diaframmi nelle rispettive posizioni. | 1.50 |
| PN corsia di servizio | Carichi concentrati | Carico concentrato applicato su travi a sbalzo per corsia di servizio. | 1.50 |
| Condizioni limite | Forze sezionali ricevute dal modello globale IBIDAS per My max nella campata centrale (LC6567) | Forze sezionali applicate al baricentro all'estremità della sezione trasversale dell'impalcato del ponte. | 1.0 |
| Autostrada Carico-asse | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBIDAS | Carico utile secondo il relativo modello 1. | 1.35 |
| Autostrada UDL | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBIDAS | Carico utile secondo il relativo modello 1. | 1.35 |

Tabella 9-12 Carichi e fattori di carico applicati al modello locale FE per Mz massima nel

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

diaframma

| Carichi | Tipo di carico | Descrizione | Fattori di carico |
|-----------------------------|--|---|--------------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN UDL su piastra del ponte | Distribuzione uniforme del carico di linea | Parapetti, pali illuminazione, carriponte traffico, frangivento applicati come carico di linea sul bordo della piastra dell'impalcato nelle rispettive posizioni. | 1.50 |
| PN interno | Carichi concentrati | Cavi, impalcato interno, passerelle di accesso, sistema di scarico e interno applicati sui diaframmi nelle rispettive posizioni. | 1.50 |
| PN corsia di servizio | Carichi concentrati | Carico concentrato applicato su travi a sbalzo per corsia di servizio. | 1.50 |
| Condizioni limite | Forze sezionali applicate in modo da bilanciare reazione e azione. | Forze sezionali applicate al baricentro all'estremità della sezione trasversale dell'impalcato del ponte. | 1.0 |
| Autostrada Carico-asse | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBIDAS | Carico utile secondo il relativo modello 1. | 1.35 |
| Autostrada UDL | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBIDAS | Carico utile secondo il relativo modello 1. | 1.35 |

Le Figure da 9-27 a 9-30 riportano il carico statico PN del modello globale IBIDAS applicato al modello.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

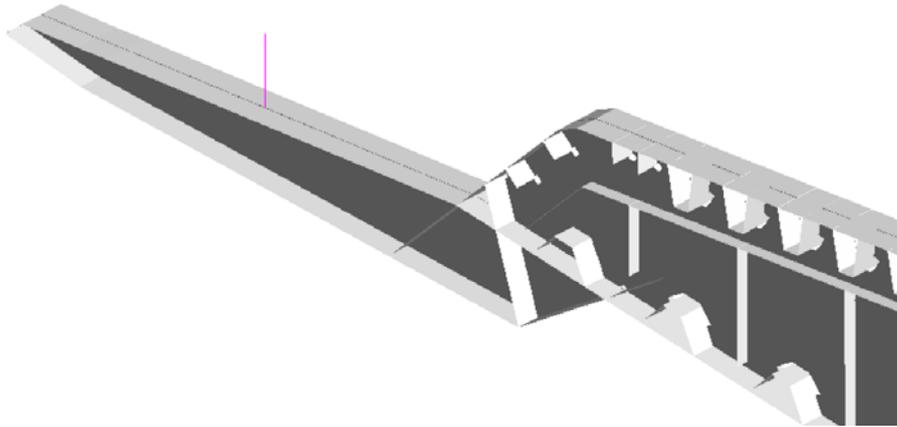


Figura 9-27 Diagramma della trave a sbalzo con carico PN della corsia di servizio

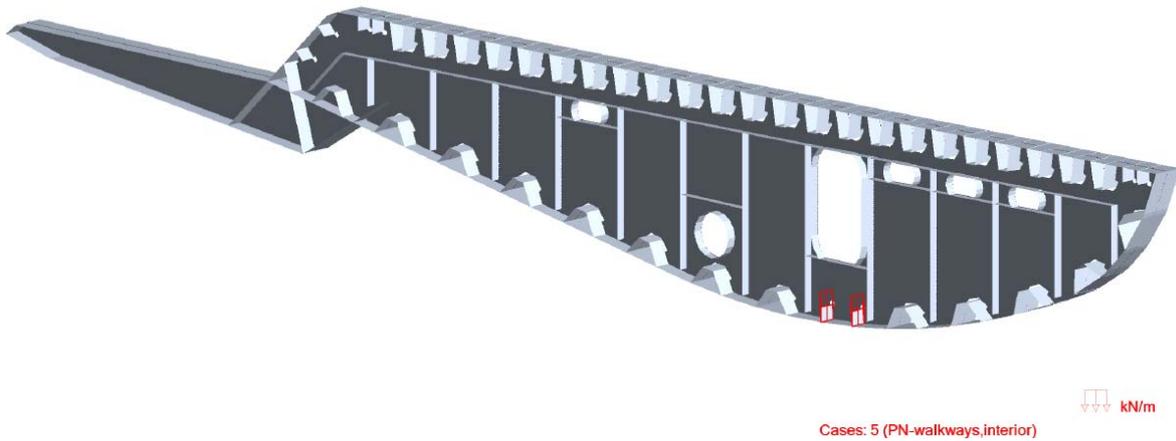


Figura 9-28 Diagramma del modello con carico PN delle passerelle

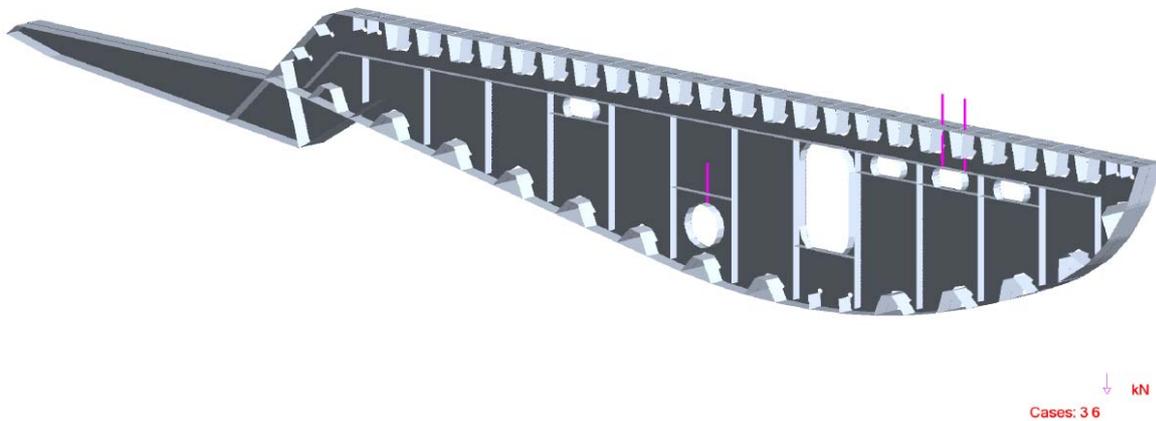


Figura 9-29 Diagramma del modello con carico PN di cavi e scarico

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

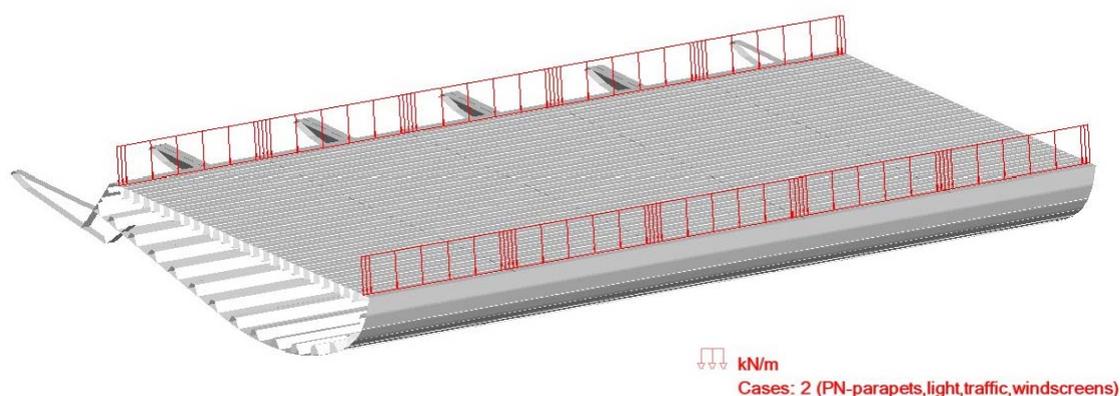


Figura 9-30 Diagramma del modello con parapetti, pali per l'illuminazione, carriponte traffico e frangivento

La pavimentazione è applicata come carico UDL PN con un'area equivalente di 20.7x11.95 m.

La Figura 9-31 riporta un esempio del carico di traffico applicato per il momento positivo massimo al centro della campata con carichi applicati secondo il modello IBDAS per il modello di carico 1.

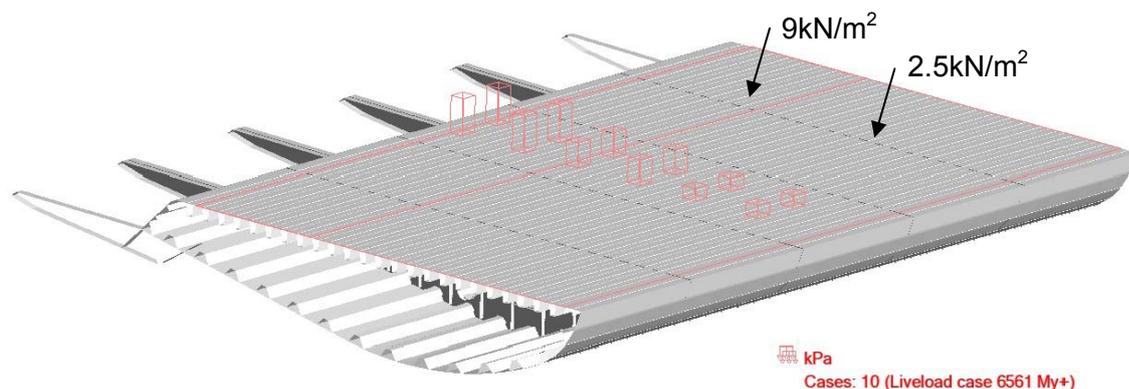


Figura 9-31 Diagramma di modello con carico applicato nel caso di momento positivo massimo sulla campata centrale

I carichi di collegamento riportati in Figura 9-31 sono equivalenti al carico dell'asse relativo a 300 kN, 200 kN e 100 kN distribuiti su 400x400 mm.

In "Relazione tecnica – Cassoni stradali, ferroviari e traversi" si riportano i diagrammi delle combinazioni di carichi applicate e la documentazione integrale delle sollecitazioni von Mises.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

9.5 Cassone ferroviario

9.5.1 Geometria

I modelli sono formati da elementi “shell” (pannelli FE) con spessori coerenti in termini di valore e denominazioni come indicato nei disegni progettuali indicati alla Tabella 9-13.

Tabella 9-13 Disegni utilizzati come base geometrica del modello

| | | | | | | | | | | | |
|--------|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | CF | 00 | 00 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | AX | D | P | SV | I3 | CS | 00 | D0 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | BX | D | P | SS | P2 | FE | 00 | 00 | 00 | 03 |

La Figura 9-32 mostra un diagramma del modello con elementi della trave a ogni estremità collegati alle piastre attraverso collegamenti e sostenuti da supporto fisso all'estremità destra del modello. L'annotazione all'estremità sinistra del modello indica il collegamento rigido tra elemento della trave e modello “shell”.

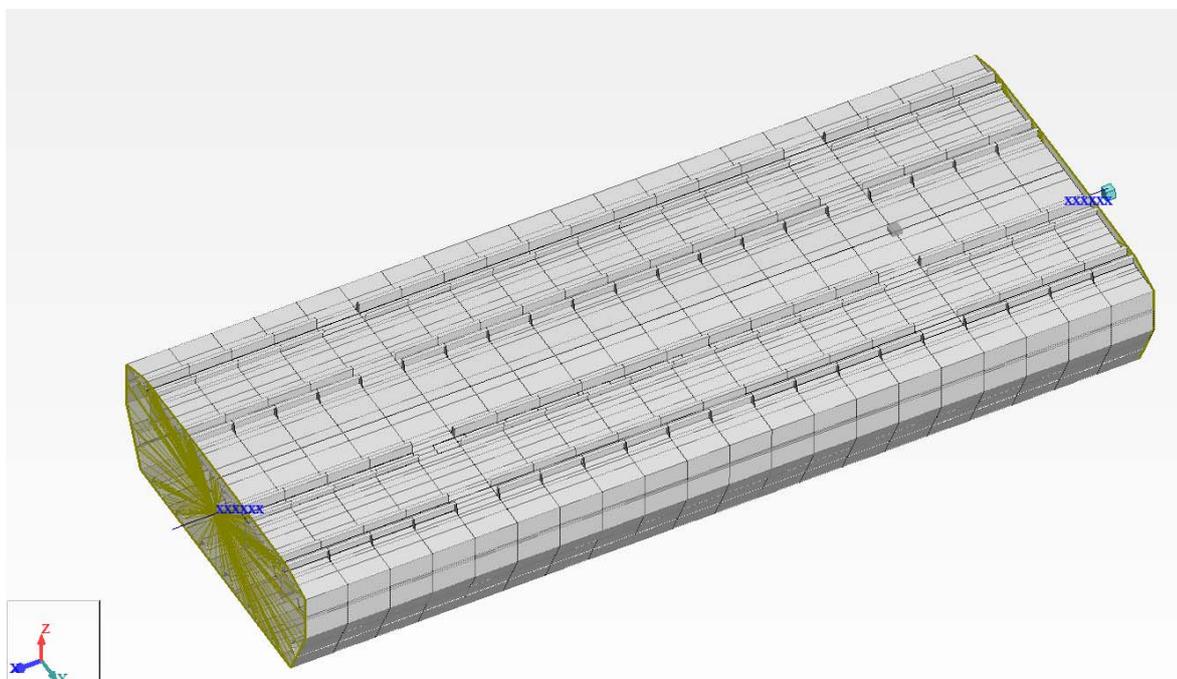


Figura 9-32 Diagramma del modello FE che indica elementi della trave, collegamenti rigidi e supporto fisso

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

La Figura 9-33 mostra un diagramma del modello FE dell'acciaio longitudinale esterno nel cassone ferroviario. La Figura 9-34 riporta un diagramma delle piastre interne longitudinali e la Figura 9-35 mostra il diaframma modellizzato adeguatamente dettagliato con irrigidimenti piastra e rinforzo di fori di scarico e portacavi. La variazione di spessore delle piastre è indicata a colori in tutti i diagrammi.

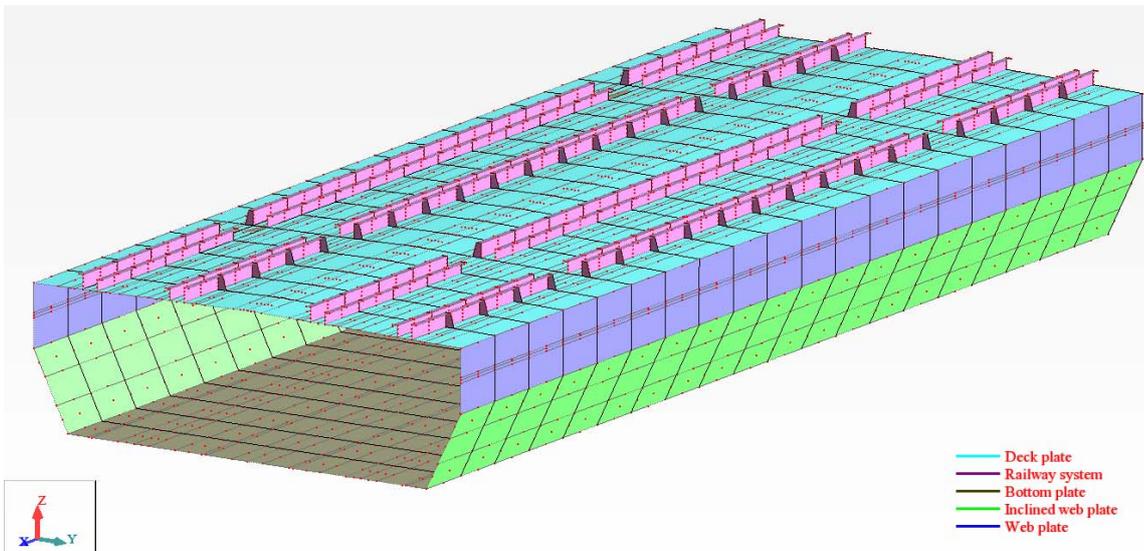


Figura 9-33 Diagramma del modello FE dell'acciaio longitudinale esterno nel cassone ferroviario con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

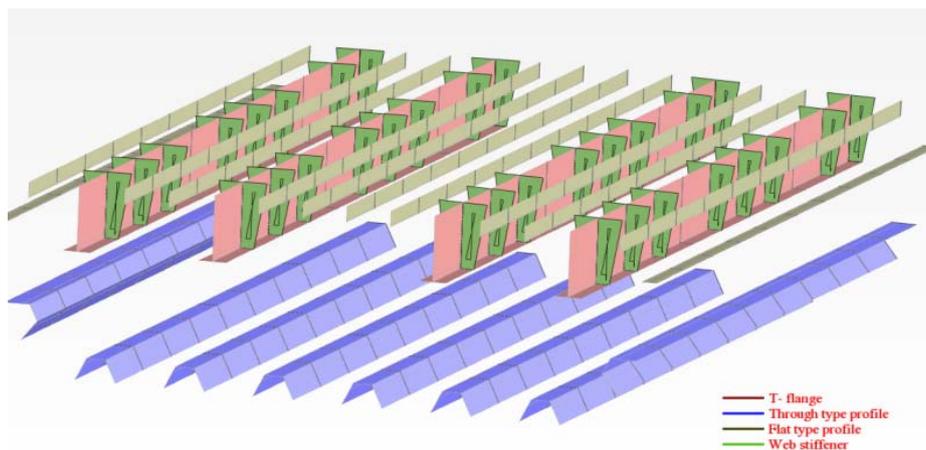


Figura 9-34 Diagramma del modello FE dell'acciaio longitudinale interno nel cassone ferroviario con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

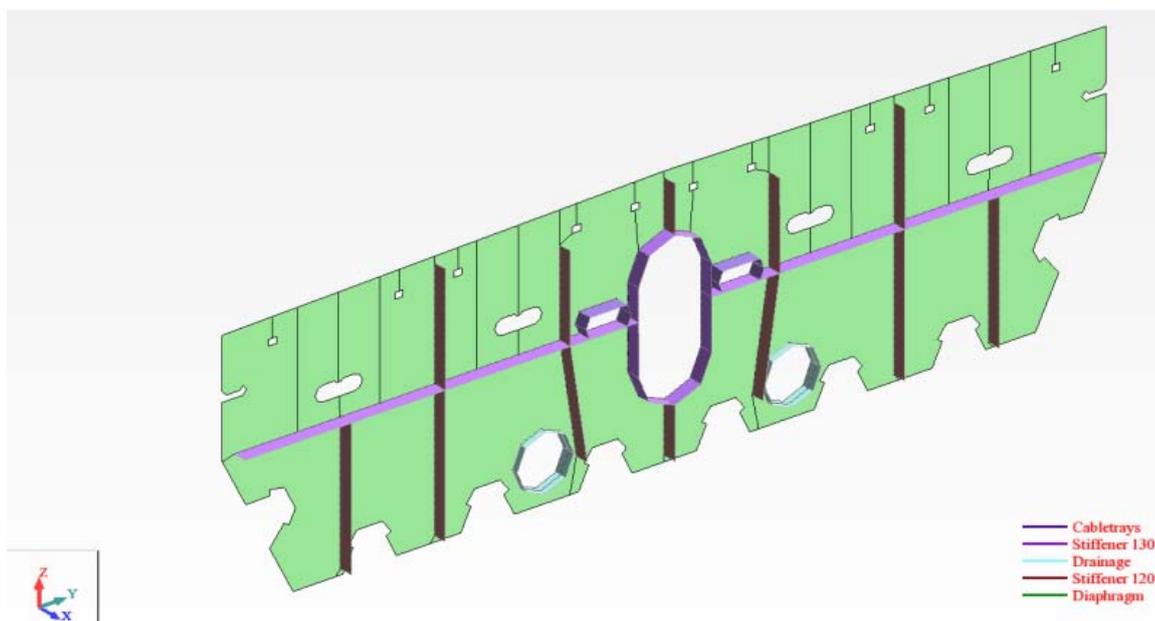


Figura 9-35 Diagramma del diaframma con irrigidimenti. Gli spessori della piastra sono evidenziati a colori

La Tabella 9-14 seguente riporta un elenco di elementi e spessori piastra inseriti nel modello.

Tabella 9-14 Elenco di elementi e spessori piastra inseriti nel modello

| Inseriti nel modello FE | Spessore piastra [mm] |
|--|-----------------------|
| Piastra impalcato | 15 |
| Piattabanda | 10 |
| Piastra anima | 10 |
| Piastra anima inclinata | 10 |
| Trave a T, flangia | 22 |
| Trave a T, anima | 14 |
| Irrigidimento piatto su piastra dell'impalcato | 18 |
| Irrigidimento piatto su piastra dell'anima | 16 |
| Nervatura | 6 |
| Diaframma tipo 1* | 8/10/15 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

| | |
|---|----|
| Diaframma tipo 2 | 12 |
| Rinforzo dei portacavi, larghezza = 110 mm | 8 |
| Rinforzo dei fori di scarico, L = 110 mm | 8 |
| Rinforzi dei diaframmi (verticali) L = 120 mm | 10 |
| Rinforzi dei diaframmi (orizzon.) L = 130 mm | 10 |
| Rinforzi del passo d'uomo, L = 130 mm | 10 |
| Profili angolari per sistema ferroviario | 16 |

*Per la specifica relativa agli spessori dei diaframmi, vedere CG.10.00-P-AX-D-P-DV-I3-CF-00-D0-00-01

9.5.2 Reticolo

Gli elementi sono lunghi 47 cm, pari ai moduli da 3.75 m tra diaframmi suddivisi in 8 parti. La larghezza degli elementi va da 6 a 50 cm appross. I diaframmi sono a forma di reticolo triangolare con dimensione massima di 100 cm, ma reticolo relativamente fine agli angoli e alle aperture. Il reticolo generato comprende 13319 nodi ed è riportato in Figura 9-36 per le piastre esterne e in Figura 9-37 per il diaframma.

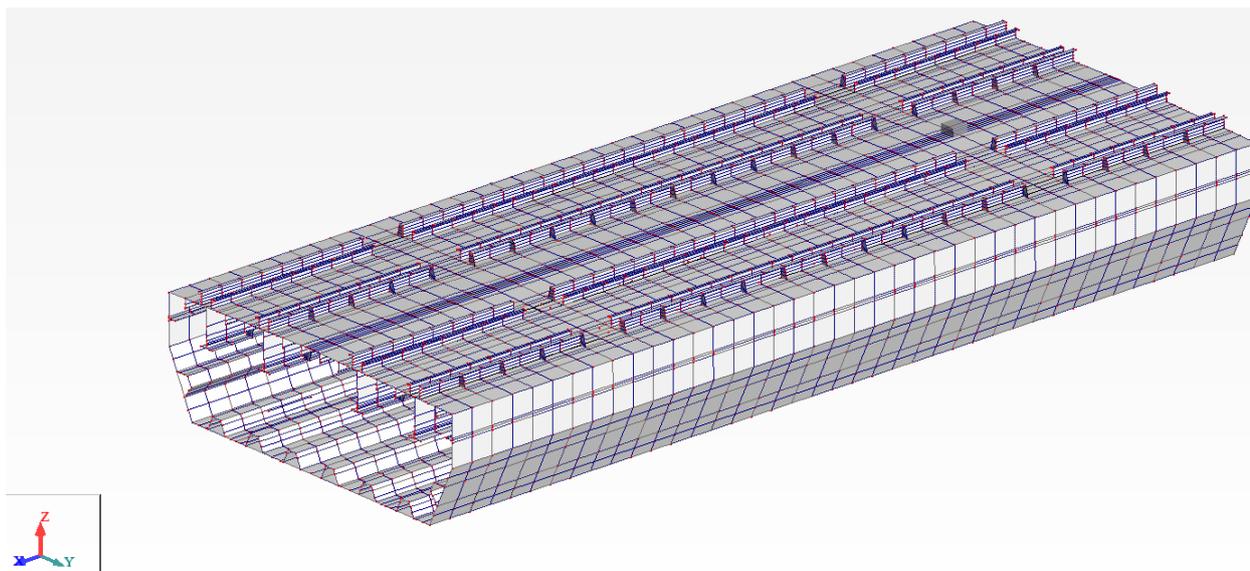


Figura 9-36 Reticolo relativo alle piastre esterne

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

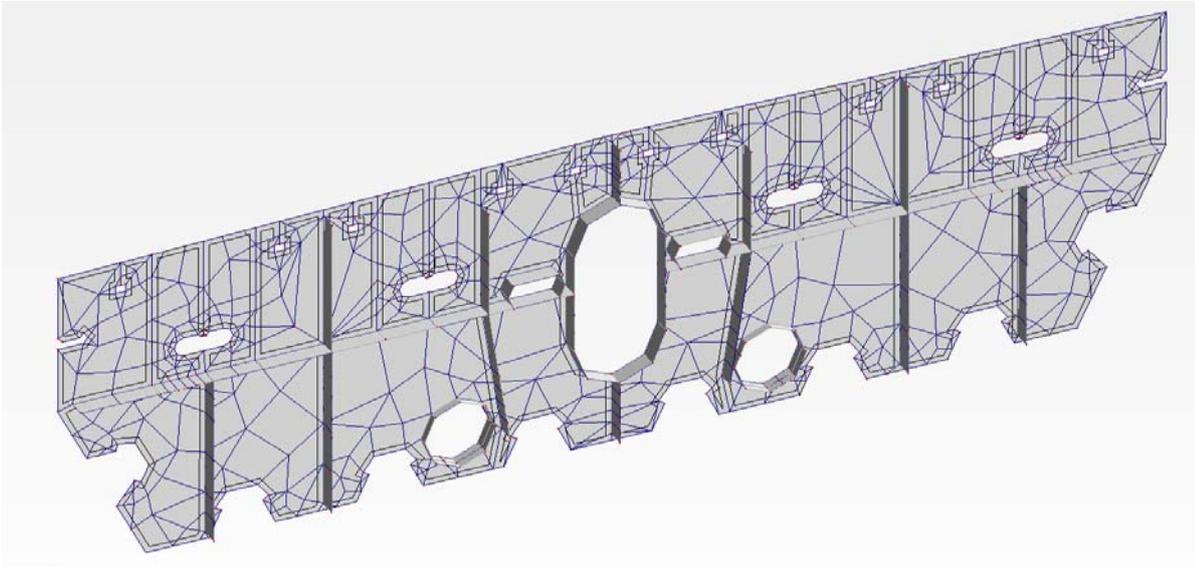


Figura 9-37 Reticolo relativo all'acciaio longitudinale esterno e al diaframma

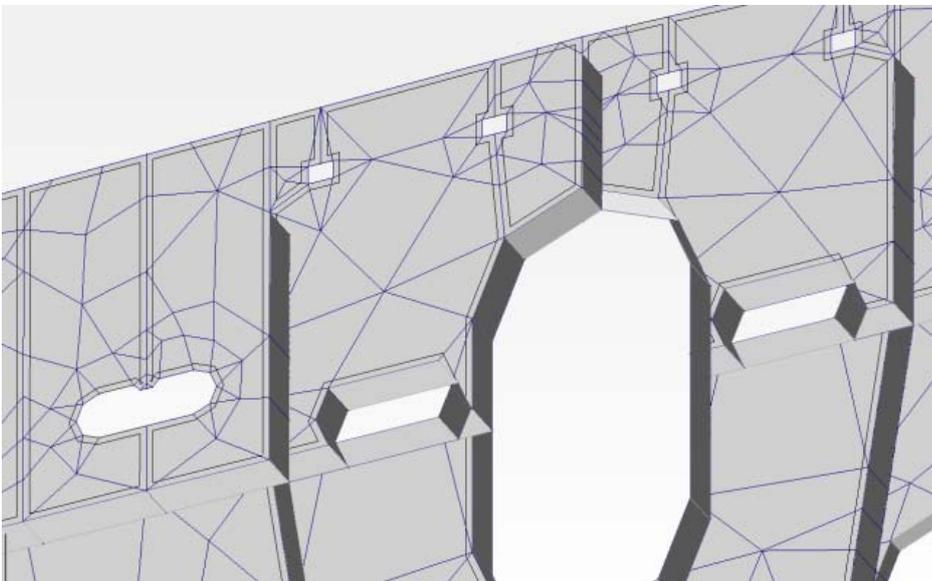


Figura 9-38 Diagramma del reticolo nel diaframma in aperture e nervature alla piastra dell'impalcato

| | | | | |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 | |

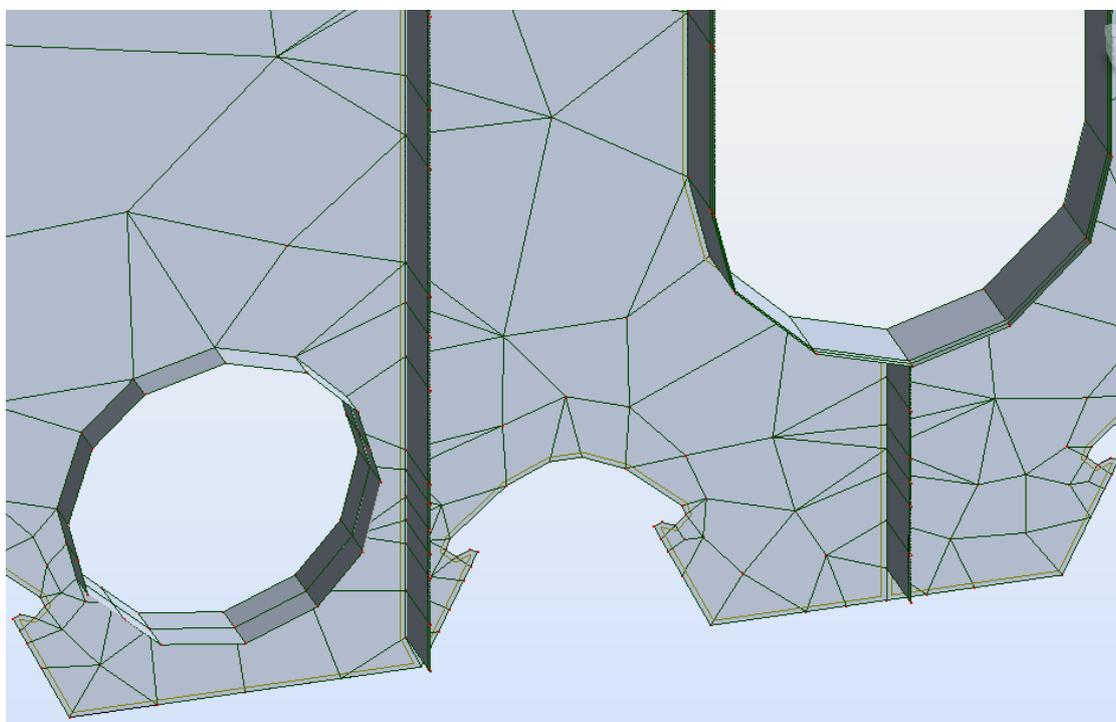


Figura 9-39 Diagramma del reticolo nel diaframma in aperture e nervature alla piattabanda

9.5.3 Carichi e combinazioni dei carichi

I carichi applicati sono carichi statici, carichi statici sovrapposti e carichi utili. In generale i carichi si applicano specificatamente agli elementi sui quali si suppone eserciteranno un peso. Il carico utile sovrapposto si applica come carico distribuito uniforme sull'intera lunghezza del modello. Ciò è dovuto alle dimensioni totali del carico di 22 kN/m e al presupposto che un'applicazione relativamente più precisa dei carichi sovrapposti, per es. da cavi, catenarie, sistema di scarico, non rifletterà una situazione reale tenendo conto della distribuzione delle sollecitazioni.

I due casi di carico riportati di seguito sono stati implementati nel modello FE per il cassone ferroviario:

1. My massimo al centro della campata
2. Mt massimo al centro della campata

Il carico del binario è stato fissato in modo da ottimizzare le forze sezionali del momento flettente massimo, My, e del momento torsionale, Mt, al centro della campata e il carico è stato applicato al modello secondo i diagrammi della linea di influenza IBDAS del carico determinante sul binario. I

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

tre esempi di carico implementati sono specificati nelle Tabelle 9-15 e 9-16 con carichi e fattori di carico relativi a Principi Base e descrizione dell'applicazione.

*Tabella 9-15 Carichi e fattori di carico applicati al modello locale FE per momento flettente massimo M_y al centro della campata (*i fattori di carico sono compresi nei risultati IBDAS)*

| Carichi | Tipo di carico | Descrizione | Fattori di carico |
|-------------------------|---|--|--------------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN | Carico di linea | Carico statico sovrapposto Applicato come carico di linea al centro della piastra dell'impalcato sull'intera lunghezza del modello | 1.50 |
| Condizioni limite | Forze sezionali ricevute dal modello globale IBDAS per M_y max nella campata centrale (LC6571) | Sei forze sezionali applicate a un'estremità dell'elemento della trave | 1.0* |
| Carico binario SW/2 | Distribuzione uniforme del carico. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello SW/2 applicato all'ubicazione di ogni rotaia del binario 1. | 1.45 |
| Carico ferroviario LM71 | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello LM71 applicato all'ubicazione di ogni rotaia del binario 2. | 1.45 |
| Forze di frenata | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello SW/2 applicato al binario 1 e modello LM71 applicato al binario 2. | 1.45 |
| Forze di serpeggio | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello SW/2 applicato al binario 1 e modello LM71 applicato al binario 2. Applicato al sistema ferroviario su un'area di 150x200 mm. | 0.73 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Tabella 9-16 Carichi e fattori di carico applicati al modello locale FE per momento torsionale massimo M_t al centro della campata

| Carichi | Tipo di carico | Descrizione | Fattori di carico |
|------------------------------|---|---|-------------------|
| PP | Calcolato automaticamente da ROBOT | Peso intrinseco | 1.35 |
| PN | Distribuzione uniforme del carico | Carico statico sovrapposto Applicato come carico di linea al centro della piastra dell'impalcato sull'intera lunghezza del modello | 1.50 |
| Condizioni limite | Forze sezionali ricevute dal modello globale IBDAS per M_t max nella campata centrale (LC6575) | Sei forze sezionali applicate a un'estremità dell'elemento della trave | 1.0 |
| Carico ferroviario LM71 (y-) | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello LM71 applicato all'ubicazione di ogni rotaia del binario 1. | 1.16 |
| Carico ferroviario LM71 (y+) | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello LM71 applicato all'ubicazione di ogni rotaia del binario 2. | 1.16 |
| Forze di frenata | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello LM71 applicato su binario 1 e 2. | 0.58 |
| Forze di serpeggio | Distribuzione uniforme dei carichi. Dimensionamento e posizione conformi al modello globale IBDAS | Carico utile secondo il relativo modello LM71 applicato al binario 1 e 2. Applicato al sistema ferroviario su un'area di 150x200 mm. | 1.16 |

Le Figure 9-40 e 9-41 riportano un esempio di carico applicato per M_y massima con treno di tipo SW2 su binario 1 (y- secondo le coordinate nel modello globale IBDAS) e LM71 su binario 2 (y+ secondo le coordinate nel modello globale IBDAS). La Figura 9-40 mostra i carichi verticali e la Figura 9-41 i carichi orizzontali nella combinazione di carichi. In "Relazione tecnica – Cassoni stradali, ferroviari e traversi" si riportano i diagrammi di tutte le combinazioni di carichi applicate e la documentazione integrale delle sollecitazioni von Mises.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

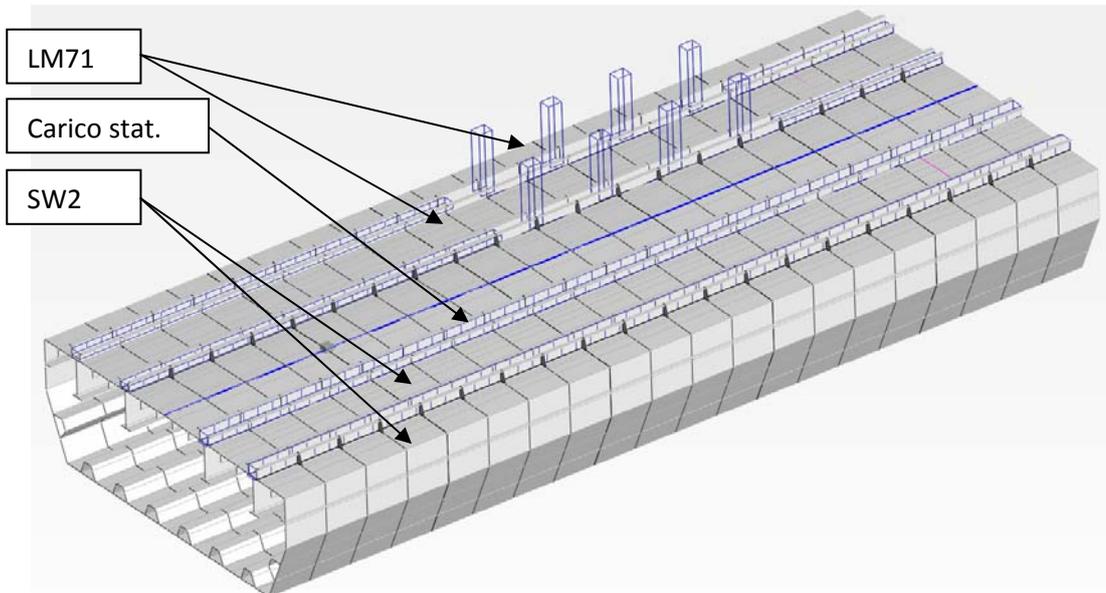


Figura 9-40 Diagramma di modello con carico verticale applicato per carico con momento positivo flettente massimo M_{y+} sulla campata centrale

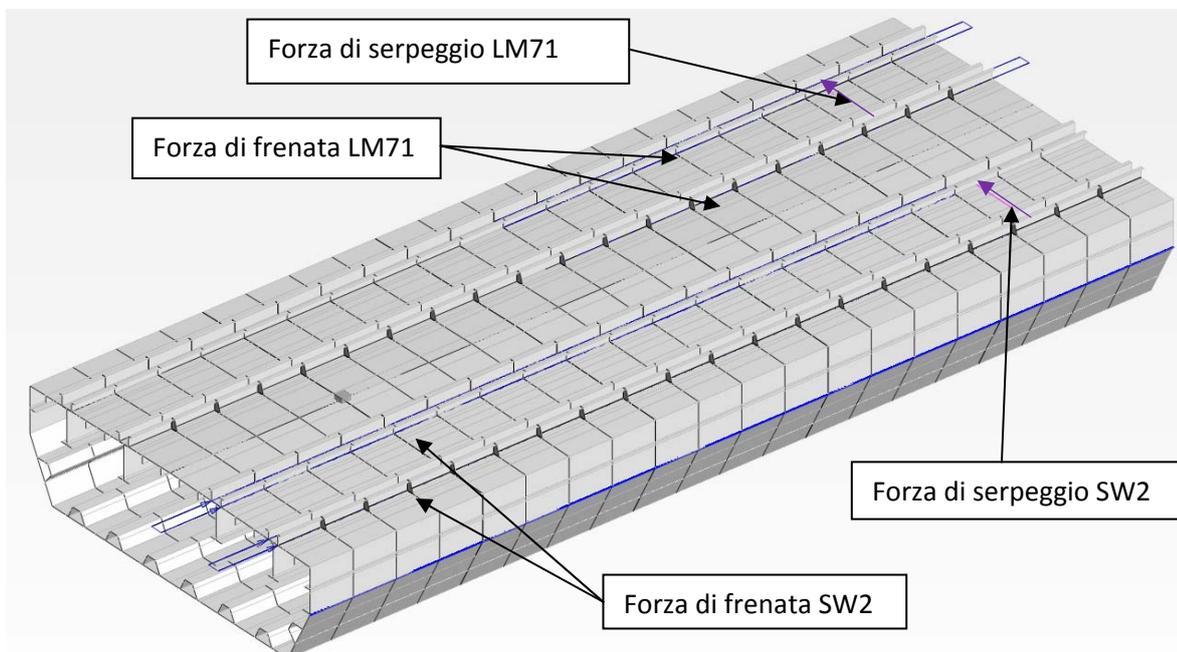


Figura 9-41 Diagramma di modello con carico orizzontale applicato per carico con momento positivo flettente massimo M_{y+} sulla campata centrale

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

9.6 Ancoraggio dei pendini

Si creano quattro modelli FE locali di ancoraggi dei pendini per verificare la distribuzione locale delle sollecitazioni dall'ancoraggio dei pendini, nel traverso e nel cassone ferroviario. Il modello avrà una lunghezza complessiva di 30m tra i centri-campata del cassone stradale longitudinale e una larghezza di 26m per mezzo trasverso. La campata relativamente lunga del modello assicurerà una condizione limite corretta e quindi la distribuzione e il flusso delle sollecitazioni per le piastre relative all'ancoraggio del pendino.

I seguenti ancoraggi dei pendini sono stati modellizzati:

- AP1 con cuscinetti a sfera e rotazioni massime,
- AP1 con cuscinetti a sfera,
- AP2
- AP3

I quattro modelli rappresentano gli ancoraggi dei pendini dal traverso numero 9 al 111.

I modelli sono formati da elementi "shell" con spessori coerenti a quanto indicato nei disegni progettuali indicati alla Tabella 9-17.

Tabella 9-17 Disegni utilizzati come base geometrica del modello

| | | | | | | | | | | | |
|--------|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| CG1000 | P | AX | D | P | SV | I3 | TP | 00 | 00 | 00 | 03 |
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | CS | 00 | 00 | 00 | 01 |
| CG1000 | P | WX | D | P | SV | I3 | TP | 00 | 00 | 00 | 01 |

La geometria dell'interfaccia dei cassoni adiacenti in condizioni limite è uguale al traverso T1 e al cassone stradale CS1 nei quattro modelli.

La geometria generale del modello FE locale degli ancoraggi dei pendini è riportata in Figura 9-42 con gli elementi "shell" di traverso, cassone stradale, ancoraggio dei pendini e supporti.

Il modello è appoggiato a ciascuna estremità della strada da 30 m in direzione longitudinale e il traverso è appoggiato in corrispondenza dell'asse del ponte in direzione trasversale e in due punti in tre direzioni come mostrato in Figura 9-42.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

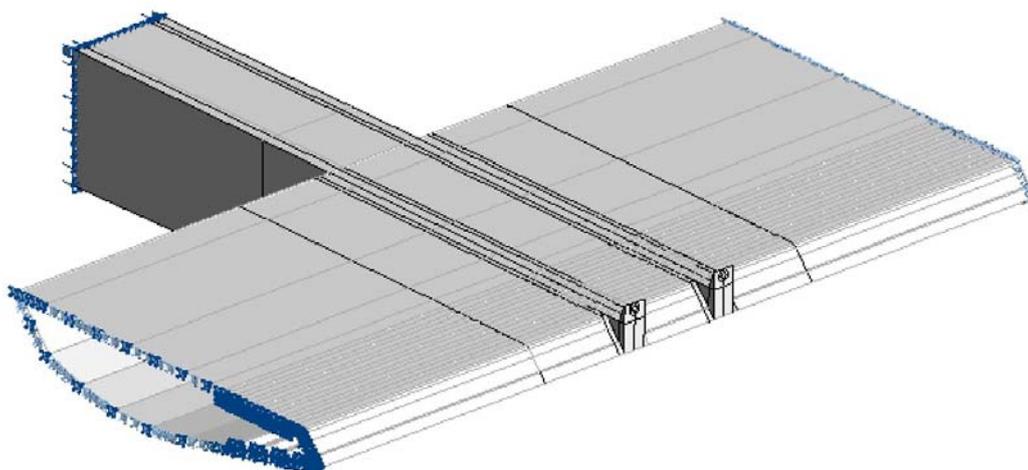


Figura 9-42 Diagramma della geometria generale e dei supporti

È stata applicata una forza esterna per conformità con la distribuzione del taglio verticale in direzione longitudinale. Tale forza è determinata secondo la distribuzione del taglio nel modello globale IBIDAS che evidenzia una distribuzione del 75% della reazione al traverso e del 25% ai cassoni stradali in totale. Queste forze di calibrazione esterne si applicano al modello come mostrato in Figura 9-43.

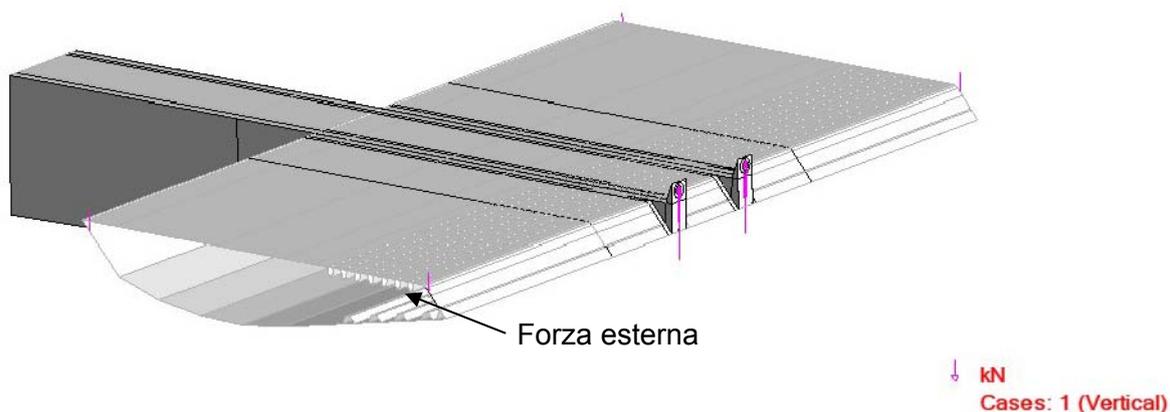


Figura 9-43 Forze esterne a scopo di conformità della distribuzione del taglio verticale ai cassoni stradali

Lo spessore della piastra dell'ancoraggio dei pendini AP1 con rotazioni massime è riportato in Figura 9-44 e 9-45.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

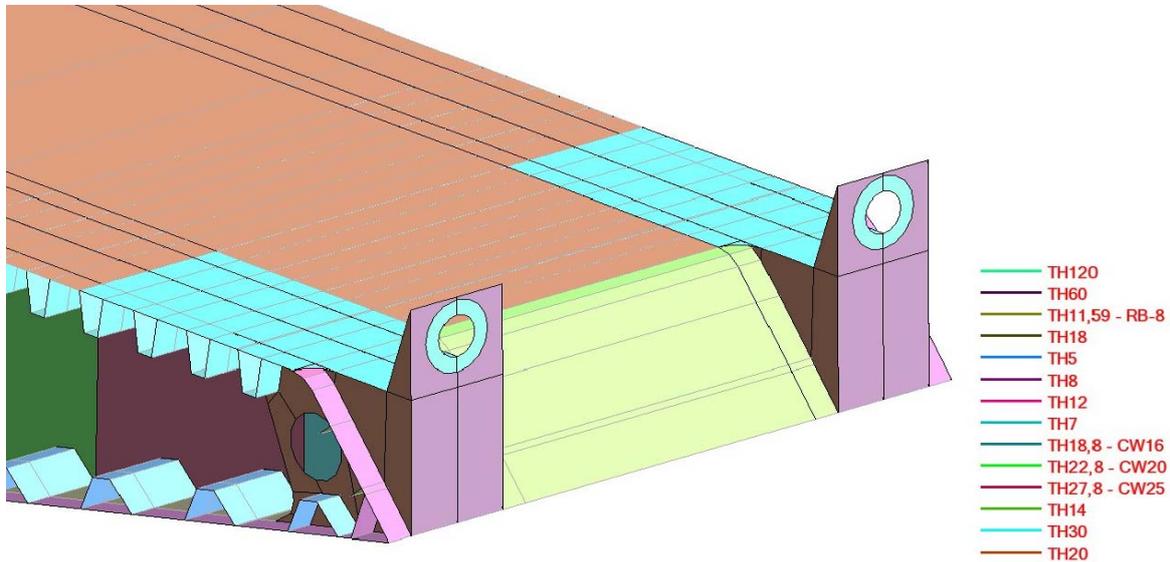


Figura 9-44 Diagramma dell'ancoraggio dei pendini con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

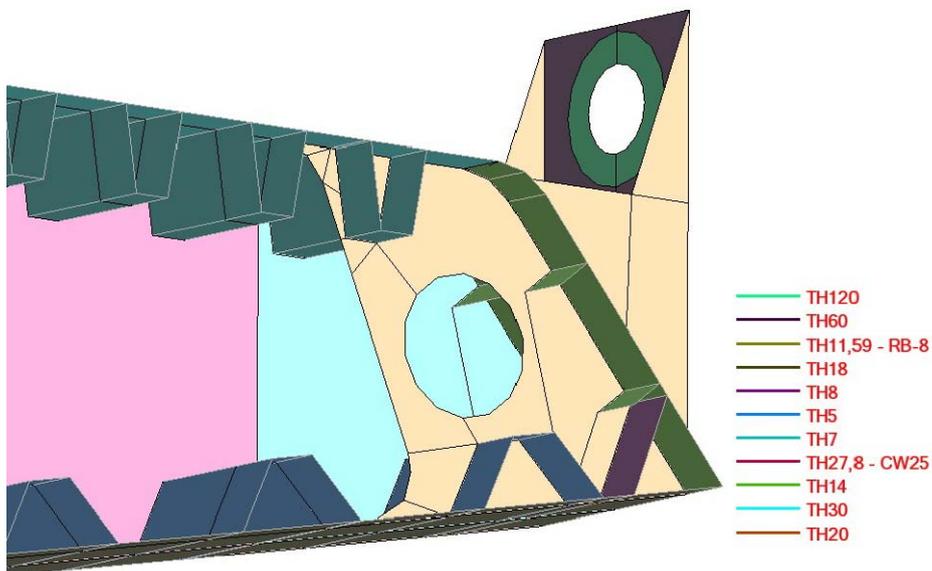


Figura 9-45 Diagramma dell'ancoraggio dei pendini con i diversi spessori della piastra evidenziati a colori

Data la generale uniformità geometrica in direzione longitudinale, gli elementi longitudinali "shell" sono stati generali tramite estrusione in base a una determinata sezione trasversale. Il reticolo,

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

generato automaticamente, comprende 9654 nodi ed è riportato in Figura 9-46 e 9-47 per reticolo interno ed esterno.

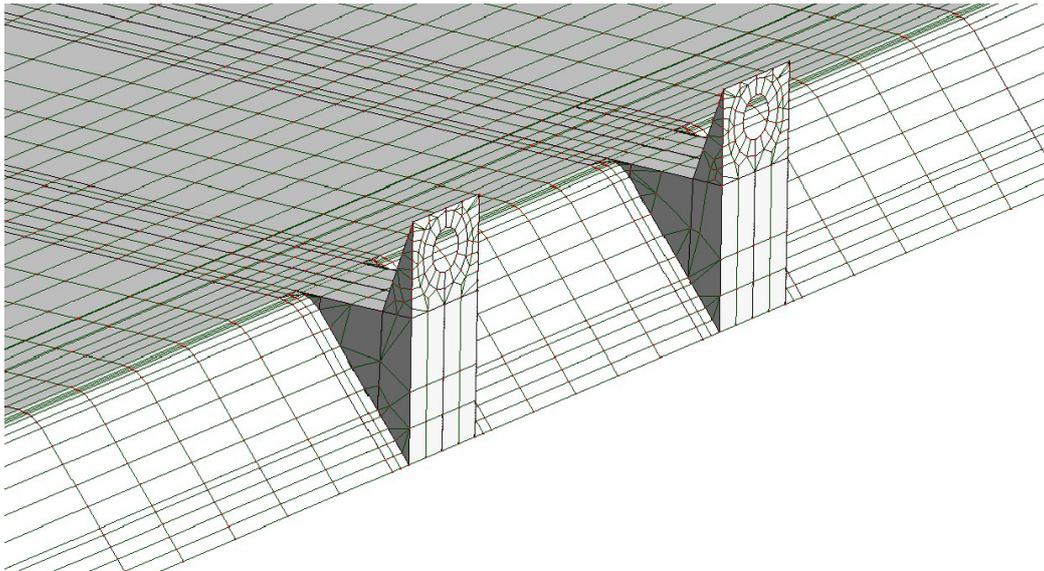


Figura 9-46 Diagramma del reticolo esterno.

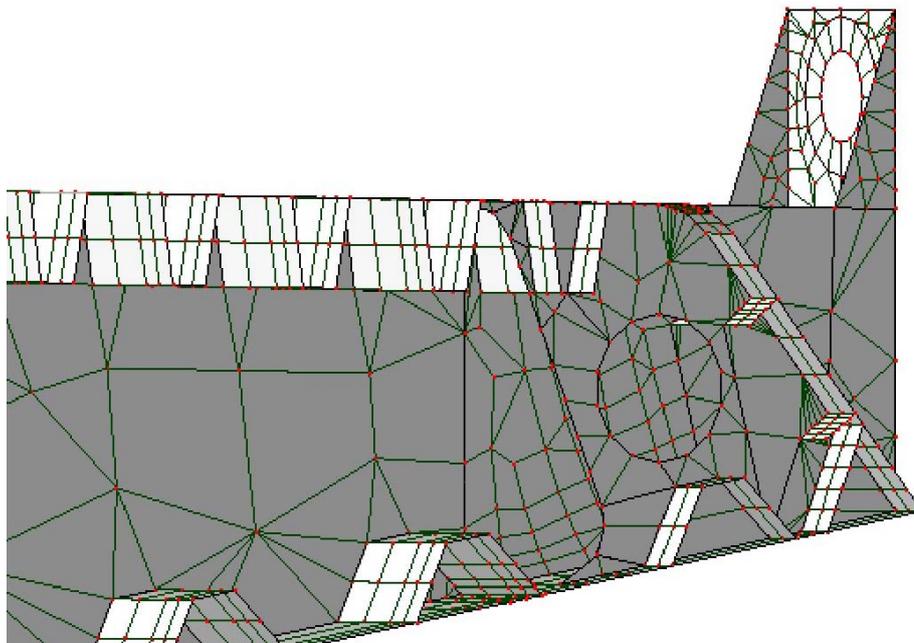


Figura 9-47 Diagramma del reticolo interno.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

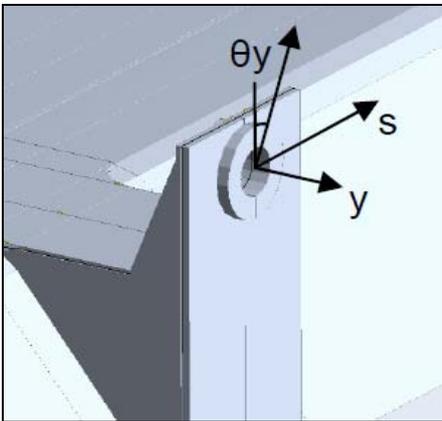


Figura 9-48 Segni convenzionali delle forze dei pendini nel modello globale IBDAS

La forza globale e le rotazioni dei pendini ULS si applicano in base ai risultati ottenuti dal modello globale IBDAS. La forza complessiva del pendino, determinata da IBDAS, agisce al centro del foro del perno ed è applicata come un'approssimazione della distribuzione hertziana delle sollecitazioni come mostrato in Figura 9-49.

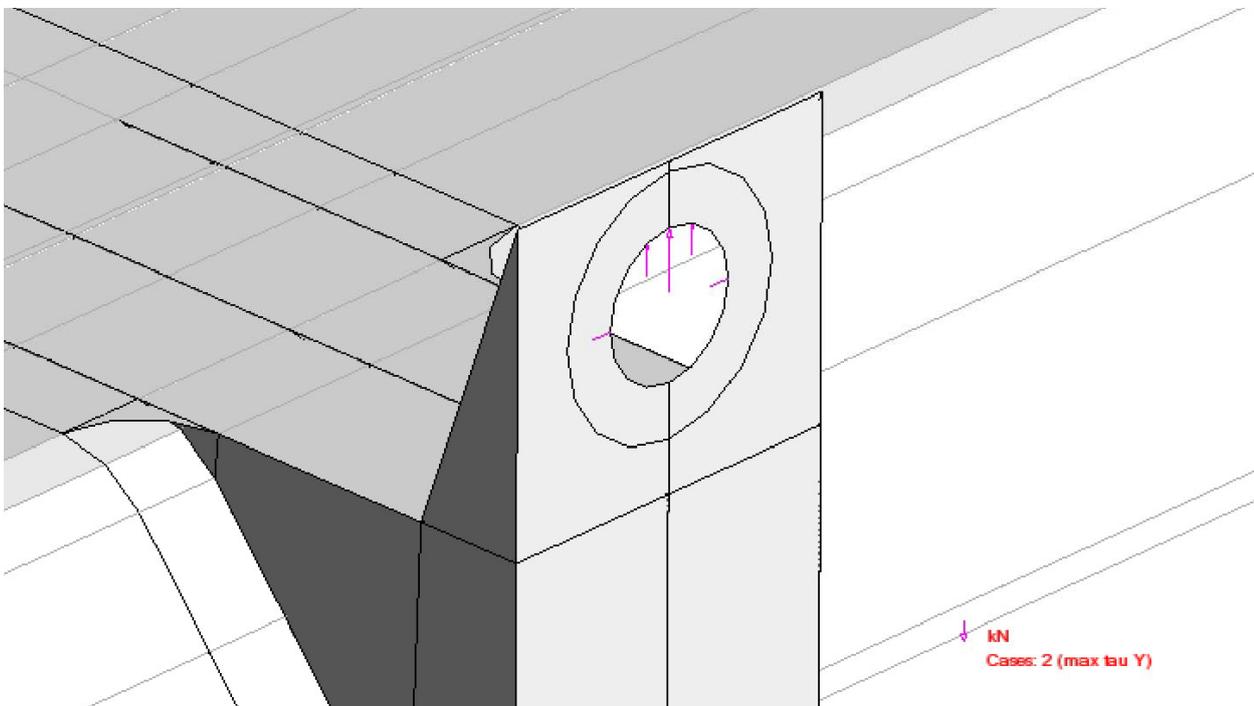


Figura 9-49 Carico dei pendini applicato ULS con rotazione massima Y

La forza dei pendini si applica con rotazione ULS massima di 13.9 gradi per la rotazione dell'asse y e 7.4 gradi per la rotazione ULS dell'asse s. I segni convenzionali della rotazione sono riportati in

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Figura 9-48. Le rotazioni massime γ sono entrambe rappresentate nel traverso 60, esattamente al centro della campata principale.

I risultati in "Relazione tecnica – Cassoni stradali, ferroviari e traversi" indicano che gli ancoraggi dei pendini su traversi dal numero 52 al 68 sono stati consolidati con un irrigidimento supplementare per la presenza di pendini relativamente corti e una conseguente rotazione ampia nell'area.

In "Relazione tecnica – Cassoni stradali, ferroviari e traversi" si riportano i diagrammi del carico applicato in tutte le combinazioni di carichi applicate e la documentazione integrale delle sollecitazioni von Mises. Si riporta inoltre la posizione del carico di traffico nei tre esempi di carico.

Il modello AP2 è utilizzato anche per il controllo della fatica, eseguito applicando una forza dei pendini a fatica per un caso a carico illimitato con passaggio di un treno EN5 e un autoveicolo LM2. I diagrammi delle sollecitazioni con questo carico sono quindi soggetti a ulteriori indagini sulla fatica, vedere il capitolo 10.10.5.

10 Valutazione della fatica

10.1 Introduzione

Secondo i Principi Base, il carico di fatica per la ferrovia è basato sul traffico misto standard la cui composizione è riportata in EN 1991-2 Tabella D.1; comprende 67 transiti di treni previsti giornalmente per binario con un volume di traffico di 24.95 milioni di tonnellate all'anno. Il carico di fatica per la strada comprende 2 milioni di transito all'anno di mezzi pesanti in ogni direzione in adempimento alla categoria di traffico 1 definita EN 1991-2 4.6.1. Nei 200 anni di durata a progetto del ponte, il numero totale di transiti per il cassone stradale diventa quindi 4.89 milioni per binario e 400 milioni per il cassone stradale in ogni direzione (corsia veicoli lenti).

Il "metodo della durata illimitata" e il metodo dell'accumulo danni (sommatoria dei danni Palmgren-Miners) sono stati entrambi utilizzati per la valutazione della fatica dei componenti strutturali principali soggetti a carichi diretti generati dall'uomo. I due metodi sono descritti nei capitoli seguenti 10.4 e 10.5. Inoltre, è stato calcolato il degrado per fatica indotto dal vento nel metodo dell'accumulo danni con un danno pari a 0.05; ciò implica l'adempimento della verifica quando il

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

danno da carichi di traffico è inferiore a 0.95. Per i contributi alla fatica di carichi non generati dall'uomo vedere il capitolo 10.3.

10.2 Applicazione dei carichi

Quando si considera il cassone stradale per la verifica della fatica, si suppone che tutti i mezzi viaggino nella corsia dei veicoli lenti. I cassoni stradali sono caricati con un veicolo alla volta per la verifica della fatica. L'indagine comprende 8 diversi treni di fatica, indicati all'Allegato D dell'Eurocodice 1991-2:2003.

Quando un treno attraversa il ponte, ciò avviene sempre nel binario verso il cassone stradale carico. Per i carichi di fatica, si suppone quanto segue:

- Traffico ferroviario: 67 treni al giorno per un totale di 4.89 milioni in 200 anni per binario
- Traffico stradale: 2 milioni di mezzi pesanti all'anno, cioè 400 milioni in 200 anni di vita a progetto
- Velocità dei treni: velocità massima dei treni
- I fattori dinamici sono stati calcolati secondo Eurocodice EN 1991-2 Allegato D "Basis for the fatigue assessment of railway structures"
- La probabilità che due treni si incontrino in un determinato punto sul ponte durante l'attraversamento è del 12%

Secondo il metodo di valutazione "Safe Life", vita sicura, in EN1993-1-9 3 e la raccomandazione inserita in RFI44/F, sono stati utilizzati i seguenti fattori parziali: $\gamma_m = 1.15$, applicato a dettagli locali dell'impalcato stradale ortotropo, $\gamma_m = 1.35$ agli altri dettagli.

10.3 Carichi non generati dall'uomo

I carichi non generati dall'uomo sono carichi termici, sismici e di vento. Si è tenuto conto di quanto segue:

- Vento durante i 200 anni di vita a progetto.
- Variazione uniforme giornaliera di +/- 10°C durante i 200 anni di vita a progetto.
- Sisma SLS1 4 volte, 5 minuti a evento (cioè totale di 20 minuti).

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Gli effetti di carichi termici e sismici sono stati ritenuti isolati, con contributo minimo o nullo ai danni da fatica; di conseguenza, secondo gli studi di base non devono essere considerati ai fini della valutazione della fatica unitamente ai carichi generati dall'uomo.

VENTO

Il carico dovuto a vento turbolento si può considerare come la sommatoria del vento medio statico e del carico di vento fluttuante stocastico, noto come scuotimento. La risposta della struttura del ponte si può dividere quindi in reazione al vento medio (contributo statico) e reazione allo scuotimento (reazione dinamica).

È stata registrata la velocità massima del vento medio rilevata durante il temporale in occasione di eventi meteorologici burrascosi. Tale valore è applicato per statistiche di vento estremo, eseguite anche per il progetto dello Stretto di Messina. Poiché si utilizza un solo valore massimo, le statistiche di vento estremo sono adatte come base di valutazione del contributo al danno da fatica fornito dalla componente del vento medio durante l'intera durata delle strutture.

Dato il numero di cicli relativamente basso (periodi di ritorno dei temporali), il contributo del vento medio al danno da fatica è molto ridotto e trascurabile nei calcoli della fatica. Tuttavia, la risposta dinamica del vento (scuotimento) produce numerosi cicli di sollecitazioni del ponte e contribuirà al danno da fatica su scala rilevante.

Si calcola l'accumulo di danni nelle seguenti combinazioni per valutare l'effetto dello scuotimento del vento sul danno totale.

Cassone stradale:

- Veicolo LM3 (effetto di carico locale e globale) + 1 treno (EN5) senza incontro di treni
- Veicolo LM3 (effetto di carico locale e globale) + 1 treno (EN5) senza incontro di treni + vento

Cassone ferroviario:

- 1 treno (EN5) su entrambi i binari (carico locale e globale, senza incontro di treni)
- 1 treno (EN5) su entrambi i binari (carico locale e globale, senza incontro di treni) + vento

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Per valutare gli effetti del vento, si utilizzano serie temporali di fluttuazioni del vento a una velocità media di 35 m/s perpendicolari all'allineamento del ponte. Le serie temporali del vento sono rappresentate in scala secondo una serie di velocità medie del vento differenti considerate nelle analisi (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 39 m/s) tramite la legge di potenza. Tuttavia il danno ottenuto per ogni intervallo di velocità del vento esaminata è valutato tramite l'occorrenza e la distribuzione delle componenti della velocità del vento perpendicolari al cassone del ponte, al fine di ottenere il danno cumulativo dalla combinazione di vento e carichi generati dall'uomo.

Si considerano i seguenti punti su cassoni stradali e ferroviari, rispettivamente:

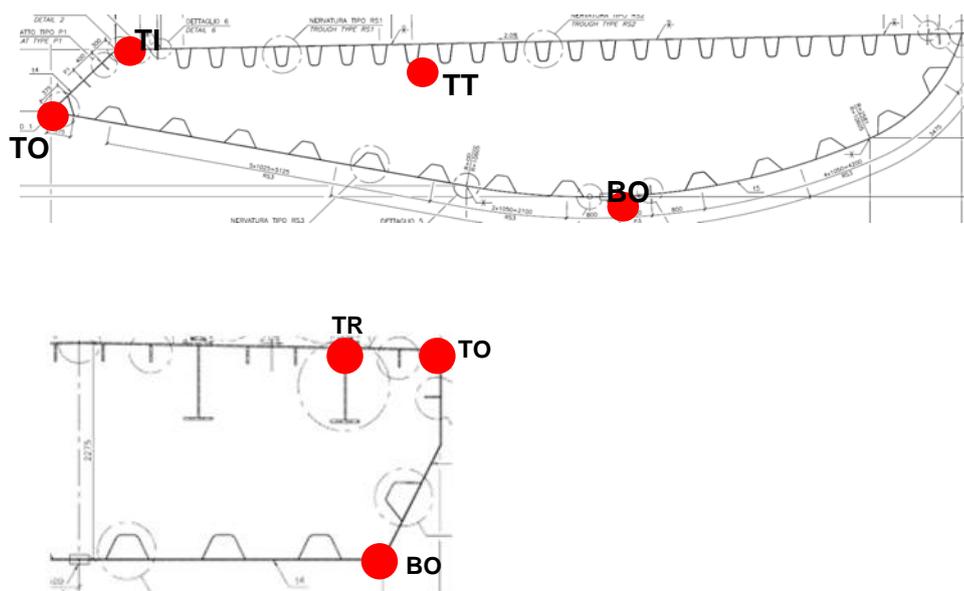


Figura 10-1 *Punti considerati nel cassone stradale e ferroviario per la valutazione degli effetti del carico del vento sul danno da fatica*

I danni cumulativi calcolati sono riassunti nelle tabelle seguenti 10-1 e 10-2 per cassoni stradali e ferroviari, rispettivamente. Una descrizione più dettagliata dei calcoli è reperibile nella relazione “Relazione di progetto – Calc. della fatica dell’impalcato sospeso”.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

Tabella 10-1 Confronto del danno cumulativo nei punti del cassone stradale

| Dettaglio strutturale | Picchetto | Solo treno EN5 | Treno + fluttuazioni del vento | Aumento percentuale |
|-----------------------|-----------|----------------|--------------------------------|---------------------|
| BO | 885 | 0.019524 | 0.019759 | +1.21% |
| TO | 885 | NA | 4.61E-5 | NA |
| TI | 885 | NA | 5.57E-5 | NA |
| TT | 885 | 0.45682 | 0.45763 | +0.18% |
| | | | | |
| BO | 1005 | 0.024185 | 0.024804 | +2.56% |
| TT | 1005 | 0.468657 | 0.471574 | +0.62% |

"NA" in tabella indica che i range di sollecitazioni ottenuti dal solo carico di traffico è inferiore al limite specifico e non sono possibili confronti diretti. L'effetto ridotto del traffico è dovuto principalmente alla posizione vicina all'asse neutro.

Tabella 10-2 Confronto del danno cumulativo nei punti del cassone ferroviario

| Dettaglio strutturale | Picchetto | Solo treno EN5 | Treno + fluttuazioni del vento | Aumento percentuale |
|-----------------------|-----------|----------------|--------------------------------|---------------------|
| TO | 1425 | 0.062759 | 0.062809 | +0.1% |
| TR | 1425 | 0.083127 | 0.084488 | +1.6% |
| BO | 1425 | 0.015851 | 0.016540 | +4.4% |
| | | | | |
| TO | 1650 | 0.024211 | 0.024505 | +1.2% |
| TR | 1650 | 0.122338 | 0.122507 | -0.7% |
| BO | 1650 | 0.024211 | 0.024345 | +0.6% |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

I risultati riportati nelle tabelle precedenti indicano un modesto aumento del danno da fatica quando il vento si combina con i carichi generati dall'uomo. L'aumento percentuale per tutti i punti selezionati è inferiore al 5%. Si propone quindi di sottrarre semplicemente il 5% dal danno consentito nella disuguaglianza della verifica e quindi limitare la verifica al danno da fatica derivante da traffico stradale e ferroviario.

La valutazione dei danni si esegue quindi in base alla formula di Palmgren-Miners, verificando di ottenere il seguente risultato:

$$D = \sum_i \frac{n_i(\text{ferrovia} + \text{strada})}{N_i} \leq 1.0 - 0.05 = 0.95$$

10.4 Limite di fatica ad ampiezza costante

Quando gli eventi di carico producono range di sollecitazioni tutti inferiori al limite di fatica ad ampiezza costante $\Delta\sigma_D$, il dettaglio resterà privo di danni e quindi avrà durata illimitata. I range di sollecitazioni possono variare notevolmente, ma finché i range massimi sono mantenuti inferiori al limite di fatica ad ampiezza costante $\Delta\sigma_D$ non sono necessarie ulteriori verifiche della fatica, come illustrato dal limite delle sollecitazioni indicato dalla curva rossa nel diagramma S-N in Figura 10-2.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

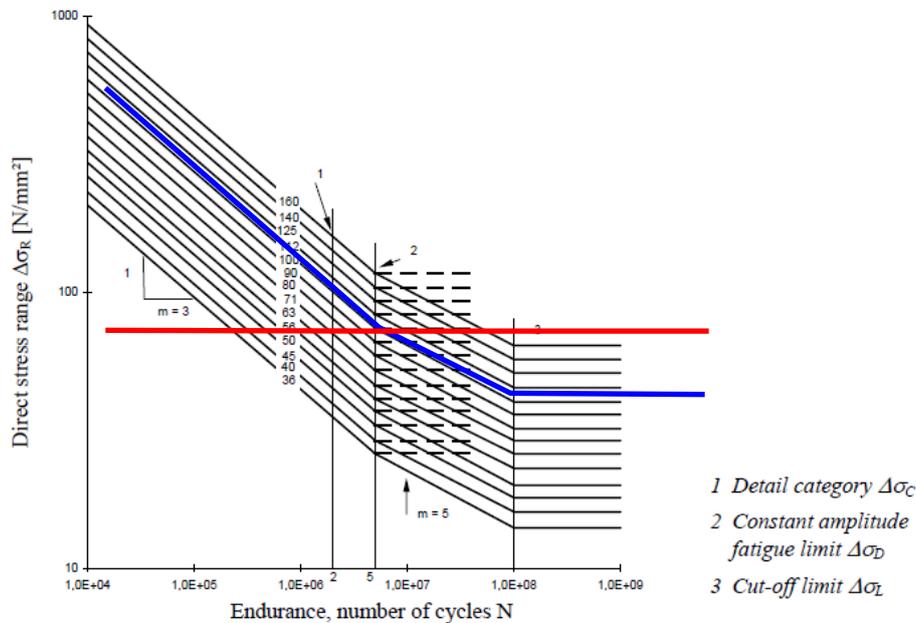


Figura 10-2 Curva rossa: Diagramma S-N per verifica di durata illimitata con carico di fatica ad ampiezza costante, categoria di dettaglio 100 indicata dal limite di fatica ad ampiezza costante $\Delta\sigma_D$

Curva blu: Diagramma S-N per carico di fatica ad ampiezza variabile, categoria di dettaglio 100 indicata. Linea orizzontale mostrata al limite di fatica ad ampiezza costante $\Delta\sigma_D$

Si utilizzano questi codici per definire un metodo della *durata illimitata* per la verifica della fatica, cioè una semplice verifica di tutti i range di sollecitazioni inferiori al *limite di fatica ad ampiezza costante* $\Delta\sigma_D$. La valutazione della durata illimitata dei componenti strutturali è espressa nell'equazione $\Delta\sigma_{\max,d} = \gamma_m \cdot \Delta\sigma_{\max} \leq \Delta\sigma_D$, dove $\Delta\sigma_{\max,d}$ è il valore a progetto del range di sollecitazioni normali massimo indotto nel dettaglio considerato nel carico di fatica su strada e ferrovia e $\Delta\sigma_D$ è il limite di fatica ad ampiezza costante.

10.5 Variazione della sollecitazione ad ampiezza variabile

Quando superano il limite di fatica ad ampiezza costante $\Delta\sigma_D$, i range di sollecitazioni contribuiscono al danno da fatica cumulativa nel dettaglio; inoltre i range di sollecitazioni inferiori a tale livello, ma superiori al livello specifico $\Delta\sigma_L$, contribuiranno all'incremento del danno cumulativo, quindi si utilizzerà la curva blu riportata in Figura 10-2 per la categoria di dettaglio 100.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Per range di sollecitazioni inferiori al limite di fatica ad ampiezza costante $\Delta\sigma_D$, ma superiori al numero di cicli di sollecitazioni fino al cedimento per l'utilizzo nella sommatoria dei danni cumulativi si ottiene dall'equazione:

$$\Delta\sigma_R^2 N_R = \Delta\sigma_D^2 \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ for } N < 1 \cdot 10^8$$

L'incremento dei danni comprenderà i range di sollecitazioni da fatica entro la durata del ponte

nella sommatoria dei danni cumulativi $D = \sum_i^k \frac{n_i}{N_i}$. I range di sollecitazioni inferiori al limite specifico $\Delta\sigma_L$ non forniscono alcun contributo al danno da fatica cumulativo. I requisiti progettuali prevedono che il danno cumulativo D da carichi generati dall'uomo debba essere inferiore a 0.95 anche in considerazione dell'effetto del vento. Il metodo dell'accumulo di danni spesso è denominato sommatoria Palmgren-Miners o, in breve, sommatoria Miners, D.

10.6 Particolari dell'impalcato di ponte sospeso

L'impalcato sospeso subisce range di sollecitazioni dovuti a diversi effetti durante l'evento di carico (passaggio di treno/veicolo di fatica); generalmente sono rilevanti tre tipi di effetti di carico:

- Gli effetti di carico globale sono relativi alla presenza dell'intero treno. L'effetto di carico globale è il risultato del supporto elastico dell'impalcato sospeso tramite pendini e sistema di sospensione principale. Gli effetti di carico globali saranno presenti per tutti i punti dell'impalcato sospeso, ma il range di sollecitazioni associato sarà in funzione della posizione del dettaglio esaminato. Poiché gli effetti di carico globali sono associati al passaggio del treno, il relativo numero di variazioni nei range di sollecitazioni sarà minimo (alcune volte il numero di passaggi dei treni).
- Gli effetti di carico semi-locale sono relativi alle caratteristiche dei singoli vagoni ferroviari/mezzi pesanti. L'ampiezza del range di sollecitazioni associato sarà in funzione della posizione del dettaglio esaminato nella struttura. Un determinato punto nella struttura subirà un numero di range di sollecitazioni semi-locali condotte dal numero di mezzi pesanti o vagoni del treno.
- Gli effetti di carico locale sono relativi al passaggio delle ruote dei singoli vagoni o mezzi pesanti. I range di sollecitazioni associati varieranno in base ai dettagli della struttura in loco. Il

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

numero di range di sollecitazioni associati agli effetti del carico locale sarà condotto dal numero di ruote che attraversa il dettaglio e quindi sarà elevato, per esempio in relazione al passaggio dei carichi delle ruote sull'impalcato stradale ortotropo che si estende per 3.75 m tra i diaframmi.

La seguente Tabella 10-3 riporta un'indicazione del numero di range di sollecitazioni per i diversi tipi di effetti di carico.

Tabella 10-3 Numero di range di sollecitazioni per diversi effetti di carico

| | N° di range di sollecitazioni |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Effetti di carico globale | Basso |
| Effetti di carico semi-locale | Medio |
| Effetti di carico locale | Alto |

La Figura 10-3 mostra un esempio di variazione della sollecitazione assiale nella piattabanda del cassone ferroviario quando un treno attraversa il ponte nella posizione indicata dalla freccia. L'ampiezza della sollecitazione assiale è riportata nella posizione del ponte in cui è situata la parte anteriore del treno (da sinistra a destra).

Il punto considerato riporterà alcuni picchi che talvolta provocheranno il verificarsi di ampi range di sollecitazioni combinati con un numero di range di sollecitazioni molto maggiore a un livello nettamente inferiore.

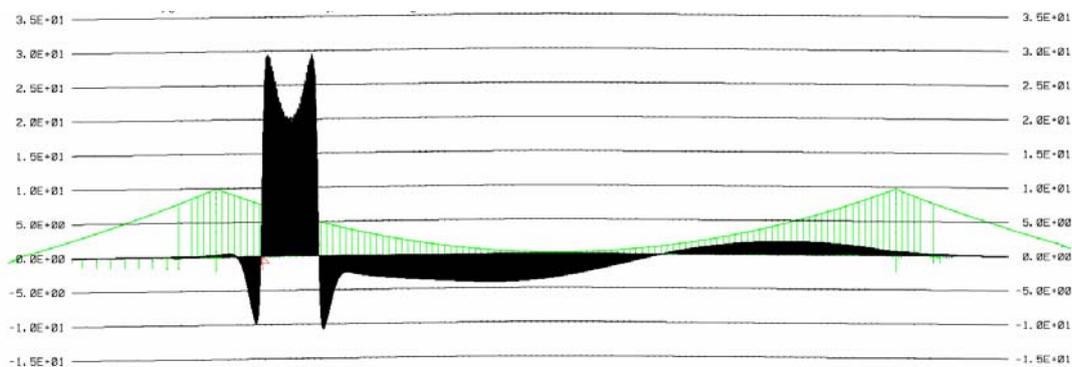


Figura 10-3 Esempio di variazione delle sollecitazioni assiali alla base del cassone ferroviario nella posizione indicata dalla freccia quando un treno attraversa il ponte.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

I range di sollecitazioni massimi per l'impalcato sospeso sono generalmente elevati e in molti casi superiori al limite di fatica ad ampiezza costante, laddove due treni merci pesanti si incontrino in posizione arbitraria sul ponte. In tali casi è impossibile ottenere una durata illimitata. Per i dettagli strutturali in cui i range di sollecitazioni siano dominati da effetti globali e semi-locali, il numero di cicli di sollecitazioni risulterà modesto e l'approccio tipico sarà quindi conforme agli standard italiani NTC08 e RFI 44 F e agli Eurocodici per svolgere la verifica della fatica con la sommatoria di Miners e accertare che la resistenza alla fatica sia di almeno 200 anni.

Per i dettagli strutturali in cui i range di sollecitazioni siano dominati dagli effetti del carico locale e quindi numerosi, è stato possibile mantenere i range di sollecitazioni sotto il limite di fatica per ottenere la resistenza alla fatica richiesta. In pratica, ciò implicherà l'applicazione del metodo della durata illimitata per la verifica della fatica.

Per il progetto dell'impalcato del ponte sospeso, si è ritenuto appropriato il metodo della durata illimitata quando tutti gli eventi di carico risultino in numerosi cicli di sollecitazioni, sebbene con variazioni minime nel range di sollecitazioni, mentre la sommatoria di Miners risulta più appropriata laddove appaiano variazioni importanti nel range di sollecitazioni.

Secondo i Principi Base, tutti gli elementi saranno conformi al metodo della durata illimitata sulla base di un treno merci e della carreggiata stradale LM2, oltre al metodo dell'accumulo di danni. L'eccezione è rappresentata dalla verifica del punto F della piastra dell'impalcato stradale in posizione dell'anima del traverso, in cui è stato verificato il metodo della durata illimitata con l'incontro di due EN5 sul ponte insieme al carico stradale LM2. Con tale approccio, è stata verificata la durata illimitata per il range di sollecitazioni massime e quindi l'accumulo di danni è irrilevante.

10.7 Metodo della durata illimitata

Nel metodo della durata illimitata, il numero di occorrenze è irrilevante, in quanto costituisce soltanto il range di sollecitazioni per fatica massima, importante ai fini della valutazione della fatica. Di conseguenza, i range di sollecitazioni saranno inferiori all'intervallo di sforzi di ampiezza costante.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

10.7.1 Principi di progettazione

Applicando il “metodo della durata illimitata”, il contributo della fatica si basa sul treno con fatica maggiore su un binario, combinato con il modello di carico di fatica 2 (LM2) applicato sul cassone stradale più vicino al treno. Non si considerano altri carichi di fatica per il metodo della durata illimitata.

10.7.2 Carico di fatica stradale

Quando i veicoli di fatica attraversano il ponte sul cassone stradale si utilizza il modello di carico di fatica 2 (LM2) per analizzare gli effetti locali dell'impalcato ortotropo in acciaio, nonché l'intero cassone stradale, il traverso e il cassone ferroviario. Il modello locale comprende gli effetti dinamici. Si selezionano i diversi veicoli che attraversano il ponte e i peggiori effetti di carico. I diversi veicoli del modello locale 2 (LM2) sono riportati in Figura 10-4.

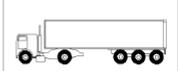
| 1 LORRY SILHOUETTE | 2 Axle spacing (m) | 3 Frequent axle loads (kN) | 4 Wheel type (see Table 4.8) |
|---|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|  | 4,5 | 90 190 | A B |
|  | 4,20 1,30 | 80 140 140 | A B B |
|  | 3,20 5,20 1,30 1,30 | 90 180 120 120 120 | A B C C C |
|  | 3,40 6,00 1,80 | 90 190 140 140 | A B B B |
|  | 4,80 3,60 4,40 1,30 | 90 180 120 110 110 | A B C C C |

Figura 10-4 Veicoli modello di carico 2 (LM)

I range di sollecitazioni tipici di un veicolo LM2 che attraversa il ponte sono riportati in Figura 10-5 per il cassone stradale, Figura 10-6 per il traverso e Figura 10-7 per il cassone ferroviario.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

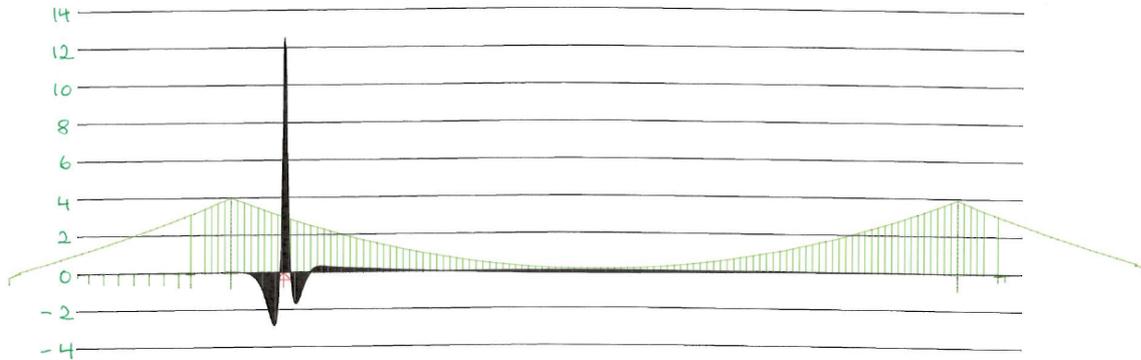


Figura 10-5 Metodo della durata illimitata – range di sollecitazioni nella piattabanda del cassone stradale per un veicolo LM2 che attraversa il ponte

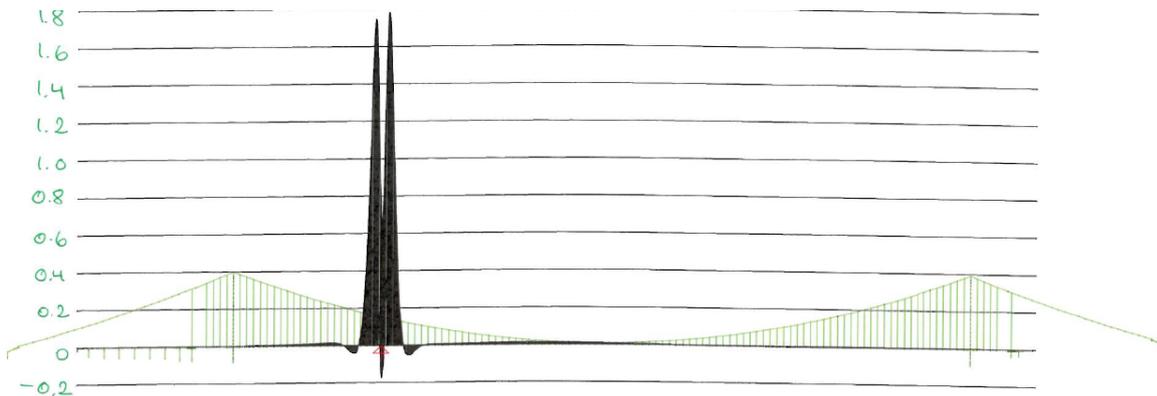


Figura 10-6 Metodo della durata illimitata – range di sollecitazioni nella piattabanda del traverso per un veicolo LM2 che attraversa il ponte

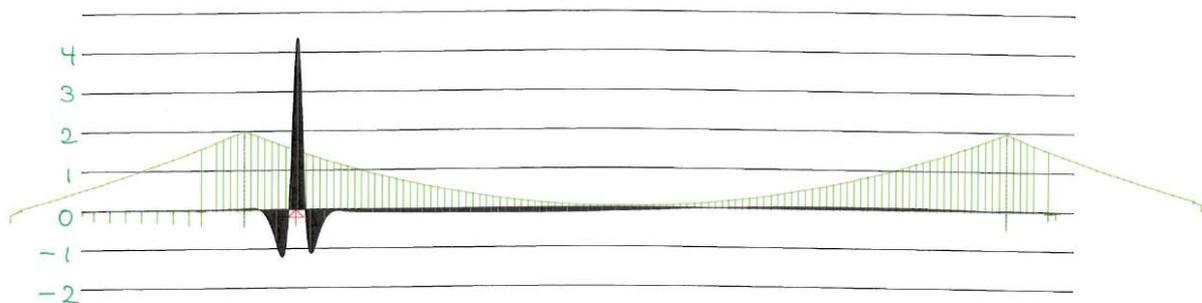


Figura 10-7 Metodo della durata illimitata – range di sollecitazioni nella piattabanda del cassone ferroviario per un veicolo LM2 che attraversa il ponte

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

Le figure mostrano che i veicoli passanti sul cassone stradale provocano sollecitazioni anche nel trasverso e nel cassone ferroviario; se ne dovrà tenere conto nella valutazione della fatica.

10.7.3 Carico di fatica ferroviario

Il range di sollecitazioni da fatica sulla ferrovia selezionato sarà il più pesante degli otto treni di fatica indicati nella serie di treni standard dell'Allegato D dell'Eurocodice 1991-2:2003. Si considera un treno EN5 con fatica intensa e caratteristiche come riportato in Figura 10-8.

$$\Sigma Q = 21600\text{kN} \quad V = 80\text{km/h} \quad L = 270,30\text{m} \quad q = 80,0\text{kN/m'}$$

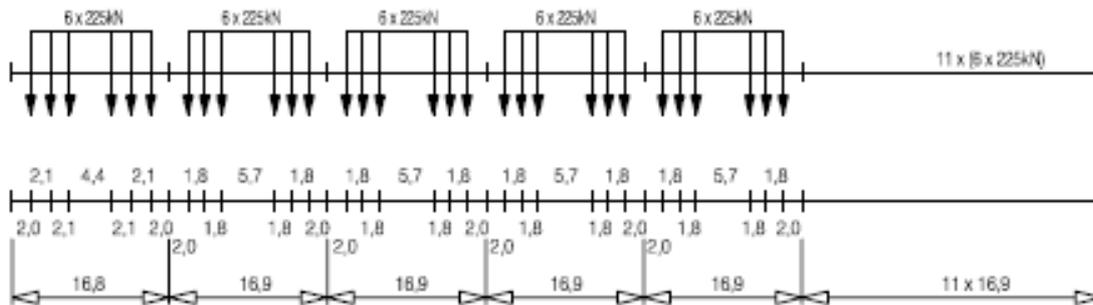


Figura 10-8 Caratteristiche di un treno EN5 con fatica intensa

I range di sollecitazioni da fatica di un treno EN5 che attraversa il ponte sono riportati in Figura 10-9 per il cassone ferroviario, Figura 10-10 per il trasverso e Figura 10-11 per il cassone stradale.

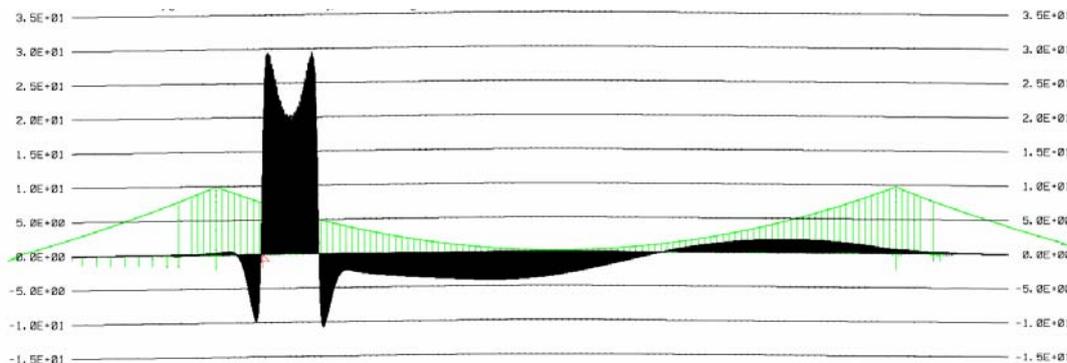


Figura 10-9 Metodo della durata illimitata – range di sollecitazioni nella piattabanda del cassone ferroviario per un treno EN5 che attraversa il ponte

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |



Figura 10-10 Metodo della durata illimitata – range di sollecitazioni nella piattabanda del traverso per un treno EN5 che attraversa il ponte

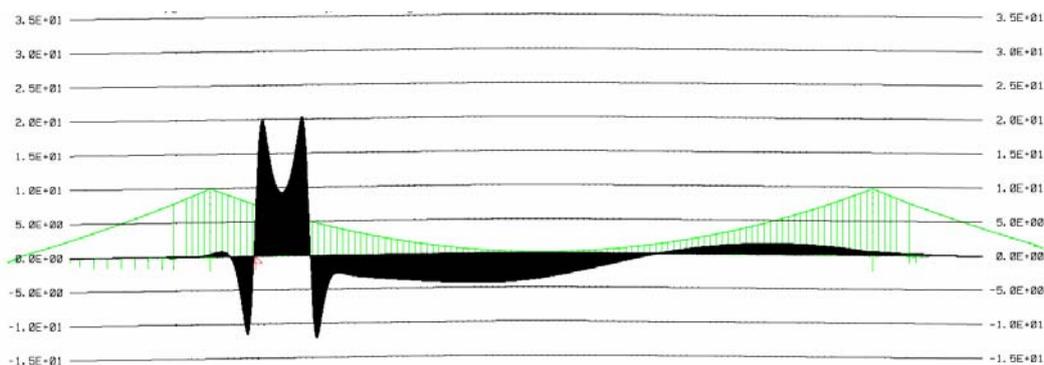


Figura 10-11 Metodo della durata illimitata – range di sollecitazioni nella piattabanda del cassone stradale per un treno EN5 che attraversa il ponte

10.7.4 Effetto del carico di fatica stradale e ferroviario

Per il metodo della durata illimitata è stata utilizzata la seguente equazione:

$$\Delta\sigma_{\text{rail+road}} = (\Delta\sigma_{\text{LM2}} + \Delta\sigma_{\text{EN5}} \cdot \varphi_{\text{real},1}) \cdot \gamma_{\square} < \Delta\sigma_{\text{D}}, \text{ dove:}$$

- $\Delta\sigma_{\text{LM2}}$ è il range di sollecitazioni massimo dato dalla differenza algebrica tra i due estremi del diagramma cronologico delle sollecitazioni del modello di carico di fatica 2 del dettaglio in questione
- $\Delta\sigma_{\text{EN5}}$ è il range di sollecitazioni massimo dato dalla differenza algebrica tra i due estremi del diagramma cronologico delle sollecitazioni del modello di carico di fatica 5 del dettaglio in questione
- $\gamma_{\text{MF}} = \gamma_f \cdot \gamma_m$ è il fattore parziale per resistenza alla fatica (fattore parziale di fatica * fattore parziale di resistenza) pari a 1.15 per i dettagli locali della piastra dell'impalcato ortotropo stradale e a 1.35 per gli altri componenti.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

- $\varphi_{reale,i}$ è il fattore dinamico in cui l'indice i si riferisce al binario carico. In base al dettaglio da verificare e alla lunghezza determinante L_{φ} è necessario distinguere tra fattori dinamici locali e globali: i fattori dinamici degli effetti locali sono stati considerati supponendo $L_{\varphi}=3$ volte la campata dell'elemento dell'impalcato, mentre per quelli degli effetti globali si è supposto $L_{\varphi}=1,5$ volte la campata del cassone principale che si estende tra i traversi. Considerando la velocità massima a progetto, i fattori dinamici reali sono riepilogati alla Tabella 10-4.

Tabella 10-4 Fattori dinamici reali

| | | velocità | effetti locali | effetti globali |
|------------------------------------|------|----------|----------------|-----------------|
| Treni di fatica EN 1991-2: 2003 | EN 1 | 200 | 1.300 | 1.165 |
| | EN 2 | 160 | 1.230 | 1.125 |
| | EN 3 | 250 | 1.400 | 1.224 |
| | EN 4 | 250 | 1.400 | 1.224 |
| | EN 5 | 80 | 1.181 | 1.056 |
| | EN 6 | 100 | 1.190 | 1.071 |
| | EN 7 | 120 | 1.200 | 1.088 |
| | EN 8 | 100 | 1.190 | 1.071 |

I dettagli strutturali sono distinti tra elementi della piattabanda per cui gli effetti locali sono stati trascurati ed elementi della piastra dell'impalcato, comprendenti gli effetti di carico locali. In base a tale divisione, si applicano diversi contributi di danni, come mostrato di seguito:

Dettagli della piattabanda di cassone stradale, ferroviario e traverso:

- $$\Delta\sigma = (\Delta\sigma_{LM2, glob} + \Delta\sigma_{EN5, glob} * \varphi_{glob}) * \gamma_{MF} < \Delta\sigma_D$$

Dettagli della piastra dell'impalcato del cassone ferroviario:

- $$\Delta\sigma = (\Delta\sigma_{LM2, glob} + \Delta\sigma_{EN5, glob} * \varphi_{glob} + \Delta\sigma_{EN5, loc} * \varphi_{loc}) * \gamma_{MF} < \Delta\sigma_D$$

Dettagli della piastra dell'impalcato del cassone stradale:

- $$\Delta\sigma = (\Delta\sigma_{LM2, glob} + \Delta\sigma_{LM2, loc} + \Delta\sigma_{EN5, glob} * \varphi_{glob,1}) * \gamma_{MF} < \Delta\sigma_D$$

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

10.8 Metodo dell'accumulo di danni

Nel metodo di accumulo di danni (sommatoria Miners), il numero di occorrenze è importante ai fini del calcolo della somma Miners. Il range di sollecitazioni superiori al valore specifico fornisce un contributo al danno da fatica cumulativo.

10.8.1 Principi di progettazione

Con il "metodo dell'accumulo di danni (sommatoria dei danni Palmgren-Miners), il contributo della fatica si basa sul passaggio di 8 treni di fatica combinato con il modello di carico di fatica su strada 3 (LM3) applicato al cassone stradale più vicino al treno. Anche il carico di fatica con vento medio e lo scuotimento sono stati inseriti nella valutazione dei danni con un fattore di danno pari a 0.05, che riduce il limite dei danni dovuto al carico di traffico soltanto allo 0.95. Considerando le combinazioni di carichi di fatica stradali e ferroviari, si applicano le seguenti definizioni:

- 0 treni + 1 veicolo stradale + vento
- 1 treno + 1 veicolo stradale + vento
- 2 treni + 1 veicolo stradale + vento

10.8.2 Carico di fatica stradale

Quando i veicoli di fatica attraversano il ponte sul cassone stradale si utilizza il modello di carico di fatica 3 (LM3) per analizzare gli effetti locali e globali dell'impalcato ortotropo in acciaio, nonché l'intero cassone stradale, il cassone ferroviario e i traversi. Il modello locale comprende gli effetti dinamici. Il veicolo del modello di carico 3 (LM3) è riportato in Figura 10-12.

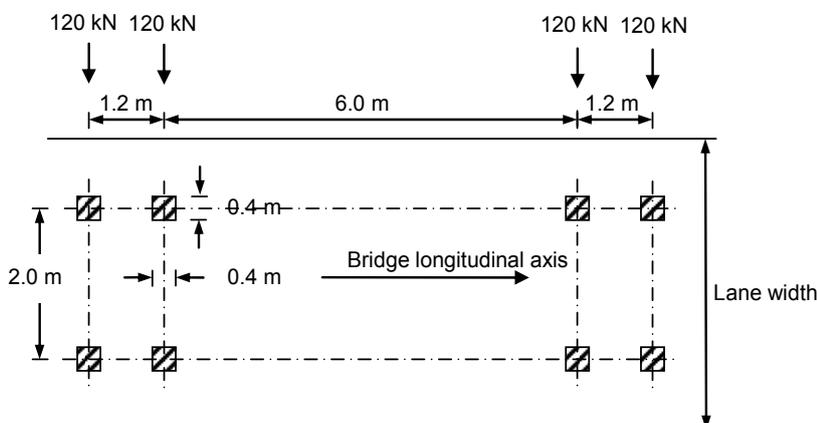


Figura 10-12 Veicolo del modello di carico (LM3)

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

Il modello è formato da quattro assali, ciascuno con due ruote identiche. La figura precedente riporta la geometria. Il peso di ogni assale equivale a 120 kN e la superficie di contatto di ogni ruota è un quadrato di 0.40x0.40 m.

I range di sollecitazioni tipici di un veicolo LM3 che attraversa il ponte sono riportati in Figura 10-13 per il cassone stradale, Figura 10-14 per il traverso e Figura 10-15 per il cassone ferroviario.

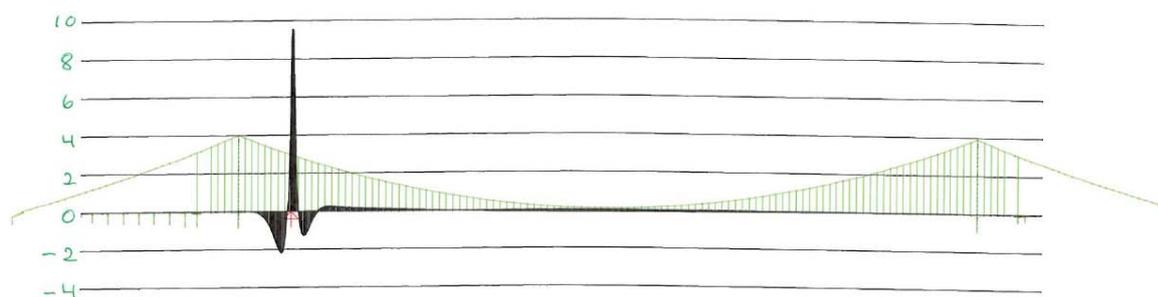


Figura 10-13 Metodo dell'accumulo di danni – range di sollecitazioni nella piattabanda del cassone stradale per un veicolo LM3 che attraversa il ponte

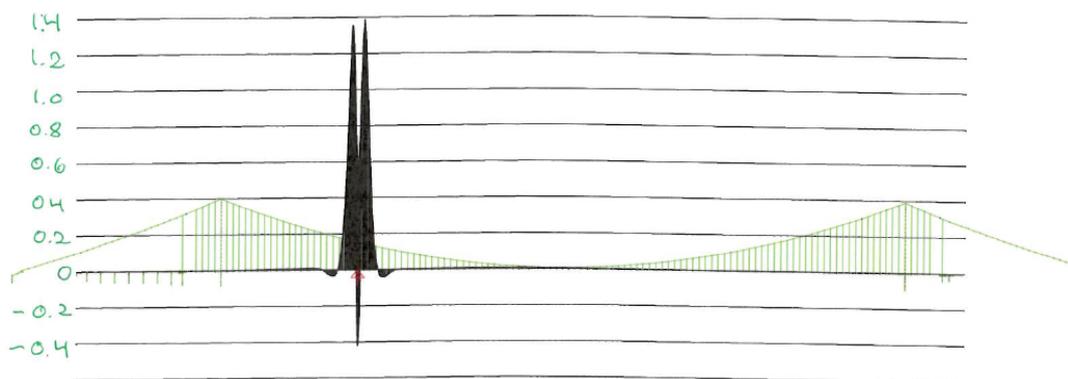


Figura 10-14 Metodo dell'accumulo di danni – range di sollecitazioni nella piattabanda del traverso per un veicolo LM3 che attraversa il ponte

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

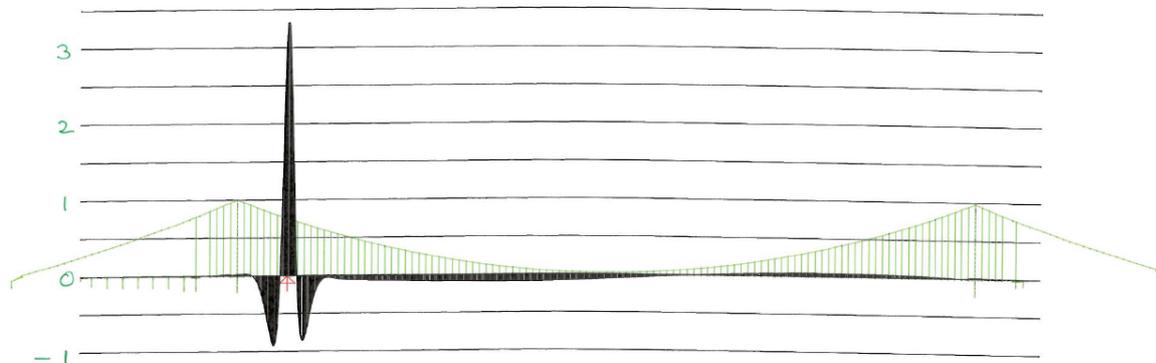


Figura 10-15 Metodo dell'accumulo di danni – range di sollecitazioni nella piattabanda del cassone ferroviario per un veicolo LM3 che attraversa il ponte

Le figure mostrano che i veicoli passanti sul cassone stradale provocano sollecitazioni anche nel traverso e nel cassone ferroviario; se ne dovrà tenere conto nella valutazione della fatica.

Considerando LM3 per la valutazione della fatica, il numero di passaggi diventa 4.0×10^8 per una durata di 200 anni; di conseguenza, il range di sollecitazioni massimo dovrà essere inferiore al valore specifico $\Delta\sigma_L$.

10.8.3 Carico di fatica ferroviario

Vi sono otto treni di fatica indicati all'Allegato D di Eurocodice 1991-2:2003. Il numero giornaliero di treni è 67 per binario con traffico misto definito nei Principi Base e mostrati in Tabella 10-5.

Tabella 10-5 Numero totale di treni per binario in 200 anni

| | | Treni/giorno | 1 anno | 200 anni | Ni per incontro treni (12%) | Ni per singolo treno (88%) |
|-----------------------------------|------|--------------|--------|----------|-----------------------------|----------------------------|
| Treni di fatica - EN 1991-2: 2003 | EN 1 | 12 | 4380 | 876000 | 105120 | 770880 |
| | EN 2 | 12 | 4380 | 876000 | 105120 | 770880 |
| | EN 3 | 5 | 1825 | 365000 | 43800 | 321200 |
| | EN 4 | 5 | 1825 | 365000 | 43800 | 321200 |
| | EN 5 | 7 | 2555 | 511000 | 61320 | 449680 |
| | EN 6 | 12 | 4380 | 876000 | 105120 | 770880 |
| | EN 7 | 8 | 2920 | 584000 | 70080 | 513920 |
| | EN 8 | 6 | 2190 | 438000 | 52560 | 385440 |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

Il numero di eventi per ciascuna delle 8 x8 diverse combinazioni è riepilogato in Tabella 10-6.

Tabella 10-6 Numero di intersezioni di treni in 200 anni

| | EN 1 | EN 2 | EN 3 | EN 4 | EN 5 | EN 6 | EN 7 | EN 8 |
|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|
| EN 1 | 18827 | 18827 | 7845 | 7845 | 10983 | 18827 | 12552 | 9414 |
| EN 2 | 18827 | 18827 | 7845 | 7845 | 10983 | 18827 | 12552 | 9414 |
| EN 3 | 7845 | 7845 | 3269 | 3269 | 4576 | 7845 | 5230 | 3922 |
| EN 4 | 7845 | 7845 | 3269 | 3269 | 4576 | 7845 | 5230 | 3922 |
| EN 5 | 10983 | 10983 | 4576 | 4576 | 6407 | 10983 | 7322 | 5491 |
| EN 6 | 18827 | 18827 | 7845 | 7845 | 10983 | 18827 | 12552 | 9414 |
| EN 7 | 12552 | 12552 | 5230 | 5230 | 7322 | 12552 | 8368 | 6276 |
| EN 8 | 9414 | 9414 | 3922 | 3922 | 5491 | 9414 | 6276 | 4707 |

I principi del range di sollecitazioni da fatica dei treni nel metodo dell'accumulo di danni sono simili a quelli del metodo della durata illimitata. Fare riferimento alla Figura 10-9 per il cassone ferroviario, alla Figura 10-10 per il traverso e alla Figura 10-11 per il cassone stradale.

10.8.4 Effetto del carico di fatica stradale e ferroviario

Quando si considera la combinazione di carichi stradali e ferroviari per la valutazione della fatica, in termini generali si utilizza la seguente equazione:

$$\Delta\sigma_{\text{ferr.+strada}} = (\Delta\sigma_1 * \varphi_{\text{reale},1}) + (\Delta\sigma_2 * \varphi_{\text{reale},2}) + \Delta\sigma_{\text{LM3}} * \gamma_{\text{MF}} \text{ dove:}$$

- $\Delta\sigma_1$ è il range di sollecitazioni massimo dato dalla differenza algebrica tra i due estremi (max min.) di un determinato ciclo di sollecitazioni ottenuto dal diagramma cronologico delle sollecitazioni per uno degli 8 treni sul binario 1. $\Delta\sigma_1$ è zero in assenza di treni.
- $\Delta\sigma_2$ è il range di sollecitazioni massimo dato dalla differenza algebrica tra i due estremi (max min.) di un determinato ciclo di sollecitazioni ottenuto dal diagramma cronologico delle sollecitazioni per uno degli 8 treni sul binario 2. $\Delta\sigma_2$ è zero in presenza di un solo treno.
- $\Delta\sigma_{\text{LM3}}$ è il range di sollecitazioni massimo dato dalla differenza algebrica tra i due estremi di un determinato ciclo di sollecitazioni ottenuto dal diagramma cronologico delle sollecitazioni utilizzando il modello di carico 3 (LM3)
- $\gamma_{\text{MF}} = \gamma_f * \gamma_m$ (fattore parziale di fatica * fattore parziale di resistenza) pari a 1.15 per i dettagli locali della piastra dell'impalcato ortotropo stradale e a 1.35 per gli altri componenti.

| | | | | |
|---|---|---|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | <i>Rev</i> <i>F0</i> | <i>Data</i> <i>20-06-2011</i> |

- $\varphi_{reale,i}$ è il fattore dinamico. Data la lunghezza determinante è necessario distinguere tra fattori dinamici locali e globali. Considerando la velocità massima reale del treno, i fattori dinamici reali sono riepilogati alla Tabella 10-4.
- Per i calcoli dell'accumulo di danni, la somma deve essere inferiore a 0.95 in considerazione del contributo del vento alla fatica (fare riferimento al Capitolo 0), quindi:
- $\sum n_i / N_i \leq 0.95$, dove
- N_i è la resistenza (in cicli) ottenuta dalla curva $\Delta\sigma_C - N_R$ per un range di sollecitazioni $\Delta\sigma_{i,d}$, n_i è il numero di cicli associati al range di sollecitazioni $\Delta\sigma_{i,d}$ per banda i nello spettro fattorizzato. Il numero di carichi ferroviari è stato ottenuto sulla base del traffico misto definito nei Principi Base.

Considerando i carichi stradali, è stato utilizzato il modello di carico di fatica 3.

I dettagli strutturali sono distinti tra elementi della piattabanda per cui gli effetti locali sono stati trascurati ed elementi della piastra dell'impalcato, comprendenti effetti di carico locali. In base a tale divisione, si applicano diversi contributi di danni, come mostrato di seguito:

Dettagli della piattabanda di cassone stradale, ferroviario e trasverso:

- treno su binario 1 + LM3
- treno su binario 2 + LM3
- treno su binario 1 + treno su binario 2 + LM3

Dettagli della piastra dell'impalcato del cassone ferroviario:

- treno su binario 1 + LM3 + locale di treno su binario 1
- treno su binario 2 + LM3
- treno su binario 1 + treno su binario 2 + locale di treno su binario 1 + LM3
- Solo LM3

Dettagli della piastra dell'impalcato del cassone stradale:

- treno su binario 1 + LM3 + locale LM3

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

- treno su binario 2 + LM3 + locale LM3
- treno su binario 1 + treno su binario 2 + LM3
- LM3 + locale LM3

Si osservi che quando si esamina la piastra dell'impalcato del cassone stradale, poiché la durata del ponte è di 200 anni, si fa riferimento a 4.0×10^8 cicli di carico globale e a cicli di carico locale persino superiori. L'ampiezza di sollecitazione massima data da un singolo evento moltiplicata per γ_{MF} deve essere inferiore a $\Delta\sigma_L$ per evitare danni. Ciò è valido considerando sia la flangia inferiore (cioè senza effetti locali) sia la nervatura (cioè con effetti locali). In quest'ultimo caso, è stato verificato che l'irrigidimento è in grado di limitare la sollecitazione dovuta all'applicazione del carico locale, inferiore al limite specifico per la categoria di dettagli 71 rappresentativa della sezione di nervatura al giunto strutturale. Ciò ha indotto un ispessimento locale della nervatura in corrispondenza della sezione della nervatura successiva all'altezza dei giunti strutturali.

Si osservi che nei diagrammi cronologici delle sollecitazioni, il range di sollecitazioni inferiore al limite specifico è stato tralasciato.

10.9 Dettagli di fatica

10.9.1 Le categorie di fatica sono state tratte da EN 1993-1-9:2005, dalla tabella 8.1 alla 8.10, ed EN 1993-2:2006. Dettagli della piattabanda stradale

L'analisi della fatica dei dettagli più critici nel cassone stradale viene effettuata utilizzando le forze sezionali del modello globale IBDAS.

La valutazione della fatica riguarda i seguenti dettagli costruttivi:

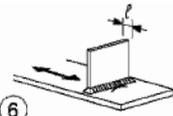
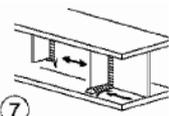
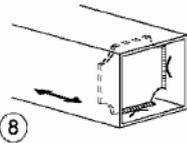
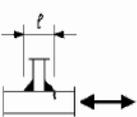
- Saldatura di testa a penetrazione completa tra piastra superiore del cassone e del traverso. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.3, dettaglio n.11.
- Saldatura a penetrazione completa tra piattabanda del cassone e anima della traversa. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.5, dettaglio n.1.

| | | | | |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 | |

- Saldatura di testa longitudinale a penetrazione completa tra piastre superiori e inferiori del cassone a metà e fine campata. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 90, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.2, dettaglio n.10.
- Saldatura d'angolo tra anima e piastra superiore e inferiore a metà e fine campata. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 100, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.2, dettaglio n.60.
- Collegamento del diaframma del cassone saldato alla piastra o all'anima. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8.
- Saldature trasversali a penetrazione completa tra piastre attraversate da saldatura longitudinale continua di irrigidimento. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.3, dettaglio n.9.
- Giunto trasversale nelle nervature con saldatura di testa a penetrazione totale con piastra di supporto in acciaio. Le sezioni delle nervature della piattabanda sono presenti nel giunto di erezione e nel giunto di officina. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 71, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.8, dettaglio n.4.

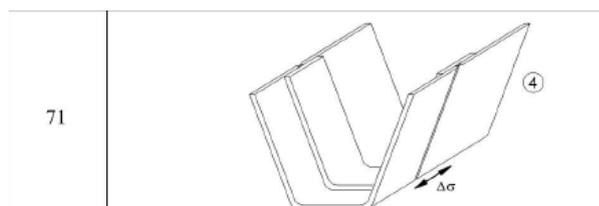
Nel calcolo, sono stati considerati solo gli elementi più pesanti nella verifica della fatica, in particolare:

1. Collegamento del diaframma alla piattabanda. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80 (EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8).

| | | |
|----|---------------------------|---|
| 80 | $t \leq 50\text{mm}$ |   |
| 71 | $50 < t \leq 80\text{mm}$ |   |

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

2. Piattabanda attraverso le nervature in corrispondenza del giunto di erezione e del giunto di officina (EN1993-1-9 Tabella 8.8, dettaglio n.4).



Tutti gli altri dettagli appartengono a una categoria uguale o superiore o sono suscettibili di passaggio a una classe superiore, quindi coperti indirettamente nel calcolo.

10.9.2 Ancoraggio dei pendini

Sono stati eseguiti tre controlli preliminari degli intervalli di sforzo per la piastra di ancoraggio in corrispondenza al collegamento del supporto al pendino, e in una posizione della piastra laterale, come mostrato nella Figura 10-16.

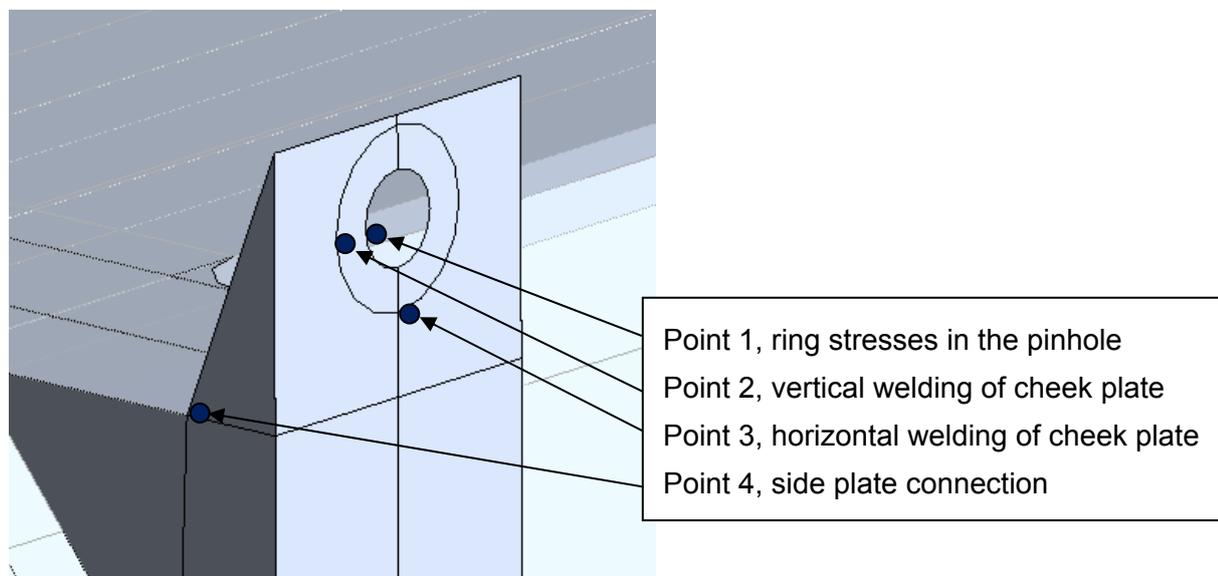


Figura 10-16 Posizioni dei punti di sollecitazione per valutazione della fatica

Le categorie di fatica dei quattro punti sono:

- Il punto 1 è 160, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.1, dettaglio n.1

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

- Il punto 2 è 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.5, dettaglio n.8
- Il punto 3 è 40, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.5, dettaglio n.6
- Il punto 4 è 56, vedere EN1993-1-9 Tabella 8,5, dettaglio n.1.

I valori del range di sollecitazioni sono confrontati con i range di sollecitazioni nel modello FE locale di ancoraggio dei pendini, vedere capitolo 10.10.5.

10.9.3 Dettagli dell'impalcato stradale

È stata eseguita l'analisi della fatica delle azioni locali nei punti A, B, C, D, E, F utilizzando un modello IBDAS locale dell'impalcato ortotropo in acciaio; per maggiori informazioni, fare riferimento a Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso Capitolo 10.9.2.

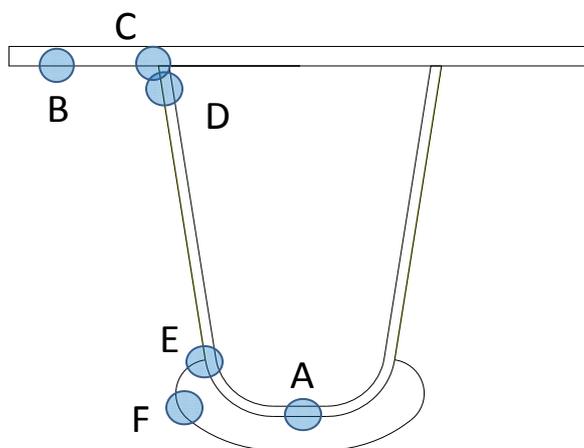


Figura 10-17 Dettagli dell'impalcato stradale ortotropo

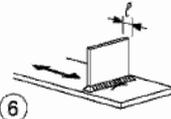
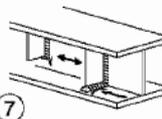
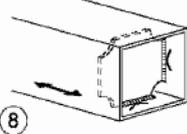
La valutazione della fatica riguarda i seguenti dettagli:

1. Il punto A rappresenta la saldatura di testa a penetrazione totale nella nervatura con piastra di supporto in acciaio. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 71, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.8, dettaglio n.4.

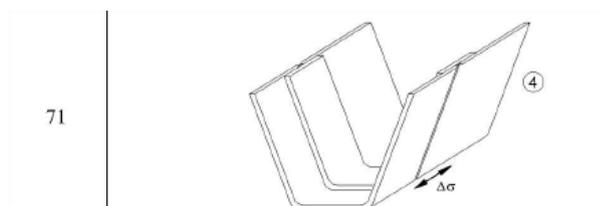
| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |



2. Il punto B rappresenta l'impalcato collegato al diaframma. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8.

| | | |
|----|---------------------------|--|
| 80 | $t \leq 50\text{mm}$ |  |
| 71 | $50 < t \leq 80\text{mm}$ |   |

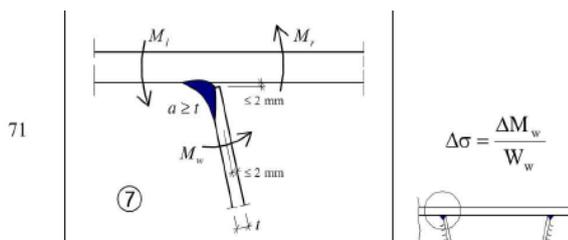
3. Il punto C rappresenta la prosecuzione nella piastra del limite dovuto alla sezione della nervatura; ciò si verifica quindi solo nei giunti strutturali (di erezione e officina). La categoria di dettagli deve quindi essere conforme allo stesso limite del punto A. All'esterno dei giunti strutturali, rappresenta inoltre le sezioni in cui la saldatura ad angolo longitudinale della nervatura incrocia una sezione di saldatura di testa a penetrazione completa della piastra dell'impalcato e si determina un dettaglio di fatica 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.3, dettaglio n.9. Nell'ultima configurazione, trattandosi di una saldatura da officina, la categoria potrebbe essere aumentata a 112 MPa, diventando quindi meno critica del dettaglio B; di conseguenza, non è mai stata presa in considerazione.



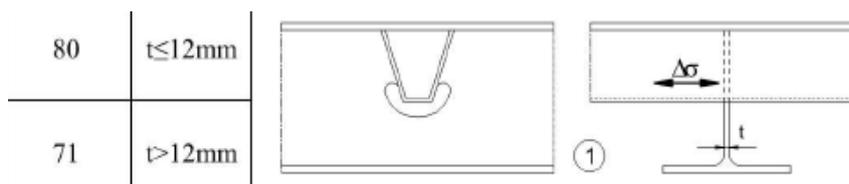
4. Il punto D rappresenta la piastra dell'impalcato che collega la saldatura all'anima della nervatura. Trattandosi di una saldatura a penetrazione parziale, è presente un momento flettente parassita ulteriore data la compressione dell'anima della nervatura e l'eccentricità

| | | | | | | | |
|---|---|---|--|-----|------|----|------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Rev</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Data</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20-06-2011</td> </tr> </table> | Rev | Data | F0 | 20-06-2011 |
| Rev | Data | | | | | | |
| F0 | 20-06-2011 | | | | | | |

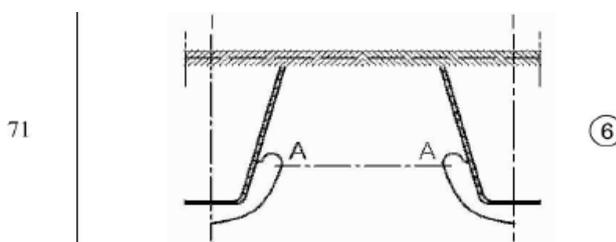
della saldatura. Il dettaglio è soggetto soltanto agli effetti locali. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 71, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.8, dettaglio n.7.



5. Il punto E rappresenta il collegamento tra la nervatura e il taglio nel diaframma. Poiché il diaframma è spesso 15mm, la saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 71, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.8, dettaglio n.1.



Il punto F rappresenta un'estremità della sezione critica nel diaframma dati i tagli. La piastra dentata del diaframma è sottoposta soltanto alle sollecitazioni prodotte dai carichi stradali locali e non è interessata dagli altri effetti globali come il carico del cassone ferroviario. È quindi verificata soltanto in base al metodo della durata illimitata. Lo stesso dettaglio è stato verificato sull'anima del traverso, prevedendo anche gli effetti combinati del carico locale delle ruote e del carico ferroviario globale.



I punti A e D sono stati controllati in posizioni specifiche tra due diaframmi in quanto i risultati al punto A sono stati utilizzati per ottimizzare l'ubicazione della sezione della nervatura, mentre il punto D deve essere rispettato in qualsiasi ubicazione tra diaframmi; per maggiori informazioni, vedere il modello FE locale stradale nel documento "Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso" Capitolo 10.9.2. I punti B, E e F sono stati controllati soltanto nell'ubicazione dei diaframmi.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

10.9.4 Dettagli della piattabanda ferroviari

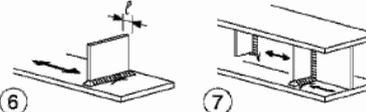
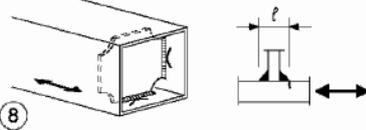
L'analisi della fatica dei dettagli più critici nel cassone ferroviario viene effettuata utilizzando i diagrammi cronologici delle sollecitazioni determinati dal modello globale IBDAS del ponte. La valutazione della fatica riguarda i seguenti dettagli costruttivi:

- Saldatura di testa a penetrazione completa tra piastra superiore del cassone e del traverso. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.3, dettaglio n.11.
- Saldatura a penetrazione completa tra piattabanda del cassone e anima del traverso. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.5, dettaglio n.1.
- Saldatura di testa longitudinale a penetrazione completa tra piastre superiori e inferiori del cassone a metà e fine campata. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 90, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.2, dettaglio n.10.
- Saldatura d'angolo automatica su ambo i lati tra anima e piastra superiore e inferiore a metà e fine campata. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 100, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.2, dettaglio n.5.
- Collegamento del diaframma del cassone saldato alla piastra dell'impalcato, alla piattabanda o all'anima. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8.
- Saldatura trasversale a penetrazione completa tra piastre attraversate da saldatura longitudinale continua di irrigidimento. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.3, dettaglio n.9.

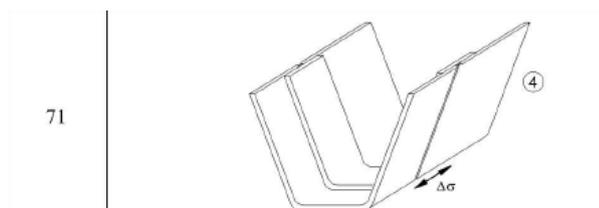
Nel calcolo, sono stati considerati solo gli elementi più pesanti nella verifica della fatica, in particolare:

1. Collegamento del diaframma alla piattabanda (EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8).

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

| | | |
|----|---------------------------|--|
| 80 | $l \leq 50\text{mm}$ |  |
| 71 | $50 < l \leq 80\text{mm}$ |  |

2. Piattabanda attraverso le nervature in corrispondenza del giunto di erezione e del giunto di officina (EN1993-1-9 Tabella 8.8, dettaglio n.4).



Tutti gli altri dettagli appartengono a una categoria uguale o superiore o sono suscettibili di passaggio a una classe superiore, quindi coperti indirettamente nel calcolo.

10.9.5 Dettagli dell'impalcato ferroviario

È stata eseguita l'analisi della fatica delle azioni locali nei punti WA e WB utilizzando un modello IBDAS locale dell'irrigidimento a T comprendente la piastra superiore effettiva; fare riferimento a "Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso", 10.9.4.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

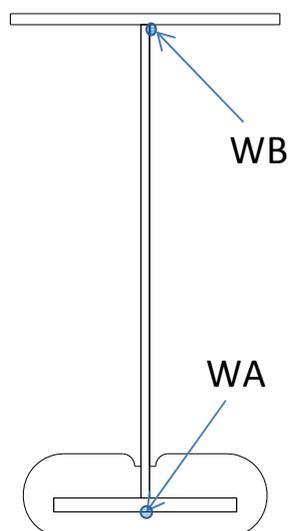
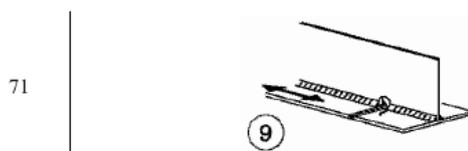


Figura 10-18 Dettagli dell'impalcato ferroviario ortotropo

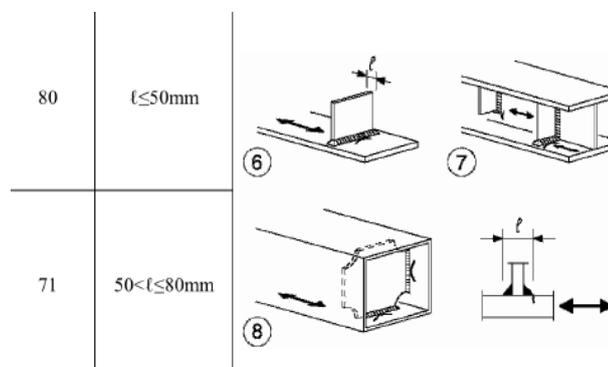
La valutazione della fatica riguarda i seguenti dettagli in prossimità dei giunti strutturali:

1. Il punto WA rappresenta la saldatura d'angolo longitudinale con altezza delle lunette angolari non superiore a 60 mm. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 71, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.2, dettaglio n.9.



2. Il punto WB rappresenta la parte superiore dell'anima dell'irrigidimento collegato ai diaframmi principali o intermedi. Categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |



10.9.6 Dettagli del traverso

L'analisi della fatica dei dettagli più critici nel traverso viene effettuata utilizzando le forze sezionali del modello globale IBDAS. Sono stati controllati i dettagli di fatica di piastra superiore e inferiore ai collegamenti della piastra.

La valutazione della fatica riguarda i seguenti dettagli costruttivi:

- Saldatura di testa a penetrazione completa tra piastra superiore e inferiore. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 112, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.3, dettaglio n.1.
- Saldatura d'angolo tra anima e piastra superiore e inferiore a metà campata. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 100, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.2, dettaglio n.60.
- Saldatura trasversale a penetrazione completa tra piastre attraversate da saldatura longitudinale continua di irrigidimento. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 112, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.3, dettaglio n.2.
- Collegamento del diaframma del cassone saldato alla piastra superiore, alla piattabanda o all'anima. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8.

Nei seguenti calcoli, sono stati considerati solo gli elementi più pesanti nella verifica della fatica, in particolare:

1. Collegamento del diaframma del cassone saldato alla piastra superiore, alla piattabanda o all'anima. La saldatura corrisponde alla categoria di dettagli 80, vedere EN1993-1-9 Tabella 8.4, dettaglio n.8.

| | | | | |
|---|---|--|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

10.9.7 Miglioramento delle categorie di dettagli di fatica

Sono state attualmente selezionate le categorie generali di dettagli di fatica 80. Alcune categorie dei dettagli possono tuttavia essere migliorate tramite trattamento di saldatura.

Una categoria di dettagli controlla la maggior parte degli elementi dell'impalcato sospeso, cioè il collegamento delle piastre rivestite ai diaframmi. Tali dettagli sono categorizzati nella classe 80, come riportato in Figura 10-19.

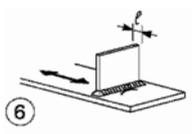
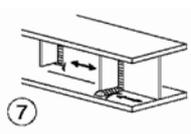
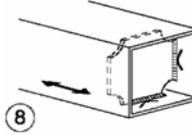
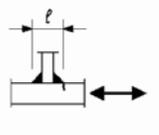
| | | | | | |
|----|------------------------------|--|--|--|---|
| 80 | $\ell \leq 50\text{mm}$ |  |  | <u>Transverse attachments:</u> 6) Welded to plate. 7) Vertical stiffeners welded to a beam or plate girder. 8) Diaphragm of box girders welded to the flange or the web. May not be possible for small hollow sections. The values are also valid for ring stiffeners. | <u>Details 6) and 7):</u> Ends of welds to be carefully ground to remove any undercut that may be present. 7) $\Delta\sigma$ to be calculated using principal stresses if the stiffener terminates in the web, see left side. |
| 71 | $50 < \ell \leq 80\text{mm}$ |  |  | | |

Figura 10-19 Collegamento di piastre rivestite diaframma - categoria di dettagli 80

In riferimento alle "International Institute of Welding (IIW) recommendations for fatigue design of welded joints and components", per il dettaglio è stata utilizzata una classe potenziata di 100 MPa come mostrato in Figura 10-20 **Dettagli strutturali secondo le raccomandazioni IIW**

IIW Fatigue Recommendations

XIII-2151-07/XV-1254-07

May 2007

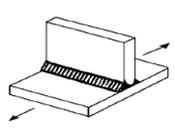
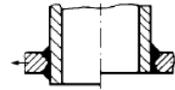
| No. | Structural Detail | Description (St.= steel; Al.= aluminium) | FAT St. | FAT AL | Requirements and Remarks |
|-----|---|--|-------------------------|----------------------|---|
| 500 | Non-load-carrying attachments | | | | |
| 511 |  | Transverse non-load-carrying attachment, not thicker than main plate K-butt weld, toe ground Two sided fillets, toe ground Fillet weld(s), as welded thicker than main plate | 100 100- 80 71 | 36 36 28 25 | Grinding parallel to stress An angular misalignment corresponding to $k_m = 1.2$ is already covered |
| 831 |  | Tubular branch or pipe penetrating a plate, K-butt welds. | 80 | 28 | If diameter > 50 mm, stress concentration of cutout has to be considered Assessment by structural hot spot is recommended. |

Figura 10-20 Dettagli strutturali secondo le raccomandazioni IIW

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

10.10 Modelli di verifica della fatica

La verifica della fatica è eseguita utilizzando i 5 modelli di seguito riportati.

10.10.1 Modello globale IBDAS

I 8 modelli di carico ferroviario del treno di fatica e i modelli del carico stradale di fatica LM2 e LM3 sono stati implementati nel modello globale IBDAS. Il tipo di analisi utile a calcolare la cronologia delle sollecitazioni è un'analisi p-delta di 1° ordine, con condizione di riferimento data dagli effetti p-delta. Ciò significa che i risultati dei nostri carichi di traffico sono molto prossimi ai risultati derivanti dall'analisi di 2° ordine, in quanto il carico statico è dominante.

La cronologia delle sollecitazioni è stata calcolata per ogni evento di carico (8 treni + carico LM3) a metà e a fine campata di 30 m in diverse ubicazioni del ponte. La campata peggiore di 30 m è stata rilevata tra le coordinate s IBDAS -1440 e -1410 m misurate dal centro del ponte (la 7° campata di 30m dalla torre lato Sicilia). La cronologia delle sollecitazioni è stata completamente sviluppata in tale campata.

Con il "metodo dell'accumulo di danni" (sommatoria dei danni Palmgren-Miners), si è considerato un solo ciclo per treno in quanto il secondo ciclo rilevante si è sempre rivelato inferiore al limite specifico del dettaglio effettivo.

Dal punto di vista conservativo, eseguita la combinazione di carichi stradali e ferroviari, si è considerato simultaneamente il valore massimo di $\Delta\sigma$ per entrambi.

10.10.2 Modello locale IBDAS di impalcato ortotropo

È stato sviluppato un modello "shell" locale FE sviluppato in IBDAS per valutare i carichi di fatica dell'impalcato stradale ortotropo in acciaio. Scopo del modello è ottenere una conoscenza dettagliata dello stato di sollecitazione locale indotto dai modelli di carico di fatica LM2 e LM3 specificati in EN 1991-2:2003 (E). Di conseguenza, i vantaggi del modello globale FE non rientrano nel presente scopo, mentre una sezione ridotta dell'impalcato in acciaio, compresi irrigidimenti e diagrammi, è stata modellizzata con maggiori dettagli rispetto al modello globale FE data la tempistica di calcolo.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

10.10.2.1 Geometria

Mentre la larghezza totale dell'impalcato stradale in acciaio supportato dalle nervature è di circa 12 m, il modello locale FE è formato da una sezione trasversale comprendente sette nervature. Analogamente, la direzione longitudinale comprende soltanto otto diaframmi. Le dimensioni chiave del modello FE locale indicano:

Tabella 10-7 Dimensioni geometriche del modello FE locale

| | | |
|--------------------|---|----------------------|
| Dimensioni esterne | Larghezza | 0.51 m x 7 = 3.57 m |
| | Lunghezza | 3.75 m x 7 = 26.25 m |
| Altre dimensioni | Spessore impalcato | 0.017 m |
| | Spessore nervatura | 0.009 m |
| | Altezza nervatura (da impalcato inferiore in acciaio a nervatura inferiore) | 0.309 m |
| | Larghezza nervatura sull'impalcato in acciaio (centro-centro) | 0.239 m |
| | Larghezza nervatura nella parte inferiore (centro-centro) | 0.139 m |
| | Spessore manto stradale | 0.012 m |
| | Spessore diaframma | 0.015 m |

Il manto stradale non è stato modellizzato direttamente nel modello FE in quanto lo scopo è calcolare le sollecitazioni indotte dal traffico, cioè senza contributo del carico statico. Al contrario, si considera la diffusione delle impronte delle ruote supponendo una dispersione del carico di 45° attraverso il manto. I diaframmi sono stati modellizzati direttamente nel modello FE inserendo dettagli completi dei tagli attorno alla parte inferiore delle nervature. I diaframmi sono modellizzati a 1 m sotto l'impalcato in acciaio per non introdurre effetti limite in prossimità delle regioni di interesse. La Figura 10-21 mostra la geometria del modello IBDAS.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

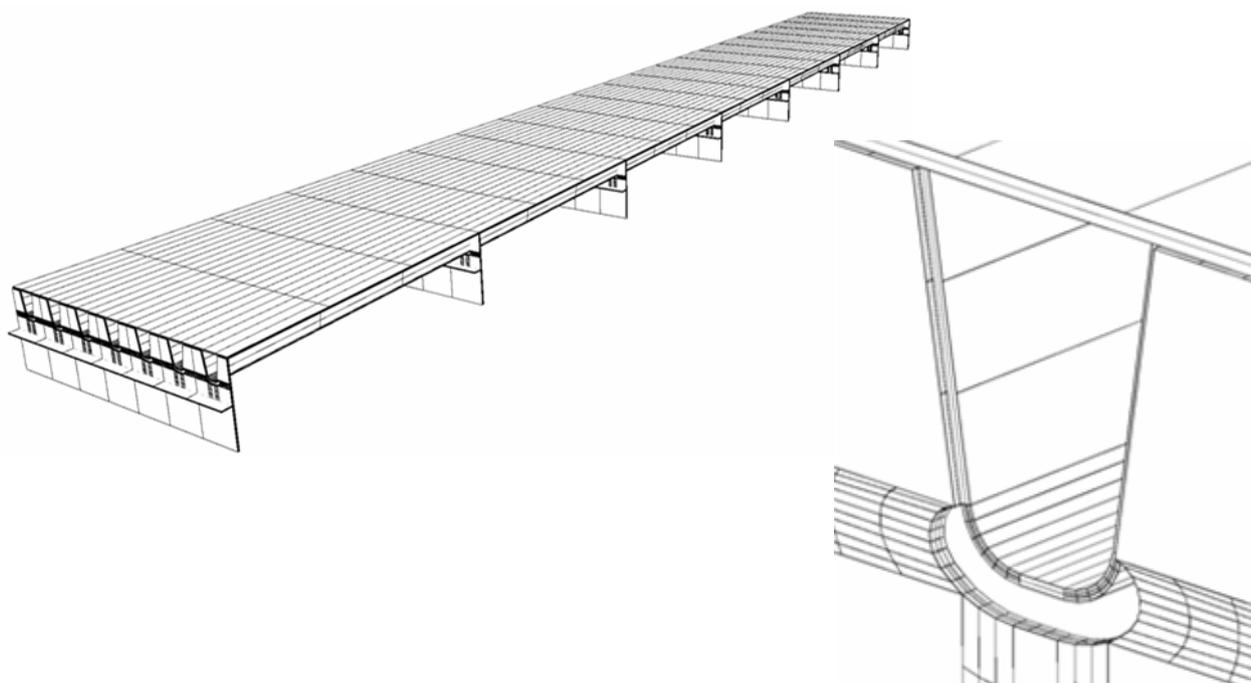


Figura 10-21 Geometria del modello locale IBDAS di impalcato stradale ortotropo in acciaio e diaframma

10.10.2.2 Modello FE

Il modello di elementi finiti viene realizzato completamente con “shell” in cui la geometria delle curve in nervature e tagli del diaframma si rifletta nel modello FE come di seguito riportato. Per garantire risultati convergenti relativi alle sollecitazioni nel diaframma attorno ai tagli in cui si possono prevedere gradienti di sollecitazioni elevati, si è applicato un reticolo molto denso in quest’area.

| | | | |
|---|---|---|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

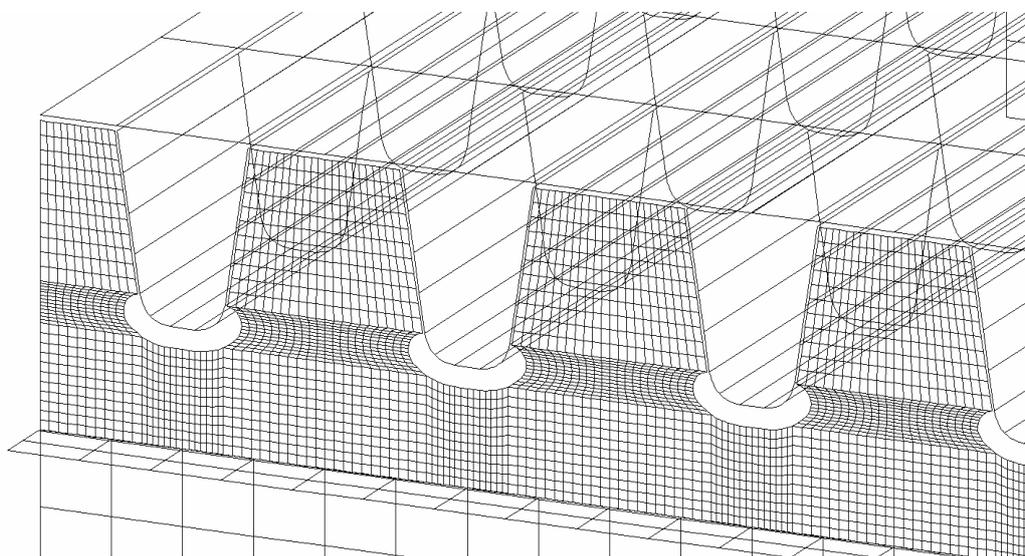


Figura 10-22 Parte del reticolo "shell" del modello FE

I nodi laterali e alla base dei diaframmi sono stati supportati da molle in direzione trasversale e verticale. L'influenza degli irrigidimenti a molla sui risultati delle sollecitazioni si è rivelata marginale. A un limite estremo del modello, sono stati supportati anche i gradi di libertà di traslazione longitudinale. La figura seguente mostra una forma con deformazione eccessiva del modello caricato soltanto con carico statico. I limiti sui lati del modello non sono supportati, tranne i nodi più esterni del diaframma.

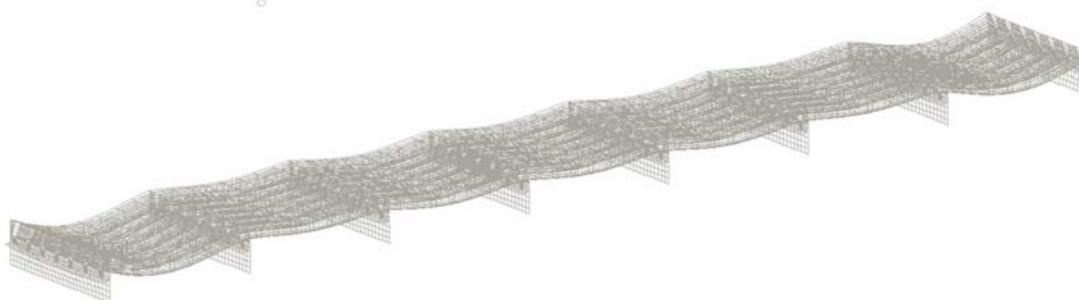


Figura 10-23 Forma deformata del modello FE locale con esposizione al carico statico (scala 8000)

Come mostrato sopra, sono state introdotte alcune condizioni limite artificiali per stabilire il modello locale in grado di mantenere l'integrità come in una struttura autonoma. Ciò significa che i risultati dell'analisi sono utilizzabili con fiducia solo quando l'elemento strutturale in questione e i carichi applicati sono posizionati a notevole distanza da tali limiti. Di conseguenza, si calcolano le

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

sollecitazioni della nervatura intermedia nella sezione intermedia del modello, come di seguito riportato.

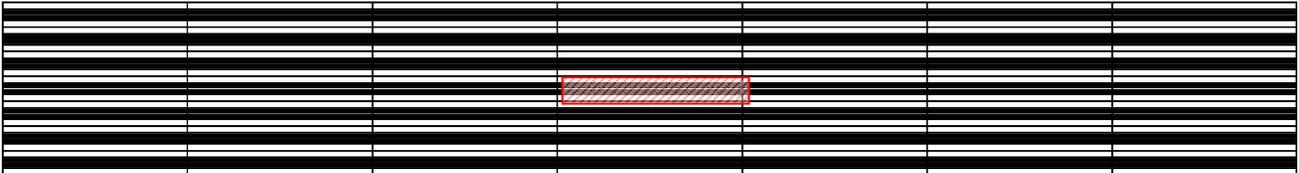


Figura 10-24 Sezione di analisi del modello FE locale

10.10.2.3 Carichi di fatica

Per la valutazione dei carichi di fatica, sono stati applicati due modelli di carico diversi al modello globale IBDAS locale, rispettivamente LM2 (EN 1991-2:2003 (E) Capitolo 4.6.3) e LM3 (EN 1991-2:2003 (E) Capitolo 4.6.4).

LM2 è formato da cinque veicoli singoli che condividono le stesse impronte geometriche delle ruote, come di seguito riportato.

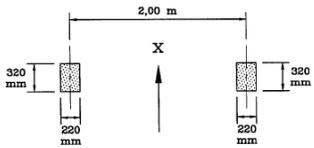
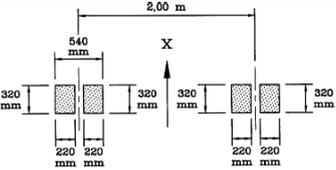
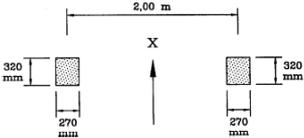
| WHEEL/ AXLE TYPE | GEOMETRICAL DEFINITION |
|---------------------|---|
| A |  |
| B |  |
| C |  |

Figura 10-25 Definizione geometrica delle impronte delle ruote in LM2

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

I cinque veicoli si definiscono nella figura seguente, riferita a tre definizioni di ruote.

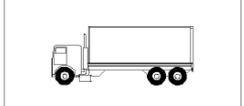
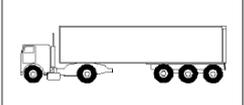
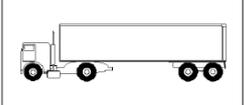
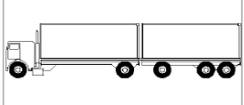
| 1 LORRY SILHOUETTE | 2 Axle spacing (m) | 3 Frequent axle loads (kN) | 4 Wheel type (see Table 4.8) |
|---|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|  | 4,5 | 90 190 | A B |
|  | 4,20 1,30 | 80 140 140 | A B B |
|  | 3,20 5,20 1,30 1,30 | 90 180 120 120 120 | A B C C C |
|  | 3,40 6,00 1,80 | 90 190 140 140 | A B B B |
|  | 4,80 3,60 4,40 1,30 | 90 180 120 110 110 | A B C C C |

Figura 10-26 I cinque veicoli "frequenti" in LM2

LM3 è formato da un singolo veicolo con la composizione geometrica di seguito riportata, vedere Figura 10-26. I carichi delle ruote sono 120 kN.

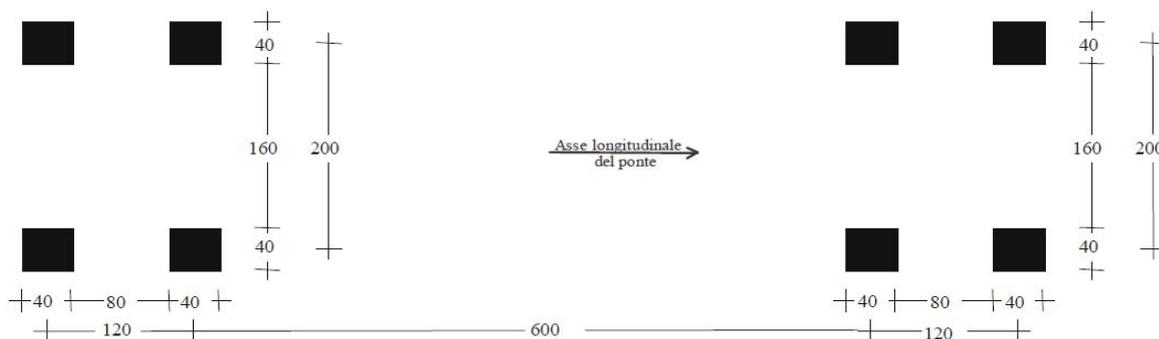


Figura 10-27 Geometria del veicolo LM3

Solo un lato dei veicoli è stato applicato al modello IBDAS, in quanto il modello dovrebbe essere nettamente più ampio per fornire spazio sufficiente a posizionare un veicolo intero ben lontano dai

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

limiti. Al contrario, è stato valutato che il caso peggiore per una nervatura si avrebbe qualora un lato dell'assale fosse posizionato in prossimità della nervatura stessa; di conseguenza, l'influenza del lato dell'assale lontano è trascurabile.

I carichi dei veicoli si posizionano automaticamente nella posizione peggiore utilizzando le superfici di influenza. Nella direzione longitudinale, IBDAS può spostare i veicoli completamente in continuo per determinare i carichi peggiori, mentre la posizione trasversale viene esaminata in sette intervalli da 10 cm, partendo da una posizione simmetrica superiore alla nervatura intermedia. La Figura 10-28 mostra un esempio di mezzo pesante n. 3 in LM2 nella posizione peggiore per determinare le forze di tensione estreme nella flangia della nervatura. La freccetta indica il punto di sollecitazione effettivo, mentre le strisce rosse rappresentano l'ampiezza relativa dei carichi delle ruote.

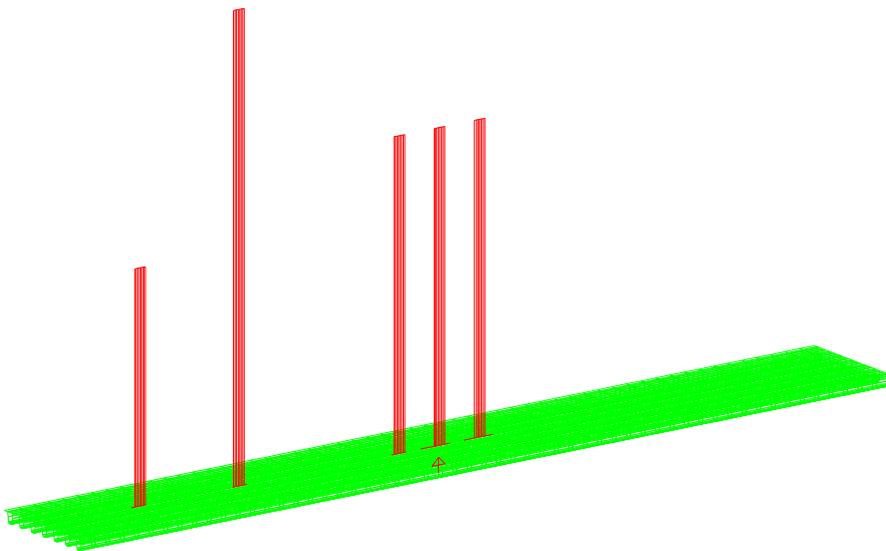


Figura 10-28 Esempio di posizione automatica nei carichi dei veicoli in IBDAS

Il modello IBDAS può fornire aree di sollecitazione, nonché casi di carichi fissi con forze sezionali coincidenti.

10.10.3 Modello FE stradale locale

Il modello locale stradale FE, vedere Capitolo 0, è stato utilizzato per controllare il punto H, vedere Capitolo 10.9.3, applicando i carichi di collegamento equivalenti alla posizione delle ruote che ottimizza la sollecitazione verticale nell'anima della nervatura.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

10.10.4 Modello FE ferroviario locale

È stato sviluppato un modello locale IBDAS per analizzare gli effetti locali degli otto treni di fatica di Eurocodice sull'irrigidimento a T del cassone ferroviario. Il modello prevede una trave continua a 21 campate rette ogni 3.75 m da diaframmi utilizzati per determinare la variazione del momento flettente e, di conseguenza, i range di sollecitazioni nelle diverse posizioni della campata centrale dato il transito completo dei treni; vedere Figura 10-28.

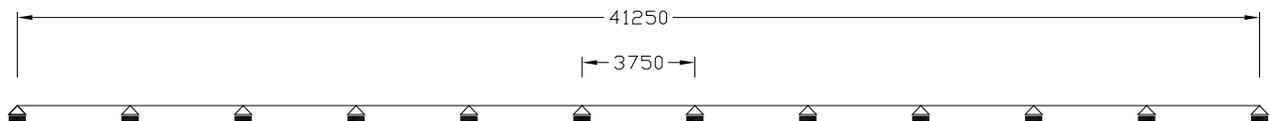


Figura 10-29 Modello a trave continua dell'irrigidimento a T

La campata centrale è stata selezionata per supporre effetti collaterali trascurabili. Per eseguire la verifica di fatica dell'irrigidimento a T, sono state esaminate sei ubicazioni in corrispondenza del supporto, a 200, 400, 600, 1250 e 1875 mm dal diaframma; vedere Figura 10-30.

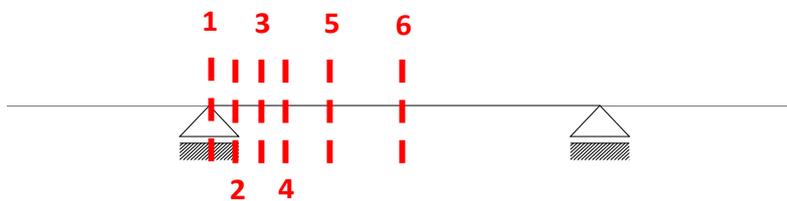


Figura 10-30 Posizioni di calcolo della linea d'influenza del momento flettente

Da tali posizioni è stato possibile verificare la posizione più favorevole per le sezioni dell'irrigidimento, nonché controllare la saldatura dell'irrigidimento stesso sul diaframma principale e intermedio.

In base alle linee d'influenza del momento flettente, sono stati generati diagrammi cronologici delle sollecitazioni, di cui si riporta un esempio in Figura 10-31. Sono stati quindi calcolati gli spettri dei range di sollecitazioni, considerando anche i relativi cicli secondari (per cui il range di sollecitazioni è superiore al limite specifico).

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

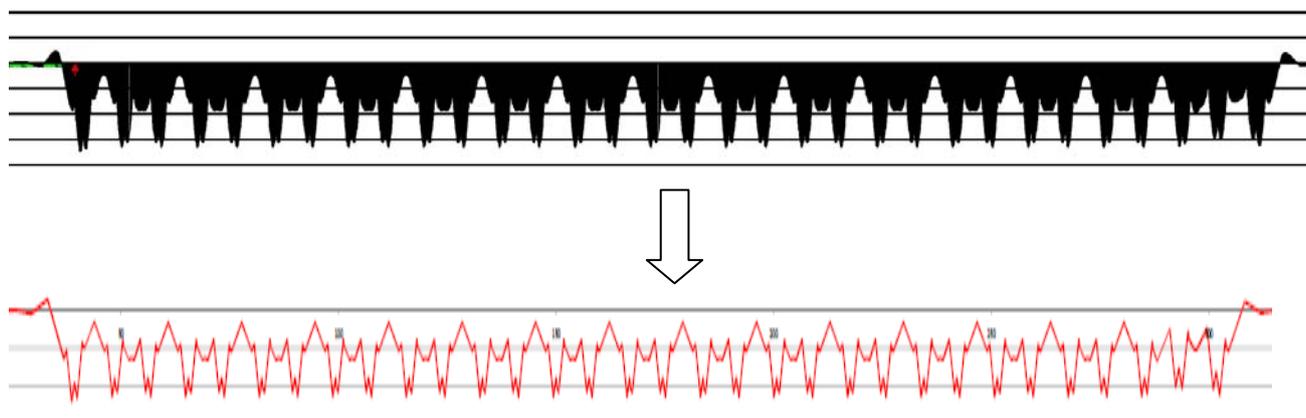


Figura 10-31 Linea d'influenza del momento flettente in alto e cronologia delle sollecitazioni in una determinata posizione in basso

10.10.5 Modello FE locale dell'ancoraggio del pendino

Per valutare la fatica dell'ancoraggio del pendino è stato utilizzato il modello FE locale corrispondente.

Per maggiori informazioni su questo modello, vedere il capitolo 9.6.

L'ancoraggio del pendino più rappresentativo per la fatica sulla lunghezza del ponte è di tipo AP2 (84 su 476 sulla lunghezza del ponte). La reazione massima del pendino al tipo AP2 è rappresentata dal pendino n° 40. Il carico considerato in tale indagine è il passaggio di un treno EN5 sul binario più vicino all'ancoraggio del pendino esaminato. Rotazioni e carico applicate all'ancoraggio dei pendini si ottengono dal modello globale IBDAS. La variazione dell'angolo di rotazione attorno all'asse S è registrata al nodo finale dell'elemento della trave del traverso di un treno EN5.

Nel modello globale IBDAS di trave, i pendini sono modellizzati come singoli pendini a ogni estremità del traverso. Data la maggiore rigidità di due pendini rispetto a uno, tale supporto avrà una forza superiore a metà del risultato IBDAS. Questo contributo supplementare è considerato aumentando il range di forza del pendino del 10%.

In merito al modello FE locale dell'ancoraggio del pendino utilizzato per la verifica ULS, è stato rifinito il reticolo per lo stato limite di fatica, come mostrato in Figura 10-32.

|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
|---|---|---|--|------------|-------------|----|------------|
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; padding: 2px;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left; padding: 2px;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left; padding: 2px;">F0</td> <td style="text-align: left; padding: 2px;">20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table> | <i>Rev</i> | <i>Data</i> | F0 | 20-06-2011 |
| <i>Rev</i> | <i>Data</i> | | | | | | |
| F0 | 20-06-2011 | | | | | | |

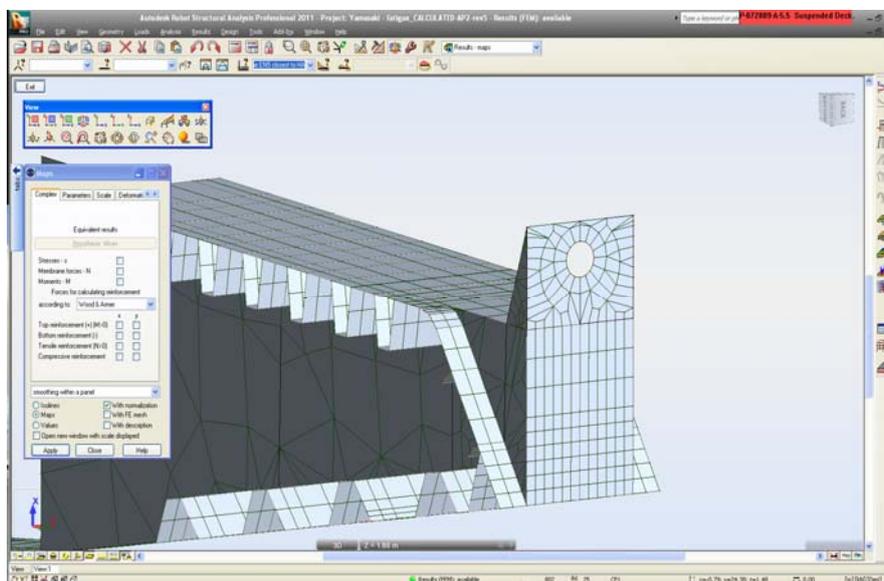


Figura 10-32 Reticolo nel modello FE locale dell'ancoraggio del pendino

La reazione del pendino si applica al modello FE locale come descritto al Capitolo 0.

11 Strutture di supporto

11.1 Introduzione

Questo capitolo descrive le diverse strutture di supporto applicabili all'impalcato sospeso e progettate principalmente su calcoli manuali basati sulle reazioni del modello globale FE IBAS e riportati in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

11.2 Ancoraggi dei pendini

Gli ancoraggi dei pendini sono verificati innanzitutto tramite modello locale FE. In totale sono stati modellizzati 4 diversi tipi (vedere capitolo 0). Rotazioni e forze totali ULS dei pendini sono applicate secondo i risultati ottenuti dal modello globale IBAS. Sono stati eseguiti calcoli ulteriori riportati in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

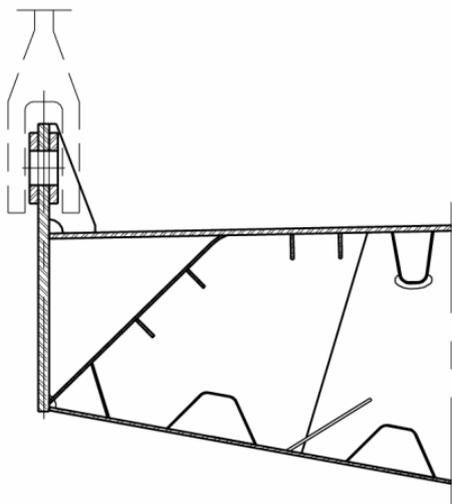


Figura 11-1 Ancoraggio dei pendini – tipo AP1

11.3 Buffer, vincoli laterali e appoggi alle torri

11.3.1 Introduzione

I movimenti dell'impalcato sospeso si riducono introducendo un sistema di vincoli longitudinali e laterali dell'impalcato del ponte alle torri.

L'impalcato sospeso è in direzione longitudinale e collegato alle torri tramite buffer idraulici, che in "normali" condizioni di esercizio rimarranno chiusi, agendo come connessioni rigide. Nell'eventualità di temperatura elevata e sisma, i buffer consentiranno spostamenti dell'impalcato limitando idraulicamente le forze trasmesse fra le torri e l'impalcato sospeso, riducendo allo stesso tempo gli spostamenti del cassone.

Al fine di ridurre il carico sulle spalle, gli impalcati stradali sono interrotti alle torri ed è continuo solo l'impalcato ferroviario. I traversi adiacenti sono collegati tramite due "triangoli" di piloni collegati al centro, che formano una cerniera elastica.

La concezione del sistema è mostrata in Figura 11-2, in cui i buffer longitudinali sono indicati con D2. L'isolatore sistemico del collegamento laterale alla torre è indicato con D1.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

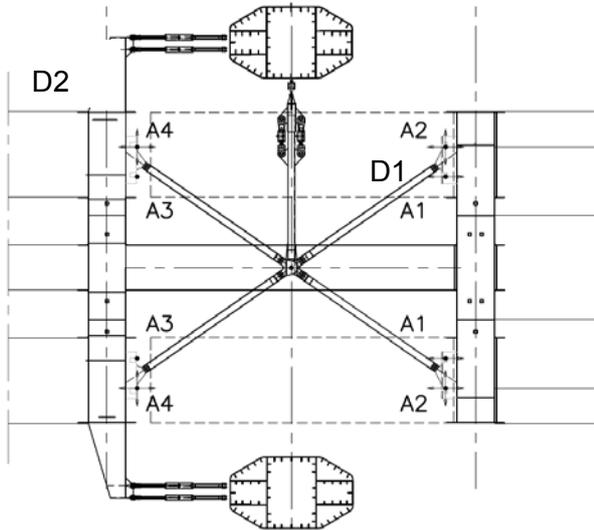


Figura 11-2 Vincolo dell'impalcato alle torri – i supporti di appoggio sono denominati A1-A4

Le seguenti strutture saranno verificate per l'impalcato sospeso in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

11.3.2 Estensioni dei trasversi

I trasversi alle torri (T4a e T4b) si estendono in direzione trasversale per supportare le disposizioni dei buffer (D1). Forze totali ULS dei pendini e rotazioni dei buffer sono applicate secondo i risultati ottenuti dal modello globale IBDAS. Sono stati eseguiti calcoli manuali riportati in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

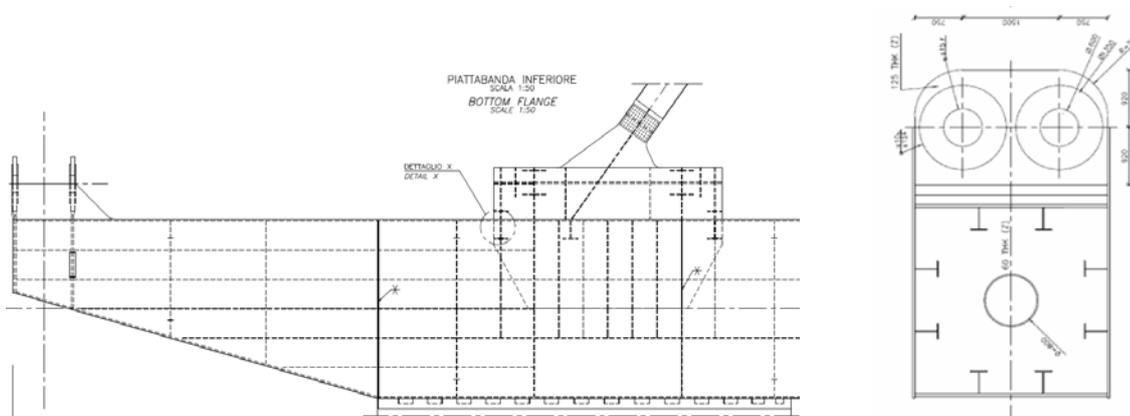


Figura 11-3 Estensione dei trasversi – planimetria e sezione all'ancoraggio dei buffer

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

11.3.3 Mensole di supporto della campata drop-in

I due traversi a ogni torre (T4a e T4b) costituiscono il supporto della campata stradale drop-in di 60 m. Movimenti e reazioni globali degli appoggi ULS sono applicate secondo i risultati ottenuti dal modello globale IBDAS. Sono stati eseguiti calcoli manuali riportati in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

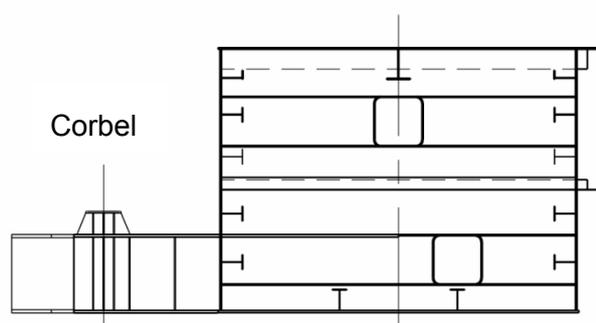


Figura 11-4 Mensola di supporto della campata drop-in

11.3.4 Taglio e disposizione del supporto del giunto di dilatazione

L'estremità della campata stradale drop-in è progettata per far fronte alle reazioni degli appoggi (da A1 ad A4) e ai requisiti geometrici del giunto di dilatazione. Movimenti e reazioni globali degli appoggi ULS sono applicate secondo i risultati ottenuti dal modello globale IBDAS. Sono stati eseguiti calcoli manuali riportati in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

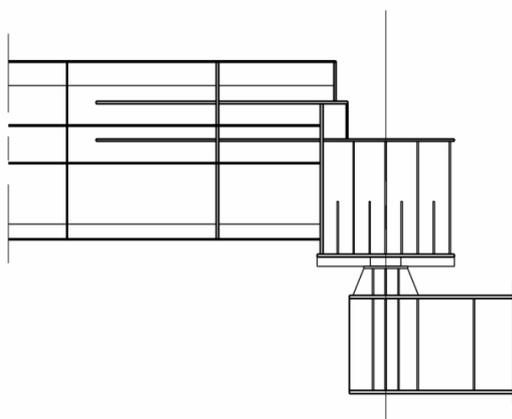


Figura 11-5 Disposizione del supporto alla campata drop-in

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

11.3.5 Supporto verticale della struttura triangolare dei pilastri

Al centro della campata ferroviaria di 60 m si trova un supporto verticale della struttura triangolare dei pilastri (D2). Rotazioni e reazioni globali degli appoggi ULS sono applicate secondo i risultati ottenuti dal modello globale IBDAS. Sono stati eseguiti calcoli manuali riportati in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

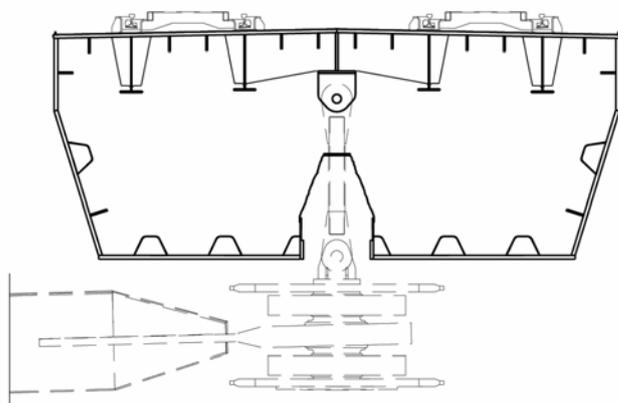


Figura 11-6 Supporto verticale della struttura triangolare dei pilastri

11.4 Appoggi e giunti di dilatazione alle strutture terminali

La struttura dell'impalcato sospeso è retta dalle sovrastrutture terminali agli appoggi A5, A8, A9, A10 and A11, vedere Figura 11-4.

Tre appoggi (2xA5 and A8) sono situati all'ingresso della struttura terminale sotto l'ultimo traverso, dove terminano i cassoni stradali. Il cassone ferroviario sporge comunque nella struttura terminale e gli appoggi dei carichi verticali sono ubicati in due posizioni – appoggi 2xA9 e A10/A11 all'estremità del cassone ferroviario.

In direzione trasversale, i cassoni stradali e ferroviari sono guidati dagli appoggi A11 e A8. I due appoggi A5 e A9 subiscono inoltre forze di sollevamento elevate.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

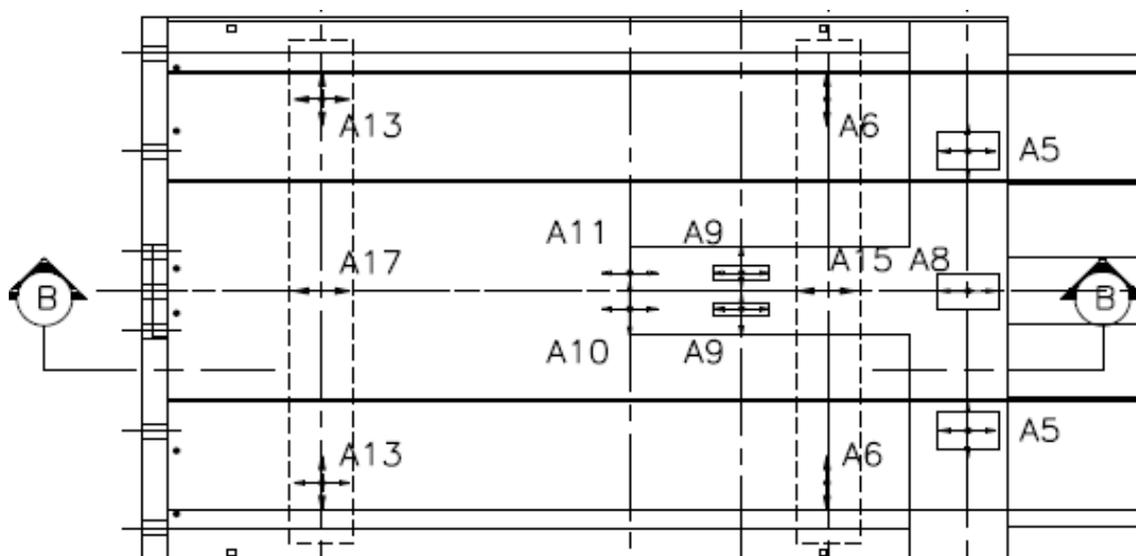


Figura 11-7 Planimetria degli appoggi alla struttura terminale lato Sicilia

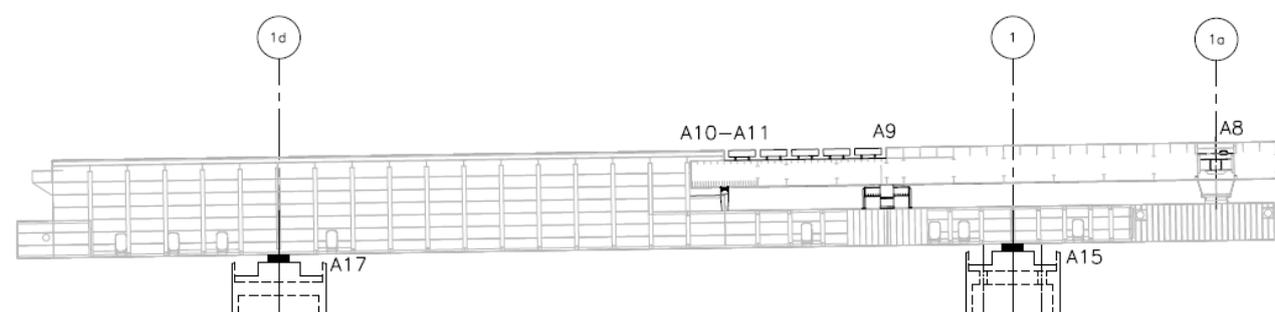


Figura 11-8 Planimetria degli appoggi alla struttura terminale lato Sicilia – vista laterale (sezione B-B in Figura 11-7).

11.4.1 Appoggi all'ingresso della struttura terminale

Gli appoggi all'ingresso della struttura terminale sono situati sotto l'ultimo traverso, progettati per far fronte alle reazioni degli appoggi, comprese le forze di sollevamento e i requisiti geometrici del giunto di dilatazione. Movimenti e reazioni globali degli appoggi ULS sono applicate secondo i risultati ottenuti dal modello globale IBAS. Sono stati eseguiti i calcoli riportati in "Relazione di progetto – Strutture di supporto".

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

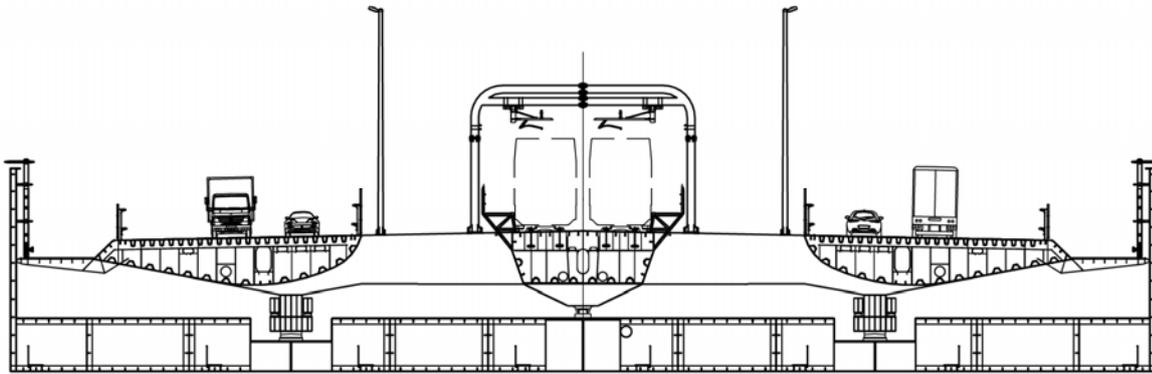


Figura 11-9 Disposizione dei supporti all'ingresso del terminale (ultimo traverso)

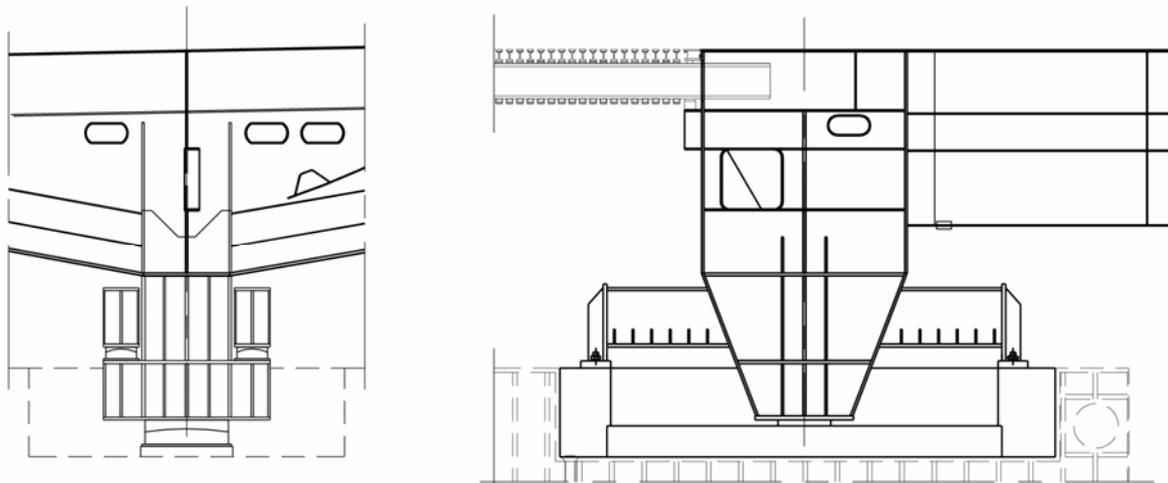


Figura 11-10 Appoggio A6 alla struttura terminale con dispositivo anti-sollevamento

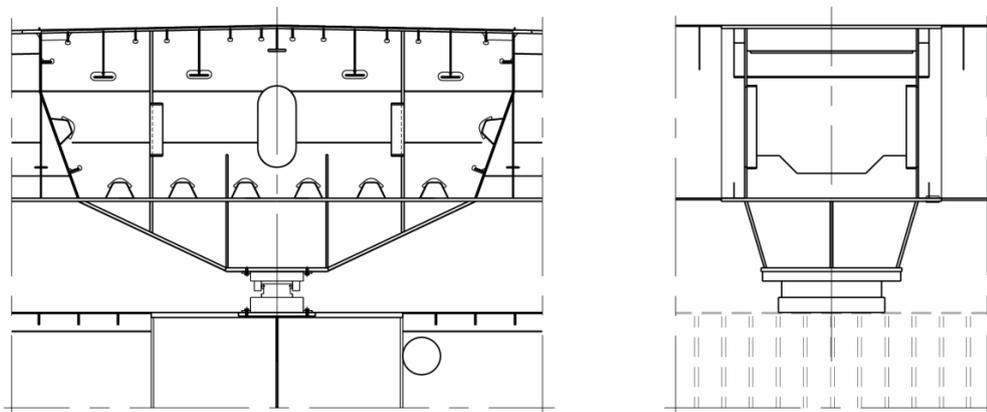


Figura 11-11 Appoggio A8 alla struttura terminale – solo per supporto laterale

|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | | | | |
|---|---|---|--|-----|------|----|------------|
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Rev</th> <th>Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table> | Rev | Data | F0 | 20-06-2011 |
| Rev | Data | | | | | | |
| F0 | 20-06-2011 | | | | | | |

11.4.2 Appoggi all'estensione del cassone ferroviario

Gli appoggi sull'estensione del cassone ferroviario sono situati su due file dati i requisiti di conformità della linea di binari ferroviari e sono stati progettati per far fronte alle reazioni, comprese le forze di sollevamento e i requisiti geometrici secondo i risultati del modello globale IBDAS. Sono stati eseguiti calcoli manuali riportati in "Relazione di progetto – Strutture di supporto".

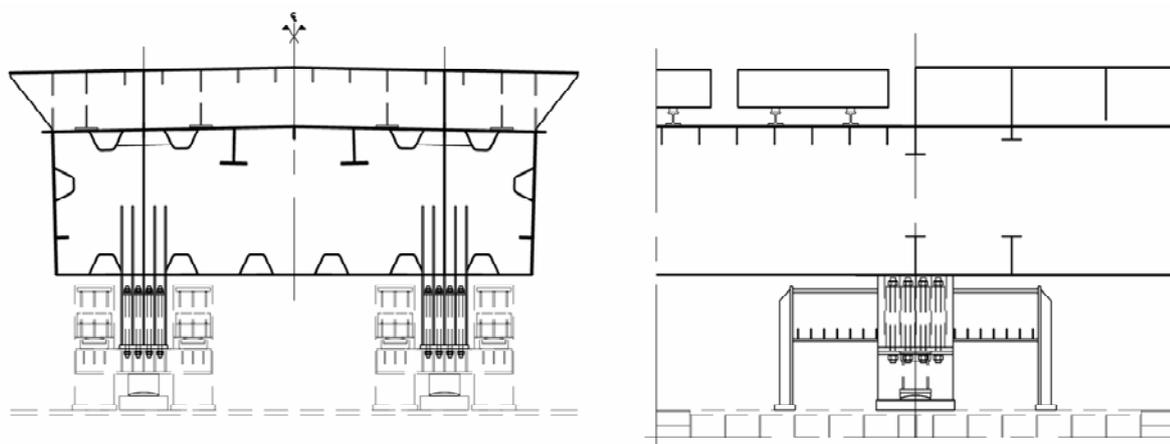


Figura 11-12 Appoggio 2 x A9 all'estensione del cassone ferroviario con dispositivo anti-sollevamento

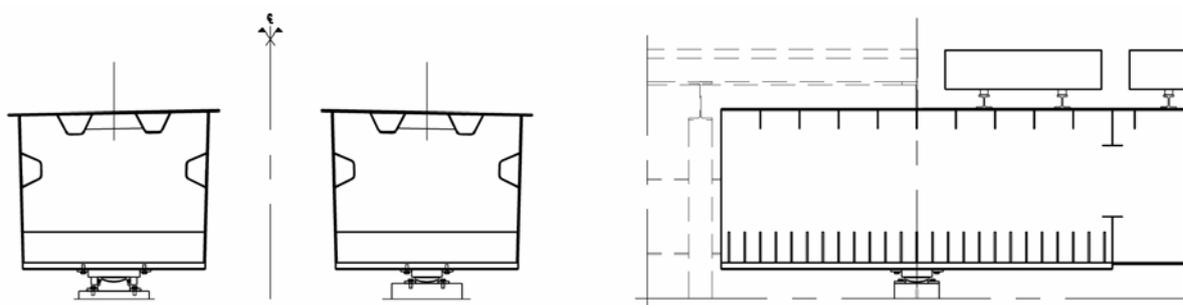


Figura 11-13 Appoggi A10 e A11 all'estremità dell'estensione del cassone ferroviario

11.4.3 Giunto di dilatazione stradale

I giunti di dilatazione stradali sono di tipo modulare con due lati mobili. Attualmente i requisiti di progettazione sono soltanto geometrici, quindi il giunto può essere costruito in modo da far fronte al movimento ULS.

| | | | | |
|---|---|---|-----------|--------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento PS0076_F0_ITA.docx | Rev F0 | Data 20-06-2011 |

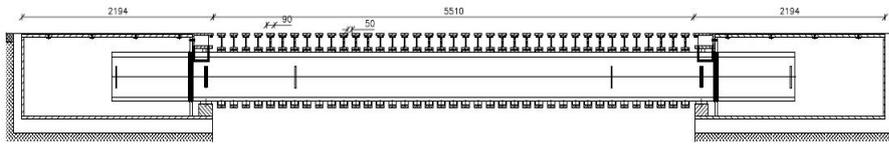


Figura 11-14 Elevatione del giunto dilatazione stradale

11.4.4 Giunti di dilatazione ferroviari

I giunti di dilatazione ferroviari sono di tipo contrago con movimento longitudinale per favorire movimenti longitudinale e rotatori ampi. Il supporto dei giunti di espansione ferroviari sono stati progettati per fare fronte ai requisiti geometrici del giunto di dilatazione. Sono stati eseguiti calcoli manuali riportati in “Relazione di progetto – Strutture di supporto”.

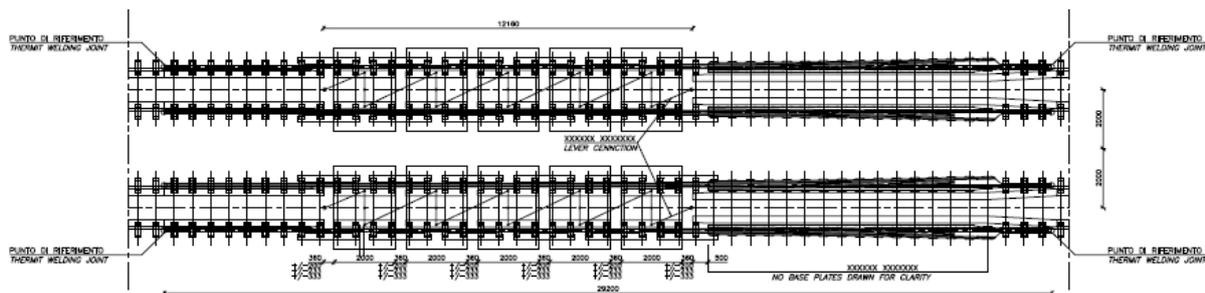


Figura 11-15 Pianta del giunto di dilatazione ferroviario

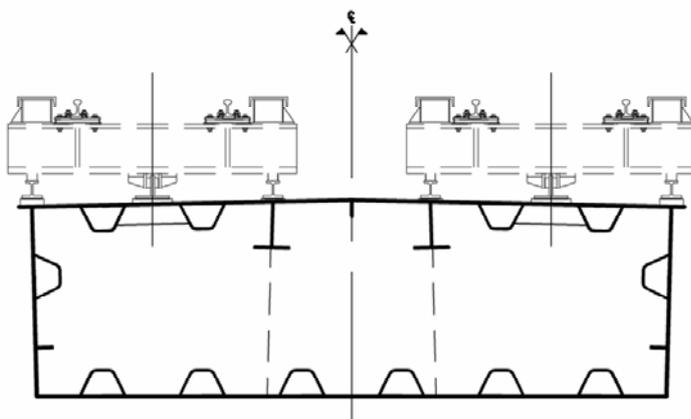


Figura 11-16 Sezione nel giunto di dilatazione ferroviario

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

11.5 Estensione dell'impalcato stradale a incroci/aree di servizio

L'estensione dell'impalcato stradale è stata concepita per far fronte al carico di traffico a incroci e aree di servizio. Sono stati eseguiti calcoli manuali riferiti a estensione e console e riportati in "Relazione di progetto – Strutture di supporto".

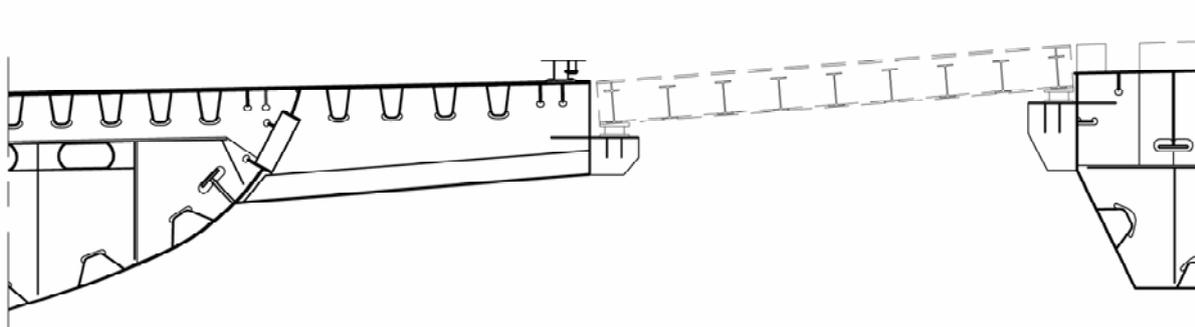


Figura 11-17 Planimetria dell'impalcato stradale esteso all'incrocio

11.6 Supporto delle strutture secondarie

Anche i supporti delle strutture secondarie più comuni sono riportati in "Relazione di progetto – Strutture di supporto".

- Corsia di servizio
- Barriere spartitraffico
- Portale per segnaletica stradale
- Pali per illuminazione
- Pali per catenaria
- Passerella lungo la ferrovia, comprendente barriere spartitraffico

| | | | | |
|---|---|---|---------------------------|--|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 | |

12 Indagini speciali a progetto

Nell'ambito delle indagini speciali a progetto sono state considerate le seguenti situazioni di carico allo stato limite ultimo (ULS).

- Sostituzione dei pendini
- Rottura dei pendini (ALS)

12.1 Sostituzione dei pendini

In merito alla sostituzione dei pendini, si è calcolato con IBDAS l'effetto della rimozione dei pendini con il ponte in funzione e l'effetto sull'impalcato sospeso è stato verificato in ADVERS applicando le forze sezionali calcolate nel modello globale.

Per la verifica della struttura dell'impalcato sospeso durante la sostituzione dei pendini, sono state selezionate alcune posizioni diverse nella campata laterale e principale. Per la campata laterale, sono stati considerati i pendini 3 e 5. Il pendino 3 è situato al centro della campata laterale e il pendino 5 è situato a un'estremità della campata drop-in di 60m. Il pendino 1 agisce da tie-down e richiederà pendini temporanei durante la sostituzione; di conseguenza non è stato esaminato. Sono stati considerati i pendini della campata principale 45 e 60, vedere Figura 12-1. Il risultato dell'analisi è riportato in "Relazione di progetto – Indagini speciali a progetto" per gli elementi strutturali dell'impalcato sospeso.

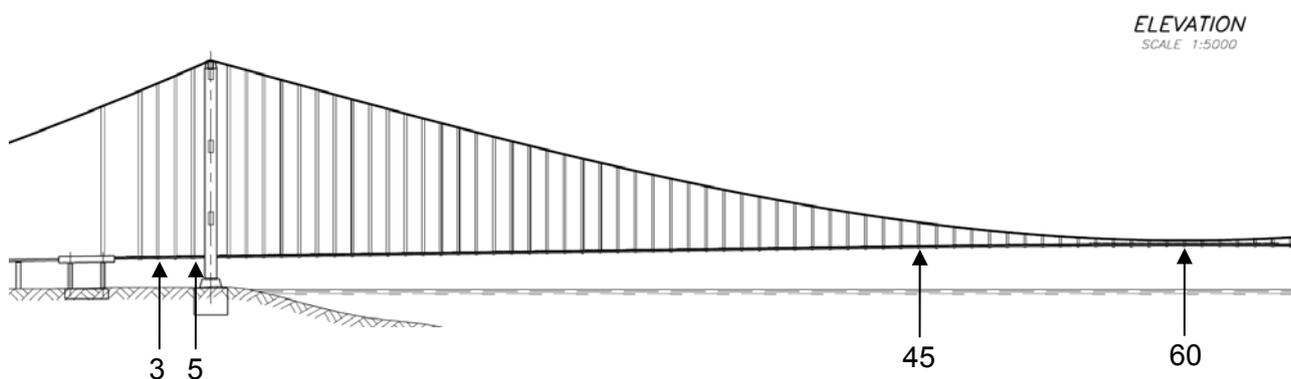


Figura 12-1 Posizione dei pendini selezionati considerati a scopo di sostituzione

L'intervento di sostituzione dei pendini senza utilizzo di pendini temporanei è possibile unicamente nelle posizioni della campata principale, senza compromettere la struttura dell'impalcato e

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | Codice documento <i>PS0076_F0_ITA.docx</i> | Rev <i>F0</i> | Data <i>20-06-2011</i> |

provocare un cedimento strutturale. Poiché anche tale strategia di sostituzione provocherebbe un effetto di carico avverso nei pendini adiacenti, la strategia di sostituzione che si avvale di pendini temporanei è stata ritenuta più fattibile e adottata per il ponte di Messina; fare riferimento a "Relazione di progetto - Sistema di Cavi ANX".

12.2 Rottura dei pendini

L'analisi in IBDAS è stata eseguita nell'area dinamica, supponendo la rottura istantanea e simultanea di entrambi i pendini. L'effetto di tale evento sull'impalcato sospeso è stato verificato con ADVERS utilizzando le forze sezionali calcolate nel modello globale.

Per la verifica della struttura dell'impalcato sospeso durante la rottura dei pendini, sono state selezionate alcune posizioni diverse nella campata laterale e attorno alle torri, vedere Figura 12-2. La posizione è stata scelta per i forti effetti dinamici presenti. Maggiore criticità è rappresentata dal pendino tie-down e dai pendini attorno alla campata drop-in di 60m, in quanto l'ampiezza del cassone aumenterà notevolmente dopo la rottura.

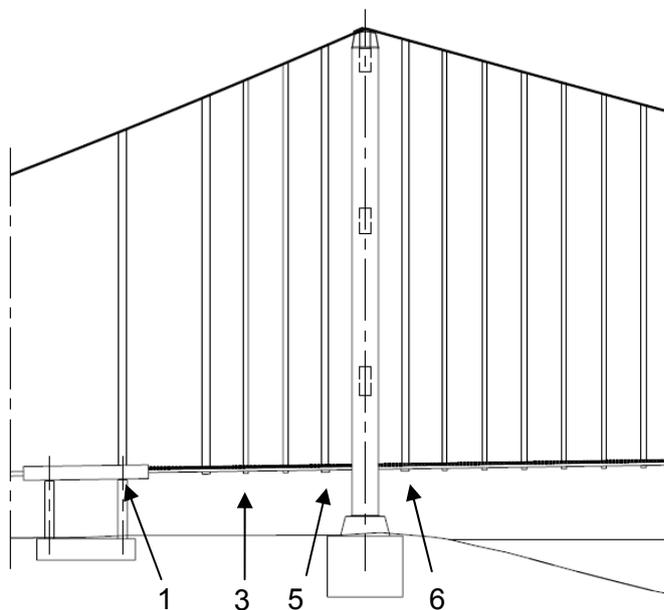


Figura 12-2 Posizione dei pendini considerati nella rottura

In conformità con i Principi Base specifici del progetto, è stata considerata la situazione di carico accidentale, come la rottura dei pendini, utilizzando il fattore di sicurezza parziale su $\gamma_M=1.0$. Il

| | | | | |
|---|---|---|------------------|---------------------------|
|  |  | Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO | | |
| Principi generali della progettazione per l'impalcato sospeso | | <i>Codice documento</i> PS0076_F0_ITA.docx | <i>Rev</i> F0 | <i>Data</i> 20-06-2011 |

risultato dell'analisi è riportato in "Relazione di progetto – Indagini speciali a progetto" per gli elementi strutturali dell'impalcato sospeso.