

POLITECNICO DI MILANO  
Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile  
Orientamento Infrastrutture di Trasporto



STUDIO, PROGETTAZIONE E COLLAUDO DI UN NUOVO  
SISTEMA PER LA REGOLAZIONE ED IL CONTROLLO  
DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA

Relatore: Prof. Giandomenico CASSANO

Tesi di laurea di:

Marco BIAGIONI

Matr. 733441

Stefano VIMERCATI

Matr. 724632

Anno Accademico 2009 – 2010

*Un ringraziamento particolare va anzitutto ad ognuna delle persone con cui abbiamo condiviso il lavoro svolto presso la società Alpha Caesar srl: al prof. Giandomenico Cassano, per le lunghe conversazioni e per i tanti insegnamenti; all'ing. Mauro Cassano, per la disponibilità e l'aiuto che ci ha sempre fornito; al dott. ing. Matteo Curioni, Fabrizio Franchi, Matteo Galli, Valentina Cardinale, Enzo Di Taranto, Dario Redaelli con cui abbiamo condiviso gioie e dolori di questi mesi di lavoro.*

*Ma questa tesi non sarebbe stata quella che è senza la preziosa disponibilità di tutti coloro che attraverso le loro conoscenze, le loro competenze, il loro tempo, ci hanno permesso di portare avanti le nostre attività: il geom. Giorgio Pisani, l'ing. Francesco Abate, il geom. Marco Albanese e il geom. Scabini.*

*Un grazie anche a Mario Biagioni, per il tempo che ci ha dedicato nel correggere le bozze della tesi, e ad Emanuele Bezzi, per le consulenze informatiche.*

*La dedica di questa tesi va ai miei genitori: senza il loro costante incoraggiamento e la leggerezza con cui mi hanno sempre consigliato, questi sei anni non sarebbero stati vissuti con lo stesso entusiasmo.*

*Un pensiero va anche a mio fratello Paolo, esempio per me di passione verso lo studio oltre che mio primo sostenitore nel percorso universitario, e a tutti i miei familiari, che mi hanno sempre supportato.*

*Infine un grazie a tutti gli amici che mi hanno incoraggiato negli studi e con cui ho condiviso i momenti di svago: menzionarli tutti sarebbe praticamente impossibile ma di sicuro ciascuno di loro sa l'importanza che ha avuto.*

*Marco*

*Ringrazio innanzitutto mia madre per aver creduto in me, nonché per avermi sopportato e sostenuto in questi anni di università, non privi di momenti di difficoltà. Ringrazio tutti i miei familiari ed in particolare i miei zii Beppe e Domenico per avermi fatto sentire il loro appoggio e il loro costante incoraggiamento.*

*Ringrazio tutti i miei amici e i miei compagni di università, sempre presenti nei momenti di bisogno.*

*Un pensiero e un grazie infine a chi oggi, in uno dei giorni più belli della mia vita, purtroppo non è più qui con me, ma che mi trasmette costantemente il coraggio e la gioia di vivere: grazie papà.*

*Stefano*

# ABSTRACT

Questa tesi è il risultato di un lavoro sperimentale svolto in collaborazione con l'Alpha Caesar srl e consiste nell'attività di studio e realizzazione di un nuovo sistema per effettuare la regolazione della lunga rotaia saldata (l.r.s.) e per il suo controllo in esercizio.

Fin dall'origine del trasporto ferroviario, per evitare gli effetti derivanti da contrazioni o dilatazioni impedito conseguenti alle variazioni termiche delle rotaie, si è ricorsi alla tecnologia delle giunzioni che permettevano al binario di deformarsi liberamente grazie alla presenza di opportune luci di dilatazione.

Il successivo sviluppo della l.r.s., a partire dagli anni '50, ha permesso di superare le limitazioni operative connesse alla presenza delle giunzioni.

I procedimenti di regolazione, controllo e certificazione della l.r.s. sono in continuo sviluppo: si è passati da tecniche manuali e visive a moderni sistemi informatizzati, come quello brevettato nel 2007 e utilizzato fino ad oggi da RFI.

Il progetto da noi sviluppato si è posto come obiettivo il superamento dei limiti connessi a quest'ultimo, grazie all'utilizzo di un'attrezzatura meno ingombrante e più precisa.

Mediante estensimetri ad alta precisione incollati sulla rotaia e collegati ad una scheda USB, si gestisce sia il processo di regolazione che quello di monitoraggio da un unico PC grazie ad un software appositamente realizzato. Tali misurazioni si basano direttamente sulla valutazione delle sollecitazioni interne alla rotaia.

La tesi è così suddivisa: nei primi tre capitoli si affrontano gli aspetti fondamentali per comprendere le caratteristiche degli acciai per armamento ferroviario, i fenomeni connessi alla termica del binario e la tecnologia della l.r.s.

Nei restanti capitoli verranno invece descritti l'hardware e il software che costituiscono il sistema e le prove realizzate in laboratorio e in sito per collaudare il funzionamento dello stesso.

Le misurazioni effettuate, in fase di verifica e collaudo su campo, confermano la validità dell'approccio teorico utilizzato e costituiscono una base di partenza per ulteriori sviluppi del sistema mediante approfondimenti sperimentali e perfezionamenti successivi.

# ABSTRACT

This thesis is the result of experimental work carried out in collaboration with the Alpha Caesar srl and consists in the study and implementation of a new system for adjustment and operation monitoring of a long welded rail.

Since the beginning of rail, in order to avoid the effects of prevented contraction or expansion, resulting from the thermal drift of the rails, the joint technology has been used, allowing the rail to deform freely due to the presence of appropriate expansion lights.

The subsequent development of the long welded rail, starting from the 50's, has overcome the operational limitations associated with the presence of joints.

Procedures for regulation, control and certification of long welded rails are in constant development: the field has moved from visual and manual techniques to modern computer systems, such as that patented in 2007 and used until now by RFI.

Our project has been developed with the goal of overcoming the limitations associated with such a system through the use of less cumbersome and more precise equipment.

By using high precision strain gages stuck on the rail and connected to a USB card, one can control both the adjustment process and the operation monitoring from a single PC using a dedicated software. These measurements are based directly on the evaluation of internal stresses on the rail.

The thesis is organized as follows: in the first three chapters the fundamentals of steel technology for railway equipment, the phenomena related to the thermal expansion of the track and the technology of the long welded rail are discussed.

In the second part we will describe the hardware and software that build up the system and discuss the results of laboratory and on-site measurements designed to test and validate its operation.

The measurements confirm the validity of the theory used and represent a starting point for further developments of the system through technical improvements and experimental investigations.

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUZIONE .....                                                                                          | 1  |
| 1. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO .....                                                                   | 3  |
| 1.1. CENNI DI CHIMICA E FISICA DELL'ACCIAIO .....                                                           | 4  |
| 1.2. CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI .....                                                                     | 6  |
| 1.3. INFLUENZA DEGLI ELEMENTI DI LEGA.....                                                                  | 8  |
| 1.4. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO E REQUISITI DI CONFORMITA' .....                                      | 12 |
| 1.5. DILATAZIONE TERMICA.....                                                                               | 20 |
| 1.6. SOLLECITAZIONI TERMICHE NELLA ROTAIA.....                                                              | 22 |
| 1.6.1. AZIONE DI COMPRESSIONE E INSTABILITA' .....                                                          | 23 |
| 1.6.2. ROTTURE PER TRAZIONE E FRAGILITA' .....                                                              | 23 |
| 1.6.2.1. IL FENOMENO DELLA TRANSIZIONE.....                                                                 | 25 |
| 1.6.2.2. INFLUENZA DEI COMPONENTI DELL'ACCIAIO SUL COMPORTAMENTO<br>FRAGILE .....                           | 26 |
| 2. TERMICA DEL BINARIO.....                                                                                 | 28 |
| 2.1. DILATAZIONE CON ROTAIA LIBERA .....                                                                    | 29 |
| 2.1.1. TIPI DI ROTAIE E LORO LUNGHEZZE .....                                                                | 30 |
| 2.1.2. TEMPERATURE OPERATIVE DEL BINARIO .....                                                              | 32 |
| 2.1.3. COEFFICIENTI DI DILATAZIONE TERMICA .....                                                            | 33 |
| 2.2. DILATAZIONE COMPLETAMENTE IMPEDITA.....                                                                | 33 |
| 2.3. SITUAZIONE REALE: ROTAIA CON DILATAZIONE PARZIALMENTE IMPEDITA .....                                   | 35 |
| 2.3.1. MASSICCIATA, TRAVERSE E ORGANI DI ATTACCO.....                                                       | 35 |
| 2.3.2. GIUNZIONI E LUCI DI DILATAZIONE.....                                                                 | 39 |
| 2.4. RESISTENZE CHE OSTACOLANO LA DILATAZIONE .....                                                         | 40 |
| 2.4.1. RESISTENZA D'ATTRITO OPPOSTA DALLE GIUNZIONI.....                                                    | 41 |
| 2.4.2. RESISTENZA D'ATTRITO OPPOSTA DALLA MASSICCIATA E DAGLI ORGANI DI<br>ATTACCO.....                     | 42 |
| 2.4.3. LUCI COMPLETAMENTE APERTE O CHIUSE .....                                                             | 45 |
| 2.4.4. LE TABELLE DELLE LUCI DI POSA .....                                                                  | 46 |
| 2.5. CICLO TERMICO DELLA ROTAIA .....                                                                       | 48 |
| 2.5.1. OSSERVAZIONI SUL CICLO TERMICO .....                                                                 | 52 |
| 2.6. LIMITI OPERATIVI DEI GIUNTI .....                                                                      | 53 |
| 3. LA LUNGA ROTAIA SALDATA .....                                                                            | 54 |
| 3.1. DEFINIZIONE DI LUNGA ROTAIA SALDATA.....                                                               | 55 |
| 3.2. REQUISITI E LIMITI REALIZZATIVI DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA.....                                        | 60 |
| 3.2.1. CASI PARTICOLARI .....                                                                               | 62 |
| 3.3. FASI OPERATIVE PER LA COSTITUZIONE DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA.....                                     | 64 |
| 3.3.1. COSTITUZIONE DELLA L.R.S. IN OCCASIONE DI COSTRUZIONE A NUOVO O DI<br>RINNOVAMENTO DEL BINARIO ..... | 64 |
| 3.4. SALDATURA ALLUMINOTERMICA ED ELETTRICA A SCINTILLIO.....                                               | 68 |

|          |                                                                                                                                      |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.1.   | SALDATURA ALLUMINOTERMICA.....                                                                                                       | 68  |
| 3.4.2.   | SALDATURA ELETTRICA A SCINTILLIO .....                                                                                               | 70  |
| 3.5.     | LIMITI E PRESCRIZIONI PER LA REGOLAZIONE DELLE TENSIONI INTERNE DELLE<br>ROTAIE .....                                                | 71  |
| 3.6.     | SISTEMI DI REGOLAZIONE DELLE TENSIONI INTERNE DELLE ROTAIE .....                                                                     | 75  |
| 3.6.1.   | IMPIEGO DEL MORSETTO TENDIROTAIE.....                                                                                                | 76  |
| 3.6.2.   | SISTEMA CON RISCALDAMENTO NATURALE DELLE ROTAIE.....                                                                                 | 82  |
| 3.7.     | NORME PARTICOLARI PER L'IMPIEGO DEL PROCEDIMENTO DI SALDATURA ELETTRICA<br>A SCINTILLIO .....                                        | 83  |
| 3.8.     | RILIEVO, CONTROLLO, REGISTRAZIONE E CERTIFICAZIONE DELLA COSTITUZIONE<br>DELLA L.R.S. ....                                           | 84  |
| 3.9.     | CONTROLLI DEL COMPORTAMENTO DELLE LUNGHE ROTAIE SALDATE<br>IN ESERCIZIO .....                                                        | 89  |
| 3.9.1.   | TRAGUARDI E RILIEVI PER IL CONTROLLO DELLE LUNGHE ROTAIE SALDATE.....                                                                | 90  |
| 3.10.    | VALUTAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI LONGITUDINALI E TRASVERSALI DELLA LUNGA<br>ROTAIA SALDATA.....                                         | 92  |
| 3.11.    | SISTEMA DI MISURA DEGLI SPOSTAMENTI LONGITUDINALI DELLE ROTAIE IN<br>ESERCIZIO .....                                                 | 95  |
| 3.12.    | PRECAUZIONI E PROVVEDIMENTI DA ADOTTARSI NEI PERIODI DI FORTE CALORE E DI<br>FORTE FREDDO PER I BINARI IN LUNGA ROTAIA SALDATA ..... | 97  |
| 4.       | L'INNOVAZIONE: HARDWARE E SOFTWARE.....                                                                                              | 100 |
| 4.1.     | TEORIA PROGETTUALE.....                                                                                                              | 101 |
| 4.2.     | GLI STRAIN GAGES.....                                                                                                                | 104 |
| 4.2.1.   | L'ESTENSIMETRO RESISTIVO .....                                                                                                       | 107 |
| 4.2.2.   | L'ERRORE TERMICO .....                                                                                                               | 109 |
| 4.2.3.   | LO SCORRIMENTO .....                                                                                                                 | 112 |
| 4.2.3.1. | L'EFFETTO DI SCORRIMENTO IN MATERIALI ELASTICI SOTTO CARICO .....                                                                    | 112 |
| 4.2.3.2. | LO SCORRIMENTO DEGLI ESTENSIMETRI.....                                                                                               | 113 |
| 4.2.3.3. | L'EFFETTO DI COMPENSAZIONE .....                                                                                                     | 115 |
| 4.3.     | L'HARDWARE .....                                                                                                                     | 116 |
| 4.4.     | IL SOFTWARE: ALPHA ViBi 1.1.....                                                                                                     | 125 |
| 4.4.1.   | L' ACQUISIZIONE E LA GESTIONE DEI DATI.....                                                                                          | 126 |
| 4.4.2.   | LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO .....                                                                                                    | 127 |
| 4.4.3.   | LA REGOLAZIONE DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA .....                                                                                      | 132 |
| 4.4.3.1. | OPERAZIONI PRELIMINARI .....                                                                                                         | 132 |
| 4.4.3.2. | LA REGOLAZIONE .....                                                                                                                 | 134 |
| 4.4.4.   | IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO .....                                                                                                   | 135 |
| 4.4.5.   | IL SALVATAGGIO DEI DATI.....                                                                                                         | 136 |
| 4.4.6.   | COME FUNZIONA IL SOFTWARE.....                                                                                                       | 137 |

|          |                                                                     |     |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.6.1. | INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE .....                                    | 137 |
| 4.4.6.2. | IL PROGRAMMA.....                                                   | 137 |
| 4.4.6.3. | LE OPERAZIONI PRELIMINARI ALLA CERTIFICAZIONE .....                 | 139 |
| 4.4.6.4. | I DATI IN SERIALE .....                                             | 141 |
| 4.4.6.5. | LA CALIBRAZIONE.....                                                | 142 |
| 4.4.6.6. | LA REGOLAZIONE.....                                                 | 144 |
| 4.4.6.7. | IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO.....                                   | 146 |
| 5.       | LE PROVE IN LABORATORIO .....                                       | 148 |
| 5.1.     | CRITERI DI SCELTA DELL'ESTENSIMETRO .....                           | 149 |
| 5.1.1.   | LEGA UTILIZZATA PER LA GRIGLIA .....                                | 150 |
| 5.1.2.   | MATERIALE DI SUPPORTO .....                                         | 151 |
| 5.1.3.   | CONFIGURAZIONE DELLO STRAIN GAGE .....                              | 152 |
| 5.1.4.   | RANGE OPERATIVO DI TEMPERATURE .....                                | 154 |
| 5.1.5.   | LUNGHEZZA OPERATIVA .....                                           | 154 |
| 5.1.6.   | OPZIONI DELL'ESTENSIMETRO .....                                     | 155 |
| 5.2.     | ESTENSIMETRI SCELTI .....                                           | 156 |
| 5.3.     | CONFIGURAZIONE CIRCUITALE .....                                     | 157 |
| 5.4.     | PREPARAZIONE DELLA SUPERFICIE E INCOLLAGGIO DELL'ESTENSIMETRO ..... | 158 |
| 5.4.1.   | SGRASSAGGIO .....                                                   | 160 |
| 5.4.2.   | CARTEGGIO .....                                                     | 161 |
| 5.4.3.   | TRACCIATURA PER L'ORIENTAMENTO DELL'ESTENSIMETRO.....               | 163 |
| 5.4.4.   | CONDIZIONAMENTO .....                                               | 164 |
| 5.4.5.   | NEUTRALIZZAZIONE.....                                               | 164 |
| 5.4.6.   | INCOLLAGGIO .....                                                   | 165 |
| 5.5.     | IL CABLAGGIO .....                                                  | 168 |
| 5.6.     | RISULTATI ATTESI.....                                               | 172 |
| 5.7.     | SVOLGIMENTO DELLE PROVE.....                                        | 176 |
| 5.7.1.   | RISULTATI DELLE PROVE.....                                          | 177 |
| 5.7.1.1. | PROVA CON DUE ESTENSIMETRI ATTIVI .....                             | 177 |
| 5.7.1.2. | PROVA CON UN SOLO ESTENSIMETRO ATTIVO .....                         | 181 |
| 6.       | LA PROVA IN SITO.....                                               | 183 |
| 6.1.     | DESCRIZIONE DEL SITO DELLA PROVA.....                               | 184 |
| 6.2.     | PECULIARITA' DEL SISTEMA PER LA PROVA IN SITO.....                  | 186 |
| 6.2.1.   | SISTEMA DI ALIMENTAZIONE .....                                      | 186 |
| 6.2.1.1. | POLARIZZAZIONE INVERSA.....                                         | 187 |
| 6.2.2.   | PREPARAZIONE DEL CIRCUITO E CABLAGGIO .....                         | 189 |
| 6.3.     | ESECUZIONE DELLA PROVA.....                                         | 191 |
| 6.3.1.   | INCOLLAGGIO .....                                                   | 191 |

|          |                                                                 |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.2.   | CALCOLI PRELIMINARI .....                                       | 193 |
| 6.3.3.   | TAGLIO DELLA ROTAIA.....                                        | 194 |
| 6.3.4.   | OPERAZIONI DI LIBERAZIONE DELLA ROTAIA.....                     | 197 |
| 6.3.5.   | TIRO CON I MARTINETTI TENDIROTAIE.....                          | 198 |
| 6.4.     | RISULTATI DELLA PROVA.....                                      | 199 |
| 6.5.     | OPERAZIONI CONCLUSIVE.....                                      | 204 |
| 6.6.     | PROVA PER IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO.....                     | 206 |
| 7.       | IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO .....                              | 208 |
| 7.1.     | MONITORAGGIO DELLE SOLLECITAZIONI DI TRAZIONE.....              | 209 |
| 7.2.     | MONITORAGGIO DELLE COMPRESSIONI E FENOMENO DI SLINEAMENTO ..... | 211 |
| 7.2.1.   | ANALISI DI INCIDENTALITA' .....                                 | 214 |
| 7.2.1.1. | INCIDENTI IMPUTABILI ALLO SLINEAMENTO.....                      | 219 |
| 7.3.     | L'APPLICAZIONE PROGETTUALE.....                                 | 221 |
| 7.3.1.   | ANALISI DI INSTABILITA'.....                                    | 221 |
| 7.3.1.1. | CARICO CRITICO SECONDO EULERO.....                              | 221 |
| 7.3.1.2. | MODELLIZZAZIONE STRUTTURALE DEL BINARIO .....                   | 223 |
| 7.3.1.3. | DEFINIZIONE DELLO SFORZO LIMITE.....                            | 226 |
| 7.3.2.   | IL MONITORAGGIO .....                                           | 227 |
| 8.       | CONCLUSIONI.....                                                | 231 |
|          | BIBLIOGRAFIA .....                                              | 234 |

|                                                                                                               |                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Prova di durezza.....                                                                            | 16                                      |    |
| Figura 1.2 – Provino metallico a sezione circolare per prova di trazione .....                                | 17                                      |    |
| Figura 1.3 – Curva di trazione per acciaio dolce.....                                                         | 18                                      |    |
| Figura 1.4 – a) Frattura fragile; b) Frattura duttile; c) Frattura completamente duttile .....                | 24                                      |    |
| Figura 2.1 – Massicciata ferroviaria .....                                                                    | 36                                      |    |
| Figura 2.2 – Traverse in c.a.p.tipo MK. 60.....                                                               | 37                                      |    |
| Figura 2.3 – Attacco diretto rotaia – traversa .....                                                          | 38                                      |    |
| Figura 2.4 – Traversa cementizia FS; attacco indiretto per rotaia 60 UNI.....                                 | 39                                      |    |
| Figura 2.5 – Ciclo termico della rotaia.....                                                                  | 52                                      |    |
| Figura 3.1 – Tratto centrale immobile della lunga rotaia saldata .....                                        | 55                                      |    |
| Figura 3.2 – Distanza tra le estremità delle traverse e lo spigolo superiore della massicciata .....          | 61                                      |    |
| Figura 3.3 – Collocazione punto singolare in l.r.s. ....                                                      | 63                                      |    |
| Figura 3.4 – Punto singolare collocato al di fuori della l.r.s. ....                                          | 63                                      |    |
| Figura 3.5 – Collocazione scambi con cuori di rotaia assiemati con normali chiavarde.....                     | 63                                      |    |
| Figura 3.6 – Schema delle diverse zone caratterizzanti la saldatura alluminotermica delle rotaie.....         | 70                                      |    |
| Figura 3.7 – Salto termico .....                                                                              | 73                                      |    |
| Figura 3.8 – Temperatura media convenzionale .....                                                            | 74                                      |    |
| Figura 3.9 – Effetto di aumento – diminuzione di temperatura .....                                            | 74                                      |    |
| Figura 3.10 – Punto di separazione tra il fenomeno di dilatazione e il fenomeno di contrazione.....           | 75                                      |    |
| Figura 3.11- Riferimenti di riscontro in corrispondenza dei punti fissi .....                                 | 77                                      |    |
| Figura 3.12 – Rullo di scorrimento perpendicolare all’asse longitudinale della rotaia .....                   | 78                                      |    |
| Figura 3.13 – Esempio di sezione di 460 m suddivisa in quarti.....                                            | 79                                      |    |
| Figura 3.14 – Ripartizione di un allungamento di 40 mm .....                                                  | 80                                      |    |
| Figura 3.15 – Macchina saldatrice semovente strada - rotaia .....                                             | 83                                      |    |
| Figura 3.16 – Congruenza delle marcature.....                                                                 | 84                                      |    |
| Figura 3.17 – Terminali da applicare alle rotaie                                                              | Figura 3.18 – Unità di rilevamento..... | 86 |
| Figura 3.19 – Particolare del terminale .....                                                                 | 88                                      |    |
| Figura 3.20 – Certificazione automatica fornita dal software .....                                            | 88                                      |    |
| Figura 3.21 – Coppie di traguardi distanziate tra loro 120 m.....                                             | 90                                      |    |
| Figura 3.22 – Esempio di disposizione dei traguardi .....                                                     | 91                                      |    |
| Figura 3.23 – Dispositivo di monitoraggio degli spostamenti .....                                             | 96                                      |    |
| Figura 3.24 – Similitudine dei triangoli.....                                                                 | 96                                      |    |
| Figura 4.1 – Range di comportamento elastico di un materiale.....                                             | 103                                     |    |
| Figura 4.2 – Allungamento di un corpo elastico soggetto ad una forza di trazione.....                         | 104                                     |    |
| Figura 4.3 – Filo metallico di lunghezza L sottoposto ad un carico assiale T .....                            | 105                                     |    |
| Figura 4.4 – Estensimetri a filo .....                                                                        | 108                                     |    |
| Figura 4.5 – Andamento dell’errore termico in funzione della temperatura .....                                | 111                                     |    |
| Figura 4.6 – Effetto dello scorrimento elastico .....                                                         | 113                                     |    |
| Figura 4.7 – Valore misurato dall’estensimetro dopo il caricamento e lo scaricamento spontaneo del pezzo..... | 114                                     |    |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Figura 4.8 – Definizione dell’ansa di ritorno dell’estensimetro (griglia e dettaglio)</i> .....    | 114 |
| <i>Figura 4.9 – Diagramma idealizzato della compensazione dello scorrimento</i> .....                 | 115 |
| <i>Figura 4.10 – Il protocollo RS232</i> .....                                                        | 118 |
| <i>Figura 4.11 – Protocollo USB</i> .....                                                             | 119 |
| <i>Figura 4.12 – Diodo led</i> .....                                                                  | 119 |
| <i>Figura 4.13 – Schema elettrico LX. 1741</i> .....                                                  | 120 |
| <i>Figura 4.14 – Scheda LX. 1741 montata</i> .....                                                    | 123 |
| <i>Figura 4.15 – Schema elettrico alimentatore LX. 1701</i> .....                                     | 124 |
| <i>Figura 4.16 – Calibrazione del modello per la regolazione</i> .....                                | 128 |
| <i>Figura 4.17 – Errore termico in funzione della temperatura</i> .....                               | 130 |
| <i>Figura 4.18 – Calibrazione del modello per monitoraggio in esercizio</i> .....                     | 131 |
| <i>Figura 4.19 – Videata iniziale del software</i> .....                                              | 137 |
| <i>Figura 4.20 – Menu certificazione</i> .....                                                        | 139 |
| <i>Figura 4.21 – Videata del menu certificazione</i> .....                                            | 139 |
| <i>Figura 4.22 – Risultati delle operazioni preliminari alla regolazione; comando calcola</i> .....   | 140 |
| <i>Figura 4.23 – Menu apriseriale</i> .....                                                           | 141 |
| <i>Figura 4.24 – Calibrazione del software</i> .....                                                  | 142 |
| <i>Figura 4.25 – Sensori utilizzati di default dal software per la calibrazione</i> .....             | 143 |
| <i>Figura 4.26 – Sezione della videata di stampa dello stato tensionale</i> .....                     | 143 |
| <i>Figura 4.27 – Comando fine regolazione</i> .....                                                   | 144 |
| <i>Figura 4.28 – Certificazione della regolazione</i> .....                                           | 145 |
| <i>Figura 4.29 – Form di monitoraggio in esercizio</i> .....                                          | 146 |
| <i>Figura 4.30 – Menu monitoraggio</i> .....                                                          | 146 |
| <i>Figura 4.31 – Segnale di pericolo</i> .....                                                        | 147 |
| <i>Figura 4.32 – Schema di disposizione dei sensori per il monitoraggio in esercizio</i> .....        | 147 |
| <i>Figura 5.1 – Estensimetro con griglie a 90°</i> .....                                              | 153 |
| <i>Figura 5.2 – Rosette 0°/60°/120° e 0°/45°/90° in configurazione circolare e rettangolare</i> ..... | 153 |
| <i>Figura 5.3 – Lunghezza attiva della griglia</i> .....                                              | 154 |
| <i>Figura 5.4 – Errore di misurazione di un estensimetro troppo lungo</i> .....                       | 155 |
| <i>Figura 5.5 – Estensimetro L2A-06-250LW-350</i> .....                                               | 156 |
| <i>Figura 5.6 – Estensimetro C2A-06-250LW-350</i> .....                                               | 157 |
| <i>Figura 5.7 – Schema elettrico del circuito a ponte di Wheastone</i> .....                          | 157 |
| <i>Figura 5.8 – Bombola CSM-2 sgrassante</i> .....                                                    | 161 |
| <i>Figura 5.9 – Applicazione del CMS-2</i> .....                                                      | 161 |
| <i>Figura 5.10 – Carteggio a secco</i> .....                                                          | 162 |
| <i>Figura 5.11 – Particolare del condizionatore e carteggio umido</i> .....                           | 163 |
| <i>Figura 5.12 – Tracciatura delle linee di riferimento</i> .....                                     | 163 |
| <i>Figura 5.13 – Applicazione del condizionatore e pulitura del provino</i> .....                     | 164 |
| <i>Figura 5.14 – Neutralizzatore</i> .....                                                            | 165 |
| <i>Figura 5.15 – Catalizzatore</i> .....                                                              | 166 |

|                                                                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Figura 5.16 – Particolare dell’adesivo e applicazione dell’adesivo sulla coppia di estensimetri.....</i> | <i>166</i> |
| <i>Figura 5.17 – Azione di pressione sopra l’estensimetro .....</i>                                         | <i>167</i> |
| <i>Figura 5.18 – Coppia di estensimetri incollata al provino .....</i>                                      | <i>168</i> |
| <i>Figura 5.19 – Configurazione a ponte con un solo estensimetro attivo e con due estensimetri attivi..</i> | <i>169</i> |
| <i>Figura 5.20 – Configurazione circuitale a ponte.....</i>                                                 | <i>170</i> |
| <i>Figura 5.21 – Particolare dei morsetti mammut e insieme dei componenti del sistema utilizzato.....</i>   | <i>172</i> |
| <i>Figura 5.22 – Relazione lineare tra carico applicato e variazione di voltaggio rilevata.....</i>         | <i>174</i> |
| <i>Figura 5.23 – Azione di flessione sul provino.....</i>                                                   | <i>176</i> |
| <i>Figura 5.24 – Grafico degli esiti della prova con due estensimetri attivi .....</i>                      | <i>179</i> |
| <i>Figura 5.25 – Grafico dell’esito della prova con un solo estensimetro attivo .....</i>                   | <i>182</i> |
| <i>Figura 6.1 – Stazione di Voghera e fascio binari.....</i>                                                | <i>184</i> |
| <i>Figura 6.2 – Binario di prova .....</i>                                                                  | <i>185</i> |
| <i>Figura 6.3 – Particolare delle traverse in ca.p. e dell’attacco tipo k del binario di prova .....</i>    | <i>185</i> |
| <i>Figura 6.4 – Diodo zener (5 Volt, 1 Watt) e simbolo elettrico.....</i>                                   | <i>187</i> |
| <i>Figura 6.5 – Schema elettrico del circuito di alimentazione con diodo zener .....</i>                    | <i>188</i> |
| <i>Figura 6.6 – Circuito di alimentazione.....</i>                                                          | <i>188</i> |
| <i>Figura 6.7 – Particolare della presa jack, del led e dell’ingresso USB sul lato del contenitore.....</i> | <i>189</i> |
| <i>Figura 6.8 – Contenitore in metallo con i componenti hardware collegati.....</i>                         | <i>190</i> |
| <i>Figura 6.9 – Contenitore a fine realizzazione .....</i>                                                  | <i>190</i> |
| <i>Figura 6.10 – Preparazione della superficie del gambo.....</i>                                           | <i>192</i> |
| <i>Figura 6.11 – Sgrassaggio della superficie e incollaggio degli estensimetri.....</i>                     | <i>192</i> |
| <i>Figura 6.12 – Estensimetri incollati al gambo della rotaia .....</i>                                     | <i>192</i> |
| <i>Figura 6.13 – Sonda termometrica applicata alla rotaia.....</i>                                          | <i>193</i> |
| <i>Figura 6.14 – Calcoli preliminari eseguiti dal software .....</i>                                        | <i>194</i> |
| <i>Figura 6.15 – Segarotaie Stumec – Geismar tipo 4205.....</i>                                             | <i>195</i> |
| <i>Figura 6.16 – Particolare del morsetto e segarotaie pronta all’uso.....</i>                              | <i>195</i> |
| <i>Figura 6.17 – Realizzazione del taglio della rotaia .....</i>                                            | <i>196</i> |
| <i>Figura 6.18 – Allentamento degli organi di attacco.....</i>                                              | <i>197</i> |
| <i>Figura 6.19 – Morsetto tendirotaie della Thermit Italiana s.r.l. ....</i>                                | <i>198</i> |
| <i>Figura 6.20 – Morsetto tendirotaie della Thermit Italiana s.r.l. e particolare del manometro.....</i>    | <i>198</i> |
| <i>Figura 6.21 – Sollecitazione interna rilevata in prossimità del giunto di regolazione.....</i>           | <i>202</i> |
| <i>Figura 6.22 – Sollecitazione interna rilevata prima del punto fisso .....</i>                            | <i>202</i> |
| <i>Figura 6.23 – Videata di fine regolazione di Alpha ViBi 1.1 .....</i>                                    | <i>203</i> |
| <i>Figura 6.24 – Operazione di saldatura alluminotermica .....</i>                                          | <i>205</i> |
| <i>Figura 6.25 – Rimozione dei residui di saldatura .....</i>                                               | <i>205</i> |
| <i>Figura 6.26 – Operazione di molatura .....</i>                                                           | <i>206</i> |
| <i>Figura 6.27 – Riscaldamento della rotaia con cannello.....</i>                                           | <i>206</i> |
| <i>Figura 7.1 – Binario slineato.....</i>                                                                   | <i>211</i> |
| <i>Figura 7.2 – Estensione dell’infrastruttura ferroviaria nazionale.....</i>                               | <i>214</i> |
| <i>Figura 7.3 – Andamento dell’incidentalità nel periodo 1992 – 2009 .....</i>                              | <i>217</i> |

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Figura 7.4 – Andamento degli incidenti nel periodo 1992 - 2008 suddiviso per singole tipologie.....</i> | <i>217</i> |
| <i>Figura 7.5 – Andamento degli incidenti nel periodo 2005 – 2008 [miliardi di treni x km].....</i>        | <i>219</i> |
| <i>Figura 7.6 – Deragliamento del 656 a Serravalle.....</i>                                                | <i>220</i> |
| <i>Figura 7.7 – NG 150 .....</i>                                                                           | <i>227</i> |
| <i>Figura 7.8 – SG 250 .....</i>                                                                           | <i>228</i> |
| <i>Figura 7.9 – Schemi di posa delle centraline di acquisizione dati.....</i>                              | <i>229</i> |

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabella 1.1 – Classificazione degli acciai secondo la normativa UNI EN 10027 .....                                               | 6   |
| Tabella 1.2 – Gamma produttiva degli acciai per rotaie della Lucchini S.p.A. ....                                                | 9   |
| Tabella 1.3 – Qualità dell'acciaio per rotaie secondo la normativa UNI EN 13674.....                                             | 13  |
| Tabella 1.4 – Contenuto di idrogeno in parti per milione negli acciai per rotaie secondo la UNI EN<br>13674 .....                | 14  |
| Tabella 1.5 – Composizione chimica degli acciai per rotaie secondo la UNI EN 13674 .....                                         | 15  |
| Tabella 1.6 – Requisiti di durezza secondo la UNI EN 13674.....                                                                  | 17  |
| Tabella 2.1 – Variazione di lunghezza delle rotaie per un salto di temperatura di 1°C.....                                       | 31  |
| Tabella 2.2 – Forza di trazione o compressione per i principali tipi di armamento per un salto termico<br>di 1°C.....            | 34  |
| Tabella 2.3 – $\Delta T$ necessario per vincere la resistenza d'attrito della giunzione.....                                     | 42  |
| Tabella 2.4 – Resistenze massime degli appoggi per ciascuna tipologia di rotaia.....                                             | 44  |
| Tabella 2.5 – $\Delta T$ [°C] per superare la resistenza degli appoggi .....                                                     | 44  |
| Tabella 2.6 – Variazione di lunghezza [mm] dalla condizione di riposo fino al superamento della<br>resistenza degli appoggi..... | 45  |
| Tabella 2.7 – Temperatura di posa a luce 0 per binari di tipo I.....                                                             | 47  |
| Tabella 2.8 – Temperatura di posa a luce 0 per binari di tipo II .....                                                           | 48  |
| Tabella 3.1 – Lunghezza minima del tratto di binario da regolare.....                                                            | 60  |
| Tabella 3.2 – Incrementi di temperatura limite per interventi di rinnovamento .....                                              | 66  |
| Tabella 3.3 – Temperatura limite $T_1$ .....                                                                                     | 71  |
| Tabella 3.4 – Lunghezza massima della sezione da regolare .....                                                                  | 76  |
| Tabella 3.5 – Limiti di cautela delle temperature per la programmazione dei lavori .....                                         | 99  |
| Tabella 5.1 – Risultati attesi con configurazione circuitale a due estensimetri attivi .....                                     | 173 |
| Tabella 5.2 – Risultati attesi con configurazione circuitale ad un solo estensimetro attivo .....                                | 175 |
| Tabella 5.3 – Esito della prova con due estensimetri attivi .....                                                                | 178 |
| Tabella 5.4 – Esito della prova con un solo estensimetro attivo .....                                                            | 181 |
| Tabella 6.1 – Parametri di calibrazione del modello analitico .....                                                              | 199 |
| Tabella 6.2 – Dati rilevati relativi all'estensimetro in corrispondenza del giunto di regolazione .....                          | 200 |
| Tabella 6.3 – Dati relativi all'estensimetro posto prima del punto fisso .....                                                   | 201 |
| Tabella 6.4 – Riassunto dei risultati della prova .....                                                                          | 204 |
| Tabella 7.1 – Traffico anno 2009 [treni x km].....                                                                               | 215 |
| Tabella 7.2 – Confronto dei dati di traffico sulla rete RFI tra il 2008 e il 2009 .....                                          | 216 |
| Tabella 7.3 – Andamento degli incidenti nel periodo 2005 - 2008 .....                                                            | 218 |

# INTRODUZIONE

Lo sviluppo tecnologico nel settore del trasporto ferroviario, negli ultimi decenni, ha comportato da un lato il miglioramento dei convogli e del materiale rotabile, con la realizzazione di treni sempre più veloci e sicuri, e dall'altro la necessità di disporre di infrastrutture adeguate ai nuovi standard operativi.

In questo contesto sono nate in Italia – negli ultimi anni (ad eccezione della direttissima Bologna – Firenze, realizzata negli anni '60) ed in ritardo rispetto ad altri Paesi della Comunità Europea (Francia, Inghilterra ecc) – le linee ad Alta Velocità e ad Alta Capacità.

I servizi offerti all'utenza diventano così sempre più efficienti ed efficaci, con prestazioni dei convogli spinte al limite. Ne consegue che i problemi legati al controllo dell'esercizio e alla manutenzione dell'infrastruttura assumono una rilevanza notevole per la sicurezza della circolazione.

Tra questi emerge il problema della termica del binario: a seguito delle variazioni di temperatura delle rotaie, si instaura al loro interno uno stato tensionale imputabile all'impedita dilatazione o contrazione della rotaia stessa. Ciò comporta, per escursioni termiche particolarmente elevate, la rottura per trazione o lo slineamento del binario per compressione.

A partire dagli anni '50, tale problema è stato affrontato mediante l'utilizzo della lunga rotaia saldata, la quale permette di ottenere la continuità del binario, per tratti di alcuni chilometri, mediante la saldatura di più rotaie successive. La realizzazione e il successivo controllo della lunga rotaia saldata sono effettuati secondo quanto contenuto nell'Istruzione Tecnica RFI TC AR IT AR 07 003 A.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è studiare, sviluppare e collaudare un nuovo sistema per la regolazione della lunga rotaia saldata, che permetta di migliorare il livello di precisione delle operazioni e semplificare l'attrezzatura e le procedure utilizzate, rispettando le prescrizioni contenute nell'Istruzione Tecnica RFI.

# 1. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO

In questo primo capitolo viene fornita una panoramica sul mondo degli acciai, in particolare su quelli utilizzati per l'armamento ferroviario, e sulle problematiche connesse alle variazioni di temperatura delle rotaie. Lo scopo è quello di chiarire i meccanismi di base che regolano il comportamento di queste leghe, per comprendere meglio i fenomeni, descritti nei successivi capitoli, che interessano direttamente i binari delle infrastrutture ferroviarie.

## 1.1. CENNI DI CHIMICA E FISICA DELL'ACCIAIO

Acciaio è il nome attribuito ad una lega di ferro contenente carbonio in percentuale non superiore al 2,11 %.

Il complesso di proprietà che caratterizzano l'acciaio, così come tutti gli altri metalli, è collegato alla sua struttura cristallina. Nei solidi cristallini gli atomi sono disposti nello spazio con regolarità in modo da costituire un reticolo tridimensionale; la struttura e le proprietà che ne derivano dipendono principalmente dalla natura dei legami esistenti tra gli atomi.

Lo studio della fisica dei materiali ha accertato che esistono solo 14 modi per disporre gli atomi in modo ordinato secondo una geometria ripetuta nello spazio. La maggior parte dei metalli cristallizza nei tipi di struttura a più alta simmetria che sono anche quelli a maggior compattezza: cubica a corpo centrato (*ccc*), cubica a facce centrate (*cfc*).

Il ferro puro, principale elemento di lega dell'acciaio, esiste in tre modificazioni allotropiche:

- *ferro  $\delta$*  a reticolo *ccc* stabile tra 1538°C e 1394°C;
- *ferro  $\gamma$*  a reticolo *cfc* stabile nell'intervallo 1394°C – 912°C;
- *ferro  $\alpha$*  a reticolo *ccc* stabile sotto i 912°C.

In funzione dei trattamenti termici ai quali viene sottoposto l'acciaio, le principali strutture che esso può assumere le seguenti:

- *Austenite*: soluzione solida primaria che il *ferro  $\gamma$*  forma con la maggior parte dei metalli e con un certo numero di elementi non metallici. L'austenite non è una fase perfettamente omogenea: vi sono infatti delle eterogeneità dovute sia alle segregazioni che si manifestano nel periodo di cristallizzazione a seguito della non uniforme diffusione degli elementi, sia alle tensioni che si generano al raffreddamento e che producono zone ricche d'imperfezioni in cui lo stato di sollecitazione è elevato; per diffusione, gli atomi di carbonio possono

accumularsi in queste zone. La dimensione del grano austenitico, che dipende dal trattamento termico subito, ha influenza sulla struttura, e conseguentemente sulle proprietà, sia degli acciai al carbonio che degli acciai legati.

- Ferrite: soluzione solida formata da molti metalli e metalloidi, in particolare dal carbonio, col *ferro  $\alpha$* . La trasformazione allotropica da austenite a ferrite avviene secondo un procedimento di nucleazione e di accrescimento, che si origina preferenzialmente ai bordi dei cristalli. La forma, le dimensioni e i bordi dei grani di ferrite non corrispondono però assolutamente a quelli dell'austenite, in quanto la trasformazione è accompagnata da un apprezzabile affinamento del grano.
- Perlite: trasformando isotermicamente un austenite omogenea di composizione autettoidica ad una temperatura elevata, la struttura che si ottiene è quella della perlite lamellare. La perlite, eutettoide del sistema binario ferro-cementite, è un aggregato di  $Fe_3C$  e di soluzione solida  $\alpha$  che al microscopio risulta costituito da grani detti colonie, ciascuna delle quali è un insieme lamellare. La formazione di perlite è un esempio di trasformazione per nucleazione ed accrescimento.
- Cementite: composto interstiziale, con il 6,69% in peso di carbonio.
- Bainite: è un aggregato di ferrite e di cementite a forme aciculari. La diffusione degli atomi di carbonio a temperature intermedie è ancora possibile ma i carburi che si formano sono costituiti da ammassi sempre più fini, non visibili al microscopio ottico.
- Martensite: strutture aciculari ottenute per tempra degli acciai. Con tale trattamento si ottiene una durezza molto elevata dei materiali. Il fenomeno della formazione della martensite si differenzia dalle altre reazioni allo stato solido per il fatto che non procede per nucleazione ed accrescimento ed inoltre non coinvolge alcuna diffusione di atomi.

## 1.2. CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI

Una semplice e razionale classificazione dei numerosi tipi di acciaio prodotti, spesso assai diversi gli uni dagli altri, non è facile in quanto essa può essere fatta in base a criteri sostanzialmente differenti.

Le norme unificate per la designazione degli acciai, stabilite dalla legislazione italiana, sono il recepimento delle normative europee del settore, in particolare della UNI EN 10027:2006. Tale normativa classifica gli acciai secondo due gruppi principali:

- gruppo 1: acciai designati in base al loro impiego e alle loro caratteristiche meccaniche o fisiche;
- gruppo 2: acciai designati in base alla loro composizione chimica.

Tabella 1.1 – Classificazione degli acciai secondo la normativa UNI EN 10027

| Simbolo iniziale                                                                                    | Simbolo indicante l'impiego  | Caratteristiche meccaniche o fisiche                                              |                                                                    | Ulteriore simbolo                                                     |  |                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Gruppo 1 acciai designati in base al loro impiego ed alle loro caratteristiche meccaniche o fisiche | G = acciaio per getti        | S = impieghi strutturali                                                          | Rs minimo (Mpa)                                                    |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | P = impieghi sotto pressione                                                      |                                                                    |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | L = tubi                                                                          |                                                                    |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | E = costruzioni meccaniche                                                        |                                                                    |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | B = per cemento armato                                                            | Rs caratteristico (Mpa)                                            |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | Y = per cemento armato precompresso                                               | Rm minimo (Mpa)                                                    |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | R = rotaie                                                                        | Rm minimo (Mpa)                                                    |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | H = prodotti piani laminati a freddo ad alta resistenza, per imbutitura a freddo  | Rs minimo (Mpa)                                                    |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   | T                                                                  | Rm minimo (Mpa)                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | D = prodotti piani per formatura a freddo                                         | C= laminati a freddo                                               |                                                                       |  | due simboli caratterizzanti l'acciaio (da definire a cura dell'Organismo responsabile) |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   | D= laminati a caldo destinati direttamente alla formatura a freddo |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   | X= stato di laminazione non specificato                            |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | TH = banda nera, stagnata e cromata (per imballaggi) prodotti a riduzione diretta | durezza HR 30 Tm                                                   |                                                                       |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              | TH = banda nera, stagnata e cromata (per imballaggi) prodotti a doppia riduzione  | Rs nominale (Mpa)                                                  |                                                                       |  |                                                                                        |
| M = acciai magnetici                                                                                | 100 x perdita specifica W/Kg | -                                                                                 | 100 x spessore prodotto                                            | A = lamiera a grani orientati                                         |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   |                                                                    | D = lamiera semifinita (senza ricottura finale) di acciaio non legato |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   |                                                                    | E = lamiera semifinita (senza ricottura finale) di acciaio legato     |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   |                                                                    | N = lamiera a grani orientati normali                                 |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   |                                                                    | S = lamiera a grani orientati a bassa perdita                         |  |                                                                                        |
|                                                                                                     |                              |                                                                                   |                                                                    | P = lamiera a grani orientati ad elevata permeabilità                 |  |                                                                                        |

## 1. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO

|                                                                         | Tipo di acciaio                                                                                                                                                                     | Composizione (le concentrazioni si intendono medie) |                                                                         |                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gruppo 2<br>acciai designati<br>in base alla<br>composizione<br>chimica | Acciai non legati con tenore di manganese < 1%                                                                                                                                      | C                                                   | 100 x % C                                                               |                                                                                                                                                                                                              |
|                                                                         | Acciai non legati con tenore di manganese > 1%<br>+<br>Acciai non legati per lavorazioni meccaniche ad alta velocità (automatici)<br>+<br>Acciai legati con elementi in tenore < 5% | 100 x % C                                           | Simboli degli elementi presenti in ordine decrescente di concentrazione | Concentrazione degli elementi separata da un trattino moltiplicate per il rispettivo fattore<br>4x → Cr, Co, Mn, Ni, Si, W<br>10x → Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr<br>100x → Ce, N, P, S<br>1000x → B |
|                                                                         | Acciai legati (tenore di almeno un elemento > 5%)                                                                                                                                   | X                                                   | 100 x % C                                                               | Simboli degli elementi presenti in ordine decrescente di concentrazione<br>Concentrazione degli elementi separata da un trattino                                                                             |
|                                                                         | Acciai rapidi                                                                                                                                                                       | HB                                                  | % W - % Mo - % V - % Co                                                 |                                                                                                                                                                                                              |

Tale sistema di classificazione però non è sempre mantenuto in tutta la trattazione dei problemi riguardanti gli acciai. D'altra parte, poiché sono diversi e numerosi i punti di vista secondo i quali gli acciai possono essere considerati (come per esempio composizione chimica, posizione degli elementi aggiunti nel sistema periodico di Mendelejeff, tipo dei diagrammi di stato delle leghe con il ferro, proprietà fisiche e meccaniche e applicazioni alle quali sono destinati), è evidente che non è possibile istituire una classificazione degli acciai che tenga conto di tutto.

Poiché, ai fini pratici è indispensabile riferirsi alle applicazioni, verrà considerata la seguente classificazione generale con la divisione in cinque grandi categorie:

- *acciai da costruzione ad uso generale*<sup>1</sup>: destinati a sopportare in opera sollecitazioni statiche o dinamiche, senza rompersi né deformarsi oltre limiti determinati;
- *acciai speciali da costruzione*<sup>2</sup>: destinati a più impegnative e caratteristiche applicazioni, nelle quali esplicano essenzialmente la funzione di resistere a sollecitazioni statiche o dinamiche;

<sup>1</sup> Gli acciai da costruzione di uso generale si identificano sostanzialmente con il gruppo 1 della designazione convenzionale UNI.

<sup>2</sup> Gli acciai speciali da costruzione appartengono, secondo la designazione UNI, principalmente ai sottogruppi 2.1 e 2.21 e solo in casi particolarissimi al sottogruppo 2.22, in quanto praticamente nessun elemento di lega supera mai, per un acciaio da costruzione, il limite di 5 % che divide i due sottogruppi degli acciai legati.

- *acciai da utensili*: destinati alle lavorazioni dei materiali più diversi;
- *acciai inossidabili*: destinati a resistere in determinati ambienti corrosivi;
- *acciai per usi particolari*: caratterizzati dal fatto che il loro impiego è determinato da alcune loro specifiche proprietà.

Gli acciai a cui faremo riferimento, in relazione alle esigenze costruttive dell'ingegneria ferroviaria, sono gli acciai della seconda categoria, ovvero gli *acciai speciali da costruzione*; in questo gruppo, come accennato, rientrano tutti quegli acciai destinati a sopportare in opera sforzi statici o dinamici anche di notevole entità.

A tali acciai si richiede quindi essenzialmente di resistere alle sollecitazioni alle quali sono sottoposti senza rompersi né deformarsi; occorre quindi che essi posseggano un carico di snervamento (o meglio un limite elastico) con un margine sufficiente di sicurezza rispetto alle sollecitazioni massime; in secondo luogo essi devono avere una sufficiente tenacità e duttilità.

### 1.3. INFLUENZA DEGLI ELEMENTI DI LEGA

Le caratteristiche meccaniche dell'acciaio variano in funzione del tenore di carbonio e degli elementi di lega.

Di seguito si analizza pertanto l'influenza che i vari elementi (carbonio, manganese, silicio, cromo, zolfo) hanno nella composizione degli acciai speciali da costruzione utilizzati per l'armamento ferroviario, prendendo come riferimento la gamma produttiva della Lucchini S.p.A., una delle società leader nella fabbricazione di prodotti lunghi in acciaio di qualità e speciale.

Tabella 1.2 – Gamma produttiva degli acciai per rotaie della Lucchini S.p.A.

| Qualità         | % in peso |           |           |           |             | P max | O max | H max | Rm min | A min | HB      |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|
|                 | C         | Mn        | Si        | Cr        | S           |       |       |       |        |       |         |
| EN 13674 series |           |           |           |           |             |       |       |       |        |       |         |
| R200            | 0,40/0,60 | 0,70/1,20 | 0,15/0,58 | 0,15 max  | 0,008/0,035 | 0,035 | 20    | 3     | 680    | 14    | 200/240 |
| R220            | 0,50/0,60 | 1,00/1,25 | 0,20/0,60 | 0,15 max  | 0,008/0,025 | 0,025 | 20    | 3     | 770    | 12    | 220/260 |
| R260            | 0,62/0,80 | 0,70/1,20 | 0,15/0,58 | 0,15 max  | 0,008/0,025 | 0,025 | 20    | 2,5   | 880    | 10    | 260/300 |
| R260Mn          | 0,55/0,75 | 1,30/1,70 | 0,15/0,60 | 0,15 max  | 0,008/0,025 | 0,025 | 20    | 2,5   | 880    | 10    | 260/300 |
| R320Cr          | 0,60/0,80 | 0,80/1,20 | 0,50/1,10 | 0,80/1,20 | 0,008/0,025 | 0,02  | 20    | 2,5   | 1080   | 9     | 320/360 |

In tali acciai, il carbonio varia in genere da un minimo dello 0,40 % a un massimo di 0,80 %; è l'elemento di aggiunta più economico e anche quello che contribuisce a incrementare maggiormente le proprietà di resistenza, ma al suo crescere diminuisce fortemente la tenacità, e quindi, in generale, si cerca di limitarne il tenore al minimo indispensabile.

Il manganese è completamente solubile nel ferro in tutte le proporzioni; esso è presente in tutti gli acciai speciali da costruzione con tenori medi dello 0,80 – 1,20 %.

Esaminando da un punto di vista generale e schematico l'influenza che il manganese esercita sulle proprietà degli acciai, si può notare subito che numerose sono le controindicazioni al suo impiego, pur restando le influenze favorevoli che discendono dall'analogia del comportamento dello stesso rispetto al nichel.

In particolare, il manganese conferisce all'acciaio le seguenti proprietà:

- diminuzione delle temperature di ricottura e di tempra<sup>3</sup>;
- diminuzione della velocità critica (velocità minima di raffreddamento che da luogo alla tempra completa);
- aumento della penetrazione di tempra e diminuzione delle deformazioni di tempra;
- aumento della tenacità (e in particolare della resilienza) a parità di resistenza alla trazione;

<sup>3</sup> Il trattamento di tempra consiste in generale nel brusco raffreddamento di un materiale dopo averlo portato ad alta temperatura. Questo processo è molto comune per i metalli: grazie alla tempra, per esempio, si trasforma la struttura perlitica dell'acciaio in martensitica conferendo quindi all'acciaio stesso alta durezza e resistenza meccanica.

## 1. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO

- forte aumento della resistenza a trazione; circa  $100 \text{ N/mm}^2$  per ogni 1 % di manganese allo stato grezzo di laminazione;
- miglioramento della deformabilità a caldo (anche se questa specifica influenza, più che al manganese come elemento di lega, sia da mettersi in relazione all'abbassamento dei tenori di ossigeno e zolfo dovuti alle azioni specifiche disossidanti e desolforanti del manganese durante la fabbricazione dell'acciaio).

Tra gli inconvenienti della presenza del manganese negli acciai si possono viceversa ricordare i seguenti:

- diminuzione della conducibilità termica, con la conseguente necessità di richiedere gran cura nel preriscaldamento e nel raffreddamento in tutte le operazioni termiche o di lavorazione a caldo, onde evitare forti squilibri di temperatura nei pezzi, che portano facilmente a rotture, specialmente se il carbonio è elevato;
- diminuzione della deformabilità a freddo degli acciai perlitici;
- aumento della sensibilità al surriscaldamento che richiede una rigorosa messa a punto della temperatura di tempra;
- straordinaria diminuzione della lavorabilità all'utensile degli acciai austenitici;
- peggioramento delle principali proprietà magnetiche ed elettriche;
- inconvenienti nella cementazione.

Il silicio è presente in tutti gli acciai da costruzione, con tenori medi dello 0,2 – 0,4 %, può superare l'1% solo negli acciai per molle fino a un massimo di circa il 2 %. Fornisce un lieve contributo nell'aumento della resistenza, del limite di snervamento e della durezza, mentre fornisce una riduzione dell'allungamento, strizione e resilienza. Anche il silicio è uno degli elementi che aumentano notevolmente la temprabilità, poiché riduce la velocità critica di raffreddamento.

Esso conferisce poi all'acciaio particolari proprietà chimiche: resistenza agli acidi e ad altri agenti corrosivi e resistenza all'ossidazione a caldo. Ha un'influenza dannosa sulla deformabilità a caldo, sulla deformabilità a freddo, sulla saldabilità (poiché si forma un silicato di difficile eliminazione nella zona di fusione) e conferisce all'acciaio una tendenza al surriscaldamento.

Il cromo è aggiunto in percentuali diversissime, da piccole quantità come lo 0,5% fino a dei massimi del 3% ed è uno degli elementi di lega più frequente negli acciai speciali da costruzione.

Circa le caratteristiche meccaniche si può dire che in generale, fino a che la struttura dell'acciaio rimane perlitica (stato ricotto, con raffreddamento molto lento), il cromo aumenta la resistenza a trazione senza che l'allungamento, la strizione e la resilienza siano eccessivamente abbassati (tanto che a parità di resistenza la tenacità è maggiore che per gli acciai al carbonio); viceversa, a strutture con carburi doppi corrispondono resilienze molto basse.

Sulla temprabilità dell'acciaio è notevole l'influenza del cromo, infatti, soprattutto per piccoli pezzi, si giunge presto alla tempra dell'aria; l'elemento conferisce poi alle strutture di tempra una notevole stabilità al rinvenimento.

Tra le altre proprietà interessanti per le applicazioni che il cromo può conferire vi è l'elevata resistenza al logoramento per attrito (per strutture contenenti carburi), l'inossidabilità rispetto a numerosi agenti corrosivi e la resistenza all'ossidazione a caldo.

Una prima influenza dello zolfo sulle caratteristiche degli acciai è la fragilità a caldo, nota anche come fragilità al rosso. La spiegazione di questo fenomeno sta nella formazione di un eutettico che fonde a 988 °C e si deposita, durante la solidificazione, al contorno dei grani: alle usuali temperature di laminazione, fucinatura o stampaggio, tutte superiori ai 1000°C, l'acciaio presenta spaccature più o meno profonde per la disgregazione prodotta dalle tracce di liquido tra i grani.

Una seconda influenza dello zolfo si ha nel peggioramento delle caratteristiche meccaniche ed in particolare della resilienza, specialmente accentuato per acciai ad elevato tenore di carbonio.

Fino ad un tenore di zolfo dello 0,2% non si ha nessun peggioramento degno di nota né della lavorabilità a caldo, né delle caratteristiche meccaniche; normalmente però si

richiede una percentuale di zolfo pari a 0,05%, e per acciai speciali anche 0,03%, in quanto lo zolfo ha notevole tendenza a segregarsi nella zona centrale del lingotto, ove si può avere un arricchimento anche superiore al 400% rispetto al tenore medio. Anche prolungati riscaldamenti ad elevata temperatura non sono efficaci per omogeneizzare la struttura perché lo zolfo non diffonde sensibilmente. Di qui la necessità di tenere molto basso il tenore medio di zolfo.

## 1.4. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO E REQUISITI DI CONFORMITA'

La fabbricazione di rotaie per binari ferroviari viene svolta in Italia secondo quanto contenuto nella specifica tecnica di prodotto RFI TCAR SP AR 02 001 A. Al suo interno sono contenute le prescrizioni sul prodotto in termini di forma, tolleranze, processo di fabbricazione, tipologia di acciai utilizzati, numerosità e criteri delle prove di accettazione.

In particolare, la specifica tecnica afferma che per quanto riguarda gli acciai utilizzati per la fabbricazione delle rotaie si devono rispettare le prescrizioni stabilite dalla normativa europea serie UNI EN 13674.

Con riferimento a tale normativa, le sette qualità di acciaio sono riportate in tabella. I range di durezza (HBW) delle varie qualità di acciaio devono conformarsi a quelli forniti in tabella.

Tabella 1.3 – Qualità dell'acciaio per rotaie secondo la normativa UNI EN 13674

| Grade <sup>a</sup> | Hardness range (HBW)    | Description                                   | Branding lines          |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|
| R200               | 200 to 240              | Carbon – manganese (C-Mn)<br>Non heat treated | No branding lines       |
| R220               | 220 to 260              | Carbon – manganese (C-Mn)<br>Non heat treated | _____                   |
| R260               | 260 to 300              | Carbon – manganese (C-Mn)<br>Non heat treated | _____<br>_____          |
| R260Mn             | 260 to 300              | Carbon – manganese (C-Mn)<br>Non heat treated | _____<br>_____          |
| R320Cr             | 320 to 360              | Alloy (1 %Cr)<br>Non heat treated             | _____<br>_____<br>_____ |
| R350HT             | 350 to 390 <sup>b</sup> | Carbon – manganese (C-Mn)<br>Heat treated     | _____<br>_____<br>_____ |
| R350LHT            | 350 to 390 <sup>b</sup> | Low alloy, heat treated                       | _____<br>_____<br>_____ |

Le designazioni a cui si fa riferimento per la qualità di acciaio in questi standard sono deducibili da quelle presenti nella UNI EN 10027.

Per quanto riguarda l'integrità del prodotto, tutte le rotaie vignole devono essere prodotte con un ampio sistema di controllo dei fattori di produzione, al fine di garantire la conformità del prodotto finito e di raggiungere la necessaria integrità per assicurare la sicurezza del prodotto in esercizio.

Per dimostrare che tali requisiti di conformità sono stati raggiunti, il manufatto deve essere identificato mediante marchiatura a caldo o a freddo.

Alcune tra le principali prove di qualità necessarie a caratterizzare la rotaia prevedono la determinazione di:

- durezza alla frattura;
- rottura a fatica;
- sforzi residui;
- resistenza a trazione ed elongazione.

Le prove di accettazione prevedono lo svolgimento di test di laboratorio che riguardano tra le altre cose la determinazione della composizione chimica, della microstruttura, della durezza e della resistenza a trazione.

Inoltre sono previste prove di tolleranze sui profili, in termini di forme e dimensioni.

Concentriamoci di seguito solo su alcuni aspetti che risultano di primario interesse per la presente trattazione.

Per quanto riguarda la composizione chimica, essa deve risultare conforme a quanto previsto dalla tabella 1.5. In particolare, oltre ai vari elementi di lega, è necessario determinare la quantità di idrogeno e di ossigeno presenti nel campione.

*Tabella 1.4 – Contenuto di idrogeno in parti per milione negli acciai per rotaie secondo la UNI EN 13674*

| Heats   | Hydrogen content $10^{-4}$ % (ppm) |                        |
|---------|------------------------------------|------------------------|
|         | Steel grades R200 and R220         | All other steel grades |
| Group 1 | $\leq 3,0$                         | $\leq 2,5$             |
| Group 2 | $> 3,0$                            | $> 2,5$                |

1. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO

Tabella 1.5 – Composizione chimica degli acciai per rotaie secondo la UNI EN 13674

| Steel sample grade   | % By mass |           |           |       |                              |           |         |        |        |                | 10 <sup>-4</sup> % ppm max. by mass |      | R <sub>m</sub> min. MPa | min. elong A % | Centre line |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-------|------------------------------|-----------|---------|--------|--------|----------------|-------------------------------------|------|-------------------------|----------------|-------------|
|                      | C         | Si        | Mn        | P max | running surface <sup>c</sup> | Cr        | Al max. | V max. | N max. | C <sup>a</sup> | H <sup>b</sup>                      |      |                         |                |             |
| R200<br>Liquid       | 0,40/0,60 | 0,15/0,58 | 0,70/1,20 | 0,035 | 0,008/0,035                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,009  | 20             | 3,0                                 |      |                         |                |             |
| Solid                | 0,38/0,62 | 0,13/0,60 | 0,65/1,25 | 0,040 | 0,008/0,040                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,010  | 20             | 3,0                                 | 680  | 14                      | 200/240        |             |
| R220<br>Liquid       | 0,50/0,60 | 0,20/0,60 | 1,00/1,25 | 0,025 | 0,008/0,025                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,008  | 20             | 3,0                                 |      |                         |                |             |
| Solid                | 0,50/0,60 | 0,20/0,60 | 1,00/1,25 | 0,025 | 0,008/0,025                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,008  | 20             | 3,0                                 | 770  | 12                      | 220/260        |             |
| R260<br>Liquid       | 0,62/0,80 | 0,15/0,58 | 0,70/1,20 | 0,025 | 0,008/0,025                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,009  | 20             | 2,5                                 |      |                         |                |             |
| Solid                | 0,60/0,82 | 0,13/0,60 | 0,65/1,25 | 0,030 | 0,008/0,030                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,010  | 20             | 2,5                                 | 880  | 10                      | 260/300        |             |
| R260<br>Mn<br>Liquid | 0,55/0,75 | 0,15/0,60 | 1,30/1,70 | 0,025 | 0,008/0,025                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,009  | 20             | 2,5                                 |      |                         |                |             |
| Solid                | 0,53/0,77 | 0,13/0,62 | 1,25/1,75 | 0,030 | 0,008/0,030                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,010  | 20             | 2,5                                 | 880  | 10                      | 260/300        |             |
| R320<br>Liquid       | 0,60/0,80 | 0,50/1,10 | 0,80/1,20 | 0,020 | 0,008/0,025                  | 0,80/1,20 | 0,004   | 0,18   | 0,009  | 20             | 2,5                                 |      |                         |                |             |
| Cr<br>Solid          | 0,58/0,82 | 0,48/1,12 | 0,75/1,25 | 0,025 | 0,008/0,030                  | 0,75/1,25 | 0,004   | 0,20   | 0,010  | 20             | 2,5                                 | 1080 | 9                       | 320/360        |             |
| R350<br>Liquid       | 0,72/0,80 | 0,15/0,58 | 0,70/1,20 | 0,020 | 0,008/0,025                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,009  | 20             | 2,5                                 |      |                         |                |             |
| HT<br>Solid          | 0,70/0,82 | 0,13/0,60 | 0,65/1,25 | 0,025 | 0,008/0,030                  | 0,15 max  | 0,004   | 0,030  | 0,010  | 20             | 2,5                                 | 1175 | 9                       | 350/390        |             |
| R350<br>Liquid       | 0,72/0,80 | 0,15/0,58 | 0,70/1,20 | 0,020 | 0,008/0,025                  | 0,30 max  | 0,004   | 0,030  | 0,009  | 20             | 2,5                                 |      |                         |                |             |
| LHT<br>Solid         | 0,70/0,82 | 0,13/0,60 | 0,65/1,25 | 0,025 | 0,008/0,030                  | 0,30 max  | 0,004   | 0,030  | 0,010  | 20             | 2,5                                 | 1175 | 9                       | 350/390        |             |

a See 9.1.2.3.

b See 9.1.2.2.

c See Figure 10.

Per determinare i valori di durezza, le prove Brinell devono essere eseguite in accordo con la EN ISO 6506-1.

La durezza è la proprietà che hanno i materiali di resistere alla penetrazione da parte di un materiale più duro di quello che deve essere esaminato. La prova di durezza eseguita con il metodo Brinell consiste nel far penetrare nel materiale in esame una sfera di acciaio duro di diametro  $D$ , premuta con forza  $F$  (carico di prova).

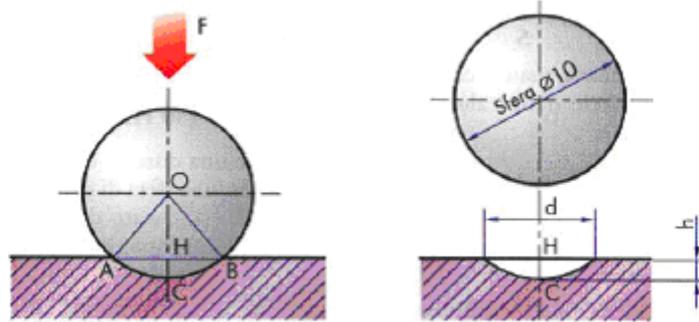


Figura 1.1 – Prova di durezza

Il diametro assume valori standard prescritti dalla normativa, mentre il carico di prova si sceglie in relazione al diametro della sfera:

$$F = 30 \times D^2 \times 9,81$$

Si definisce durezza Brinell il rapporto tra il carico di prova  $F$  (espresso in Newton) e l'area della superficie dell'impronta  $S$  (espressa in  $\text{mm}^2$ ) moltiplicato per una costante  $n$  (pari a  $0,102 \text{ N/mm}^2$ )

$$HBW = \frac{F}{S} \times n$$

I valori di durezza misurati devono soddisfare i requisiti presentati in tabella.

Tabella 1.6 – Requisiti di durezza secondo la UNI EN 13674

| Position        | Rail Steel Grade |         |         |         |         |                      |                      |
|-----------------|------------------|---------|---------|---------|---------|----------------------|----------------------|
|                 | R200             | R220    | R260    | R250Mn  | R320Cr  | R350HT               | R350LHT              |
|                 | Hardness (HBW)   |         |         |         |         |                      |                      |
| RS <sup>a</sup> | 200-240          | 220-260 | 260-300 | 260-300 | 320-360 | 350-390 <sup>b</sup> | 350-390 <sup>b</sup> |
| 1               |                  |         |         |         |         | 340 min              | 340 min              |
| 2               |                  |         |         |         |         | 331 min              | 331 min              |
| 3               |                  |         |         |         |         | 321 min              | 321 min              |
| 4               |                  |         |         |         |         | 340 min              | 340 min              |

<sup>a</sup> RS = Point on the centre line running surface.

<sup>b</sup> If the hardness exceeds 390HBW, the rail is acceptable provided the microstructure is confirmed to be pearlitic, and the hardness does not exceed 405 HBW

La prova di trazione è la più importante per la caratterizzazione dell'acciaio e di qualunque materiale metallico, perché i diversi valori di resistenza che si determinano sono gli elementi più validi e quindi più utilizzati per esprimere le caratteristiche del materiale ed individuarne le possibilità di impiego.

I provini di trazione sui metalli hanno un tratto a sezione costante all'interno del quale viene individuato un tratto utile di lunghezza  $l_0$  a cui si fa riferimento durante la prova. In figura è rappresentata un tipico provino a sezione circolare (di diametro  $d$ ) per la prova di trazione.

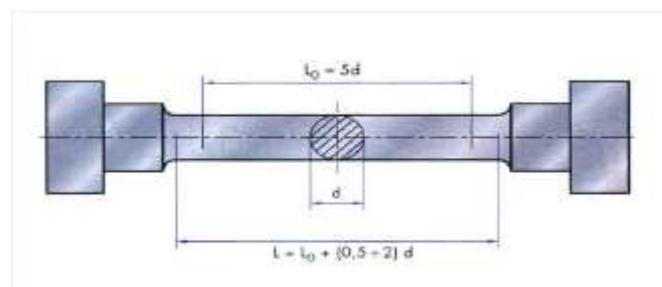


Figura 1.2 – Provino metallico a sezione circolare per prova di trazione

La macchina di trazione consente, durante la prova, la misura istantanea della lunghezza del tratto utile  $l$  e della forza  $F$  agente lungo l'asse del provino. Si ottiene così un progressivo allungamento  $\Delta l = l - l_0$  e si misura la forza  $F$  opposta dal provino. La curva di trazione descrive l'andamento dello sforzo nominale ( $\sigma = F/A_0$ , con  $A_0 = \pi d^2/4$ ) in funzione della deformazione nominale ( $\varepsilon = \Delta l/l_0$ ).

Per un materiale come l'acciaio dolce, la curva di trazione si presenta come quella mostrata nella figura ed è caratterizzata da differenti fasi di allungamento.

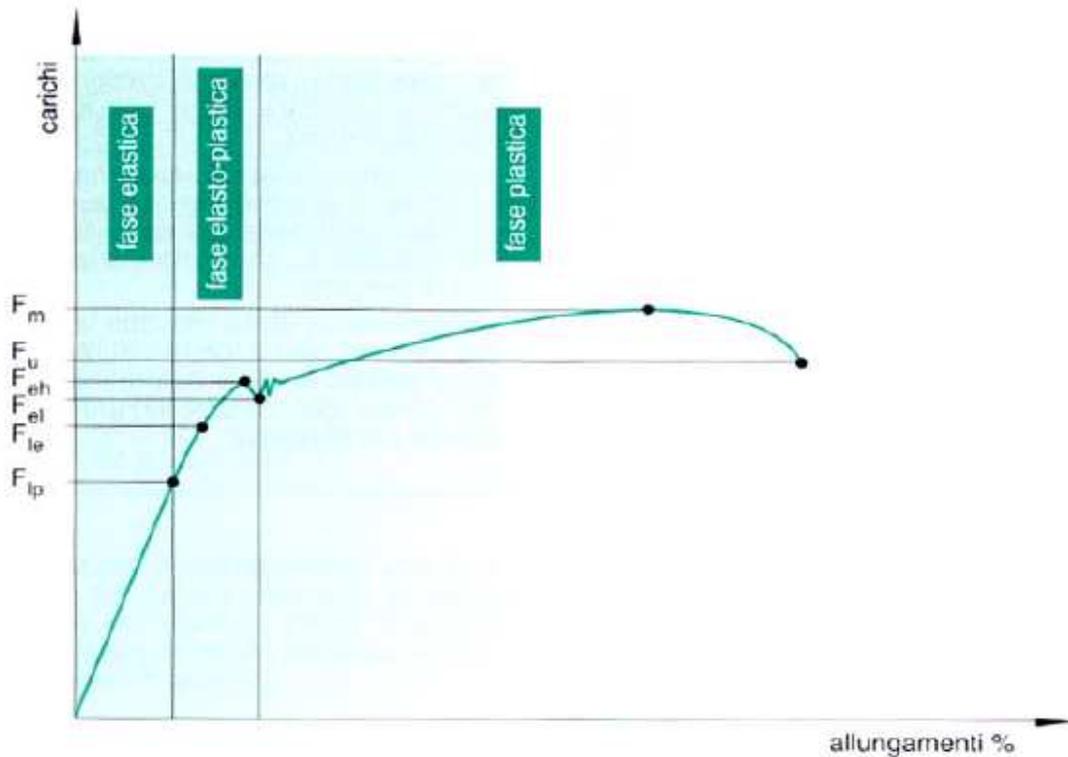


Figura 1.3 – Curva di trazione per acciaio dolce

1. Fase di elasticità e proporzionalità: in una prima fase, quando il materiale è sottoposto ai primi carichi, l'allungamento cresce in proporzione al carico impresso. Al cessare del carico la provetta riacquista le dimensioni iniziali.
2. Fase di elasticità e plasticità: oltre un determinato valore di carico, la provetta comincia a subire delle deformazioni che permangono, in parte, anche dopo aver eliminato il carico. Se togliamo il carico l'allungamento si riduce, ma la provetta non riassume le dimensioni iniziali.
3. Fase di snervamento: si ha lo snervamento quando la deformazione della provetta aumenta per la prima volta senza che il carico aumenti, oppure quando il carico diminuisce. Il carico di snervamento caratterizza l'inizio della fase plastica che precede la rottura della provetta. Dopo lo snervamento, se aumentiamo ancora il carico la provetta continua a deformarsi plasticamente fino all'improvvisa rottura. In questa fase, nella zona di rottura della provetta, la

sezione si restringe visibilmente e presenta il cosiddetto fenomeno della strizione.

Dalla prova di trazione è possibile ricavare le seguenti grandezze fondamentali:

- Carico di snervamento unitario, ottenuto dividendo il carico di snervamento superiore o inferiore per la sezione iniziale:

$$\sigma_{eh} = \frac{F_{eh}}{A_0}$$

$$\sigma_{el} = \frac{F_{el}}{A_0}$$

- Carico di rottura, che rappresenta il valore massimo del carico raggiunto durante la prova di trazione condotto fino alla rottura. Il carico massimo unitario è dato dal rapporto fra il carico massimo e la sezione iniziale del provino:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0}$$

- Modulo elastico, che caratterizza il tratto elastico della curva e rappresenta la relazione lineare esistente tra sforzi  $\sigma$  e deformazioni  $\varepsilon$  in tale tratto:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Per gli acciai ferroviari, il valore assunto come resistenza del materiale è il limite di snervamento: esso varia, in funzione del tipo di acciaio che si intende utilizzare, da un valore di  $200 \text{ MPa}$  a un valore di  $350 \text{ MPa}$ .

Per quanto riguarda il modulo elastico del materiale, esso assume valori compresi tra  $2,0 \times 10^5 \text{ MPa}$  e  $2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$ .

## 1.5. DILATAZIONE TERMICA

L'acciaio, come la maggior parte dei materiali, si espande nel caso in cui venga sottoposto ad una variazione di temperatura che non comporti un cambiamento di fase (da solido a liquido o da liquido a gas). L'aumento di temperatura incrementa l'ampiezza delle vibrazioni degli atomi del materiale e di conseguenza aumenta anche la distanza di separazione tra gli atomi stessi.

Supponiamo di far subire ad un oggetto di lunghezza  $L$  una variazione di temperatura di ampiezza  $\Delta T$ . Se la variazione è contenuta in un intervallo all'interno del quale  $\alpha$  può essere ritenuto costante, la variazione di lunghezza  $\Delta L$  è proporzionale a  $L$  e a  $\Delta T$ .

Analiticamente, la relazione è espressa da:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$$

dove  $\alpha$  è denominato coefficiente di dilatazione lineare del materiale.

Questo, naturalmente, assumendo che l'oggetto abbia la medesima espansione in tutte le direzioni per una data variazione di temperatura, come avviene nel caso dell'acciaio (anche se ciò non è vero per tutti i materiali). I materiali che hanno questo tipo di comportamento, ovvero la stessa espansione in tutte le direzioni, sono chiamati isotropici.

Generalmente, il valore di  $\alpha$  varia con il valore di temperatura, pertanto la variazione di lunghezza dipende non solo dall'entità del salto di temperatura, ma anche dal valore assoluto della temperatura stessa. Tuttavia, nei limiti delle variazioni di temperatura ambientale raggiungibili naturalmente, si può ritenere che il valore del coefficiente di dilatazione rimanga costante al variare della temperatura.

Nel caso di acciai per rotaie ferroviarie, il coefficiente assume un valore pari a:

$$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Per misurare il coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio è necessario effettuare delle misurazioni su due grandezze fisiche: gli allungamenti e le temperature. In particolare, la misurazione degli allungamenti dovrà essere effettuata per calcolare successivamente il valore di  $\alpha$ ; poiché tipicamente  $\alpha$  assume valori molto piccoli

(dell'ordine di  $10^{-6}/^{\circ}C$ ), per determinare un valore ragionevolmente accurato è necessario misurare  $L$  con altrettanta accuratezza e precisione. Se possibile, si dovrebbe tenere una precisione dell'ordine di  $0,5\text{ mm}$ .

Tre delle più utilizzate tecniche per la misurazione del coefficiente di dilatazione termica sono la dilatometria, l'interferometria e l'analisi termomeccanica.

Le tecniche della dilatometria meccanica sono usate di frequente. Con questa tecnica, un campione viene introdotto in una fornace e gli spostamenti dei due estremi del campione sono trasmessi ad un sensore per mezzo di una levetta. La precisione della prova è inferiore rispetto a quella di prove interferometriche e la prova è generalmente applicabile in un intervallo di temperature compreso tra  $-180^{\circ}C$  e  $900^{\circ}C$ .

Con le tecniche di interferometria ottica, gli spostamenti agli estremi del campione sono misurati in termini di numero di lunghezze d'onda della luce monocromatica. La precisione è significativamente più elevata di quella della dilatometria ma poiché la tecnica si basa sulla riflessione della superficie del campione, l'interferometria non è usata al di sopra dei  $700^{\circ}C$ .

Le misurazioni eseguite tramite analisi termomeccanica consistono nel utilizzo di un campione e di una sonda che trasmette le variazioni di lunghezza a un trasduttore che trasforma i movimenti della sonda in un segnale elettrico. L'apparecchiatura consiste inoltre in una fornace per il riscaldamento uniforme, un elemento per il rilevamento della temperatura e un mezzo per registrare i risultati. Gli standard ASTM descrivono le metodologie per l'esecuzione delle prove che servono a determinare il coefficiente di dilatazione termica per mezzo dell'analisi termomeccanica. Il range di temperature applicabili è compreso tra  $-120^{\circ}C$  e  $600^{\circ}C$ .

## 1.6. SOLLECITAZIONI TERMICHE NELLA ROTAIA

Come verrà ampiamente descritto nei successivi capitoli, oltre alle sollecitazioni statiche e dinamiche legate al passaggio di un convoglio ferroviario, ciò che può maggiormente minacciare l'integrità dell'acciaio di cui è composto il binario ferroviario sono gli sforzi connessi alle dilatazioni termiche impedito.

Nel caso di rotaie giuntate e di lunghe rotaie saldate, un aumento di temperatura genera un allungamento del binario mentre una diminuzione di temperatura genera una contrazione: nel caso in cui tali variazioni di lunghezza siano impedito, si sviluppano nel binario delle sollecitazioni che sono rispettivamente di compressione o di trazione.

Nel caso di sollecitazioni di compressione il problema è principalmente legato all'instabilità del binario, il quale tende a slinearsi per il raggiungimento di un carico di punta che instabilizza l'armamento nel complesso rotaie/traverse. Ciò comporterebbe gravi rischi per la sicurezza della circolazione ferroviaria fino ad implicare, al limite, lo svio di un convoglio.

Nel caso invece di basse temperature e sforzi di trazione, il problema principale è legato alla rottura per trazione che può manifestarsi nelle forme di una rottura fragile del materiale. A seguito della discontinuità formatasi, possono nascere problemi di circolazione che risultano di entità nettamente inferiore rispetto a quelli legati allo slineamento: il convoglio ferroviario potrebbe superare il punto di rottura con un sobbalzo senza che per questo possano esserci situazioni di pericolo legate al possibile deragliamento del treno.

### 1.6.1. AZIONE DI COMPRESSIONE E INSTABILITA'

In un'asta metallica di sezione e lunghezza assegnate, soggetta ad una sollecitazione assiale di pura compressione, lo stato tensionale, ad eccezione delle zone di vincolo e delle estremità a cui è applicato il carico, si riduce ad una  $\sigma$  uniforme, diretta come l'asta e di valore costante.

La teoria classica dell'elasticità mostra come la struttura si possa ritenere sicura se la sollecitazione cui è sottoposta non supera il carico di rottura (o quello di snervamento) a meno di un opportuno coefficiente di sicurezza. Per strutture tozze, quanto detto risulta essere completamente vero, mentre nel caso di strutture snelle insorge un fenomeno che può portare al collasso della struttura prima che si raggiunga lo sforzo limite di rottura o di snervamento: tale fenomeno è noto come instabilità dell'equilibrio.

I fenomeni fisici e le relazioni che entrano in gioco nella descrizione dell'instabilità, in particolare per quanto riguarda una rotaia ferroviaria in acciaio, verranno esposti, nei loro aspetti essenziali, nel capitolo 7. Ci si limita qui a far notare come il complesso dell'armamento ferroviario, costituito da due rotaie e da traverse ad interasse costante, possa costituire una forte analogia con un sistema di due aste calastrellate: per determinare il carico assiale che può portare all'instabilità del binario, è necessario considerare sia il singolo tratto di rotaia compreso tra due traverse, sia il binario e le traverse nel loro complesso, ai fini di valutare quale tra le due condizioni risulti la più critica.

### 1.6.2. ROTTURE PER TRAZIONE E FRAGILITA'

Gli acciai, in specifiche condizioni, possono rompersi improvvisamente sotto sollecitazioni nominali di trazione inferiori al carico di snervamento del materiale: queste fratture, che avvengono prematuramente senza che si manifestino deformazioni plastiche, sono dette fratture fragili.

Lo studio della frattura fragile dei metalli è estremamente complesso ed è della massima importanza; da un punto di vista teorico, tramite lo studio dei meccanismi di base della frattura e della interrelazione fra la micro tessitura dei materiali metallici e la loro tenacità, si cerca di individuare le condizioni nelle quali essa può verificarsi.

Con il nome di rotture fragili quindi si intendono correntemente quelle che avvengono di schianto senza deformazioni plastiche, per decoesione, e che sono analoghe a quanto si verifica per materiali non metallici fragili, come vetro, porcellana ecc.

Fortunatamente le rotture fragili sono nel complesso da considerare come una eccezione, ancorché sempre temuta. Gli aspetti distintivi della rottura fragile, o per decoesione, possono essere così schematizzati:

- la rottura fragile avviene per decoesione senza scorrimento né deformazioni plastiche apprezzabili; come superfici di frattura si presentano quei piani cristallini di sfaldatura che sono orientati pressoché normalmente alle direzioni delle maggiori tensioni normali, e in ogni modo tali piani non coincidono mai con quelli lungo i quali si sono avuti gli scorrimenti della deformazione che eventualmente ha preceduto l'inizio di tale rottura;
- perché la rottura per decoesione abbia inizio, è necessaria una particolare configurazione di tensioni triassiali, tale che in una delle tre direzioni si superi un valore critico;
- una volta iniziata, la rottura per decoesione si propaga senza ulteriore deformazione plastica con una velocità che è di un altro ordine di grandezza rispetto alla velocità della macchina e precisamente è pari a quella di propagazione delle perturbazioni di tensioni (ossia dell'ordine di qualche migliaio di m/s);
- l'aspetto della frattura è cristallino, con lucentezza caratteristica.

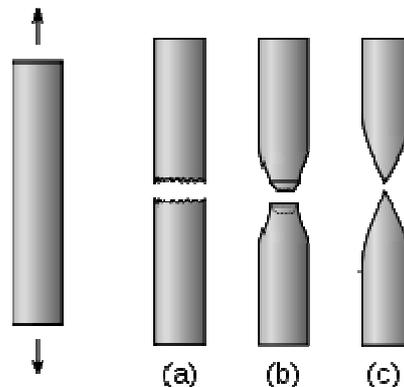


Figura 1.4 – a) Frattura fragile; b) Frattura duttile; c) Frattura completamente duttile

### 1.6.2.1. IL FENOMENO DELLA TRANSIZIONE

Ad influenzare il meccanismo della rottura è innanzitutto il reticolo cristallino; ed infatti i metalli con reticolo cubico a corpo centrato od esagonale compatto, possono, a seconda delle circostanze, presentare frattura tenace<sup>4</sup>, fragile oppure mista se si trovano entro un intervallo di transizione.

Il fenomeno della transizione, in riferimento a questa tipologia di metalli, consiste nel fenomeno del passaggio tra un tipo di rottura e l'altro, in funzione della principale variabile sperimentale, la temperatura.

Per poter determinare il valore della suddetta temperatura, è possibile sottoporre una serie di provini metallici a una prova di trazione a diverse temperature di riferimento.

Mediante questa procedura, si sottopongono una serie di provini metallici a delle prove di trazione diretta, a diverse temperature, e si indagano i diversi meccanismi di rottura che si vanno a creare; conseguentemente è possibile individuare i seguenti step:

- a cavallo della temperatura ambiente, la rottura avviene con la caratteristica forma a cono che denota buona duttilità; le tensioni che provocano la rottura sono nettamente superiori al limite di snervamento;
- al progressivo diminuire della temperatura, l'acciaio si presenta ancora tenace, ma il bordo esterno della frattura comincia a contenere alcune faccette di decoesione; tanto il limite di snervamento che le tensioni che provocano la rottura crescono regolarmente al diminuire della temperatura di prova;
- improvvisamente, in corrispondenza di un determinato valore di temperatura  $T_d$ , temperatura di transizione, si ha il brusco passaggio dal comportamento duttile a quello fragile con una caduta praticamente verticale sia della curva delle tensioni che provocano la rottura, sia della curva della strizione<sup>5</sup>, la

<sup>4</sup> Con questo termine si indicano correntemente le rotture dei metalli che sono precedute ed accompagnate da deformazioni plastiche più o meno accentuate, talvolta vistosissime.

<sup>5</sup> La strizione è un fenomeno che si manifesta nelle prove di trazione su provini prismatici o cilindrici sottoposti a trazione: esso porta a una riduzione della sezione del provino prima del collasso dello stesso.

quale si riduce a valori estremamente bassi; solamente le curve relative al limite di snervamento non presentano andamento singolare;

- ad una successiva diminuzione di temperatura, la curva delle tensioni di rottura scende rapidamente fino a raggiungere il livello del limite di snervamento inferiore e da questo punto si sovrappone ad essa, continuando con andamento crescente al diminuire della temperatura.

Per poter classificare un materiale metallico dal punto di vista della sensibilità alla frattura fragile è molto importante riassumere con un solo parametro l'intero fenomeno della transizione. La scelta cade usualmente sulla cosiddetta temperatura di transizione la quale è intesa come quella particolare temperatura del limite superiore dell'intervallo di transizione<sup>6</sup>.

### 1.6.2.2. INFLUENZA DEI COMPONENTI DELL'ACCIAIO SUL COMPORTAMENTO FRAGILE

Si riporta ora l'influenza dei singoli elementi di lega degli acciai da costruzione sulla posizione e forma della curva di transizione:

- carbonio: generalmente un aumento del tenore di carbonio negli acciai dolci produce un aumento delle caratteristiche tensili e conseguentemente una diminuzione della duttilità e un aumento della temperatura di transizione, accompagnato da una caduta del valore di resilienza;
- manganese: per tenori inferiori all'1,5 % di questo elemento si osserva una diminuzione della temperatura di transizione di circa 5°C per ogni 0,10 % di manganese aggiunto. Insignificante è invece l'effetto sul valore massimo della resilienza come pure sull'andamento delle curve di transizione.

Il rapporto manganese – carbonio è un fattore importante sulla suscettibilità alla fragilità degli acciai dolci. All'aumentare del rapporto Mn/C si osserva una diminuzione della temperatura di transizione, si restringe l'intervallo di transizione e aumenta il valore della resistenza del materiale;

---

<sup>6</sup> In realtà esistono diverse definizioni della temperatura di regolazione: per comodità si fa riferimento alla suddetta.

## 1. ACCIAI PER ARMAMENTO FERROVIARIO

- zolfo: un quantitativo di zolfo fino allo 0,040 % sembra non influire sulle proprietà alla bassa temperatura degli acciai;
- silicio: nei tenori normalmente aggiunti per disossidare l'acciaio, 0,15 – 0,30 %, il silicio abbassa la temperatura di transizione in quanto si ha una diminuzione del grano ferritico. Per maggiori quantitativi si ha un valore più elevato della resilienza, ma un aumento della temperatura di transizione;
- cromo: l'influenza del cromo sulla temperatura di transizione non è sensibile. I risultati ottenuti con acciai contenenti tenori di cromo inferiori allo 0,90 % non sono confrontabili con quelli in cui tale elemento è assente a causa del differente aspetto micro strutturale. Gli acciai al cromo sono molto sensibili alla fragilità di rinvenimento.

A titolo puramente informativo si cita l'esistenza anche di altre prove per determinare il comportamento fragile dell'acciaio (es. Prova d'urto Pellini, Prove di meccanica della frattura).

## 2. TERMICA DEL BINARIO

Il fenomeno fisico che sta alla base delle applicazioni presentate nel presente lavoro di tesi è quello relativo alle variazioni termiche di un binario ferroviario, le quali possono indurre variazioni di lunghezza della rotaia se essa risulta completamente libera da vincoli, mentre se le deformazioni sono parzialmente o completamente impedita tali variazioni di temperatura determinano l'insorgere di sollecitazioni di trazione o compressione.

Lo studio delle resistenze che si oppongono alle deformazioni di una rotaia permettono di determinare il ciclo termico che essa subisce al variare della temperatura, specificando per le varie temperature quale sforzo nasca all'interno della rotaia e di quanto essa risulti deformata.

Poiché la tecnologia tradizionale, utilizzata in ambito ferroviario per ovviare a tale fenomeno, è quella delle giunzioni tra rotaie successive, le considerazioni svolte in questo capitolo si riferiscono a tale ambito, sebbene gli stessi fenomeni fisici siano alla base anche della più moderna tecnologia della lunga rotaia saldata. Nell'ottica di mostrare l'evoluzione con cui il problema della termica del binario è stato affrontato, vengono presentate al termine del capitolo le limitazioni che hanno portato

all'abbandono delle giunzioni e all'utilizzo della lunga rotaia saldata, sulla quale si basa nello specifico lo studio sperimentale svolto.

## 2.1. DILATAZIONE CON ROTAIA LIBERA

Una rotaia posta all'aperto si trova ad una temperatura che varia con continuità in funzione delle sempre mutevoli condizioni ambientali: la temperatura dell'aria, l'intensità dell'irraggiamento solare, l'eventuale presenza di pioggia, ecc.

Ipotizziamo che la rotaia possa subire una dilatazione libera, presupponendo cioè che nessuna resistenza la ostacoli o ne alteri l'andamento. In altre parole, si suppone che le rotaie siano completamente libere di dilatarsi e contrarsi al variare della loro temperatura, come se fossero semplicemente appoggiate su una serie di rulli che non offrono alcuna resistenza al moto.

In questa situazione ideale per la rotaia, ad ogni variazione della sua temperatura corrisponderebbe una variazione della sua lunghezza: se la temperatura aumentasse la rotaia si allungherebbe, se la temperatura diminuisse la rotaia si accorcerebbe.

La variazione di lunghezza  $\Delta L$  che la rotaia lunga  $L$  assume a seguito di un salto di temperatura  $\Delta T = T_2 - T_1$  è pari a:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica della rotaia.

Se la temperatura aumenta, la variabile  $\Delta T$  assume valore positivo e con essa sarà positivo  $\Delta L$  causando un allungamento della rotaia; se la temperatura diminuisce, la variabile  $\Delta T$  assume valore negativo e di conseguenza il termine  $\Delta L$  negativo indica che la rotaia si è accorciata.

I termini presenti nell'espressione, che determina la variazione di lunghezza della rotaia, assumono valori che dipendono da un lato dalla lunghezza della rotaia e dal materiale di cui è composta, dall'altro dalle condizioni ambientali che si possono verificare in sito.

### 2.1.1. TIPI DI ROTAIE E LORO LUNGHEZZE

I vecchi modelli di armamento utilizzati in Italia prevedevano rotaie aventi un peso per unità di lunghezza di 36,1 kg/m, secondo diverse varianti di costruzione. Esistono poi modelli di vecchi armamenti pesanti, con rotaie da 46,3 kg/m o da 50,6 kg/m.

Tali modelli, oggi, non vengono più costruiti e quelli già presenti in linea vengono utilizzati fino alla sostituzione con altri modelli.

Come nuovi tipi di armamento per l'epoca, in via sperimentale e transitoria, sono stati adottati i tipi:

- FS 49, con rotaie dal peso unitario di 49,05 kg/m;
- FS 60, con rotaie dal peso unitario di 59,46 kg/m.

In seguito, in Italia è stata creata un apposita normativa, la UNI 3141 del 1991, che codifica il profilo della sezione trasversale della rotaia, l'area relativa, i momenti di inerzia e i moduli di resistenza rispetto all'asse di simmetria ed all'asse neutro ad esso perpendicolare.

Tale codifica distingue 7 principali tipi di rotaie:

- 21 UNI, avente massa di 21,737 kg/m;
- 27 UNI, avente massa di 27,350 kg/m;
- 30 UNI, avente massa di 30,152 kg/m;
- 36 UNI, avente massa di 36,188 kg/m;
- 46 UNI, avente massa di 46,786 kg/m;
- 50 UNI, avente massa di 49,850 kg/m;
- 60 UNI, avente massa di 60,340 kg/m.

Oggi su tutte le nuove linee e per il rinnovo di quelle esistenti si utilizzano esclusivamente due tipi di armamento, che sono destinati a sostituire gradualmente tutti i precedenti: 50 UNI e 60 UNI.

Le rotaie vengono fabbricate in lunghezze diverse a secondo del tipo, tipicamente con valori multipli di 6; generalmente i valori utilizzati nella tecnica siderurgica di produzione per i 50 UNI e i 60 UNI sono i seguenti:

12 m, 18 m, 24 m, 36 m, 48 m

Per le ordinarie lunghezze di rotaie possiamo eseguire il prodotto  $\alpha \times L$  che rappresenta la variazione di lunghezza per un salto di temperatura di un grado, ottenendo i risultati in tabella 2.1.

Come risulta dalla formula, la variazione di lunghezza  $\Delta L$  che si verifica nelle rotaie a seguito di un determinato salto di temperatura dipende solamente dalla lunghezza della rotaia e non dalla sua sezione o dal suo peso.

Tabella 2.1 – Variazione di lunghezza delle rotaie per un salto di temperatura di 1°C

| Lunghezza rotaia [m] | Variazione di lunghezza per grado [mm] |
|----------------------|----------------------------------------|
| 12                   | 0,14                                   |
| 18                   | 0,22                                   |
| 24                   | 0,29                                   |
| 36                   | 0,43                                   |
| 48                   | 0,58                                   |

Pertanto rotaie della stessa lunghezza, anche se di tipo diverso, si allungano della stessa quantità quando il salto di temperatura è della stessa entità

### 2.1.2. TEMPERATURE OPERATIVE DEL BINARIO

Come detto in precedenza la temperatura che assume il binario al variare delle condizioni ambientali dipende principalmente da 3 fattori:

- la temperatura dell'aria;
- l'irraggiamento solare;
- l'eventuale presenza di precipitazioni atmosferiche.

La temperatura dell'aria determina uno scambio di calore che avviene, attraverso la superficie esterna della rotaia, tra l'aria circostante e la rotaia stessa. Da questo punto di vista la rotaia tenderebbe e raggiungere una situazione di equilibrio in cui, in tutto il suo volume, essa assumerebbe una temperatura pari a quella dell'aria.

In occasione di giornate soleggiate però, qualora la rotaia sia direttamente esposta ai raggi del sole, il fenomeno dell'irraggiamento può far aumentare la temperatura del materiale fino a valori superiori a quelli della temperatura dell'aria.

Inoltre il verificarsi di piogge più o meno intense fa sì che la rotaia si ricopra di un velo d'acqua, il quale da un lato può avere una temperatura differente da quella della rotaia implicando quindi uno scambio di calore con la rotaia stessa, dall'altro a seguito dell'evaporazione ne farà diminuire la temperatura superficiale.

E' bene infine considerare che le precipitazioni possono assumere anche carattere nevoso oppure che, a seguito del verificarsi di temperature sotto gli  $0^{\circ}\text{C}$ , il velo d'acqua può trasformarsi in una patina ghiacciata.

Complessivamente, viste le temperature massime e minime dell'aria registrate nel corso di un anno in Italia, e visti i fenomeni dell'irraggiamento e delle precipitazioni atmosferiche che possono intervenire, è possibile raggiungere temperature di binario massime di circa  $60^{\circ}\text{C}$  e minime di circa  $-10^{\circ}\text{C}$ ; pertanto l'escursione massima di temperatura da prendere in considerazione è dell'ordine di  $70^{\circ}\text{C}$ . Al variare dell'altitudine o della latitudine, variano leggermente gli estremi di questa escursione, ma ne rimane praticamente invariata l'ampiezza.

### 2.1.3. COEFFICIENTI DI DILATAZIONE TERMICA

Come è noto, tutti i metalli sottoposti ad operazioni di riscaldamento o di raffreddamento si dilatano o si contraggono, vale a dire le loro dimensioni aumentano se riscaldati e diminuiscono se raffreddati.

Tali variazioni, a parità di dimensioni del pezzo e di differenza di temperatura, dipendono esclusivamente dal tipo di metallo costituente i pezzi stessi, caratteristica che influenza il valore attribuito al coefficiente di dilatazione termica. Esso rappresenta il coefficiente di proporzionalità tra le deformazioni  $\varepsilon$  che si verificano nel materiale a seguito di un determinato salto di temperatura  $\Delta T$ :

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\Delta T}$$

Il valore tipico per un acciaio da armamento ferroviario è compreso tra  $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  e  $12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Ciò significa che, considerando l'escursione massima di temperatura dei binari, e cioè  $70^\circ\text{C}$ , si ha una dilatazione massima dell'ordine di  $0,80 - 0,84 \text{ mm/m}$ .

## 2.2. DILATAZIONE COMPLETAMENTE IMPEDITA

Quando alla rotaia è impedito di dilatarsi, come può avvenire nel caso ideale in cui si supponga che ciascuna rotaia sia perfettamente vincolata alle estremità, si genera nell'interno di essa una sollecitazione. Se la rotaia subisce una variazione di temperatura essa dovrebbe deformarsi, allungandosi o accorciandosi; ma se un vincolo ostacola tale deformazione la rotaia è sollecitata da una forza di compressione o di trazione, di entità tanto maggiore quanto maggiore è la variazione di temperatura.

Nasce internamente ad essa una forza di compressione o di trazione proporzionale al salto di temperatura ed all'area della sezione della rotaia.

Il valore di tale forza si ottiene dalla formula:

$$F = \sigma \times A = (E \times \alpha \times \Delta T) \times A$$

Se assumiamo un modulo elastico dell'acciaio  $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$  ed un coefficiente di dilatazione termica  $\alpha = 0,000012^\circ\text{C}^{-1}$ , possiamo scrivere che:

$$F \text{ [N]} = 2,4 \times \Delta T \times A$$

dove A è l'area della sezione espressa in  $[\text{mm}^2]$  e  $\Delta T$  è il salto di temperatura in  $[\text{°C}]$ .

La tabella che segue riporta, per i principali tipi di armamento, la forza di compressione o di trazione che si sviluppa per una variazione di temperatura di  $1^\circ\text{C}$ :

*Tabella 2.2 – Forza di trazione o compressione per i principali tipi di armamento per un salto termico di  $1^\circ\text{C}$*

| Tipo di rotaia | Forza di compressione o trazione [kN] per ogni $^\circ\text{C}$ |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|
| 36 UNI         | 11,05                                                           |
| 46 UNI         | 14,30                                                           |
| FS 49          | 15,00                                                           |
| 50 UNI         | 15,25                                                           |
| FS 60          | 18,15                                                           |
| 60 UNI         | 18,45                                                           |

## 2.3. SITUAZIONE REALE: ROTAIA CON DILATAZIONE PARZIALMENTE IMPEDITA

I casi ideali di dilatazione libera o completamente impedita, sono situazioni che normalmente non si verificano, a meno di condizioni particolari.

Ciò dipende dal fatto che le rotaie sono ancorate, con particolari modalità, al resto della sovrastruttura ferroviaria (costituita dalle piastre, dalle traverse, dalla massicciata ecc.).

Le rotaie in opera vengono collegate longitudinalmente tra loro a mezzo degli organi di giunzione (ganasce e chiavarde) e bloccate alle traverse mediante gli organi di attacco (piastrini, chiavardini, piastre, caviglie,).

Sia gli organi di giunzione che quelli di attacco costituiscono delle resistenze, ovvero dei vincoli alla libera dilatazione delle rotaie che si ha sotto l'effetto delle variazioni di temperatura cui esse sono sottoposte in esercizio.

Un ulteriore impedimento alla libera dilatazione è, inoltre, costituito dalle luci esistenti tra una rotaia e la successiva nel momento in cui, le stesse luci, sono completamente chiuse o completamente aperte.

### 2.3.1. MASSICCIATA, TRAVERSE E ORGANI DI ATTACCO

La massicciata viene interposta tra il corpo stradale e l'armamento per assolvere a tre fondamentali compiti:

- distribuire i carichi verticali sul piano di regolamento del corpo stradale;
- consentire di realizzare le condizioni geometriche di posa del binario in fase di costruzione e garantirle durante l'esercizio;
- consentire la correzione dei difetti di geometria indotti dai carichi dinamici e da eventuali piccole alterazioni del corpo stradale.



*Figura 2.1 – Massicciata ferroviaria*

L'armamento non potrebbe da solo resistere, senza deformarsi e senza spostarsi dal giusto tracciato, agli sforzi verticali, longitudinali e trasversali cui esso è sottoposto a seguito della circolazione dei treni e delle variazioni termiche. L'armamento resiste in quanto le traverse risultano solidalmente incastrate nella massicciata: ciò lo rende indeformabile e lo ancora al piano di formazione.

Per ottenere attrito e contrasto laterale, le traverse risultano completamente annegate nel pietrisco in modo tale che il loro piano superiore sia allo stesso livello del piano superiore della massicciata.

Le traverse hanno lo scopo di collegare trasversalmente le due rotaie, assicurandone lo scartamento, e di distribuire sul pietrisco lo sforzo trasmesso dalle rotaie. A mezzo di esse l'armamento risulta vincolato alla massicciata e quindi ancorato al piano di regolamento.

Nei moderni tipi di armamento con attacchi indiretti<sup>7</sup>, che non permettono scorrimenti, e con lunghe campate di saldatura, le traverse hanno lo scopo di tenere bloccate le rotaie impedendone gli scorrimenti dovuti alle dilatazioni termiche ed ai continui prolungati sforzi unidirezionali di avviamento e frenatura.

Le traverse inizialmente più usate furono le traverse in legno, che presentavano il vantaggio dell'elevata elasticità, dell'alta resistenza agli sforzi dinamici e del peso relativamente contenuto (circa 60 – 100 kg). La durata media di una traversa in legno viene in genere valutata in 20 anni. Con un tale limite, nella rete delle FS si aveva un fabbisogno, per ricambi, di circa 800.000 traverse di legno all'anno. Tale fabbisogno è

---

<sup>7</sup> Definiti più avanti nel presente paragrafo.

andato nel tempo diminuendo, con il crescente uso di traverse in cemento armato precompresso, oggi utilizzate come standard per i rinnovi e le costruzioni di nuove linee.

Verso le traverse in c.a.p. ci si è inoltre orientati sia per le crescenti difficoltà di approvvigionamento di legnami di qualità idonea sia per la vita utile decisamente maggiore rispetto a quella delle traverse in legno, sia infine per un problema ecologico legato all'utilizzo di trattamenti antisettici di impregnazione con olio di catrame. La diffusione delle traverse in cemento armato precompresso è anche conseguenza della progressiva riduzione del loro costo e del progressivo aumento del costo delle traverse in legno impregnate: già negli anni '80 i due costi praticamente si equivalevano.

Le Ferrovie hanno quindi studiato e realizzato, attraverso ditte specializzate, una traversa in cemento armato precompresso tipo FS. Si tratta di una traversa lunga 2,30 m ed a sezione trapezia variabile in altezza e larghezza, con dimensioni massime alle testate (0,30 x 0,19 m) e ridotte al centro (0,20 x 0,15 m). Le traverse in cemento armato risultano notevolmente più pesanti delle traverse in legno, raggiungendo masse dell'ordine dei 220 kg.

Nelle traverse in c.a.p. si annegano gli elementi di attacco alla suola delle rotaie, con le relative piastre.

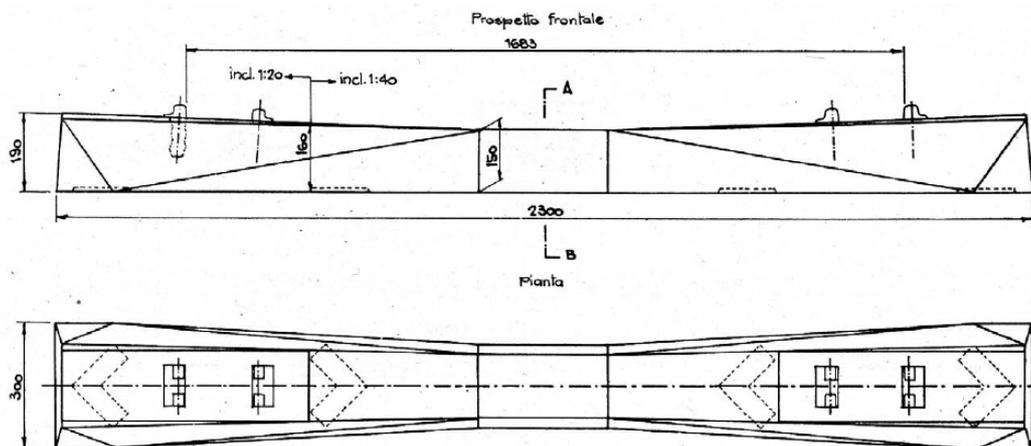


Figura 2.2 – Traverse in c.a.p. tipo MK. 60

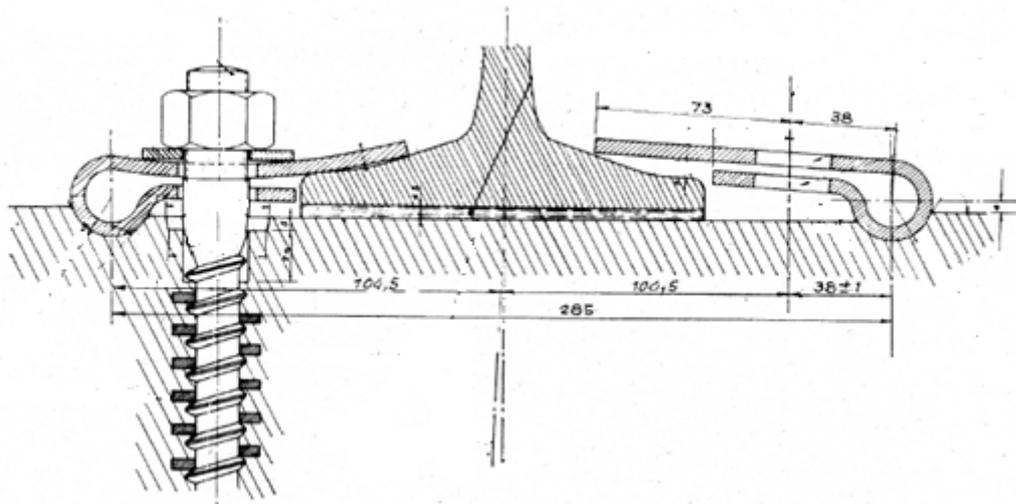
Per le nuove linee, progettate per velocità di tracciato superiore ai 200 km/h, sono state progettate delle traverse in cemento armato precompresso che raggiungono una lunghezza di 2,60 m: tale manufatto raggiunge una massa di 300 kg. Infine per le nuove

linee AV le FS hanno introdotto una traversa sempre da 2,60 m, ma avente massa di circa 400 kg.

Gli organi di attacco per fissare la rotaia alle traverse sono definiti di tipo diretto o indiretto.

Si definisce attacco diretto un attacco che, anche se fornito di una piastra interposta tra rotaia e traversa, vede sempre la rotaia fissata, con chiodi detti arpioni o con caviglie, direttamente alla traversa. La presenza o meno della stessa piastra intermedia fra traversa e suola di rotaia porta a distinguere la posa indiretta da quella diretta, non essendo peraltro quest'ultima più di pratico interesse.

Se invece di chiodi o caviglie si usano arpioni elastici, si ha un particolare tipo di attacco diretto che viene detto attacco elastico.



*Figura 2.3 – Attacco diretto rotaia – traversa*

Si definisce invece attacco indiretto un attacco che, oltre ad avere sempre una piastra tra rotaia e traversa, vede la piastra fissata alla traversa, a mezzo di caviglie, e la rotaia fissata alla piastra a mezzo di bulloni, detti chiavarde di ancoraggio, e di apposite piastrine.

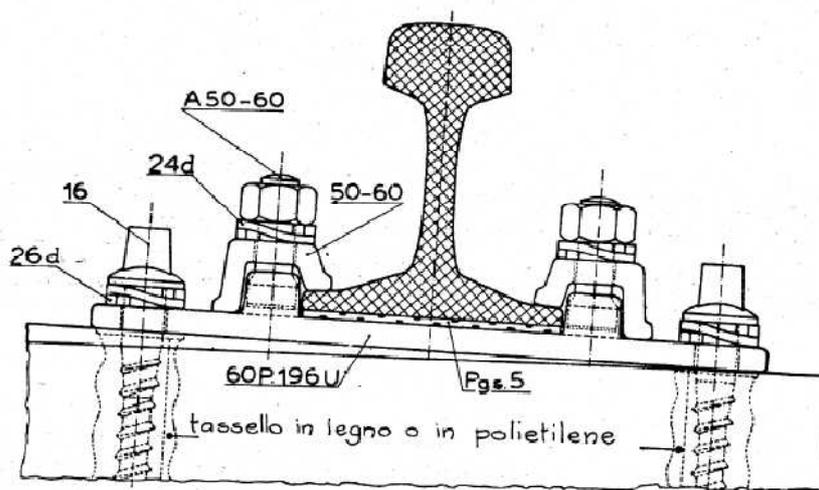


Figura 2.4 – Traversa cementizia FS; attacco indiretto per rotaia 60 UNI

### 2.3.2. GIUNZIONI E LUCI DI DILATAZIONE

I primi armamenti vennero costruiti con rotaie da 9 o 12 m. Tali lunghezze vennero fissate anche in funzione della massima dilatazione ammissibile.

Con un salto di temperatura di circa 70°C la variazione di lunghezza di una rotaia di 12 m è di circa 10 mm e ciò vuol dire che già con rotaie di 12 m la luce da lasciare nei giunti si avvicina al valore massimo – fissato nelle FS in 14 mm – compatibile con una buona marcia dei treni.

L'esistenza di un'interruzione e della luce di dilatazione rende necessaria, tra rotaie contigue, la presenza di giunti capaci di garantire la necessaria robustezza al binario pur consentendo le dilatazioni termiche.

Lo scopo viene raggiunto attraverso l'utilizzo di giunzioni costituite da due ganasce, da un piastrone e da bulloni di collegamento. Le due ganasce, in acciaio, vengono poste una a destra ed una a sinistra del gambo delle rotaie a cavallo dell'interruzione. A mezzo di bulloni, detti chiavarde, le due ganasce vengono strette in modo da serrare tra loro i gambi delle due testate delle rotaie contigue. Le due ganasce hanno una sezione opportunamente sagomata in modo che esse si incastrino saldamente tra i piani di steccatura delle testate delle rotaie.

Tutto il giunto appoggia poi su di un piastrone al quale le rotaie sono ancorate, come in un normale attacco diretto, a mezzo di chiavarde e piastrine. Si viene così a costituire un

insieme che è capace di sostituire, tanto nei riguardi degli sforzi verticali quanto di quelli orizzontali, la continuità delle rotaie nel punto di interruzione.

La dilatazione nella giunzione è consentita dal fatto che il diametro delle chiavarde è inferiore a quello dei fori delle rotaie e delle ganasce. Oggi si usano in FS chiavarde da 24 mm, fori nelle ganasce da 27 mm e fori nelle rotaie da 29 mm. Il gioco consentito è quindi pari a:

$$2 \times [(29 - 24) + (27 - 24)] = 16 \text{ mm}$$

contro i 14 mm che rappresentano la massima luce ammessa tra due rotaie consecutive. In questo modo si evita la sollecitazione a taglio delle chiavarde.

## 2.4. RESISTENZE CHE OSTACOLANO LA DILATAZIONE

Come visto, nella situazione reale la dilatazione delle rotaie non è né libera né completamente impedita. Infatti, quando le rotaie sono poste in opera sui loro appoggi la dilatazione libera è ostacolata essenzialmente dalle seguenti resistenze od impedimenti:

- resistenza di attrito che si sviluppa nelle giunzioni, tra le ganasce e le testate delle rotaie a causa della pressione esercitata dalle chiavarde;
- resistenza di attrito che si sviluppa tra massicciata e traverse alle quali le rotaie sono vincolate tramite gli organi di attacco;
- impedimento ad una ulteriore dilatazione delle rotaie quando, avvenuta la dilatazione sufficiente per chiudere le luci interposte tra le varie rotaie, le testate sono ormai a contatto diretto;

- impedimento ad un ulteriore accorciamento delle rotaie quando si è raggiunta la luce massima (14 mm) permessa dagli organi di giunzione<sup>8</sup>.

Le resistenze di attrito che si sviluppano ostacolano solo parzialmente la dilatazione della rotaia: le variazioni di temperatura portano ad una dilatazione della rotaia inferiore rispetto a quella che si avrebbe se essa risultasse completamente libera ma nel contempo nascono degli sforzi interni, che risultano anch'essi inferiori rispetto a quelli che si verificherebbero nel caso di dilatazione completamente impedita.

Solo quando le testate sono a contatto diretto (nel caso di aumenti di temperatura) o le luci raggiungono il loro valore massimo (nel caso di abbassamenti di temperatura), allora la dilatazione o l'accorciamento risultano completamente impediti.

Per poter esaminare il comportamento della rotaia quando le luci non risultano né completamente chiuse né completamente aperte, ossia in regime di dilatazione parzialmente impedita, è necessario conoscere i valori della resistenza d'attrito della giunzione e della resistenza d'attrito degli appoggi.

### 2.4.1. RESISTENZA D'ATTRITO OPPOSTA DALLE GIUNZIONI

Il collegamento tra le due rotaie consecutive è assicurato dagli organi di giunzione e cioè, normalmente, da due ganasce serrate contro i piani di steccatura da quattro chiavarde. La posizione reciproca delle rotaie non può essere pertanto alterata finché non si sviluppi una forza che vinca la resistenza d'attrito e faccia scorrere le rotaie entro le due ganasce.

Il valore di tale resistenza dipende soprattutto dall'entità del serraggio delle chiavarde e dalla ruvidezza dei piani a contatto e dalla loro lubrificazione. In media si può ritenere che tale resistenza sia di circa  $R_g = 60 \text{ kN}$  per ciascuna coppia di ganasce a condizione che le superfici di contatto siano opportunamente lubrificate e che le chiavarde siano state strette con le normali chiavi in dotazione, senza l'impiego di prolunghie. Poiché abbiamo calcolato quale è la forza sviluppata da una rotaia quando viene impedita la

---

<sup>8</sup> Come detto, il collegamento tra le testate di due rotaie consecutive è assicurato dagli organi di giunzione ordinariamente costituiti da due ganasce e da quattro chiavarde; per la diversa distanza tra i centri dei fori esterni delle testate nonché per la diversità di fori delle rotaie, delle ganasce e del diametro del gambo delle chiavarde, si rende possibile uno scorrimento delle testate delle ganasce fino a raggiungere la luce massima di 14 mm.

libera dilatazione per ogni grado di variazione di temperatura (tab. 2.2) è possibile calcolare quale sia il salto di temperatura necessario per vincere la resistenza opposta da una coppia di ganasce allo scorrimento delle testate delle rotaie:

Tabella 2.3 –  $\Delta T$  necessario per vincere la resistenza d'attrito della giunzione

| Tipo di rotaia | Salto di temperatura occorrente per vincere la resistenza d'attrito della giunzione |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 36 UNI         | $60 : 11,05 = 5,4^{\circ}\text{C}$                                                  |
| 46 UNI         | $60 : 14,30 = 4,2^{\circ}\text{C}$                                                  |
| FS 49          | $60 : 15,00 = 4^{\circ}\text{C}$                                                    |
| 50 UNI         | $60 : 15,25 = 3,9^{\circ}\text{C}$                                                  |
| FS 60          | $60 : 18,15 = 3,3^{\circ}\text{C}$                                                  |
| 60 UNI         | $60 : 18,45 = 3,3^{\circ}\text{C}$                                                  |

## 2.4.2. RESISTENZA D'ATTRITO OPPOSTA DALLA MASSICCIA E DAGLI ORGANI DI ATTACCO

La dilatazione delle rotaie, oltre che dalle ganasce, è ostacolata anche dalla resistenza opposta dagli appoggi. Infatti la rotaia potrà muoversi soltanto dopo aver superato anche la resistenza d'attrito che per effetto degli attacchi la tiene ancorata alle traverse, oppure trascinando con sé le traverse, dopo aver vinto la resistenza che si sviluppa tra traverse e massiccata.

La resistenza opposta dagli appoggi alla dilatazione delle rotaie dipende in definitiva:

- dal numero degli appoggi;
- dal tipo degli attacchi (diretti, indiretti);
- dal tipo e dallo stato di assodamento della massiccata;
- dal grado di inquinamento della massiccata.

Sono molti gli elementi in gioco per determinare il valore della resistenza allo scorrimento delle rotaie ed è per questo che, dopo esperienze fatte, si sono assegnati due valori medi sui quali basare i calcoli per i binari muniti di traverse in legno con massiccata non inquinata:

- resistenza media  $r = 6 \text{ kN/m}$  per binario di tipo I<sup>9</sup>;
- resistenza media  $r = 3 \text{ kN/m}$  per binario di tipo II.

Tale resistenza vale circa  $9 \text{ kN/m}$  per il binario munito di traverse in cemento armato precompresso.

A differenza di quanto avviene per il tipo di resistenza opposta dagli organi di giunzione, per la quale la dilatazione delle rotaie è impedita fino al superamento della stessa resistenza da parte della forza interna alla rotaia prodotta da un certo salto di temperatura, la resistenza opposta dagli appoggi impedisce solo in parte la dilatazione delle rotaie e precisamente essa assume valori crescenti man mano che si procede dalla mezziera della rotaia alle sue estremità, dove si verifica la massima dilatazione.

Calcoliamo dunque la resistenza allo scorrimento di una rotaia lunga  $L$ , fissata agli appoggi ma non collegata alle estremità, con le rotaie adiacenti.

Considerato fermo il punto centrale, la condizione per lo spostamento di un punto qualsiasi della rotaia è che si spostino tutti gli appoggi compresi tra il punto medesimo e la testata più vicina. Di conseguenza la resistenza incontrata da ciascun punto è proporzionale alla sua distanza dalla testata.

In particolare, il punto in testata non incontra alcuna resistenza, mentre il punto prossimo al centro incontra la resistenza massima  $R_m = 6 \text{ kN/m} \cdot L/2$ .

Nell'ipotesi di utilizzare traverse in legno per binari di tipo I, i valori delle resistenze massime degli appoggi per ciascuna rotaia sono riportati nella tabella 2.4.

---

<sup>9</sup> Binario di tipo I) – binario armato con attacchi indiretti o elastici in numero uguale o superiore al 30% con una massiciata normale di pietrisco. Binario di tipo II) – binario armato con attacchi diretti od indiretti in numero inferiore al 30% o con massiciata ghiaiosa.

Tabella 2.4 – Resistenze massime degli appoggi per ciascuna tipologia di rotaia

| Lunghezza della rotaia [m] | Resistenza allo scorrimento [kN] |
|----------------------------|----------------------------------|
| 12                         | 36                               |
| 18                         | 54                               |
| 24                         | 72                               |
| 36                         | 108                              |
| 48                         | 144                              |

Calcoliamo ora il salto di temperatura necessario a far sorgere nella rotaia la forza di compressione o di trazione occorrente per superare la resistenza allo scorrimento degli appoggi.

Esso dipende dalla sezione della rotaia e si ottiene dal rapporto tra i valore della tabella 2.4 e quelli della tabella 2.2.

Tabella 2.5 –  $\Delta T$  [°C] per superare la resistenza degli appoggi

| Lunghezza della rotaia [m] | TIPO DI ROTAIA |        |       |        |       |        |
|----------------------------|----------------|--------|-------|--------|-------|--------|
|                            | 36 UNI         | 46 UNI | FS 49 | 50 UNI | FS 60 | 60 UNI |
| 12                         | 3,3            | 2,5    | 2,4   | 2,4    | 2,0   | 2,0    |
| 18                         | 4,9            | 3,8    | 3,6   | 3,5    | 3,0   | 2,9    |
| 24                         | 6,5            | 5,0    | 4,8   | 4,7    | 4,0   | 3,9    |
| 36                         | 9,8            | 7,6    | 7,2   | 7,1    | 6,0   | 5,9    |
| 48                         | 13,0           | 10,1   | 9,6   | 9,4    | 7,9   | 7,8    |

Variando la temperatura, tra l'inizio e la fine del salto termico, la rotaia si libera gradualmente, dalla testata al centro, dal vincolo costituito dalla resistenza degli appoggi, passando al regime di dilatazione libera. La rotaia subirà quindi una variazione di lunghezza diversa da punto a punto, massima in testata e nulla al centro. In definitiva la variazione di lunghezza della rotaia alla fine del salto risulta pari alla metà di quella che si avrebbe in assenza di vincolo.

Per i diversi tipi e lunghezze di rotaia la tabella 2.6 riporta la variazione di lunghezza.

*Tabella 2.6 – Variazione di lunghezza [mm] dalla condizione di riposo fino al superamento della resistenza degli appoggi*

| Lunghezza della rotaia [m] | TIPO DI ROTAIA |        |       |        |       |        |
|----------------------------|----------------|--------|-------|--------|-------|--------|
|                            | 36 UNI         | 46 UNI | FS 49 | 50 UNI | FS 60 | 60 UNI |
| 12                         | 0,2            | 0,2    | 0,2   | 0,2    | 0,1   | 0,1    |
| 18                         | 0,5            | 0,4    | 0,4   | 0,4    | 0,3   | 0,3    |
| 24                         | 0,9            | 0,7    | 0,7   | 0,7    | 0,6   | 0,6    |
| 36                         | 2,1            | 1,6    | 1,6   | 1,5    | 1,3   | 1,3    |
| 48                         | 3,8            | 2,9    | 2,8   | 2,7    | 2,3   | 2,2    |

Per quanto riguarda infine la forza interna (di compressione o di trazione) che sorge nella rotaia per la presenza del vincolo, essa ha valore zero in testata e valore massimo pari alla resistenza allo scorrimento (tabella 2.4) al centro.

Riepilogando, in un binario costituito da rotaie giuntate, prima che le rotaie possano entrare in regime di libera dilatazione (pur rimanendo compresse o tese da una forza corrispondente alla somma di  $R_g + R_m$ ) occorre:

- vincere la resistenza opposta dalle ganasce (dilatazione impedita, con valore delle luci fisso);
- vincere la resistenza opposta dagli appoggi (dilatazione parzialmente impedita, con valore delle luci variabile).

### 2.4.3. LUCI COMPLETAMENTE APERTE O CHIUSE

A seguito di un aumento della temperatura, raggiunta una dilatazione delle rotaie tale da chiudere le luci interposte tra le varie rotaie, le testate si trovano ormai a contatto diretto: in questa situazione, poiché alla rotaia è impedito di dilatarsi ulteriormente, nasce una forza interna di compressione.

Nel caso in cui invece, a seguito di una diminuzione di temperatura, un ulteriore accorciamento della rotaia sia impedito dal fatto che è stata ormai raggiunta la luce massima di 14 mm permessa dagli organi di giunzione, nasce internamente ad essa una forza di compressione.

In entrambe le situazioni si ricade nel caso di dilatazione completamente impedita, quindi tutta la variazione di temperatura da quel momento in avanti si traduce in una forza proporzionale al salto di temperatura e all'area della sezione della rotaia.

### 2.4.4. LE TABELLE DELLE LUCI DI POSA

Abbiamo visto come la presenza di alcuni vincoli possa arrivare a creare nella rotaia uno stato di compressione o di trazione al variare della temperatura, per cui possono nascere fenomeni di slineamento del binario, quando le rotaie sono troppo compresse, oppure di rottura, quando sono troppo tese.

E' quindi molto importante che la posa dei binari avvenga mettendo tutte le rotaie nelle stesse condizioni nei riguardi del fenomeno termico, per fare in modo che successivamente lo stato di compressione o di trazione non superi determinati limiti oltre i quali potrebbero sorgere situazioni di pericolo.

Per ottenere questo scopo è necessario lasciare tra le testate delle rotaie che si susseguono una luce diversa a seconda della diversa temperatura alla quale si effettua la loro posa e, poiché la legge della loro dilatazione è nota, basterà stabilire un punto di partenza, ad esempio la temperatura alla quale effettuare la posa con luce zero, per ricavare il valore da assegnare alle luci secondo le varie lunghezze di rotaie e la temperatura di posa.

Il valore della temperatura alla quale effettuare la posa delle rotaie a luce zero deve essere stabilito tenendo sempre presente, come detto, che le temperature massime e minime delle rotaie che si verificano nei nostri climi sono le seguenti:

- + 60°C (massima temperatura)
- - 10°C (minima temperatura)

Per tale escursione di 70°C non è possibile, almeno per le rotaie più lunghe, evitare che le luci si chiudano o si aprano completamente, per cui in fase di aumento della temperatura dopo la chiusura delle luci la rotaia si comprimerà, mentre in fase di diminuzione della temperatura, dopo la completa apertura delle luci, essa si tenderà

agendo con una forza crescente sulle chiavarde di giunzione. La temperatura di posa a luce zero, temperatura alla quale in una rotaia libera di dilatarsi si chiudono le luci, è stata scelta pari a 31°C in modo che non si verifichino né slineamenti del binario per eccessiva compressione né rotture per eccessiva trazione<sup>10</sup>.

Fissata una temperatura di posa con luce zero millimetri è possibile ricavare, in base alla legge della dilatazione libera, la relativa tabella delle luci di posa del binario alle diverse temperature.

La tabella 2.7, relativa al binario di tipo I, stabilisce in 31°C la temperatura di posa a luce zero; la tabella 2.8 fissa in 35°C la stessa temperatura di posa per tenere conto della minor resistenza dei binari di tipo II allo sforzo di compressione<sup>11</sup>.

Tabella 2.7 – Temperatura di posa a luce 0 per binari di tipo I

| Lunghezza<br>delle rotaie<br>[m] | LUCI DI POSA [mm]                          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |        |          |          |         |          |          |          |
|----------------------------------|--------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
|                                  | 0                                          | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11       | 12     | 13       | 14       | 15      | 16       | 17       | 18       |
|                                  | LIMITI DELLA TEMPERATURA DELLA ROTAIA [°C] |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |        |          |          |         |          |          |          |
| 12                               | 38<br>32                                   | 31<br>25 | 24<br>18 | 17<br>11 | 10<br>4  | 3<br>-3  | -4<br>-6 |          |          |          |          |          |        |          |          |         |          |          |          |
| 18                               | 37<br>33                                   | 32<br>29 | 28<br>24 | 23<br>19 | 18<br>15 | 14<br>10 | 9<br>5   | 4<br>1   | 0<br>-4  | -5<br>-6 |          |          |        |          |          |         |          |          |          |
| 24                               | 36<br>34                                   | 33<br>30 | 29<br>27 | 26<br>23 | 22<br>20 | 19<br>16 | 15<br>13 | 12<br>9  | 8<br>6   | 5<br>2   | 1<br>-1  | -2<br>-5 | -6     |          |          |         |          |          |          |
| 36                               | 36<br>34                                   | 33<br>32 | 31<br>30 | 29<br>27 | 26<br>25 | 24<br>23 | 22<br>20 | 19<br>18 | 17<br>16 | 15<br>13 | 12<br>11 | 10<br>9  | 8<br>6 | 5<br>4   | 3<br>2   | 1<br>-1 | -2<br>-3 | -4<br>-5 | -6<br>-8 |
| 48                               | 35                                         | 34<br>33 | 32<br>31 | 30<br>29 |          | 27<br>26 | 25<br>24 | 23<br>22 | 21       | 20<br>19 | 18<br>17 | 16<br>15 | 14     | 13<br>12 | 11<br>10 | 9<br>8  | 7        | 6<br>5   | 4<br>3   |

<sup>10</sup> Si calcola che una rotaia sopporti in tutta sicurezza una forza di compressione o trazione pari a 100 N/mm<sup>2</sup>

<sup>11</sup> Binario di tipo I) – binario armato con attacchi indiretti o elastici in numero uguale o superiore al 30% con una massciata normale di pietrisco. Binario di tipo II) – binario armato con attacchi diretti od indiretti in numero inferiore al 30% o con massciata ghiaiosa

Tabella 2.8 – Temperatura di posa a luce 0 per binari di tipo II

| Lunghezza<br>delle rotaie<br>[m] | LUCI DI POSA [mm]                          |          |          |          |          |          |           |          |          |           |          |          |        |        |          |          |          |          |         |    |
|----------------------------------|--------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|---------|----|
|                                  | 0                                          | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6         | 7        | 8        | 9         | 10       | 11       | 12     | 13     | 14       | 15       | 16       | 17       | 18      |    |
|                                  | LIMITI DELLA TEMPERATURA DELLA ROTAIA [°C] |          |          |          |          |          |           |          |          |           |          |          |        |        |          |          |          |          |         |    |
| 12                               | 34<br>28                                   | 27<br>21 | 20<br>14 | 13<br>7  | 6<br>0   | -1<br>-7 | -8<br>-10 |          |          |           |          |          |        |        |          |          |          |          |         |    |
| 18                               | 33<br>29                                   | 28<br>25 | 24<br>20 | 19<br>15 | 14<br>11 | 10<br>6  | 5<br>1    | 0<br>-3  | -4<br>-8 | -9<br>-10 |          |          |        |        |          |          |          |          |         |    |
| 24                               | 32<br>30                                   | 29<br>26 | 25<br>23 | 22<br>19 | 18<br>16 | 15<br>12 | 11<br>9   | 8<br>5   | 4<br>2   | 1<br>-2   | -3<br>-5 | -6<br>-9 | -      |        |          |          |          |          |         |    |
| 36                               | 32<br>30                                   | 29<br>28 | 27<br>26 | 25<br>23 | 22<br>21 | 20<br>19 | 18<br>16  | 15<br>14 | 13<br>12 | 11<br>9   | 8<br>7   | 6<br>5   | 4<br>2 | 1<br>0 | -1<br>-2 | -3<br>-5 | -6<br>-7 | -8<br>-9 | -       | 10 |
| 48                               | 31                                         | 30<br>29 | 28<br>27 | 26<br>25 | 24       | 23<br>22 | 21<br>20  | 19<br>18 | 17       | 16<br>15  | 14<br>13 | 12<br>11 | 10     | 9<br>8 | 7<br>6   | 5<br>4   | 3        | 2<br>1   | 0<br>-1 |    |

Infine sulle linee di montagna i limiti massimi di temperatura sono diversi da quelli sopracitati ed infatti si è accertato che la massima temperatura raggiungibile sulle linee di montagna può essere di + 54°C mentre la minima può essere di – 16°C. Poiché risultano diminuiti di 6°C i valori estremi di temperatura, la temperatura di posa a luce zero presa a riferimento è di 25°C anziché 31°C per armamenti di tipo I e di 29°C anziché 35°C per armamenti di tipo II. Tutti i dati caratteristici vengono quindi ridotti di una quantità costante e perciò non occorre creare una speciale tabella ma basta impiegare quelle del tipo I o del tipo II a condizione di aumentare di 6°C la temperatura effettiva rilevata e poi ricavare dalla tabella la luce occorrente.

## 2.5. CICLO TERMICO DELLA ROTAIA

Per ciclo termico della rotaia si intende l'avvicinarsi della sua temperatura nel tempo. La temperatura della rotaia segue, approssimativamente, quella ambientale per cui crescerà nel corso della mattinata e del primo pomeriggio (fase di temperatura crescente), diminuirà successivamente fino all'alba (fase di temperatura decrescente) per poi tornare a salire.

Per quanto riguarda l'effetto che tale ciclo termico induce nella rotaia questo può distinguersi nelle seguenti fasi:

- dilatazione parzialmente impedita, che si verifica con temperatura crescente o decrescente fino a quando non saranno state superate le resistenze opposte dalle giunzioni e dagli appoggi;
- dilatazione libera, che si verifica quando, vinte tutte le resistenze, la rotaia si dilata o si ritira seguendo praticamente la legge della libera dilatazione;
- dilatazione totalmente impedita, che si verifica quando si raggiunge, con temperatura decrescente, l'apertura massima delle luci consentita dalla geometria dell'organo di giunzione (14 mm), oppure con temperatura crescente, la chiusura totale delle luci.

In fase di dilatazione parzialmente impedita, l'azione termica si traduce in parte in accumulo di tensioni interne alla rotaia ed in parte in variazione delle luci.

Durante la fase di dilatazione libera, l'azione termica si traduce solo in variazione della luce restando costante la tensione accumulata precedentemente nella rotaia.

Infine, durante la fase di dilatazione totalmente impedita, l'azione termica si traduce solo in accumulo di tensioni interne restando costante il valore della luce (0 o 14 mm).

Prendiamo ora in considerazione una fila di rotaie del tipo 60 UNI di data lunghezza, posate alla temperatura di  $15^{\circ}\text{C}$ . Al momento della posa le luci risultano pari al valore descritto nelle tabelle 2.7 e 2.8.

Supponiamo di studiare il ciclo termico delle rotaie nelle ipotesi che la temperatura cresca da  $+15^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$  e decresca di nuovo fino a  $-10^{\circ}\text{C}$  toccando cioè i valori estremi dell'escursione termica normale in Italia.

- a) In un primo tempo, all'aumentare della temperatura, la resistenza opposta dalle ganasce di giunzione allo scorrimento di ciascuna rotaia impedisce la dilatazione. In ogni sezione della rotaia l'aumento della temperatura determina una forza di compressione crescente, che raggiunge il valore di  $60\text{ kN}$ , pari alla resistenza massima della giunzione, dopo un salto di temperatura di  $\Delta T_1$ . In definitiva, alla temperatura di  $15^{\circ}\text{C} + \Delta T_1$ , la rotaia risulta compressa da una forza di  $60\text{ kN}$  e la luce ha ancora il valore iniziale.

b) A seguito di un'ulteriore aumento di temperatura, la testata della rotaia si muove e, continuando a crescere la temperatura, fino a  $15^{\circ}\text{C} + \Delta T_2$ , si muoveranno gli altri punti della rotaia fino al centro, mano a mano che nei punti stessi si supera la resistenza allo scorrimento degli appoggi. Alla temperatura di  $15^{\circ}\text{C} + \Delta T_2$ , si avrà un aumento di lunghezza di ogni rotaia deducibile dalla tabella 2.6 e di conseguenza si ridurrà del medesimo valore la luce tra una rotaia e l'altra. Alla temperatura di  $15^{\circ}\text{C} + \Delta T_2$  quindi: la forza di compressione risulta di  $60\text{ kN}$  in testata e di  $60 + 108 = 168\text{ kN}$  al centro della rotaia assumendo valori intermedi negli altri punti.

c) Superate tutte le resistenze di attrito, a seguito di un ulteriore aumento della temperatura la rotaia si dilata fino alla chiusura delle luci, come se fosse libera.

d) Dal momento della chiusura delle luci, crescendo la temperatura, la rotaia entra in regime di dilatazione totalmente impedita: l'ulteriore salto di temperatura si esplica quindi in un aumento della forza di compressione in tutta la rotaia ( $\Delta F$ ) di valore proporzionale al salto stesso fino al raggiungimento della temperatura di  $60^{\circ}\text{C}$ . Complessivamente quindi a tale temperatura, la forza di compressione risulta in testata di  $60\text{ kN} + \Delta F$ , al centro di  $168\text{ kN} + \Delta F$ , la luce ha valore zero.

e) A partire da  $+60^{\circ}\text{C}$  la temperatura inizia a diminuire. Finché la rotaia risulta compressa in ogni punto, essa non potrà accorciarsi per effetto dell'abbassamento di temperatura e, quindi, l'unico effetto di questo consisterà in una diminuzione della forza di compressione. Perciò la forza di compressione in ogni punto della rotaia diminuisce del valore di  $\Delta F$  sopra citato, fino al raggiungimento della temperatura che corrisponde al momento di chiusura delle luci ( $60^{\circ}\text{C} - \Delta T_3$ ).

f) Un'ulteriore diminuzione di temperatura pari a  $-\Delta T_1$  determina una diminuzione dello sforzo di compressione nella rotaia pari a  $60\text{ kN}$ . Al termine di tale salto termico, si ha pertanto una forza di compressione pari a zero in testata e pari a  $168\text{ kN} - 60\text{ kN} = 108\text{ kN}$  al centro della rotaia; la luce ha valore zero.

g) Continuando a diminuire la temperatura, se la rotaia fosse libera dal vincolo delle giunzioni si sposterebbe almeno la testata determinando quindi l'apertura della luce. Ma la testata non può spostarsi prima che venga superata la resistenza di attrito della giunzione, il cui valore è di  $60\text{ kN}$ . Quindi l'apertura della luce non

potrà verificarsi prima che, almeno in testata, insorga per effetto della variazione termica una forza di trazione pari a  $60 \text{ kN}$ . Ciò avviene se, in tale diminuzione di temperatura, essa decremmenta ancora di  $-\Delta T_1$ . A questo punto si ha una forza di trazione di  $60 \text{ kN}$  in testata, una forza di compressione pari a  $108 \text{ kN} - 60 \text{ kN} = 48 \text{ kN}$  al centro, e la luce ha ancora valore zero.

h) Da questo momento in poi può avere inizio l'apertura della luce. Infatti, scendendo la temperatura al di sotto di  $60^\circ\text{C} - \Delta T_3 - 2 \Delta T_1$ , a partire dalla testata verso il centro cresce la forza di trazione fino a superare man mano in ogni punto la resistenza complessiva, allo scorrimento verso il centro, degli appoggi e della giunzione.

i) Infine se la temperatura diminuisce per valori prossimi allo zero e sottozero, superate tutte le resistenze di attrito la rotaia si accorcia seguendo la legge di dilatazione libera, fino all'apertura completa delle luci, per un valore massimo di  $14 \text{ mm}$ . Sebbene la dilatazione della rotaia avvenga in maniera libera, essa non risulta scarica: al termine di questa fase, infatti, la forza di trazione risulta pari a  $60 \text{ kN}$  in testata e a  $168 \text{ kN}$  al centro della rotaia.

l) Qualora la temperatura diminuisse oltre al valore per cui è avvenuta la completa apertura della luce, fino a raggiungere  $-10^\circ\text{C}$ , alla rotaia sarebbe impedito di accorciarsi dagli organi di giunzione: la diminuzione di temperatura determinerebbe soltanto una variazione della forza di trazione, mantenendo costante la luce massima a  $14 \text{ mm}$ .

m) Tornando a crescere la temperatura, la rotaia non potrà allungarsi finché in ogni suo punto risulta tesa: l'unico effetto dell'aumento di temperatura sarà una diminuzione della forza di trazione. Per valori al di sopra degli  $0^\circ\text{C}$ , superata la resistenza della giunzione, per l'effettivo scorrimento la rotaia deve superare la resistenza d'attrito degli appoggi. Aumentando la temperatura, ci si ritrova nelle medesime condizioni calcolate nel punto c), ovvero una forza di compressione di  $60 \text{ kN}$  in testata e di  $60 + 108 = 168 \text{ kN}$  al centro della rotaia, con luce zero.

Si chiude in questo modo il ciclo termico. Le successive variazioni di temperatura faranno ripercorrere alla rotaia il medesimo ciclo, purché esse siano sufficienti a far chiudere ed aprire completamente le luci.

### 2.5.1. OSSERVAZIONI SUL CICLO TERMICO

Dalle considerazioni appena svolte, è possibile ottenere un diagramma del ciclo termico, avente in ascissa il valore della luce [mm] e in ordinata il valore della temperatura [°C].

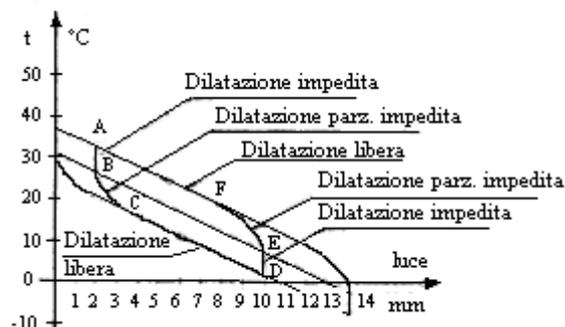


Figura 2.5 – Ciclo termico della rotaia

Se le variazioni di temperatura sono più contenute dell'escursione termica massima di 70°C, il ciclo è meno ampio di quello massimo ed è contenuto all'interno di esso.

I tratti verticali del ciclo corrispondono alle fasi in cui la rotaia si trova nelle condizioni di dilatazione impedita e in cui la variazione della luce è nulla. I tratti curvilinei corrispondono alle fasi in cui la rotaia va superando, dalla testata verso il centro, la resistenza allo scorrimento degli appoggi ed il salto termico determina una variazione della luce pari a metà di quella che si avrebbe nella dilatazione libera. I tratti rettilinei corrispondono alle fasi in cui, avendo la rotaia superato in ogni punto le resistenze di attrito, il salto termico determina variazioni di lunghezza uguali a quelle della dilatazione libera.

La retta parallela ai tratti rettilinei del ciclo e da questi equidistante, rappresenta per le stesse rotaie i valori di luce nella dilatazione libera (retta delle luci di posa).

Ai diversi tipi o lunghezze di rotaie corrispondono cicli della luce differenti in ampiezza ma della medesima forma.

Osserviamo infine che la variazione di temperatura necessaria a far percorrere il tratto verticale e quello curvilineo del ciclo, rappresenta il salto termico necessario affinché la rotaia inverta il movimento in ogni suo punto, ossia si scarichi della forza interna

accumulata in un senso e ne riacquisti una di segno contrario sufficiente a superare tutte le resistenze allo scorrimento in senso opposto. Tale salto termico di inversione è caratteristico di ciascun ciclo termico e si ottiene moltiplicando per due la somma del salto termico della tabella 2.3 e di quello della tabella 2.5.

### 2.6. LIMITI OPERATIVI DEI GIUNTI

La metodologia che permette di servirsi, in testata alle rotaie, di giunzioni che ammettono delle luci di dilatazione rende impossibile l'utilizzo di rotaie di lunghezza superiore ai 12 m: infatti, in tal caso, occorrerebbe lasciare delle luci di dilatazione che, nei momenti di temperatura minima, potrebbero superare il massimo consentito da un accettabile martellamento delle ruote sui giunti. Ciò costringerebbe ad utilizzare solamente rotaie di dimensioni contenute, costituendo un limite ai possibili sviluppi tecnologici di rotaie con lunghezze superiori, che permetterebbero una riduzione dei costi e dei tempi di costruzione di una linea.

Analizzando la situazione da un altro punto di vista, il recente sviluppo di linee ad alta velocità, che consentono il transito di treni fino a oltre 200 km/h, ha reso più delicato il problema del martellamento delle ruote sui giunti: l'elevata velocità comporta, anche per piccole luci di giunzione, sollecitazioni eccessive sia al materiale rotabile che al binario stesso, determinando un'usura accelerata di molti componenti del veicolo e dell'infrastruttura. Inoltre il comfort dei passeggeri è fortemente penalizzato a seguito delle oscillazioni verticali del treno conseguenti al suo passaggio ad elevata velocità in corrispondenza di una giunzione.

D'altra parte, una riduzione o addirittura l'annullamento delle luci di dilatazione, a rotaie libere, non potrebbero che essere ammessi in ambienti dove esiste la sicurezza che lo sbalzo massimo di temperatura risulti contenuto entro limiti ristretti.

Sono questi i motivi per cui si è passati dalla tecnologia delle giunzioni all'utilizzo della lunga rotaia saldata, la quale permette di superare le limitazioni operative sopra descritte.

# 3. LA LUNGA ROTAIA SALDATA

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione della lunga rotaia saldata.

A questo scopo, ci si riferisce alla Istruzione tecnica RFI TC AR IT AR 07 003 A, ovvero alla normativa vigente in Italia per la costituzione ed il controllo della lunga rotaia saldata.

Il capitolo è articolato in due diverse sezioni: nella prima si descrivono l'approccio teorico alla regolazione che la normativa utilizza, le prescrizioni e le metodologie con cui si effettua la procedura di regolazione e le temperature di riferimento.

Nella seconda sezione si descrivono le metodologie di controllo della lunga rotaia saldata in fase di esercizio.

Verrà inoltre presentato l'attuale sistema che RFI utilizza per il monitoraggio della procedura di regolazione, progettato dalla Net Tech s.r.l., per poter fornire la possibilità di effettuare una comparazione con il progetto sviluppato successivamente nel presente lavoro di tesi.

### 3.1. DEFINIZIONE DI LUNGA ROTAIA SALDATA

L'avvento della tecnologia della lunga rotaia saldata è legato alla necessità di trovare una metodologia realizzativa dell'infrastruttura ferroviaria che permetta di superare le problematiche inerenti la realizzazione del binario con giunzioni viste nel precedente capitolo.

L'Istruzione Tecnica RFI TC AR IT AR 07 003 A "Istruzione sulla costituzione ed il controllo sulle lunghe rotaie saldate", edizione 2006, afferma: *"Si definisce binario in lunga rotaia saldata (l.r.s.) quel binario nel quale le dilatazioni, o le contrazioni, delle rotaie, dovute alle escursioni termiche, possono manifestarsi solo alle estremità della l.r.s., restando quindi immobile un tratto centrale, al variare della temperatura delle rotaie medesime, nel quale si generano soltanto variazioni di sforzi longitudinali nelle rotaie (sollecitazioni interne) proporzionali proprio alle suddette variazioni di temperatura"*.

Valutando attentamente i valori delle forze che hanno origine nelle rotaie per effetto delle variazioni di temperatura e i valori delle resistenze che il binario oppone ad esse, è possibile calcolare per ciascuna tipologia di rotaia la lunghezza minima oltre la quale la parte centrale delle rotaie stesse non subisce alcun movimento (coincidente con la lunghezza minima di rotaia in lunga rotaia saldata).

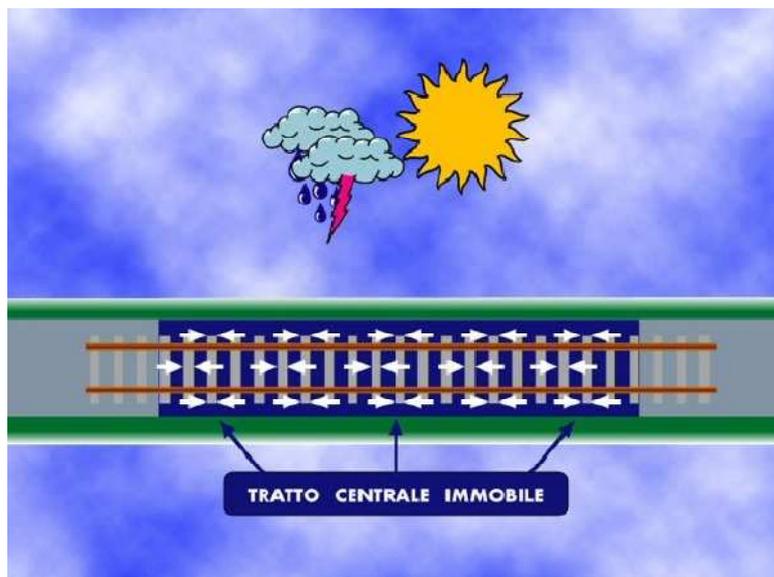


Figura 3.1 – Tratto centrale immobile della lunga rotaia saldata

Si riporta di seguito un esempio di calcolo di tale lunghezza. Si considerino delle rotaie tipo 60E1, con resistenza della massicciata di 9 KN/m, posate in opera alla temperatura di 25°C (ottenuta dalla media tra la temperatura massima di 60°C, normalmente raggiungibile dalle rotaie nelle nostre regioni e la minima di -10°C); la forza di compressione massima che nasce nelle rotaie, quando se ne impedisce la dilatazione, risulta uguale a:

$$F = 0,24 \times A \times \Delta T = 18,45 \times (60^\circ - 25^\circ) = 18,45 \times 35^\circ = 645,74 \text{ kN}$$

dove:

- A: area della sezione di rotaia (tipo 60E1, sezione 76,8 cm<sup>2</sup>).
- $\Delta T$ : salto termico in gradi centigradi.

La resistenza totale di attrito ( $R_t$ ), capace di eguagliare la suddetta forza a metà lunghezza della rotaia, è data da:

$$R_t = R_g + R_m = 60 + \frac{L}{2} \times 9$$

dove:

- $R_g$ : resistenza di attrito opposta al movimento delle rotaie dagli organi di giunzione; il valore, medio, è fissato in 60 KN e vale per tutti i tipi di rotaie.
- $R_m$ : resistenza di attrito opposta dalla massicciata, la quale varia gradualmente il suo valore da un minimo in corrispondenza delle estremità delle rotaie a un massimo in corrispondenza della mezzeria.
- L: lunghezza limite della rotaia.

Dalla formula sopra indicata si può ricavare il valore di  $L$  uguagliando  $F$  ad  $R_t$  per cui:

$$645,75 = 60 + \frac{L}{2} \times 9 \text{ da cui}$$

$$L = \frac{2 \times (645,75 - 60)}{9} = 130 \text{ m circa}$$

che per motivi di produzione delle rotaie in stabilimento si arrotonda a 144 m.

Con lo stesso procedimento è possibile calcolare la lunghezza limite di una rotaia tipo 50E5 ponendo:

$$F = 15,25 \times (60^\circ - 25^\circ) = 15,25 \times 35^\circ = 533,75 \text{ kN}$$

eguagliando  $F$  ad  $R_t$  (quest'ultima di valore uguale a quanto visto per le rotaie 60E1), si ha:

$$R_t = R_g + R_m = 60 + \frac{L}{2} \times 9$$

ottenendo:

$$L = \frac{2 \times (533,75 - 60)}{9} = 105 \text{ m circa}$$

che per motivi di produzione delle rotaie in stabilimento si arrotonda a 115 m.

Pertanto, per binari aventi le caratteristiche strutturali di cui al successivo paragrafo 3.2 ed in buono stato di manutenzione, armati con traverse in c.a.p., risulta che a partire dalla lunghezza di 144 m (per le rotaie del profilo 60E1) e di 115 m (per le rotaie del profilo 50E5), il tratto centrale delle rotaie stesse non subisce alcun movimento dovuto alle dilatazioni termiche, in conseguenza delle normali escursioni di temperatura giornaliere e stagionali cui le rotaie sono sottoposte. Per binari armati con traverse in legno, le lunghezze suddette sono rispettivamente di 200 m e 150 m.

Per quanto concerne le sollecitazioni che si sviluppano nelle rotaie, costituenti binari in lunga rotaia saldata e binari con giunzioni, si osserva quanto segue:

- a) Sforzi di compressione massimi (interessanti la parte centrale della l.r.s. e la mezzeria delle rotaie con le giunzioni) alla temperatura massima di 60°C:

- per il binario in l.r.s.

$$F = 18,45 \times (60^\circ - 30^\circ) = 18,45 \times 30^\circ = 553,50 \text{ kN}$$

avendo ipotizzato come temperatura di regolazione<sup>12</sup> delle tensioni interne 30°C

- per il binario con giunzioni (temperatura di posa a luce zero pari a 31°C)

$$F = \left(\frac{48}{2} \times 9\right) + 60 + 18,45 \times (60^\circ - 40^\circ) = 276 + 369 = 645 \text{ kN}$$

essendo  $t_{\max} = 60^\circ\text{C}$  e  $t_c = 40^\circ\text{C}$  la temperatura di chiusura delle luci per il binario armato con rotaie lunghe 48 m e traverse in c.a.p.

Pertanto, nel binario con giunzioni, alla temperatura massima di 60°C, esiste, nella mezzeria della rotaia, uno sforzo di compressione di circa 90 KN in più rispetto a quello esistente nel corpo della l.r.s.

Le cose non si modificano di molto quando si esamina il comportamento tensionale del binario già sottoposto a cicli completi di inversione di temperatura (aumento e diminuzione di temperatura tali da vincere completamente le resistenze complessive del binario).

Se è vero che per il binario con giunzioni la chiusura delle luci avviene a temperatura superiore a quella di posa a luce zero (40°C per le rotaie da 48 m, anziché 31°C) – per cui il tipo di binario in questione potrebbe sembrare, a parità di temperatura, meno sollecitato a compressione di quello ove esiste la l.r.s. – è altresì vero che, alla temperatura di chiusura delle luci, nelle rotaie esiste uno sforzo di compressione corrispondente alla somma delle resistenze  $R_g + R_m = R_t$  (resistenza della giunzione più

<sup>12</sup> Temperatura di regolazione: vedi paragrafo 3.5.

resistenza della massicciata che, per le rotaie lunghe 48 m è  $60 + 216 = 276$  KN, a cui corrisponde per le rotaie del profilo 60E1 un salto di temperatura uguale a circa  $15^\circ$ , ottenuto dividendo la resistenza totale di 276 KN per lo sforzo di 18,45 KN che nasce nella rotaia per ogni grado di variazione di temperatura).

b) Sforzi di trazione: per quanto riguarda gli sforzi di trazione la lunga rotaia saldata risulta più sollecitata rispetto al binario con giunzioni. Infatti alla temperatura di  $-10^\circ\text{C}$  si avrà:

- per il binario con l.r.s.

$$F = 18,45 \times (30^\circ + 10^\circ) = 738 \text{ kN}$$

- per il binario con giunzioni (temperatura di massima apertura delle luci =  $-3^\circ\text{C}$ )

$$F = 276 + 18,45 \times (10^\circ - 3^\circ) = 276 + 129 = 405 \text{ kN}$$

corrispondente a poco più della metà dello sforzo di trazione che si verifica nella l.r.s.

E' comunque opportuno considerare che:

- il maggior sforzo di trazione che nasce nelle l.r.s. risulta contenuto entro i limiti di sicurezza del materiale costituente le rotaie;
- lo sforzo che genera maggiori problemi, dei due presentati, è sicuramente quello di compressione essendo l'eventuale responsabile del fenomeno di slineamento dei binari, a differenza dell'eccessiva trazione responsabile di una eventuale rottura della rotaia.

## 3.2. REQUISITI E LIMITI REALIZZATIVI DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA

Le lunghe rotaie saldate, ottenute saldando tra loro in opera le rotaie di lunghezza standard, cominciarono a muovere i primi passi in FS a partire dalla seconda metà degli anni '50. Esse sono andate sempre più estendendosi per i vantaggi che le stesse apportano e che possono riassumersi in:

- riduzione dei lavori di manutenzione al binario (le giunzioni, costituendo dei punti delicati del binario, richiedono una continua manutenzione);
- riduzione dei lavori di manutenzione al materiale rotabile, con aumento della durata dello stesso (dovuto alla riduzione delle sollecitazioni indotte nel medesimo dalla presenza delle giunzioni);
- possibilità di aumentare la velocità dei treni e quindi riduzione dei tempi di percorrenza;
- aumento del comfort di viaggio in treno.

Secondo l'Istruzione Tecnica RFI TC AR IT AR 07 003 A, i requisiti richiesti per la realizzazione della l.r.s. sono:

- lunghezza minima del tratto di binario da regolare:

*Tabella 3.1 – Lunghezza minima del tratto di binario da regolare*

| LUNGHEZZA MINIMA DEL TRATTO DI BINARIO DA REGOLARE | PROFILO ROTAIE | TIPO TRAVERSE |
|----------------------------------------------------|----------------|---------------|
| 144 m                                              | 60E1           | CAP           |
| 115 m                                              | 50E5           | CAP           |
| 200 m                                              | 60E1           | LEGNO         |
| 150 m                                              | 50E5           | LEGNO         |

(si può notare come i valori contenuti in tabella corrispondano alle lunghezze minime per i due differenti profili di rotaia calcolate nel paragrafo 3.1, ovvero lunghezze minime di rotaia necessarie per avere il tratto centrale non soggetto a variazioni di lunghezza)

- raggi di curvatura nei tratti curvilinei che dipendono:
  - a) dal tipo di traverse installate (60E, M62P, FSU35P, ecc);
  - b) dallo spartito, ovvero dall'interasse tra le traverse (60/66,6 cm);
  - c) dalla distanza U tra le estremità delle traverse e lo spigolo superiore della massicciata;

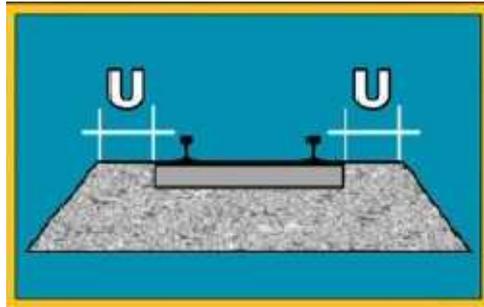


Figura 3.2 – Distanza tra le estremità delle traverse e lo spigolo superiore della massicciata

- se il tratto in curva ricade in una stazione e la massicciata è a livello costante al piano superiore delle traverse, o incassata tra i marciapiedi, il raggio di curvatura e il tipo di traverse non presentano alcuna controindicazione per la realizzazione della lunga rotaia saldata;
- se il tratto in curva ricade in galleria e ha una lunghezza superiore ai 150 m, è ammessa la l.r.s. per qualunque tipo di traversa e raggio;
- in merito ai tratti in galleria è opportuno precisare che se il loro sviluppo risulta inferiore ai 150 m, la regolazione<sup>13</sup> si effettua senza soluzione di continuità; per tratti di lunghezza superiore ai 150 m, la regolazione si assesta con due antenne di 75 m all'interno di ciascun imbocco, essendo il tratto centrale delle rotaie esente da significative dilatazioni per via della ridottissima escursione termica.

Ulteriori requisiti sono:

- l'uso di rotaie nuove o in buono stato, dei profili 50E5 e 60E1, con attacchi elastici indiretti dei tipi 50 e 60, nonché l'impiego di giunti isolanti incollati;

<sup>13</sup> Regolazione della lunga rotaia saldata: vedi paragrafo 3.5, 3.6.

- traverse, in buone condizioni, poste agli interassi prescritti e massicciata, costituita da pietrisco di pezzatura regolare, avente la granulometria prevista;
- scambi muniti di cuori monoblocco in acciaio fuso al Manganese, oppure con cuori a punta.

Costituiscono impedimento all'adozione della l.r.s.:

- la mancanza di uno solo dei requisiti sopra riportati;
- l'esistenza di tratte di linea caratterizzate da corpo stradale cedevole o da piattaforme instabili, intendendosi con ciò quelle tratte per le quali i fenomeni di cui sopra impongono rallentamenti fissi in orario o limitazioni delle velocità d'orario per almeno un rango di circolazione.

La lunga rotaia saldata non può essere realizzata sui binari secondari di stazione con velocità massima non superiore a 60 Km/h, in presenza di scambi armati con rotaie del profilo inferiore al 46E4, tenuti assieme mediante le normali chivarde di giunzione.

E' consentita:

- a) la realizzazione della l.r.s. passante fra più scambi;
- b) la realizzazione del binario continuo fra più scambi posti fra loro a distanza inferiore ai limiti riportati nella tabella 3.1.

#### 3.2.1. CASI PARTICOLARI

Molto frequentemente la lunga rotaia saldata incontra nel suo sviluppo punti singolari come deviatori con cuore monoblocco incollato o saldato, travate metalliche senza massicciata e passaggi a livello. Questi punti singolari potranno essere inseriti nella l.r.s. solo quando la loro collocazione dista da una giunzione estrema<sup>14</sup> almeno 100 m se le

---

<sup>14</sup> Giunzione estrema: luce di dilatazione presente nei tratti in cui la lunga rotaia saldata viene interrotta.

traverse sono in c.a.p. e 150 m se sono in legno. Tale accorgimento risulta fondamentale per garantire che essi ricadano nel tratto di binario non soggetto a spostamenti.

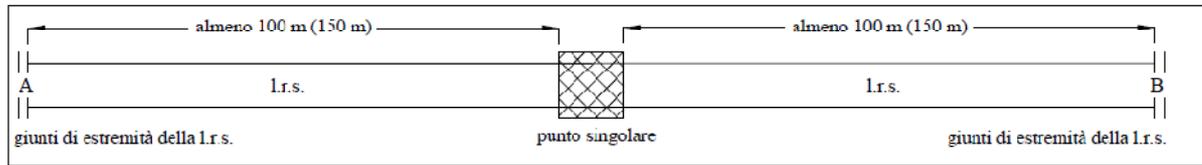


Figura 3.3 – Collocazione punto singolare in l.r.s.

Nel caso in cui un punto singolare non possa essere inserito in una lunga rotaia saldata, deve essere protetto da una campata polmone<sup>15</sup> di 36 m (per le travate metalliche senza massicciata occorrono 2 campate da 36 m).

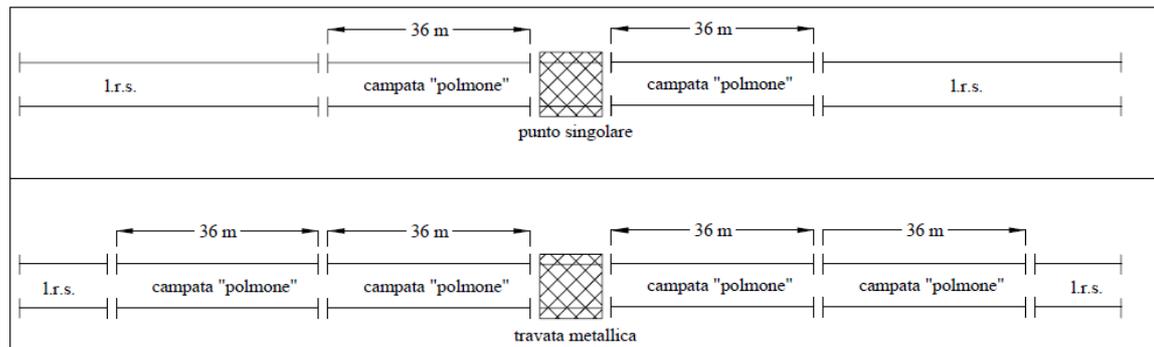


Figura 3.4 – Punto singolare collocato al di fuori della l.r.s.

Se in prossimità dell'estremità di un tratto di l.r.s. ricadono scambi con cuori di rotaia assiemati con le normali chiavarde, gli scambi stessi devono essere isolati, lato punta e lato tallone, dai tratti in l.r.s. da serraglia (da 12 – 18 m) seguite da una campata polmone di 36 m.

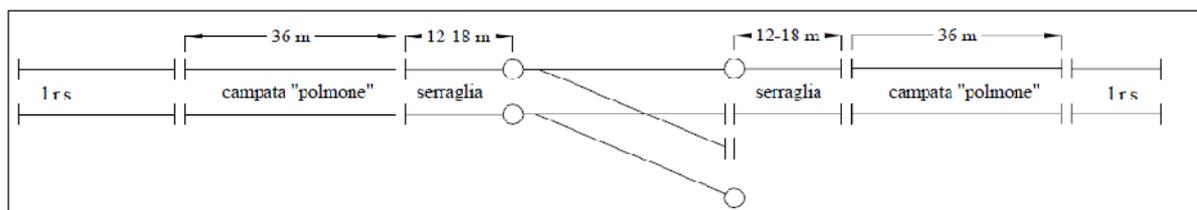


Figura 3.5 – Collocazione scambi con cuori di rotaia assiemati con normali chiavarde

<sup>15</sup> Campata polmone: tratti di rotaia di 36 m adiacenti a ciascuna giunzione estrema.

### 3.3. FASI OPERATIVE PER LA COSTITUZIONE DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA

La lunga rotaia saldata può essere realizzata durante i lavori di costituzione del binario (realizzazione di nuove linee), durante quelli di rinnovamento, oppure come intervento a sé stante.

Per la costituzione della l.r.s., le rotaie elementari, della lunghezza di 36 m oppure 108 m, dei profili 50E5 e 60E1, devono dapprima essere saldate fra loro progressivamente mediante il procedimento di saldatura alluminotermica od elettrico a scintillio<sup>16</sup>, per l'esecuzione delle quali valgono i seguenti limiti di temperatura:

- per rotaie costituite da acciaio normale tipo 700: minimo - 5°C
- per rotaie costituite da acciaio duro tipo R260: minimo 0°C

Nel caso di saldature eseguite con procedimento alluminotermico, per rotaie in acciaio duro tipo R260, se la temperatura delle rotaie è inferiore a +10°C e si utilizza il procedimento di saldatura PRA, è necessario preriscaldare alla temperatura di 50°C anche un tratto di rotaia di lunghezza 1 m a cavallo della giunzione da saldare.

#### 3.3.1. COSTITUZIONE DELLA L.R.S. IN OCCASIONE DI COSTRUZIONE A NUOVO O DI RINNOVAMENTO DEL BINARIO

Per quanto concerne questa tipologia realizzativa della l.r.s., la normativa RFI impone che le due fughe delle rotaie debbano essere posate in opera in modo tale che le testate delle rotaie elementari da 36 m, successivamente soggette a saldatura con procedimento alluminotermico al fine di formare il tratto in l.r.s., risultino sfalsate fra loro di 12 m e comprese entro lo spartito delle traverse.

---

<sup>16</sup> Per le saldature: vedi paragrafo 3.4

L'unica deroga concessa a tale prescrizione riguarda le rotaie di lunghezza 108 m, soggette a saldatura sia mediante procedimento alluminotermico che elettrico a scintillio, e le rotaie di 36 m da saldare in opera con il procedimento elettrico a scintillio.

Inoltre, le testate destinate a diventare giunzioni estreme definitive della l.r.s. devono essere necessariamente affacciate a squadra sulle due fughe di rotaie ed appoggiate su traverse doppie di legno con due traverse di controggiunto.

Contestualmente alla fase di posa si procede:

- subito dopo il serraggio degli organi di attacco, al rilievo delle temperature di posa  $T_p$  delle rotaie;
- alla riguarnitura delle testate delle traverse, utilizzando anche il pietrisco dell'unghiatura;
- ad un primo sommario livellamento ed allineamento del binario.

La normativa sottolinea anche che qualora nel periodo intercorrente tra la costituzione del binario continuo ed il suo assetto definitivo (risanamento, riguarnitura, rinalzata e riprofilatura) la temperatura delle rotaie dovesse superare quella di posa indicata in modo indelebile sul gambo delle stesse, rispettivamente di:

- + 15°C per il binario in retta o con curve di raggio  $R > 600$  m,
- + 10°C per i binari con curve di raggio  $R < 600$  m,

nella zona in cui si è verificato detto superamento, è necessario operare il taglio delle rotaie, in tratti non superiori a 144 m con allentamento degli organi di attacco e successivo stringimento degli stessi. Il motivo di tale prescrizione è strettamente legato al comportamento termico dell'acciaio: ad un incremento della temperatura, le rotaie, poste in opera in seguito al successivo procedimento di saldatura, tendono ad allungarsi generando un aumento degli sforzi di compressione che possono portare, al limite, allo slineamento del binario ancora prima di averlo posto in esercizio.

Al fine di creare un nuovo stato di equilibrio tensionale all'interno degli stessi, si procede al taglio.

Ciò comporta anche la necessità di avere squadre di operai sempre reperibili per poter intervenire tempestivamente sull'infrastruttura (soprattutto nei tempi di chiusura del cantiere).

I predetti valori limite di temperatura, nel caso in cui si proceda al rinnovamento del binario, ovvero interventi di costituzione del binario continuo su binari già riguarniti, rinalzati e riprofilati (binari in assetto definitivo), subiscono una maggiorazione (secondo quanto riportato nella tabella 3.2), incremento che tiene conto dell'effetto di assestamento della massicciata in seguito al peso dei convogli transitati sul binario già in esercizio e dell'eventuale stabilizzazione dinamica del binario<sup>17</sup>.

Tabella 3.2 – Incrementi di temperatura limite per interventi di rinnovamento

| Condizioni del binario                                            | Tracciato del binario   | Limite di Temperatura      | Maggiorazione dei limiti di Temperatura                                             |                                      |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                   |                         |                            | Assestamento massicciata con transito treni                                         | Stabilizzazione dinamica del binario |
| Binario continuo in assetto geometrico definitivo ma non regolato | retifili                | $T_{pmin} + 15 \text{ °C}$ | 1 °C ogni 5000 tonnellate-treno transitate con il limite $T_{pmin} + 30 \text{ °C}$ | $T_{pmin} + 30 \text{ °C}$           |
|                                                                   | curve con $R \geq 600m$ |                            |                                                                                     |                                      |
|                                                                   | curve con $R < 600m$    | $T_{pmin} + 10 \text{ °C}$ |                                                                                     |                                      |

La motivazione dell'incremento dei valori limite di temperatura è legata al fatto che l'effetto di assestamento e stabilizzazione crea, seppur a parità di incremento di sforzi di compressione, un maggior effetto contrastante dell'armamento ferroviario alla tendenza di slineamento del binario.

Nel caso in cui si preveda che, nella giornata immediatamente successiva al lavoro di posa dei binari, la temperatura del ferro possa superare i limiti precedentemente prescritti, si procede al pretensionamento delle rotaie mediante morsetto tendirotaia al fine di ottenere uno sforzo di trazione corrispondente ad un salto termico di 10°C (con conseguente serraggio degli organi di attacco).

La temperatura di posa delle rotaie alla quale si farà riferimento sarà pertanto una temperatura di posa fittizia, data dalla somma tra la temperatura di posa reale e i 10°C ottenuti con il pretensionamento.

<sup>17</sup> La stabilizzazione dinamica del binario ha lo scopo di ancorare meglio la griglia del binario nella massicciata. Il binario presenta quindi, dopo la stabilizzazione dinamica, uno stato di maggiore sicurezza all'esercizio e consente ai treni di transitare alla velocità massima di linea ammissibile.

L'imposizione di uno stato di sforzo differente dal normale stato delle rotaie permette quindi di rientrare nei canoni di temperatura limite imposti dalla normativa ed evitare il taglio delle rotaie stesse altrimenti inevitabile per l'eccessiva compressione che si andrebbe a creare.

In sede di risanamento a sé stante della massicciata si applicano le prescrizioni illustrate finora, fermo restando che prima del consolidamento del binario lo stesso dovrà essere scaricato delle sue tensioni interne mediante opportuni tagli delle rotaie ed allentamento degli organi di attacco.

E' ammesso non operare tagli se la temperatura effettiva della rotaia, in fase di lavoro o nel periodo successivo fino alla rinalzata e profilatura definitiva, è compresa nei seguenti limiti (con  $T_r$  temperatura di regolazione prima del risanamento):

- binario in rettilineo o con curve di raggio  $R > 600$  m:  $T_r + 15^\circ\text{C}$  e  $T_r - 30^\circ\text{C}$ ,
- binario in curve di raggio  $R < 600$  m:  $T_r + 10^\circ\text{C}$  e  $T_r - 15^\circ\text{C}$ .

Nel caso in cui la l.r.s. interessi binari già armati di giunzioni, valgono le norme appena illustrate, integrate da:

- bonifica delle rotaie (asportazione delle testate di giunzione) e conseguente scorrimento delle rotaie;
- ricambio delle rotaie presentanti consumi o difetti tali da non consentire o rendere conveniente la bonifica delle stesse;
- risanamento della massicciata;
- sostituzione delle traverse doppie con quelle semplici, con regolarizzazione dello spartito;
- scorrimento delle rotaie per realizzare, se necessario e se non già esistente, lo sfalso di 12 m;
- verifica ed eventuale ripristino del corretto stato geometrico del binario (allineamento a livello longitudinale e trasversale).

## 3.4. SALDATURA ALLUMINOTERMICA ED ELETTRICA A SCINTILLIO

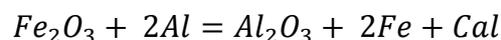
### 3.4.1. SALDATURA ALLUMINOTERMICA

Il nome stesso del procedimento alluminotermico indica che si tratta di un processo atto a sviluppare del calore mediante la combustione dell'alluminio. Infatti, l'alluminio presenta una forte affinità con l'ossigeno nel caso in cui venga mescolato, in certe proporzioni, con ossido metallico entrambi finemente suddivisi.

Innescando la reazione chimica tra i due elementi, l'alluminio brucia sottraendo l'ossigeno all'ossido con cui è mescolato trasformando quest'ultimo in metallo puro.

Si tratta, in sostanza, di una combustione in cui il combustibile è costituito dall'alluminio ed il comburente dall'ossigeno sottratto all'ossido metallico.

Nel caso dell'ossido di ferro il processo si svolge secondo la seguente reazione chimica:



La temperatura che la reazione raggiunge è di circa 2800°C.

La saldatura alluminotermica, che sfrutta il processo di cui sopra, è un procedimento di saldatura autogena per fusione. Esso fu messo a punto dal tedesco Goldschmidt nel 1899 con il nome tedesco di processo "Thermit" e trovò la sua maggiore applicazione nella saldatura delle rotaie ferroviarie.

Dal completamento, nell'apposito crogiolo, della reazione chimica fra ossido di ferro e alluminio, si ottengono acciaio e scorie allo stato fuso, più un forte sviluppo di calore (848 Kcal per ogni chilogrammo di porzione saldante) occorrente per effettuare la fusione e quindi la saldatura delle due rotaie.

I materiali sopra citati, alla fine della reazione chimica, si stratificano nel crogiolo a causa della diversa densità o peso specifico delle due sostanze (l'acciaio, più pesante, si deposita sul fondo; la scoria, più leggera, si raccoglie sulla superficie dell'acciaio fuso). L'operazione di saldatura consiste nel far colare, dal crogiolo sovrastante la giunzione di rotaia da saldare, l'acciaio allo stato fuso nello spazio (luce) esistente fra le due testate delle rotaie avvolte da una forma in materiale refrattario.

I sistemi impiegati per la saldatura alluminotermica delle rotaie si distinguono tra loro, essenzialmente, per la durata del preriscaldamento delle rotaie stesse. Essi sono:

- Sistema con preriscaldamento lungo (PRL),
- Sistema con preriscaldamento abbreviato (PRA).

Il primo è un sistema caratterizzato da un tempo medio di preriscaldamento di 6 – 7 minuti, occorrente per portare le due testate delle rotaie da saldare ad una temperatura di circa 950°C. E' opportuno prestare attenzione alla fase di preriscaldamento al fine di evitare la formazione di strutture dure non compatibili con le desiderate caratteristiche meccaniche del giunto.

Il secondo è un metodo basato su un tempo di preriscaldamento delle rotaie da saldare di 1 – 2 minuti, durante il quale le due testate delle rotaie raggiungono la temperatura di circa 300° - 400°C. Per raggiungere tali temperature, sia le forme in refrattario sia il peso e la qualità delle porzioni saldanti sono studiate in modo tale che l'acciaio fuso, entrando nella forma, possa effettuare l'ulteriore preriscaldamento delle due testate di rotaie (durante la fase di discesa nella forma) e quindi di realizzare la fusione delle stesse (durante la fase di salita). Con questo sistema di saldatura, il minor tempo di preriscaldamento del giunto effettuato con il cannello determina, ai lati della zona fusa (Z.F.), la formazione di zone di alterazione termica (Z.T.A.) più limitate rispetto al sistema con preriscaldamento lungo<sup>18</sup> (figura 3.6).

Quanto sopra contribuisce a ridurre la formazione, nelle due suddette zone, di irregolarità sulla superficie di rotolamento della rotaia e quindi del conseguente martellamento del giunto al passaggio dei treni.

---

<sup>18</sup> Circa 3 cm per parte, contro i 4 cm della saldatura con preriscaldamento lungo.

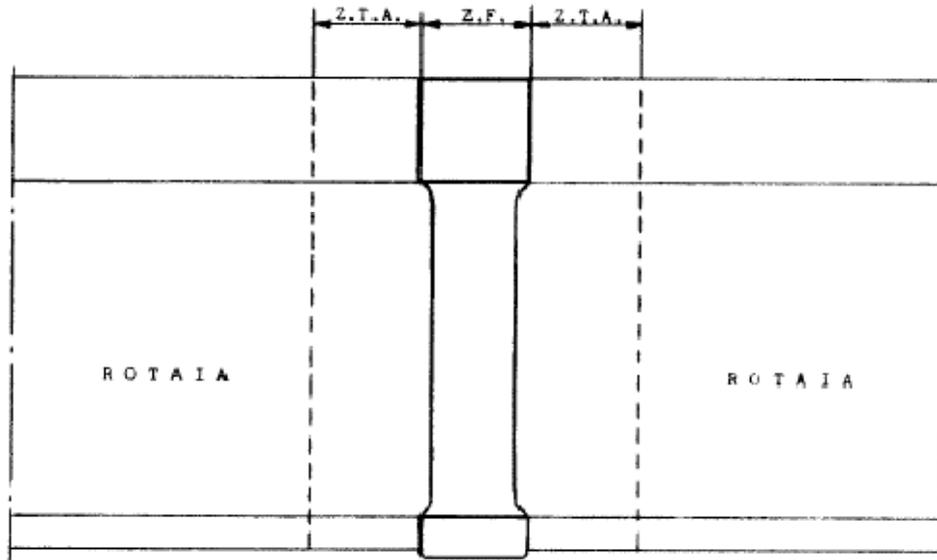


Figura 3.6 – Schema delle diverse zone caratterizzanti la saldatura alluminotermica delle rotaie

### 3.4.2. SALDATURA ELETTRICA A SCINTILLIO

Nella saldatura elettrica a scintillio le due testate delle rotaie da saldare vengono semplicemente accostate e il contatto si realizza così attraverso qualche asperità superficiale.

Inviando la corrente nel circuito di saldatura, essa si concentra con notevole intensità nei punti di contatto che, per effetto Joule, sono ben presto portati a fusione. Le goccioline di metallo fuso, sotto l'effetto della forte corrente che le percorre, esplodono e sono proiettate in minuti spruzzi all'esterno della superficie di contatto, mentre una parte del metallo volatilizza.

Si formano così sulle superfici affacciate delle piccole cavità fra le quali scoccano scintille, cioè piccoli archi instabili; il lento avanzamento di una delle due rotaie da saldare porta a contatto altre asperità facendo sì che gradualmente lo scintillio si propaghi a tutta la sezione delle testate da saldare, ricoprendole di un velo liquido e portando le testate stesse allo stato pastoso (temperatura di forgiatura o di plasticità).

Raggiunta la temperatura sufficiente su tutta la superficie da saldare e nella zona adiacente, si applica una forte e brusca pressione fra le rotaie: il velo liquido (con le impurezze di ossidi che contiene) viene espulso all'esterno e le testate in parte si compenetrano ed in parte si riscaldano slabbrandosi all'esterno, mentre la corrente viene

interrotta non appena le superfici sono decisamente combacianti. Con il suddetto processo si realizza, per sincristallizzazione, l'unione saldata.

### 3.5. LIMITI E PRESCRIZIONI PER LA REGOLAZIONE DELLE TENSIONI INTERNE DELLE ROTAIE

Effettuare la regolazione di un tratto di lunga rotaia saldata significa intervenire sulla rotaia stessa al fine di provocare l'annullamento delle tensioni interne in corrispondenza di un determinato valore di temperatura. Prima della regolazione delle tensioni interne è necessario monitorare lo stato operativo del binario, al fine di garantire che lo stesso non sia costretto all'esercizio a temperature superiori ai valori limite imposti da normativa.

Essa prescrive:

Tabella 3.3 – Temperatura limite  $T_1$

| Temperatura Limite " $T_1$ "                                                                                                   |                                                                |                     |                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Binario continuo in assetto geometrico definitivo (prescritta sagoma della massicciata, rinalzato e profilato) ma non regolato | $T_{pmin} \leq T_r$<br>(tutela contro trazione e compressione) | $T_{pmax} > T_r$    | $T_1 = T_{pmax} - 40 \text{ }^\circ\text{C}$<br>(agli effetti delle trazioni)<br><br>$T_1' = T_{pmin} + 30 \text{ }^\circ\text{C}$<br>(agli effetti delle compressioni) |
|                                                                                                                                |                                                                | $T_{pmax} \leq T_r$ | $T_1'' = T_{pmin} + 30 \text{ }^\circ\text{C}$<br>(agli effetti delle compressioni)                                                                                     |
|                                                                                                                                | $T_{pmin} > T_r$<br>(tutela contro trazione)                   |                     | $T_1 = T_{pmax} - 40 \text{ }^\circ\text{C}$<br>(agli effetti delle trazioni)                                                                                           |

dove con  $T_{pmin}$  e  $T_{pmax}$  si intendono le temperature di posa minime e massime e con  $T_r$  la temperatura di regolazione.

Si può notare che:

- per  $T_{pmin} < T_r$ , la normativa considera due casistiche differenti. Nella prima, ovvero per  $T_{pmax} > T_r$ , la temperatura limite assume due valori estremi per la tutela agli effetti delle compressioni e delle trazioni. Ci troviamo in una situazione intermedia, per cui in relazione alle due differenti temperature di posa si può avere o un incremento di sforzi di compressione (per tratti di binari posati a  $T_{pmin}$ ) in seguito ad un incremento del valore della temperatura necessaria per la regolazione rispetto a quella di posa, oppure un incremento degli sforzi di trazione per i tratti posati a  $T_{pmax}$  in quanto si ha una riduzione della temperatura alla quale si effettua la regolazione. E' importante sottolineare che la normativa impone un margine di tolleranza più ampio nella tutela contro le trazioni che in quella contro le compressioni essendo, fra le due, la situazione meno problematica in relazione alla sicurezza del binario.

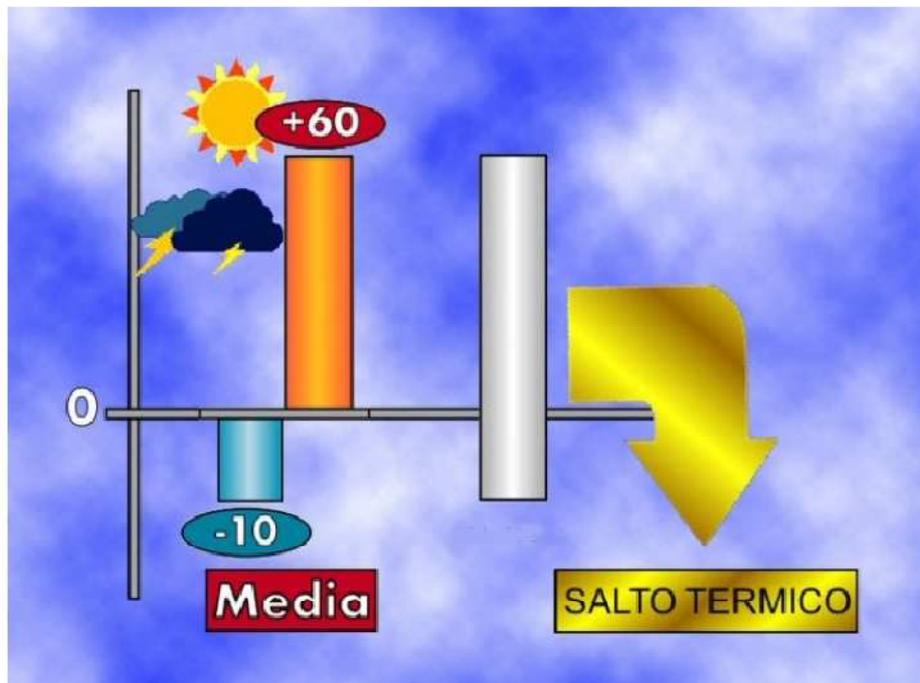
Nella seconda invece si prevede una tutela solo nei riguardi degli sforzi di compressione: essendo infatti la  $T_r$  maggiore di entrambi i limiti di posa, lo stato tensionale interno alla rotaia che si va a generare riguarda esclusivamente il campo delle compressioni;

- per  $T_{pmin} > T_r$ , l'unica tutela è nei confronti dello stato tensionale di trazione essendo la  $T_r$  inferiore ai due limiti di posa;
- i valori delle temperatura di posa sono valori in corrispondenza dei quali il binario non è regolato: essi sono indicativi dello stato tensionale delle rotaie al momento della loro collocazione in sito.

La temperatura di regolazione coincide con il valore di temperatura in corrispondenza del quale si ha l'annullamento delle tensioni interne alle rotaie. Essa quindi deve essere determinata preventivamente alla realizzazione della lunga rotaia saldata per poter garantire poi delle condizioni di esercizio in assoluta sicurezza.

La procedura necessaria alla determinazione della temperatura di regolazione è la seguente:

- si effettuano dei rilevamenti di temperatura massima e minima operativa delle rotaie (mediante l'impiego di termometri analogici magnetici da applicare sulle rotaie), pianificati in un triennio e in zone differenti della stessa area geografica;
- si determina, dai risultati dei rilievi, la temperatura minima, massima e media (ottenuta sommando algebricamente la temperatura minima e massima e dividendo per due) per quella zona e il corrispondente salto termico;



*Figura 3.7 – Salto termico*

- nel caso in cui non si disponga di rilievi distribuiti nell'arco di un triennio oppure di dati di rilievo delle temperature in zone geograficamente simili, si assume come temperatura media convenzionale la temperatura di 25°C (a binario in esercizio occorre comunque valutare gli scostamenti fra temperatura reale delle rotaie e valore convenzionale: se tale scostamento risulta superiore a 3°C è necessario valutare l'ipotesi di una nuova regolazione).

### 3. LA LUNGA ROTAIA SALDATA

Per semplificare il concetto di temperatura di regolazione si pensi che la temperatura convenzionale di 25°C è al centro del salto termico mediamente riscontrato. A questa temperatura quindi una rotaia libera di dilatarsi all'aumento o alla riduzione di temperatura avrà reazioni, indotte dalle variazioni dello stato molecolare dell'acciaio con cui è costituita, proporzionalmente simili nei due sensi.

Il valore convenzionale di 25°C corrisponde dunque, in linea teorica, alla temperatura di regolazione ottimale, rappresentando esattamente il punto di separazione tra gli opposti fenomeni di contrazione e di dilatazione della rotaia, ai quali corrispondono rischi opposti e di diversa entità.



Figura 3.8 – Temperatura media convenzionale

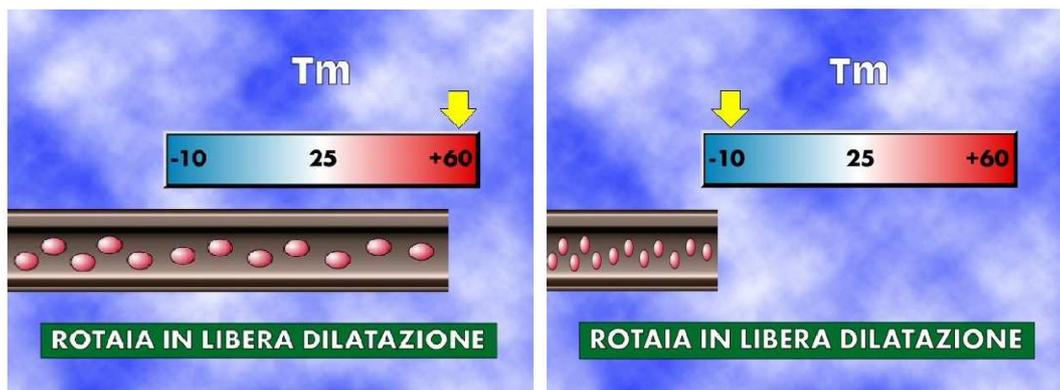


Figura 3.9 – Effetto di aumento – diminuzione di temperatura

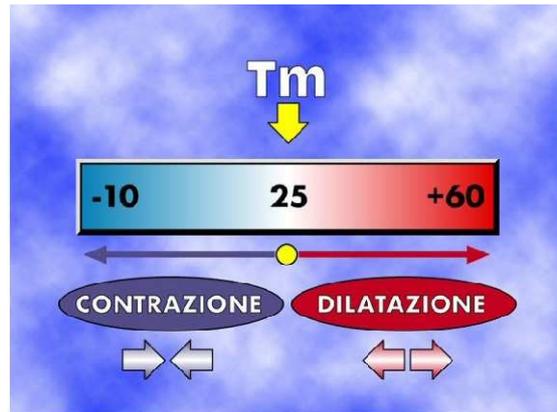


Figura 3.10 – Punto di separazione tra il fenomeno di dilatazione e il fenomeno di contrazione

La temperatura di regolazione è pertanto definita come:

$$T_r = T_m + 5^{\circ}\text{C}$$

Il motivo di tale maggiorazione rispetto al valore medio calcolato, tutela maggiormente la lunga rotaia saldata dall'eccesso di compressione che, come già detto, produce effetti notevoli (slineamento del binario) che possono compromettere in maniera grave la sicurezza della circolazione. Per i tratti di linea di nuova costruzione con velocità massima d'orario maggiore di 200 Km/h la maggiorazione sarà di 10°C.

### 3.6. SISTEMI DI REGOLAZIONE DELLE TENSIONI INTERNE DELLE ROTAIE

La procedura di regolazione della lunga rotaia saldata viene effettuata su rotaia libera da organi di attacco e poggiata su rulli di scorrimento e solamente se la temperatura effettiva della stessa (rilevata mediante l'impiego di termometri analogici magnetici da applicare sulle rotaie) non supera la temperatura di regolazione prescritta.

I sistemi attualmente in uso per effettuare la regolazione sono due:

- impiego del morsetto tendirotaie,
- sistema con riscaldamento naturale delle rotaie.

### 3.6.1. IMPIEGO DEL MORSETTO TENDIROTAIE

L'impiego dei morsetti tendirotaie permette di regolare un tratto di binario caratterizzato da una temperatura diversa da quella di regolazione prescritta (a patto che essa sia comunque minore di quella di regolazione).

Mediante i morsetti vengono indotti allungamenti nelle rotaie, libere di dilatarsi ma fissate ad un estremo, pari a quelli corrispondenti alla differenza  $\Delta T$  fra la temperatura di regolazione e quella effettiva della rotaia all'atto dell'operazione di regolazione; si provoca quindi nelle rotaie una trazione tale che, quando la temperatura effettiva della rotaia raggiungerà quella di regolazione, lo stato di tensioni interne si annulli.

Il sistema, secondo la normativa, può essere impiegato:

- durante il periodo stabilito per l'esecuzione dei lavori di costituzione della lunga rotaia saldata, non sia possibile raggiungere, con il riscaldamento solare, la temperatura di regolazione con una tolleranza di  $\pm$  (più o meno)  $3^{\circ}\text{C}$ ;
- nei limiti dei carichi e delle corse del morsetto e comunque secondo quanto riportato nella tabella 3.4.

*Tabella 3.4 – Lunghezza massima della sezione da regolare*

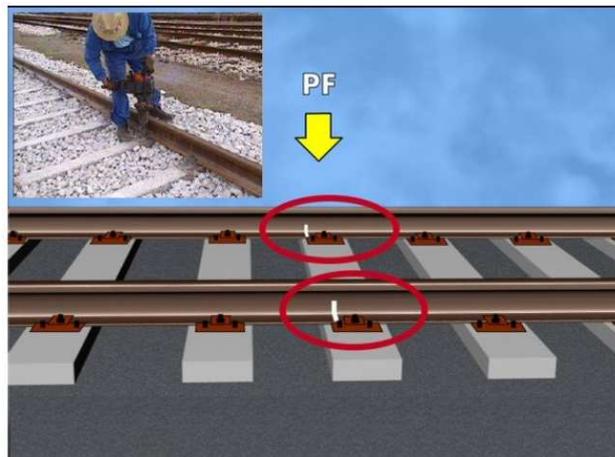
| <b>TRACCIATO</b>                                     | <b>LUNGHEZZA MAX SEZIONE DA REGOLARE<br/>(Somma di due semisezioni)</b> |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Rettifili e Curve con $R \geq 5000$ m                | 1080 m                                                                  |
| Curve con $(1000 \text{ m} \leq R < 5000 \text{ m})$ | 864 m                                                                   |
| Curve con $(600 \text{ m} \leq R < 1000 \text{ m})$  | 648 m                                                                   |
| Curve con $R < 600$ m                                | 288 m                                                                   |

E' assolutamente vietato l'impiego di tale sistema di regolazione nel caso di regolazione di tratti di binario continuo comprendenti travate metalliche senza massicciata; per binari con curve di raggio  $R < 600$  m, qualora non sia oggettivamente possibile l'impiego del metodo di regolazione mediante riscaldamento naturale, è consentito l'uso

del morsetto tendirotaie purché, regolando semisezioni di lunghezza non superiore a 144 m, il salto termico ( $T_r - T_{\text{effettiva}}$ ) non superi il valore di  $R[\text{m}] / 25$ .

Le operazioni da eseguire per l'impiego di tale metodo sono le seguenti:

- a) si effettuano tagli<sup>19</sup> delle rotaie (giunti di regolazione<sup>20</sup>), in modo da realizzare delle sezioni di lunghezza minima 288 m e massima secondo le prescrizioni in tabella 3.4 (attenzione: prima del taglio è opportuno collegare con un idoneo conduttore le estremità di rotaia che verranno determinate dal taglio, allo scopo di garantire la continuità del circuito di ritorno della trazione elettrica);
- b) si allentano<sup>21</sup> gli attacchi delle due traverse ricadenti rispettivamente in corrispondenza dei due punti fissi che delimitano le due mezze sezioni da regolare, liberando accuratamente la rotaia dalla traversa (dalle piastre sottorotaia ecc.) e si tracciano sulla suola della rotaia e sull'appoggio (spalletta dell'attacco di rotaia o inserto per gli attacchi elastici) i riferimenti di riscontro;



*Figura 3.11- Riferimenti di riscontro in corrispondenza dei punti fissi*

<sup>19</sup> Le norme tecniche prevedono che per il taglio delle rotaie siano da utilizzare obbligatoriamente solo mezzi meccanici quali troncatrici a disco abrasivo o segarotaie.

<sup>20</sup> Punto nevralgico della regolazione, generalmente posto a metà sezione. Se esso è individuato nei pressi di una saldatura esistente, il taglio previsto per la regolarizzazione va localizzato in corrispondenza della saldatura preesistente provvedendo all'asportazione della zona fusa della saldatura stessa.

<sup>21</sup> L'allentamento della traversa in corrispondenza dei punti fissi ha lo scopo di isolare quella traversa da qualsiasi azione possa essere indotta al binario dalle successive operazioni di regolazione.

- c) si allentano progressivamente gli organi di attacco delle rotaie alle traverse, procedendo dalle testate, in corrispondenza dei tagli, verso i punti fissi, operando, per le campate lunghe, con almeno quattro attrezzature (due per direzione di cui una per ogni fila di rotaia). L'allentamento deve arrestarsi 30 traverse prima dei punti fissi suddetti. Qualora il binario a valle (semisezione da regolare in seguito) sia totalmente o parzialmente libero dagli organi di attacco bisognerà serrare gli organi d'attacco di tale semisezione per almeno 50 appoggi oltre il relativo punto fisso ottenendo, in complesso, 80 appoggi serrati a cavallo di detti punto fissi;
- d) si sollevano, mediante paletti, le rotaie dagli appoggi a partire dai giunti di regolazione interessando, successivamente, una traversa ogni quindici circa; si rimuovono le piastre sottorotaia e si introducono, fra suola ed appoggi (uno ogni quindici traverse) dei rulli di scorrimento in posizione perpendicolare all'asse longitudinale della rotaia;



*Figura 3.12 – Rullo di scorrimento perpendicolare all'asse longitudinale della rotaia*

- e) ci si accerta che le rotaie siano effettivamente libere e che non vi siano ostacoli fra suola ed appoggi, o traverse fuori squadra, facilitando lo scorrimento delle rotaie sui rulli con paletti di ferro o mazze di legno;
- f) si procede alla suddivisione delle due semisezioni in 4 parti uguali (i quarti vengono segnati a distanze di  $4/4$ ,  $3/4$ ,  $2/4$ ,  $1/4$  dal giunto di regolazione sulla suola della rotaia in corrispondenza della piastra d'attacco).

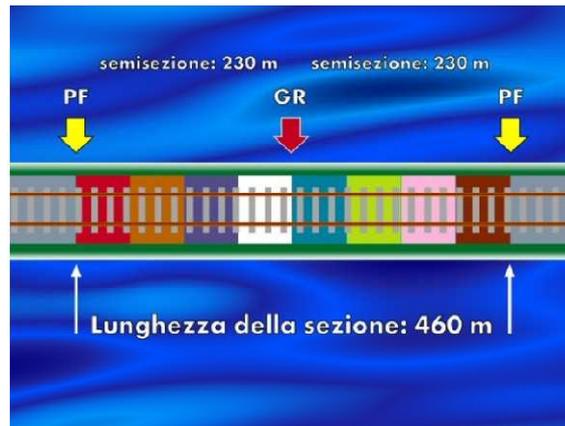


Figura 3.13 – Esempio di sezione di 460 m suddivisa in quarti

Si calcolano gli allungamenti necessari da provocare alla rotaia:

- si procede al rilievo della temperatura della rotaia,
- si calcola  $\Delta L$  secondo la relazione:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$$

dove:

- $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio,
- L lunghezza della semisezione da regolare,
- $\Delta T$  è la differenza tra la temperatura di regolazione e la temperatura effettiva della rotaia.

L'allungamento così calcolato dovrà risultare distribuito proporzionalmente su ciascuna delle 4 parti in cui ogni semisezione è stata precedentemente suddivisa e marcata.

Esempio: si ipotizzi di essere in corrispondenza di una sezione da regolare di 460 m, con temperatura di regolazione assunta pari a quella convenzionale di  $25^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$ , temperatura effettiva della rotaia di  $15,5^{\circ}\text{C}$ , coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio  $\alpha$  pari a 0,000012.

L'allungamento necessario risulta pari a:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T = 0,000012 \times 230 \times 14,5 = 0,04 \text{ m}$$

L'allungamento di 40 mm dovrà risultare distribuito proporzionalmente su ciascuna delle 4 parti in cui ogni semisezione è stata precedentemente suddivisa e marcata (figura 3.14):

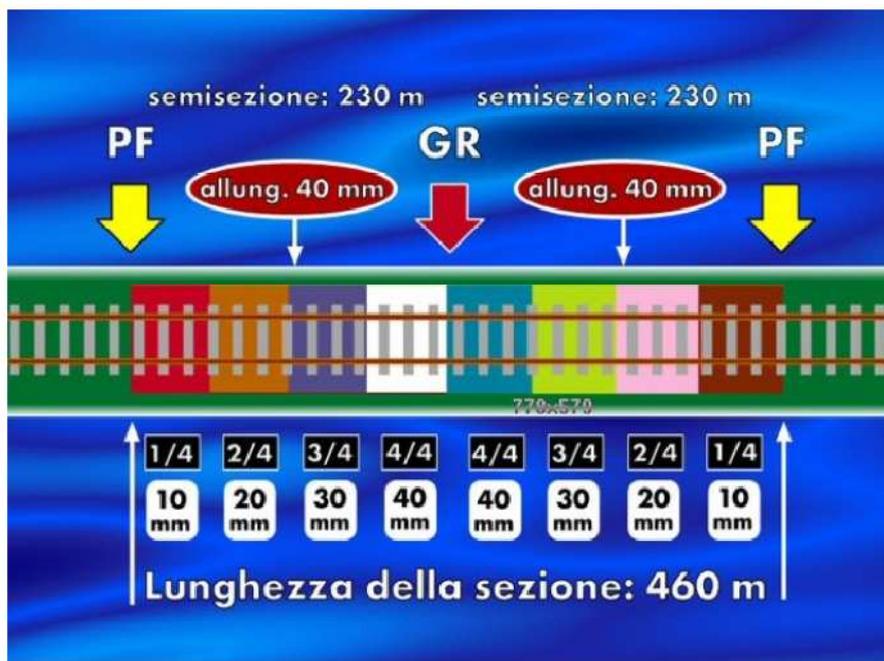


Figura 3.14 – Ripartizione di un allungamento di 40 mm

- g) si calcola la luce da praticare all'altezza del giunto di regolazione sulla rotaia precedentemente tagliata, tale da consentire l'allungamento calcolato per ciascuna semisezione, oltre un margine di 24 – 26 mm richiesti per la saldatura.

In merito al precedente esempio, la luce fra le rotaie dovrà risultare di 40 + 40 mm per ogni semisezione + 24 mm per la saldatura – 2/3 mm di compensazione per il ritiro della saldatura durante il raffreddamento;

- h) si agisce sui morsetti per conseguire gli allungamenti calcolati, alternando al tiro brevi riposi per ottenere un uniforme allungamento delle rotaie. Il tiro necessario da applicare ai morsetti deriva dalla relazione:

- rotaie 60E1:  $F = 19,4 \times (T_r - T_{effettiva})$
- rotaie 50E5:  $F = 16,0 \times (T_r - T_{effettiva})$

Durante tale operazione va controllato che nulla ostacoli l'allungamento delle rotaie stesse e che esso avvenga gradualmente ed uniformemente su entrambe le mezze sezioni facenti capo al morsetto, provvedendo ad un continuo ed efficace scuotimento delle rotaie, avendo cura che non vengano spostate le traverse in corrispondenza dei segni di controllo degli allungamenti praticati sulla suola delle rotaie;

- i) alla fine del tiro, con i morsetti sempre in presa, si procede a liberare le rotaie dagli organi di attacco dei 30 appoggi rimasti serrati in corrispondenza del punto fisso retrocedendo e sorpassando il punto fisso (cioè in corrispondenza del riferimento di riscontro praticato in precedenza sulla spalletta dell'attacco) per un tratto di circa 20 appoggi. L'operazione dovrà essere effettuata solo dal lato della semisezione di binario già regolata in precedenza. Qualora, dopo la liberazione degli organi di attacco del succitato tratto, il punto fisso non ricada nell'ambito di  $\pm 2$  mm rispetto alla posizione originaria, andrà ripreso il tiro con il morsetto se il punto fisso è ancora arretrato, oppure andrà allentato il morsetto se il punto fisso è avanzato;
- j) si procede a togliere celermente i rulli di scorrimento delle giunzioni verso i punti fissi, ricollocare in opera le piastre sottorotaia rimosse e serrare tutti gli organi di attacco. Tale serraggio va iniziato da due punti a cavallo delle giunzioni medesime e posti a 20 appoggi da queste, lasciando libere le rotaie in corrispondenza dei 40 appoggi a cavallo delle giunzioni stesse;
- k) si effettuano, contestualmente alle operazioni indicate sopra, le due saldature alluminotermiche;
- l) si accompagna il ritiro di ciascun saldatura, durante il raffreddamento, con serraggio del morsetto nel senso atto a comprimere la saldatura stessa. Il serraggio dovrà durare circa 15 minuti, effettuato in più riprese (3 al minuto), dopodiché il morsetto può essere rimosso;

m) si serrano gli organi di attacco in corrispondenza della traversa utilizzata per individuare il punto fisso.

### 3.6.2. SISTEMA CON RISCALDAMENTO NATURALE DELLE ROTAIE

Questo metodo di regolazione prevede di effettuare il riscaldamento naturale delle rotaie (essenzialmente mediante irraggiamento solare) successivamente ad operazioni di liberazione della rotaia dagli organi di attacco e collocazione della stessa su rulli di scorrimento (riscaldare perché, come sopra citato, la temperatura operativa alla quale si effettua la regolazione deve essere inferiore alla temperatura di regolazione). In questo modo la rotaia raggiunge naturalmente la temperatura di regolazione e l'annullamento dello stato tensionale interno.

Le procedure preliminari da applicare per tale metodo di regolazione sono di fatto le medesime del metodo con morsetti tendirotaie (voci dalla a alla e); raggiunta la temperatura di regolazione prescritta si procede a liberare le rotaie dagli organi di attacco rimasti fissati nella zona del punto fisso retrocedendo e sorpassando lo stesso agendo per un tratto di 20 appoggi.

Si tolgono successivamente, con la massima celerità, partendo da una distanza di 20 appoggi dai giunti di regolazione e procedendo verso i punti fissi dei due tratti interessati, i rulli di scorrimento, si ricollocano in opera le piastre sottorotaia precedentemente rimosse e si inizia il serraggio degli organi di attacco.

Detto serraggio deve interessare in un primo tempo 40 traverse, poi i tratti iniziali non serrati e, successivamente, una traversa su tre fino ai punti fissi.

Serrati tutti gli organi di attacco delle traverse, si eseguono le due saldature in corrispondenza dei giunti di regolazione e si continua l'operazione di serraggio degli organi di attacco lasciati lenti in precedenza.

Gli attacchi degli appoggi lasciati liberi a cavallo dei giunti andranno serrati solo dopo che sia trascorsa almeno mezz'ora dalla tranciatura del ringrosso delle saldature: ciò per agevolare il ritiro delle saldature stesse in fase di raffreddamento.

### 3.7. NORME PARTICOLARI PER L'IMPIEGO DEL PROCEDIMENTO DI SALDATURA ELETTRICA A SCINTILLIO

L'impiego della macchina saldatrice semovente per la saldatura in opera delle rotaie con il procedimento elettrico a scintillio è prevista per i seguenti casi:

- 1) binari in esercizio,
- 2) binari fuori esercizio (costruzione di nuove linee).

La macchina saldatrice può essere utilizzata per la formazione del binario continuo e cioè per la saldatura sistematica di tutte le giunzioni di rotaie durante la posa in opera, in attesa della successiva operazione di regolazione delle tensioni interne per costituire la l.r.s..

Per l'esecuzione delle operazioni di cui sopra, si applicano le modalità e le prescrizioni contenute nei paragrafi 3.3.1 e 3.5. Inoltre la macchina in questione può essere impiegata per eseguire la saldatura dei giunti di regolazione (senza l'impiego della saldatura alluminotermica) per costruire la l.r.s., previo sezionamento progressivo del binario continuo, e ciò sia ricorrendo all'impiego del morsetto tendirotaie sia all'impiego del riscaldamento naturale delle rotaie.



*Figura 3.15 – Macchina saldatrice semovente strada - rotaia*

### 3.8. RILIEVO, CONTROLLO, REGISTRAZIONE E CERTIFICAZIONE DELLA COSTITUZIONE DELLA L.R.S.

Nei precedenti paragrafi si sono illustrate le metodologie ad oggi disponibili per effettuare la regolazione di un tratto di binario in lunga rotaia saldata; non essendo comunque delle metodologie di precisione assoluta e soprattutto garantita, occorre che le procedure di regolazione siano supervisionate da una squadra di operatori specializzati RFI al fine di controllare che gli spostamenti ottenuti dai calcoli sviluppati siano effettivamente pari a quelli rilevati in sito in corrispondenza di ciascun quarto nei quali sono state suddivise le semisezioni.

Il primo metodo utilizzato da RFI per il controllo delle operazioni di regolazione è proprio basato sull'impiego di una squadra composta da un numero sufficiente di operatori i quali, durante i lavori di regolazione, devono controllare che gli spostamenti di ciascun quarto siano conformi a quanto prescritto; il controllo era quindi di tipo puramente visivo, di coincidenza delle marcature riportate sulle rotaie stesse.

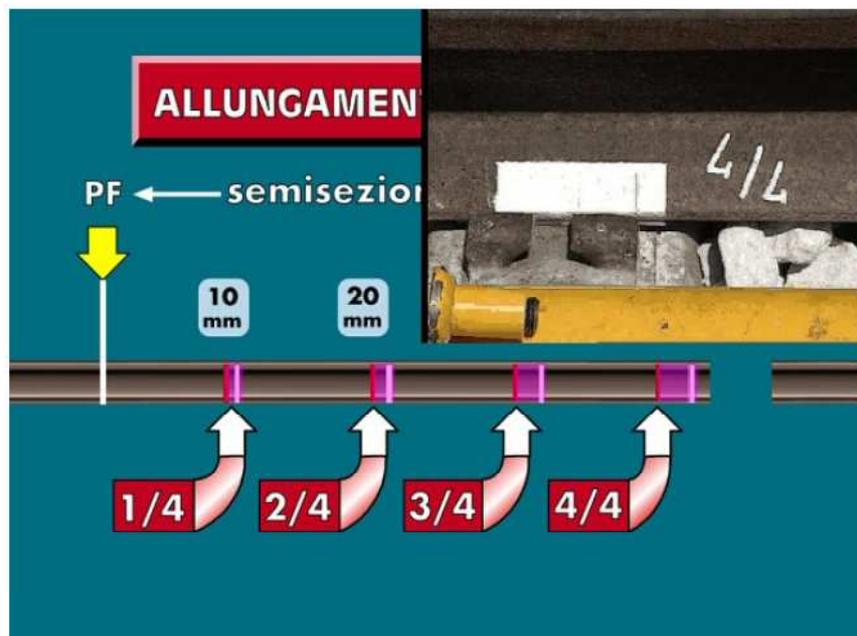


Figura 3.16 – Congruenza delle marcature

Nella figura 3.16 si riporta un esempio di quanto esposto: le marcature iniziali dei rispettivi quarti dovranno subire uno spostamento pari allo spostamento totale calcolato, ripartito sui quarti stessi. Deve essere inoltre verificato che i punti fissi rimangano tali, ovvero coincidenti con i riferimenti tracciati all'inizio della regolazione, essendo comunque ammessa una tolleranza di  $\pm 2$  mm. Se il margine di tolleranza risulta superato occorre procedere ad una ulteriore azione con il morsetto tendirotaia, stringendolo se il punto fisso è arretrato o allentandolo nel caso opposto.

Da tale descrizione, sono intuibili alcuni aspetti particolarmente critici:

- il controllo, essendo puramente visivo, non garantisce una precisione assoluta delle operazioni di regolazione;
- non si ha un riscontro effettivo che, prima di svolgere le operazioni di regolazione, la rotaia sia effettivamente libera da tutti i vincoli: tale requisito è necessario per garantire l'uniformità di scorrimento delle rotaie stesse;
- la quantità di operatori necessaria per monitorare l'intero tratto è particolarmente importante: occorrono infatti uno o due operatori per ciascun quarto oltre al personale per eseguire la regolazione.

Con lo scopo di intervenire su questa tipologia di problematiche, negli ultimi anni la Net Tech s.r.l. (Network Technologies) ha sviluppato un sistema informatizzato per il rilievo, il controllo, la registrazione e la certificazione della costituzione della lunga rotaia saldata, sistema adottato da RFI e attualmente utilizzato in gran parte delle operazioni di regolazione.

Il sistema è costituito da:

- 20 terminali da applicare alle rotaie (figura 3.17),
- 10 unità di rilevamento grandezze e trasmissione dati (figura 3.18),
- computer portatile e modem radio di interfaccia denominati unità di elaborazione, memorizzazione, visualizzazione dati.

I terminali sono realizzati per poter essere utilizzati su tutti i tipi di traverse in uso per armamenti del tipo 50UNI e 60 UNI e con armamenti del tipo K, Pandroll o Vosloh.



*Figura 3.17 – Terminali da applicare alle rotaie*



*Figura 3.18 – Unità di rilevamento*

Le procedure operative per porre in funzione il sistema sono riportate di seguito.

In cantiere, dopo l'individuazione dei quarti, si procede al montaggio dei terminali; ogni terminale è costituito da due parti separate, fissate rispettivamente alla rotaia e alle traverse. Entrambe le parti hanno riscontri meccanici tenuti permanentemente in contatto tra loro da un dispositivo a molla. Un riscontro, verticale, è reso solidale con la rotaia mediante staffa montata sulla suola, l'altro riscontro, orizzontale, è solidale con il cursore di un trasduttore di posizione elettronico montato sulle traverse mediante opportuno ancoraggio. La posizione dei riscontri tra di loro è finalizzata a rilevare i soli movimenti longitudinali della rotaia rispetto alle traverse, senza disturbi di altri spostamenti verticali o laterali indotti dalle lavorazioni.

I sensori sono posizionati in anticipo rispetto all'inizio delle attività di regolazione e possono rimanere in opera anche in presenza di circolazione di treni. Nell'imminenza dell'inizio delle attività di regolazione delle tensioni, sono installate e inizializzate le unità di rilevamento grandezze e trasmissione dati (URGT): esse vanno posizionate all'esterno del binario ed esternamente alla sagoma del rotabile ferroviario, orientate in modo che le uscite dei cavi siano rivolte verso il binario in lavorazione.

Completata l'installazione dei terminali, si procede alla configurazione di ciascuna postazione eseguendo le seguenti operazioni:

- identificazione del quarto in cui è installato il sensore,
- identificazione della posizione del taglio,

- identificazione delle rotaie di destra e sinistra,
- identificazione della posizione dei sensori A e B rispetto allo scartamento.

Prima di eseguire la procedura di regolazione viene attivata l'unità di elaborazione e memorizzazione (computer e modem wireless di interfaccia), creando un file di progetto (file della regolazione). A questo punto il file della regolazione è inizializzato per importare automaticamente i dati di temperatura<sup>22</sup> e spostamento rilevati dai terminali (previa verifica del funzionamento del collegamento radio sensori – unità di elaborazione); i dati di temperatura rilevati sono utilizzati in automatico dalla URGT per il calcolo degli allungamenti da imporre ai quarti, in funzione della lunghezza delle semisezioni.

Uno dei principali elementi positivi del sistema risiede nel fatto che, a video, è possibile valutare in tempo reale i grafici degli spostamenti per ciascun quarto durante il tempo di monitoraggio. Oltre agli spostamenti della rotaia in relazione alle operazioni di regolazione e quindi verifica della congruenza con gli spostamenti calcolati, è possibile osservare anche le operazioni di liberazione delle semisezioni e la verifica del raggiungimento della condizione di rotaia libera. Essendo tale condizione fondamentale per eseguire la regolazione, risulta utile anche valutare la temperatura effettiva di raggiungimento della stessa (a volte differente dalla temperatura di inizio della procedura) al fine di valutare l'effettivo tiro da imporre alla rotaia con il morsetto per avere l'annullamento delle tensioni interne.

Alla fine della procedura, il sistema fornisce automaticamente la certificazione RFI relativa all'esecuzione delle operazioni.

In sintesi il sistema consente di:

- tenere sotto controllo l'intero processo di regolazione con un unico operatore;
- monitorare anche la fase di liberazione dai vincoli;
- annullare i tempi di calcolo e tracciamento dei riferimenti;

---

<sup>22</sup> Essa è misurabile grazie alla possibilità di collegare ad ogni URGT una sonda termometrica a contatto magnetico

### 3. LA LUNGA ROTAIA SALDATA

- disporre interventi mirati di scuotimento delle rotaie dove il sistema evidenzia la mancanza di proporzionalità;
- certificare la regolazione eseguita.

In figura 3.19 è valutabile la grandezza del terminale in relazione ad una sezione di rotaia. I cavi in figura sono di collegamento tra il terminale e la URGT di riferimento.



Figura 3.19 – Particolare del terminale

All. n° 1

Linea: Stazione di Voghera    Tratto: Milano 1    Stato: Essente    Dal Km. 36+920    AL Km. 37+498

**PROSPETTO REGOLAZIONI TENSIONI INTERNE I.R.S.**

| N° Ord. Reg. | Data       | Progressive |        | Fila | Lunghezza Campata (m) | T. Iniziale (°C) | T. Prescritta (°C) | Allungamento Calcolato |      | Allungamento realizzato |    |     |     | T. Reg. Realizzata (°C) | Annotazioni |     |
|--------------|------------|-------------|--------|------|-----------------------|------------------|--------------------|------------------------|------|-------------------------|----|-----|-----|-------------------------|-------------|-----|
|              |            | Dal Km.     | Al Km. |      |                       |                  |                    | Mediante (*)           |      | Riscroni in campata     |    |     |     |                         |             |     |
|              |            |             |        |      |                       |                  |                    | De la T.               | cu   | cu                      | tr | 4/4 | 3/4 |                         |             | 2/4 |
| 1            | 02/03/2007 | 36+920      | 37+224 | D    | 304                   | 10               | 30                 | 20                     | 73   | X                       | 78 | 55  | 37  | 18                      | 31,4        |     |
| 2            | 02/03/2007 | 36+920      | 37+224 | S    | 304                   | 10               | 30                 | 20                     | 73   | X                       | 79 | 58  | 38  | 20                      | 31,7        |     |
| 1            | 02/03/2007 | 37+224      | 37+498 | D    | 274                   | 10               | 30                 | 20                     | 65,8 | X                       | 67 | 50  | 32  | 15                      | 30,4        |     |
| 2            | 02/03/2007 | 37+224      | 37+498 | S    | 274                   | 10               | 30                 | 20                     | 65,8 | X                       | 67 | 50  | 33  | 17                      | 30,4        |     |

(\*) n = Riscaldamento Naturale    tr = Tramezzo

Il Capo Tecnico Linea \_\_\_\_\_    Il Capo Reparto Esercizio \_\_\_\_\_

Figura 3.20 – Certificazione automatica fornita dal software

### 3.9. CONTROLLI DEL COMPORTAMENTO DELLE LUNGHE ROTAIE SALDATE IN ESERCIZIO

Come ampiamente descritto nei precedenti paragrafi, nei binari costituiti da l.r.s. le escursioni di temperatura comportano variazioni di sollecitazioni assiali delle rotaie a cui si contrappongono, per l'equilibrio del sistema, l'efficacia del serraggio degli organi di attacco, la resistenza opposta dalla massicciata al movimento, compreso quello trasversale, la rigidità del telaio costituito dalle traverse con le rotaie.

Il suddetto equilibrio può essere compromesso a causa del verificarsi di situazioni di disequilibrio tra stato tensionale teorico e reale. Inoltre, costituisce motivo di possibile instabilità del binario in l.r.s. una cattiva qualità dello stato geometrico del binario stesso in termini di allineamento e livellamento, nonché la presenza di zone di traverse "ballerine" e con massicciata rimossa nei vani.

Occorrerà quindi curare in maniera scrupolosa:

- che non si verifichino situazioni tali da indebolire le resistenze opposte dalla massicciata, come rimaneggiamenti o deconsolidamenti del pietrisco, riduzione del suo profilo, svasamenti ed inquinamenti;
- che non esistano, per estese apprezzabili, allentamenti o rotture degli organi di attacco nonché fenomeni di scarsa tenuta fra traverse ed attacchi;
- che i difetti di geometria del binario siano sempre contenuti nei limiti delle tolleranze ammesse: in particolare per l'allineamento, si dovrà considerare che quando il diagramma delle frecce registrate, per corde di 10 m, presenti escursioni  $\Delta f$ , fra picco inferiore minimo e picco superiore massimo, superiori a determinati valori<sup>23</sup> il binario potrebbe trovarsi in assetto precario ai fini della stabilità allo slineamento.

A tali effetti la geometria del binario andrà controllata in momenti tali da garantire, rispetto alle stagioni più sfavorevoli, congrui margini di tempo durante i quali sarà possibile eseguire gli eventuali interventi correttivi.

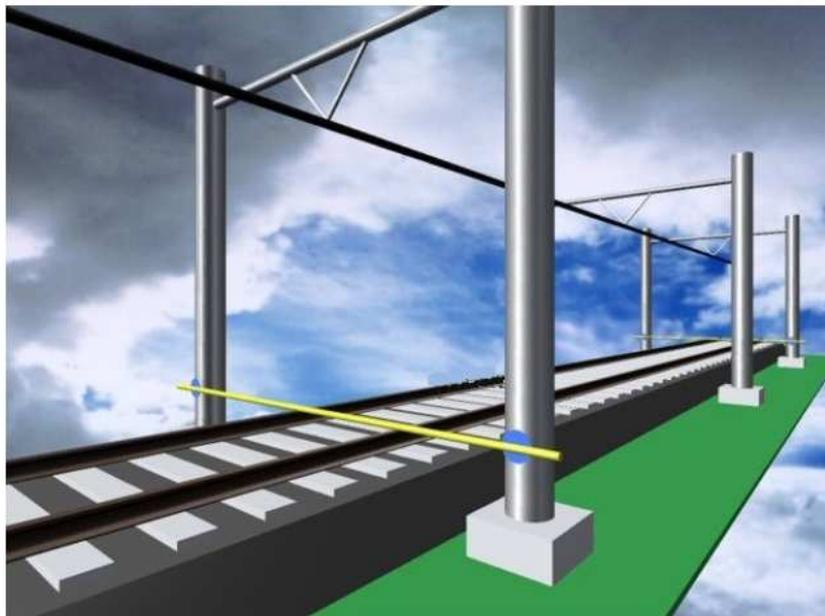
<sup>23</sup> 15 – 25 – 30 mm rispettivamente per raggi di curve in metri compresi fra 300 e 449, 450 e 599, 600 ed infinito

Infine, per la verifica che gli squilibri tra tensioni interne teoriche e reali siano contenuti entro limiti di sicurezza, si procederà al controllo degli eventuali spostamenti longitudinali della l.r.s.

#### 3.9.1. TRAGUARDI E RILIEVI PER IL CONTROLLO DELLE LUNGHE ROTAIE SALDATE

Al fine di poter controllare l'esistenza di spostamenti che potrebbero verificarsi sia longitudinalmente sia trasversalmente nella l.r.s., specie in corrispondenza di tratte particolari della linea (P.L., cambiamenti di livelletta, curve di raggio inferiore a 400 m, ecc) è necessario istituire, qualora non già esistenti (pali T.E., picchetti delle curve ecc.), due coppie di picchetti di riferimento distanziate di circa 120 m.

Per le linee con velocità massime maggiori o uguali a 160 Km/h, oltre che in corrispondenza dei suddetti punti singolari, le due coppie di picchetti, distanziate di circa 120 m, andranno installate ogni 500 – 600 m circa.



*Figura 3.21 – Coppie di traguardi distanziate tra loro 120 m*

Una sola coppia di traguardi andrà invece appositamente istituita ad un metro da ciascuna estremità della l.r.s..

Subito dopo le operazioni di regolazione delle tensioni interne occorrerà eseguire, sia sulla faccia laterale del fungo delle rotaie esterne al binario sia sui riferimenti, delle impronte a mezzo di bulino, occorrenti quali traguardi per i successivi rilievi che saranno effettuati mediante l'uso di filo di acciaio armonico o di nylon.

Le bulinature della coppia di traguardi all'estremità della l.r.s. dovranno essere fatte in posizione tale da individuare un punto distante 1000 mm dalla testata della rotaia appartenente all'adiacente campata polmone. A tale proposito la normativa riporta una serie di esempi (alcuni in figura 3.22) riguardanti la disposizione dei traguardi nelle situazioni più ricorrenti.

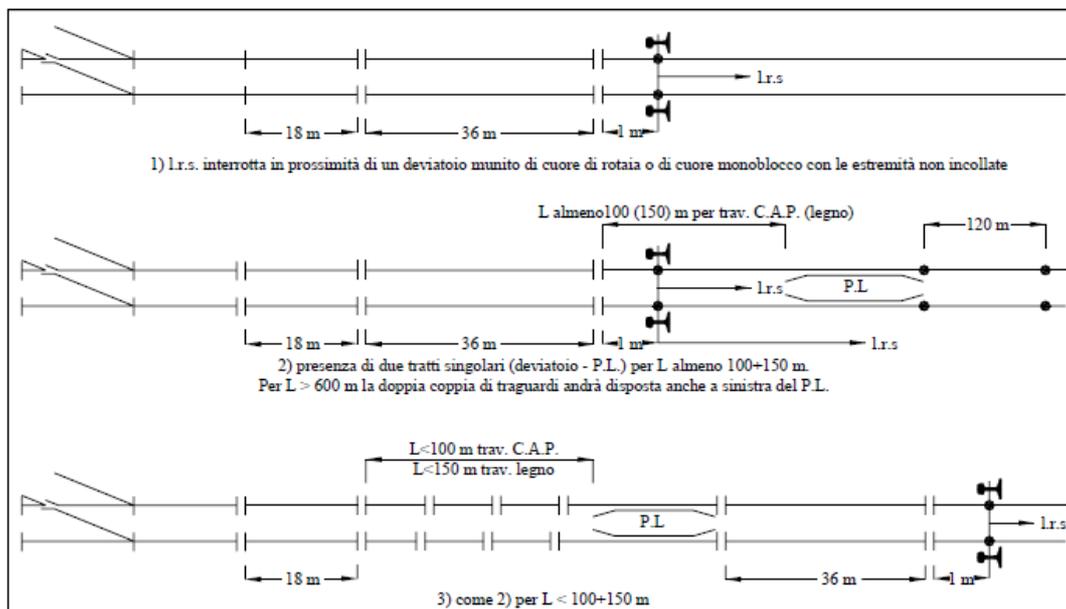


Figura 3.22 – Esempio di disposizione dei traguardi

I rilievi andranno eseguiti:

- la prima volta in sede di regolazione, subito dopo il serraggio degli organi di attacco;
- frequentemente durante il primo anno di esercizio della l.r.s. e comunque dopo ogni intervento di rinalzata sistemica delle traverse;
- dopo il primo anno di esercizio, riscontrata la normalità di comportamento della l.r.s., sarà sufficiente limitare i controlli durante il periodo primaverile e nei casi di alte e basse temperature delle rotaie.

### 3.10. VALUTAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI LONGITUDINALI E TRASVERSALI DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA

Ai fini della valutazione degli effetti degli spostamenti longitudinali eventualmente riscontrati in l.r.s., con buona approssimazione risulta che ogni millimetro di variazione della distanza fra le bulinature, corrispondenti alle due coppie di picchetti, corrisponde ad un aumento (o diminuzione) localizzato della temperatura di rotaia di circa  $83/L$  gradi, con  $L$  = distanza in metri fra le bulinature.

Per la determinazione di detta variazione deve essere rilevato lo spostamento della bulinatura rispetto alla prima coppia di picchetti, al quale andrà sottratto algebricamente (tenendo conto del verso degli spostamenti) lo spostamento della bulinatura rispetto alla seconda coppia di picchetti, posta alla distanza di circa 120 m.

All'epoca della verifica primaverile, pertanto, quando si hanno avvicinamenti od allontanamenti delle bulinature eccedenti i 14 mm, indicativi di ammassamenti di tensioni all'interno od all'esterno del tratto in esame, andranno normalizzati gli stati tensionali all'interno della l.r.s. Si procederà, quando la temperatura effettiva delle rotaie è più bassa di quella di regolazione, alla liberazione delle rotaie dagli organi di attacco per un'estensione opportuna (indicativamente 200 m per parte, più il tratto di 120 m compreso fra la doppia coppia di traguardi).

Se, a seguito dell'intervento, il successivo controllo dovesse rilevare ulteriori scorrimenti dei riferimenti rispetto ai picchetti, si dovrà valutare la situazione generale della l.r.s. come detto più avanti.

Per quanto concerne invece le estremità della l.r.s. si dovrà porre attenzione in particolare:

- nei periodi freddi, all'arretramento della bulinatura di riscontro; se questa avrà sorpassato i 20 mm circa rispetto all'adiacente testata della rotaia polmone, dovrà essere controllata l'integrità strutturale del deviatoio non inserito in l.r.s., eventualmente contiguo all'estremità stessa e dovrà inoltre essere verificata la situazione delle giunzioni del binario a campate normali adiacenti la l.r.s. accertando l'integrità di tutti gli organi di giunzione,

compresi gli attacchi delle rotaie alle traverse, e provvedendo al suo eventuale ripristino;

- all'inizio della stagione calda, se oltre all'avanzamento della bulinatura di riscontro si dovesse anche verificare la chiusura anticipata della luce dei giunti, che delimitano la campata polmone posta a protezione del deviatoio, si dovrà provvedere (in funzione della variazione dell'effettiva temperatura di posa a luce zero) ad una nuova regolarizzazione del tratto estremo di l.r.s. e delle luci della campata polmone, secondo la procedura già descritta in precedenza.

La prescritta verifica della situazione tensionale della l.r.s. (da eseguire in particolare per le linee con velocità massima superiore a 160 Km/h, facendo riferimento anche alla coppia di picchettazione posta ogni 500 – 600 m) andrà fatta tenendo presente la natura e l'entità degli eventuali interventi di normalizzazione delle tensioni effettuati precedentemente, ripetendo la regolazione per tratte comprese tra una stazione e la successiva, prima che la temperatura effettiva delle rotaie superi i seguenti limiti:

$$T_{intervento} = T_r - (\pm T) + C$$

dove:

- $T_r$  : temperatura di regolazione;
- $T$ : staratura della temperatura di regolazione, da riportare nella formula suddetta con il segno più se trattasi di ammassamenti di tensioni e con il segno – se trattasi di diradamenti di tensioni;
- $C = 25^\circ\text{C}$  per i binari armati con traverse in c.a.p.;  $C = 22^\circ\text{C}$  per i binari armati con traverse in legno.

La variazione di temperatura descritta, corrispondente alla staratura della tensione rispetto al valore teorico, è data da:

$$T = \frac{Seff.}{L} \times 83$$

dove:

- Seff.: variazione di distanza in millimetri fra le bulinature delle due coppie di picchetti consecutivi;
- L: distanza in m fra le bulinature delle due coppie di picchetti consecutivi.

Per quanto concerne gli spostamenti trasversali, nei periodi di basse temperature possono verificarsi nel binario sforzi di trazione la cui entità può essere tale da determinare un dissesto geometrico del tracciato del binario stesso nei tratti in curva di raggio limitato.

A tale proposito si aggiunge che ogni centimetro di deformazione permanente generalizzata lungo la curva circolare verso l'interno comporta un abbassamento della temperatura di regolazione pari a circa  $833/R$  gradi, essendo R il raggio della curva in m.

Visto quanto è stato esposto, durante la stagione fredda, qualora dovessero verificarsi temperature di rotaia pari a quella di regolazione meno  $40^{\circ}\text{C}$ , in tratti di linea con curve di raggio inferiore a 400 m, occorrerà disporre i necessari rilievi per verificare il corretto stato geometrico del binario.

Nel caso in cui dai rilievi suddetti si verificasse la presenza di difetti trasversali accompagnati da difetti di allineamento fuori dalle tolleranze ammesse, si dovrà provvedere all'eliminazione di detti difetti previo taglio della l.r.s. e successiva ricostituzione e regolazione della stessa in un periodo stagionale più favorevole.

Invece, qualora dai suddetti rilievi emergesse la presenza di soli spostamenti trasversali della curva e dei raccordi parabolici non accompagnati da difetti di allineamento, occorrerà procedere, dopo che la temperatura delle rotaie avrà superato quella di regolazione prescritta, alla verifica dello stato geometrico della curva effettuando il taglio e la successiva regolazione delle tensioni interne qualora il tracciato in piena curva circolare evidenzia spostamenti trasversali verso l'interno superiori al valore di 3 cm.

### 3.11.SISTEMA DI MISURA DEGLI SPOSTAMENTI LONGITUDINALI DELLE ROTAIE IN ESERCIZIO

In merito alla necessità di controllare gli spostamenti longitudinali delle rotaie in esercizio al fine di prevenire il rischio legato allo slineamento del binario per situazioni estreme di tensioni interne, la Net Tech s.r.l. ha sviluppato, parallelamente al sistema informatizzato per il controllo della regolazione visto al paragrafo 3.8, un sistema informatizzato per la misura degli spostamenti longitudinali delle rotaie in esercizio (figura 3.23).

Ciò comporta un'innovazione notevole rispetto al controllo degli spostamenti delle rotaie, affidato a sistemi puramente meccanici, come illustrato in precedenza.

Il sistema è composto da una struttura in acciaio, realizzata secondo precisi standard progettuali di uniformità, montata in sito avente la funzione di supporto; tale struttura è composta da tre parti essenziali, una di sostegno e due parti laterali mobili regolabili mediante un sistema apposito di viti. Il dispositivo utilizzato è un puntatore laser mobile, collocato, per mezzo di appositi cuscinetti sferici che assicurano la messa in bolla dello strumento, in due posizioni con orientamento perpendicolare fra loro tali da formare un triangolo rettangolo con la rotaia stessa. Il raggio è indirizzato verso un riscontro fisso posto in sito in corrispondenza del punto di rotaia che si intende monitorare: tramite il criterio di similitudine tra il triangolo iniziale e quello finale, modificatosi in seguito allo spostamento del punto stesso, il sistema è in grado di elaborare i dati e restituire l'entità dello spostamento.

In sintesi quindi il sistema automaticamente:

- acquisisce la misura di spostamento della rotaia;
- attribuisce il segno dei movimenti;
- memorizza i dati su un dispositivo portatile o li trasferisce in tempo reale ad un server centrale;
- elabora i calcoli di scostamento della temperatura neutra della l.r.s. e redige la certificazione.

Il tempo medio stimato dalla ditta produttrice del sistema, per addetto per postazione, per eseguire le operazioni è di circa 3 minuti.



Figura 3.23 – Dispositivo di monitoraggio degli spostamenti

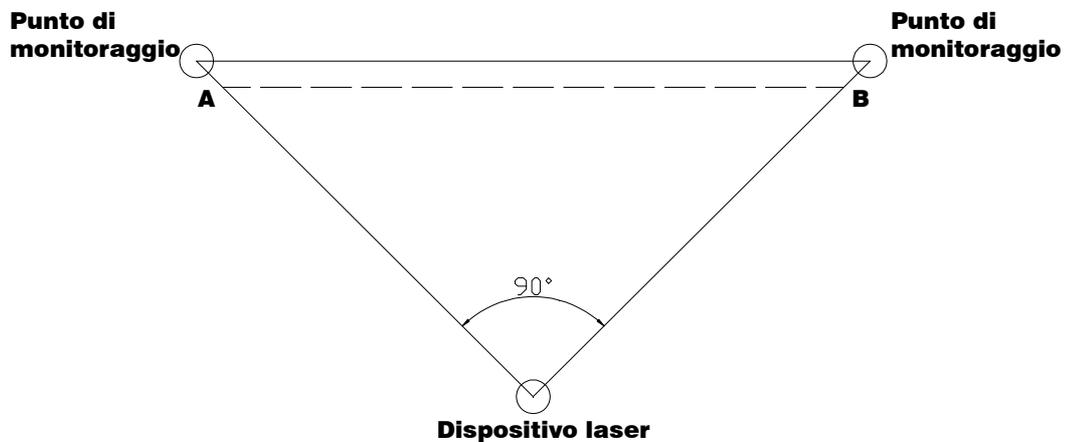


Figura 3.24 – Similitudine dei triangoli

Nella figura 3.24 è possibile osservare il fenomeno precedentemente descritto: i due lati obliqui del primo triangolo sono costituiti dalla distanza tra il puntatore laser e i due riscontri fissi collocati in corrispondenza dei punti da monitorare; la base è costituita dalla rotaia. In seguito alla variazione di posizione dei punti, il nuovo triangolo che si va a formare ha come vertici i due punti A e B e il puntatore laser (la direzione di

orientamento del dispositivo è sempre la stessa, i lati obliqui pertanto variano solo in lunghezza).

### 3.12. PRECAUZIONI E PROVVEDIMENTI DA ADOTTARSI NEI PERIODI DI FORTE CALORE E DI FORTE FREDDO PER I BINARI IN LUNGA ROTAIA SALDATA

Nei periodi stagionali meno favorevoli dell'anno le escursioni termiche, rispetto alle temperature di regolazione, inducono nelle rotaie i massimi sforzi di compressione o di trazione e pertanto in tali periodi saranno da adottare delle particolari precauzioni.

Quando sulla base delle rilevazioni dei giorni precedenti, oppure in relazione ad evoluzioni climatiche improvvise della giornata, si presume venga raggiunto un salto termico positivo di 25°C (per i binari armati con traverse in legno tale salto è di 22°C) rispetto alla temperatura di regolazione, vanno istituite le visite straordinarie di cui all'art. 6 dell'Istruzione per i servizi di vigilanza della linea.

Al raggiungimento di un salto termico di 28°C (26°C per i binari armati con traverse in legno) vanno prescritte riduzioni di velocità, limitatamente al periodo più caldo della giornata ed ai soli tratti interessati dal fenomeno che, salvo diverse e responsabili valutazioni, sono fissate:

- pari a 100 Km/h per i treni di qualsiasi tipo per cui la velocità del rango più elevato sia uguale o superiore a 120 Km/h;
- pari alla velocità di fiancata di rango A meno 20 km/, qualora la velocità di fiancata di rango A sia compresa tra 70 km/h e 120 km/h.

Se il salto termico nelle rotaie supera occasionalmente i 30°C (30°C anche per i binari armati con traverse in legno), la velocità va subito ulteriormente e drasticamente

abbassata, prescrivendo il rallentamento a 50 Km/h di tutti i treni con presenziamento dei tratti interessati.

In quest'ultimo caso, prima del graduale ripristino della velocità normale, il binario andrà accuratamente ispezionato ai fini di ogni eventuale provvedimento.

I succitati valori di salto termico rispetto alla temperatura di regolazione si riferiscono ai binari con  $T_r = T_m + 5^\circ\text{C}$  (essendo  $T_m$  la temperatura media ottenuta dalla media aritmetica fra la temperatura massima e quella minima di rotaia secondo le condizioni climatiche locali, cioè:  $T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$ ).

Per i binari regolati con  $T_r = T_m + 10^\circ\text{C}$ , i rispettivi valori si devono ridurre di  $5^\circ\text{C}$  (diventando, cioè:  $20^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$  anziché  $25^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ ).

Per quanto concerne le precauzioni ed i provvedimenti da adottare durante i periodi di forte freddo, specie per i tratti di linea con curve di raggio inferiore a 400 m, vale quanto già detto al precedente paragrafo 3.10.

Per quanto concerne i provvedimenti da adottarsi per i binari in l.r.s. sottoposti a lavorazione, i periodi stagionali da preferirsi per l'esecuzione dei lavori al binario sono quelli non soggetti a forte calore ed a freddo intenso.

In particolare, durante l'estate ed in presenza di alte temperature gli interventi al binario devono essere per quanto possibile evitati, specie quando si tratta di operare sotto esercizio incidendo sui componenti strutturali dell'armamento (rincalzatura sistematica, revisione generale, sostituzione di traverse ad essa associate od a sé stante, rettifica di curve ecc.). Essi vanno, di norma, rinviati ad epoca più favorevole, salvo casi di particolare urgenza, per i quali andranno comunque ed in modo tassativo osservate le condizioni di cui appresso. In ogni caso l'apertura ed il mantenimento dei cantieri di lavoro deve presupporre la conoscenza dell'andamento delle temperature ed il loro costante controllo durante le ore di attività dei cantieri stessi ed una ragionevole previsione nelle ore e giornate successive, nonché la conoscenza della temperatura di regolazione.

L'esecuzione di lavori al binario può essere programmata nei periodi in cui ragionevolmente si prevede che la temperatura delle rotaie non salga o non scenda durante i lavori stessi e nelle ore che seguono la chiusura del cantiere, oltre i limiti di cautela di cui alla tabella 3.5.

Tabella 3.5 – Limiti di cautela delle temperature per la programmazione dei lavori

| TIPOLOGIA DELLE LAVORAZIONI                                                                                                                                                       | Limiti temperatura rotaie con $T_r = T_m + 5\text{ °C}$ |                     | Limiti temperatura rotaie con $T_r = T_m + 10\text{ °C}$ |                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|
|                                                                                                                                                                                   | Rettifili e curve di $R \geq 1000$                      | Curve di $R < 1000$ | Rettifili e curve di $R \geq 1000$                       | Curve di $R < 1000$ |
| Rincalzatura di brevi tratti di binario con estesa non superiore a 6 m, distanti fra loro almeno 50 m.                                                                            | +20°C; -30°C                                            | +15°C; -25 °C       | +15°C; -35°C                                             | —                   |
| Livellamento binario con alzamenti inferiori a 3 cm.                                                                                                                              | +15°C; -30°C                                            | +10°C; -25°C        | +10°C; -35°C                                             | —                   |
| Livellamento binario con alzamenti superiori a 3 cm.<br>Revisione generale.<br>Ricambio di traverse, fra loro non consecutive, con o senza risanamento.<br>Rettifica delle curve. | +8°C; -30°C                                             | + 3°C; - 25°C       | +3°C; -35°C                                              | —                   |
| Livellamento binario con alzamenti inferiori a 3 cm e stabilizzazione dinamica della massicciata.                                                                                 | +25°C; -35°C                                            | + 15°C; -30°C       | +15°C; -35°C                                             | —                   |
| Livellamento binario con alzamenti superiori a 3 cm e stabilizzazione dinamica dello stesso.                                                                                      | +20°C; -30°C                                            | +10°C; -25°C        | +10°C; -35°C                                             | —                   |

Qualora durante l'esecuzione di lavori al binario l'andamento della temperatura delle rotaie evidenzi che la stessa abbia tendenza a raggiungere, nelle ore successive, i limiti di cautela prescritti, si dovrà procedere alla chiusura del cantiere provvedendo al ripristino dell'allineamento del livello ed alla riguarnitura delle traverse (dove necessario).

L'accennata valutazione circa l'andamento tendenziale delle temperature sarà effettuata estrapolando le misure di temperatura fatte ad opportuni e frequenti intervalli a partire da due ore prima dell'inizio delle lavorazioni. Detta estrapolazione sarà fatta con riferimento all'andamento stagionale medio delle temperature di rotaia nella zona interessata dai lavori.

Se dopo la chiusura del cantiere la temperatura di rotaia dovesse oltrepassare i limiti di cautela indicati precedentemente, il traffico ferroviario nel tratto interessato dovrà essere interrotto.

# 4. L'INNOVAZIONE: HARDWARE E SOFTWARE

Alla luce di quanto esposto nei precedenti capitoli, il nostro lavoro di tesi si colloca in un'ottica di analisi, sviluppo e collaudo di un nuovo sistema per il controllo della procedura di regolazione della lunga rotaia saldata e per il monitoraggio successivo dello stato tensionale.

L'idea è nata ad Alpha Caesar s.r.l. dopo avere preso coscienza dei limiti e delle problematiche connesse alle tecniche oggi in uso presso RFI, le quali si basano, a nostro avviso, su un approccio teorico – tecnico che, essendosi protratto per anni, risulta ormai obsoleto sia in relazione alle innovazioni tecnologiche nel frattempo intervenute, sia per lo sviluppo delle conoscenze riguardo ai fenomeni termo – meccanici del binario ferroviario.

Sfruttando le teorie proprie della scienza e della tecnica delle costruzioni, ovvero la propagazione di sollecitazioni all'interno di un corpo elastico, il nostro obiettivo è stato quello di semplificare l'attrezzatura in uso per il controllo della procedura di regolazione introducendo una tecnologia fino ad oggi non utilizzata in campo ferroviario: gli strain gages.

Per fare questo, è stato sviluppato un progetto che comprende la realizzazione di un hardware elettronico in grado di rilevare un segnale di input fornito dagli strain gages (collegati all'hardware mediante opportuno cablaggio) rappresentativo della grandezza da misurare e di un software che permetta l'acquisizione, l'elaborazione e la gestione di tali dati.

La seconda parte del progetto ha visto l'impiego dell'attrezzatura sopra citata per analizzare la problematica del controllo in esercizio dello stato tensionale interno a ciascuna rotaia; nei precedenti paragrafi 2 e 3, è stato illustrato come l'attuale normativa ferroviaria per la costituzione ed il controllo della lunga rotaia saldata cerchi di tutelare l'infrastruttura da eccessivi stati tensionali di compressione, in seguito ad un eccessivo aumento della temperatura operativa.

Il software che sarà presentato, in ausilio all'utilizzo degli strain gages prevede quindi una sezione dedicata proprio a questa problematica. Si tratta della possibilità di rilevare in continuo, durante l'esercizio, le tensioni interne alle rotaie confrontando ad ogni rilevazione lo stato di sforzo  $i - esimo$  con un valore limite definito in seguito (capitolo 7).

In caso di superamento dello stato tensionale del valore limite prescritto il sistema sarà in grado di lanciare un segnale di allarme ed avvisare il personale di controllo del rischio di slineamento del binario prima che tale fenomeno si verifichi. E' evidente come la conoscenza di tale informazione risulti di particolare importanza, anche in relazione alla pericolosità connessa agli eccessivi stati tensionali di compressione della rotaia ed in particolare sulle linee ad alta velocità.

### 4.1. TEORIA PROGETTUALE

L'attuale apparato normativo di RFI per la costituzione ed il controllo della lunga rotaia saldata utilizza un approccio per il monitoraggio della procedura di regolazione basato, come si è visto nel capitolo 3, sull'analisi degli spostamenti che ciascuna porzione di rotaia (quarti) deve subire per poter annullare lo stato tensionale interno ad una data temperatura (temperatura di regolazione). La teoria, ormai consolidata, alla base di

questa concezione consiste come già detto nel presupporre l'uniformità degli spostamenti per ciascun punto della rotaia in condizioni di rotaia libera, ovvero rotaie prive di qualsiasi forma di impedimento.

L'allungamento totale necessario per annullare lo stato tensionale interno è dato quindi dalla relazione:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$$

La verifica che tale allungamento si concretizzi effettivamente è realizzata mediante monitoraggio visivo (controllo della coincidenza delle marcature riportate in ogni quarto della semisezione di rotaia).

La tecnologia, sviluppata dalla Net Tech s.r.l. ed illustrata sempre all'interno del capitolo 3, ha permesso l'automazione delle procedure di monitoraggio della regolazione del tratto in lunga rotaia saldata, sostituendo l'imprecisa e "obsoleta" azione visiva dell'addetto di verifica con dei trasduttori lineari di posizione.

L'approccio teorico rimane esattamente quello fornito dalla normativa, ovvero una verifica della congruenza degli spostamenti nei punti "chiave" caratterizzanti ciascuna semisezione.

Se, in riferimento a quanto illustrato nel paragrafo 3.8, si considera che, per poter utilizzare il sistema progettato e distribuito dalla Net Tech s.r.l., è però necessario disporre di 20 terminali (5 per ogni rotaia delle due semisezioni e 10 unità di rilevamento dati) si può facilmente comprendere come l'ingombro, il peso e la difficoltà di trasporto, oltre ad una certa macchinosità e al tempo necessario per montare l'intera attrezzatura, ne limitino i vantaggi, comunque importanti e notevoli.

Si è cercato pertanto di sviluppare un sistema che permettesse di verificare l'esito della procedura di regolazione con una riduzione dell'attrezzatura necessaria e dell'ingombro della stessa, e che soprattutto approcciasse il problema non più dal punto di vista della congruenza degli spostamenti, ma della congruenza delle sollecitazioni interne alle rotaie.

Considerando, a ragion veduta, la rotaia come un corpo elastico – lineare (schematizzato come un parallelepipedo) sussiste una relazione di proporzionalità tra sforzo  $\sigma$  e deformazione  $\varepsilon$ , espressa dalla formula:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

dove E è il modulo elastico del materiale.

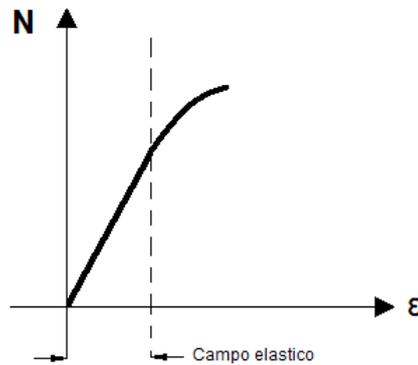


Figura 4.1 – Range di comportamento elastico di un materiale

Pertanto, assumendo come positivi gli sforzi di trazione, se il materiale risulta essere soggetto ad uno stato tensionale di questo tipo (espresso da una forza T) esso subirà, per proporzionalità, una deformazione positiva definita come:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

che esprime un allungamento  $\Delta L > 0$ ; vale il caso contrario se il materiale risulta essere soggetto ad uno sforzo di compressione.

Ora, se un corpo elastico subisce una deformazione  $\varepsilon$ , essa risulta essere costante lungo tutto lo sviluppo del corpo e l'allungamento  $\Delta L$  connesso a questa deformazione risulta essere uniformemente ripartito sull'intera lunghezza del materiale, secondo il principio della scienza delle costruzioni.

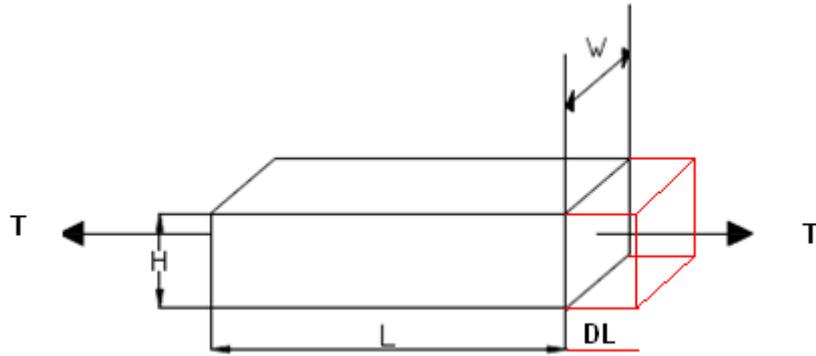


Figura 4.2 – Allungamento di un corpo elastico soggetto ad una forza di trazione

Ma in virtù del comportamento elastico – lineare, se la deformazione subita dal materiale è costante lungo tutto lo sviluppo dello stesso, ne consegue che anche lo sforzo  $\sigma$ , caratterizzante lo stato di sollecitazione interna al materiale, risulta essere costante all'interno dello stesso.

Pertanto, per verificare la corretta esecuzione della procedura di regolazione della lunga rotaia saldata è sufficiente verificare che lo stato tensionale all'interno del materiale sia costante lungo lo sviluppo dello stesso.

Il nostro progetto permette di determinare lo stato tensionale mediante il rilievo di una variazione di tensione  $\Delta V$  tra una coppia di resistenze, gli strain gages, descritti nel successivo paragrafo. Il software abbinato è in grado di eseguire le verifiche sui dati rilevati e certificare l'avvenuta procedura di regolazione.

## 4.2. GLI STRAIN GAGES

Il problema iniziale del progetto è stato quello di capire quale strumento utilizzare per rilevare lo stato di sollecitazione interno alla rotaia.

Lo strumento scelto è lo strain gage (o estensimetro): l'estensimetro è un dispositivo in grado di rilevare la deformazione del materiale su cui viene applicato (nel nostro caso la rotaia) e permette di misurare variazioni di lunghezza dell'ordine del  $\mu\text{m}$ .

La trattazione seguente ha lo scopo di illustrarne il principio di funzionamento.

L'applicazione di una forza  $F$  ad un corpo solido genera una sollecitazione interna e una deformazione; in condizioni stazionarie, con il termine sollecitazione si indica lo stato tensionale che si genera all'interno del corpo per reazione allo sforzo applicato esternamente. Se lo stato tensionale è uniforme sull'intero volume del corpo, lo sforzo può essere calcolato dividendo la forza applicata  $F$  per l'area della superficie  $A$  (ipotesi di comportamento elastico del materiale).

La sollecitazione produce una deformazione (strain) del corpo, definita come il valore della variazione dimensionale per unità di lunghezza. La deformazione può essere calcolata dividendo la variazione dimensionale complessiva conseguente allo sforzo per la lunghezza totale del corpo  $L$ .

Si consideri ora un sottile filo metallico di lunghezza  $L$  e diametro  $D$ , sottoposto ad un carico assiale  $T$  come mostrato in figura 4.3.

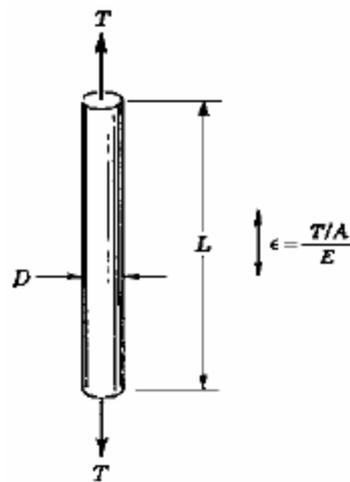


Figura 4.3 – Filo metallico di lunghezza  $L$  sottoposto ad un carico assiale  $T$

Il filo si deformerà allungandosi e diminuendo la sua sezione  $A$ . L'allungamento assiale sarà:

$$\epsilon = \frac{T}{A} \times \frac{1}{E} = \frac{\sigma_a}{E}$$

dove  $\sigma_a$  è la sollecitazione assiale ed  $E$  è il modulo di Young o costante elastica del materiale.

Per quanto riguarda il restringimento della sezione, si ipotizza in prima analisi che non ci siano variazioni di volume del filo ( $\Delta V = 0$ ), per cui si ha:

$$\Delta V = L\Delta A + A\Delta L + \Delta L\Delta A = 0 \rightarrow \frac{\Delta A}{A} = -\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta L\Delta A}{L \times A}$$

Derivando rispetto a D l'area  $A = \frac{D^2}{4} \times \pi$  si ottiene:

$$\frac{\Delta A}{\Delta D} = \frac{2 \times \pi \times D}{4} = \frac{\pi \times D}{2} \rightarrow \frac{\Delta A}{A} = \frac{\pi \times D \times \frac{\Delta D}{2}}{\frac{D^2}{4} \times \pi} = 2 \times \frac{\Delta D}{D}$$

Combinando le due precedenti equazioni risulta:

$$2 \times \frac{\Delta D}{D} = -\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta L\Delta A}{L \times A}$$

Introducendo il rapporto di Poisson, definito come  $\mu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a}$ , dove  $\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L}$  è la deformazione lineare lungo l'asse per unità di lunghezza e  $\varepsilon_t$  è la variazione del diametro  $\frac{\Delta D}{D}$ , ed approssimando a 0 il secondo termine dell'equazione, si ha:

$$\mu = -\frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Il segno “-“ sta ad indicare che, ad un aumento di lunghezza, si ha una diminuzione della sezione. Combinando quest'ultima equazione con la precedente, si ottiene  $\mu = 0,3$ .

### 4.2.1. L'ESTENSIMETRO RESISTIVO

Il funzionamento dell'estensimetro resistivo è basato sul fatto che la resistenza elettrica della griglia di cui è costituito è proporzionale alla sua lunghezza  $L$  ed inversamente alla sezione  $A$  secondo l'espressione:

$$R = \frac{\rho \times L}{A}$$

dove  $\rho$  è la resistività del materiale in  $[\Omega \cdot m]$ . Se sottoposto ad una sollecitazione meccanica, pertanto, l'estensimetro varia la sua resistenza in funzione della variazione di sezione e di lunghezza. Derivando la precedente espressione rispetto alle tre variabili si ottiene:

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial L}{L} - \frac{\partial A}{A}, \text{ sostituendo: } \frac{\partial A}{A} = 2 \times \frac{\partial D}{D}, \text{ si ha:}$$

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{\partial \rho}{\rho} + \frac{\partial L}{L} - 2 \times \frac{\partial D}{D}$$

ed in termini di rapporto di Poisson:

$$\frac{\partial R}{R} = \varepsilon_a \times (1 + 2\mu) + \frac{\partial \rho}{\rho}$$

Definendo il GAGE FACTOR  $F = \frac{\partial R}{R} \times \frac{1}{\varepsilon_a}$ , si ottiene:

$$F = 1 + 2 \times \mu + \frac{\partial \rho}{\rho} \times \frac{1}{\varepsilon_a}$$

Il terzo termine rappresenta le variazioni di resistività dovute all'effetto piezo-resistivo. Questo effetto, trascurabile per i metalli, è notevolmente presente nei semiconduttori (F varia da 2 nei metalli a valori superiori a 100 nei semiconduttori).

Il gage factor è definito quindi come rapporto tra la variazione di resistenza unitaria e la variazione di lunghezza unitaria e identifica la sensibilità dell'estensimetro.

I valori di R e F sono specificati dal costruttore dell'estensimetro. Dalla definizione di F, si può esprimere la deformazione locale come:

$$\varepsilon = \frac{1}{F} \times \frac{\Delta R}{R}$$

per cui, rilevando le variazioni di R e conoscendo F, si può risalire alle deformazioni e quindi agli sforzi subiti dalla struttura su cui è incollato l'estensimetro.

Il valore della corrente nominale è determinato dalla quantità di calore dissipabile, poiché non si possono superare temperature di esercizio che, anzitutto, danneggerebbero il supporto e l'adesivo. Di norma,  $I_n = 15 - 20$  mA.

L'isteresi elastica dell'estensimetro definisce il campo entro cui la risposta è lineare. Va notato che, sotto questo aspetto, il punto debole dell'estensimetro è l'adesivo.

Questo infatti deve assolvere la funzione fondamentale di trasmettere al filo estensimetrico la deformazione del pezzo senza alterarla e quindi avere, teoricamente, modulo elastico infinito.

In secondo luogo esso deve conservarsi isotropo, al fine di mantenere lo stesso legame fra sforzo e deformazione in ogni direzione, in un intervallo di temperature di funzionamento.

In terzo luogo esso contribuisce all'isolamento elettrico verso massa del filo estensimetrico (una resistenza finita verso massa si tramuta in una variazione apparente di deformazione).

Oggi si impiegano adesivi in grado di soddisfare questi requisiti, ciascuno per un opportuno campo di temperature e deformazioni.

Gli estensimetri hanno l'aspetto mostrato nella figura seguente.

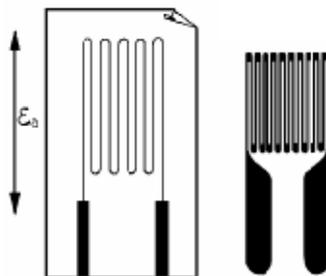


Figura 4.4 – Estensimetri a filo

Su una sottile lamina isolante, che funge da supporto elastico e isolante, è disposto un sottile filo metallico disposto a serpentina (griglia), in modo da aumentare la resistenza complessiva e da offrire la sua lunghezza lungo la direzione di sensibilità del trasduttore. La resistenza deve essere abbastanza grande (tipico valore:  $R = 120 \Omega$ ) per non risentire eccessivamente della resistenza dei fili di collegamento.

La piastrina viene incollata sulla struttura di cui si vuole misurare lo stato di deformazione e collegata ad un circuito a ponte, necessario per convertire le variazioni di resistenza in segnale elettrico.

### 4.2.2. L'ERRORE TERMICO

Idealmente un estensimetro applicato ad un provino dovrebbe essere rappresentativo esclusivamente dello stato di sforzo e deformazione del provino stesso e risultare inalterato dall'influenza di parametri ambientali esterni. Purtroppo in realtà la resistenza degli strain gages, così come le resistenze di tutti i più comuni sensori, sono tutt'altro che delle resistenze perfette.

La resistenza di un estensimetro difatti varia non solo in concomitanza di una variazione dello stato tenso – deformativo del corpo al quale è applicato ma anche in relazione ad una variazione di temperatura. Queste variazioni, in alcuni casi, se non opportunamente trattate possono provocare degli errori, anche sensibili, nei dati rilevati.

In inglese questo effetto di variazione di resistenza imputabile esclusivamente ad una variazione di temperatura, prende il nome di thermal output.

L'effetto di errore termico è imputabile a due fattori essenziali:

- il primo è legato alla dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica dell'estensimetro;
- il secondo è legato al differente valore del coefficiente di espansione termica tra la griglia dell'estensimetro e l'oggetto a cui l'estensimetro è applicato. Una variazione di temperatura provoca infatti un'espansione o una contrazione dell'oggetto a cui l'estensimetro è applicato, il quale subisce la medesima deformazione. Ma il differente valore del coefficiente di espansione termica

induce nell'estensimetro la generazione di uno stato di sforzo proporzionale alla deformazione dell'oggetto cui è applicato, causando quindi una variazione di resistenza dello strain gage.

L'effetto dei due precedenti fattori può essere positivo o negativo, a seconda della variazione di temperatura e la somma algebrica di entrambi fornisce il thermal output dell'estensimetro.

Quindi, esprimendo l'effetto termico in funzione della variazione unitaria di resistenza, l'espressione analitica alla base del fenomeno è:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[ \beta_G + F_G \times \left( \frac{1 + K_t}{1 - \nu_0 K_t} \right) \times (\alpha_S - \alpha_G) \right] \times \Delta T$$

dove:

- $\frac{\Delta R}{R}$  è la variazione unitaria di resistenza dal valore di resistenza iniziale R, causata dalla variazione di temperatura;
- $\beta_G$  coefficiente di variazione della resistenza in funzione della temperatura dell'estensimetro;
- $F_G$  è il gage factor dell'estensimetro;
- $K_t$  è la sensibilità trasversale dell'estensimetro;
- $\nu_0$  è il coefficiente di Poisson dell'oggetto utilizzato per calibrare l'estensimetro per la determinazione del gage factor;
- $(\alpha_S - \alpha_G)$  è la differenza tra i coefficienti di espansione termica dell'oggetto e dell'estensimetro.

In virtù dell'espressione della precedente equazione si deduce che non è possibile, a priori, considerare lineare l'andamento dell'errore termico in funzione della variazione di temperatura, in quanto tutti i coefficienti descritti sono a loro volta funzione della temperatura.

L'equazione dimostra inoltre che il thermal output dipende non solo dalla natura dello strain gage utilizzato ma anche dalla natura del materiale al quale è applicato: l'errore termico dovrà quindi essere sempre riferito ad una particolare coppia dei due elementi citati.

Si riporta ora in figura 4.5 l'andamento dell'errore termico in funzione della temperatura: esso vuole essere solamente un riferimento grafico, non utilizzabile per effettuare un'eventuale compensazione.

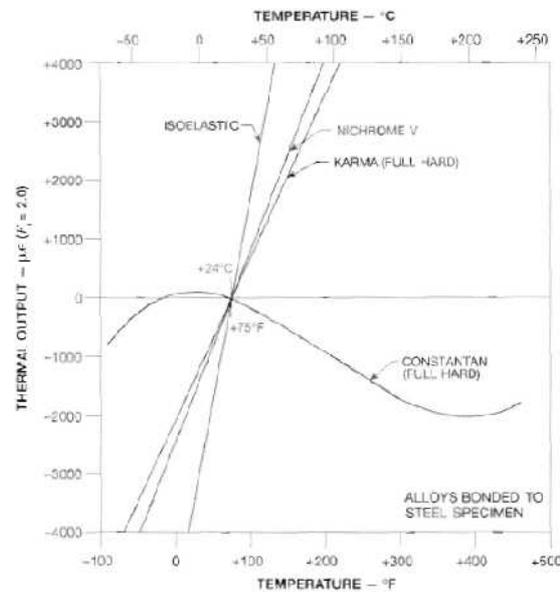


Figura 4.5 – Andamento dell'errore termico in funzione della temperatura

Si può osservare comunque che, ad eccezione degli estensimetri realizzati in lega constantana, all'interno del range di temperature operative normali delle rotaie (- 10°C - +60°C) la variazione del thermal output può considerarsi in realtà pressoché lineare.

Per gli estensimetri in lega constantana invece, la linearizzazione può essere effettuata in un range di temperatura compresa tra i 0°C e i +130°C<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> Per approfondimenti vedi paragrafo 4.4.2.

### 4.2.3. LO SCORRIMENTO

Tutti i materiali elastici esibiscono il fenomeno dello scorrimento in modo più o meno accentuato; dopo la variazione immediata del carico il materiale continua a deformarsi nel tempo (in senso positivo o negativo). Questo fenomeno, analogamente a quanto visto per l'effetto della variazione di temperatura, induce un errore nella stima delle tensioni circolanti nell'estensimetro, errore che necessariamente deve essere compensato.

Essendo strettamente limitata la scelta del materiale, occorre trovare altri mezzi per compensare questo effetto o per minimizzare l'errore che ne deriva. La modifica della geometria della griglia dello strain gage è uno di questi metodi; gli estensimetri moderni foto incisi hanno la possibilità di variare il proprio scorrimento, in modo da compensare lo scorrimento di un corpo elastico sotto carico, ottenendo così una maggiore precisione di misura.

#### 4.2.3.1. L'EFFETTO DI SCORRIMENTO IN MATERIALI ELASTICI SOTTO CARICO

La regola fondamentale base per la trattazione di tale fenomeno è che la sollecitazione dell'elemento elastico del trasduttore non deve mai superare il campo di deformazione elastica.

Una barra soggetta ad un carico di trazione nel campo di deformazione elastica si deforma spontaneamente di un'entità definita dalla legge di Hook.

A causa del rilassamento del materiale, a questa deformazione se ne aggiunge un'altra di andamento asintotico e dipendente dal tempo. Rimosso il carico la barra recupererà la quota parte di deformazione elastica (spontanea sotto carico); ciò che rimane è una piccola deformazione residua di entità pari alla deformazione che si è aggiunta dopo il carico.

Tale deformazione verrà recuperata interamente e gradualmente nel tempo tramite il fenomeno dello scorrimento elastico (da non confondersi con il fenomeno dello scorrimento plastico, irreversibile).

In figura 4.6 si illustra l'effetto dello scorrimento elastico.

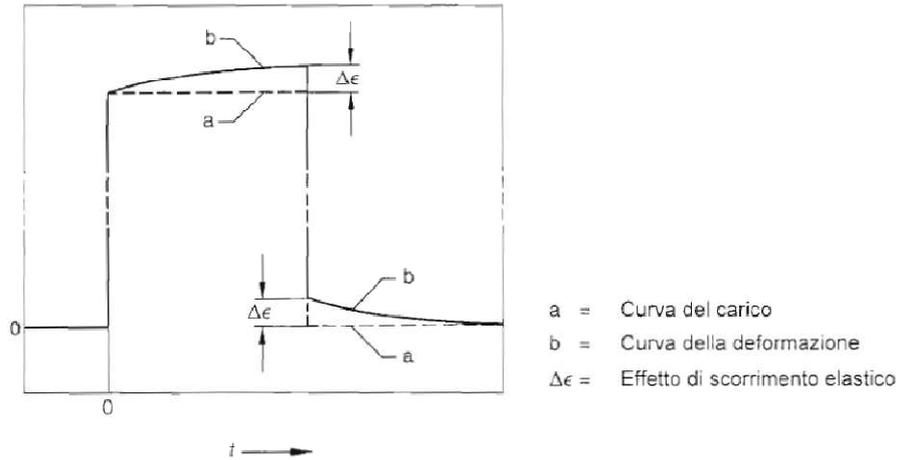


Figura 4.6 – Effetto dello scorrimento elastico

Lo scorrimento elastico genera un errore positivo (nel senso della deformazione per la grandezza di misura) riferito al tempo.

#### 4.2.3.2. LO SCORRIMENTO DEGLI ESTENSIMETRI

Sottoponendo un estensimetro a deformazione statica si nota che, nonostante sia costante la deformazione dell'elemento elastico, la sua resistenza varia nel tempo. Questa variazione del segnale di misura dell'estensimetro soggetto a trazione (o compressione) avviene molto lentamente (scorrimento) ed in direzione di scarico.

La causa è il comportamento reologico del trasferimento della deformazione dello strato di collante al materiale di supporto dello strain gage.

La griglia di misura sotto deformazione si comporta come una molla in tensione.

La tensione della molla genera sollecitazioni di taglio nelle superfici di contatto fra la griglia ed il supporto, principalmente attorno alle anse di ritorno della griglia. Queste sollecitazioni di taglio si sommano a quelle normali provocate dalla deformazione.

Sotto l'azione combinata di queste sollecitazioni sia la resina plastica del supporto dell'estensimetro che il collante si rilassano, cioè si indeboliscono le forze di contrasto e la griglia si ritira: si genera così un errore negativo, mostrato in figura 4.7.

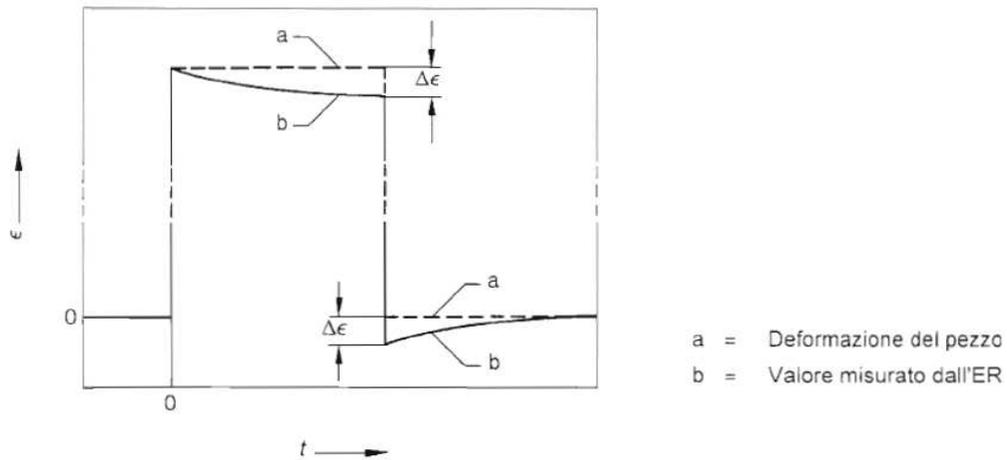


Figura 4.7 – Valore misurato dall'estensimetro dopo il caricamento e lo scaricamento spontaneo del pezzo

Verificandosi questo processo anche nella zona dei tornanti delle griglie, il suo effetto è più alto con le griglie di misura corte che con quelle lunghe.

Imputando essenzialmente questo effetto alla struttura delle anse di ritorno, intervenendo sulle stesse modificandole ad arte, è possibile influenzare lo scorrimento.

Ciò si ottiene realizzando le anse di lunghezze diverse; esse vengono definite quotando la lunghezza "u" dell'ansa quale multiplo della larghezza "s" del filamento.

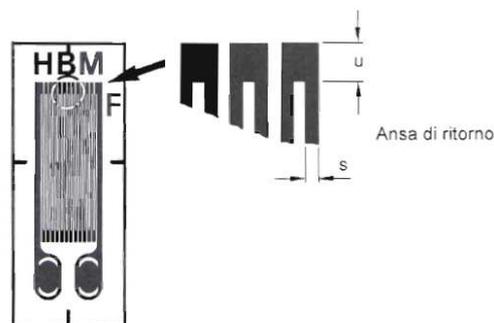


Figura 4.8 – Definizione dell'ansa di ritorno dell'estensimetro (griglia e dettaglio)

E' importante sottolineare che quando si parla di scorrimento degli estensimetri non si deve dimenticare che, in aggiunta alle caratteristiche proprie dello stesso, si deve tenere conto di altri importanti fattori: i principali sono la natura e lo spessore dello strato di collante e l'effetto del tempo e della temperatura.

Tutti questi effetti presi insieme causano lo scorrimento, che è sempre una riduzione del segnale di misura in funzione del tempo, cioè un errore negativo di maggiore o minore entità a seconda della lunghezza “u” dell’ansa di ritorno.

#### 4.2.3.3. L'EFFETTO DI COMPENSAZIONE

Riassumendo, lo scorrimento dell’estensimetro genera un errore negativo mentre quello del materiale dell’elemento elastico ne genera uno positivo. In un caso ideale lo scorrimento dell’estensimetro e lo scorrimento dell’elemento si compensano fra di loro come mostrato in figura 4.9.

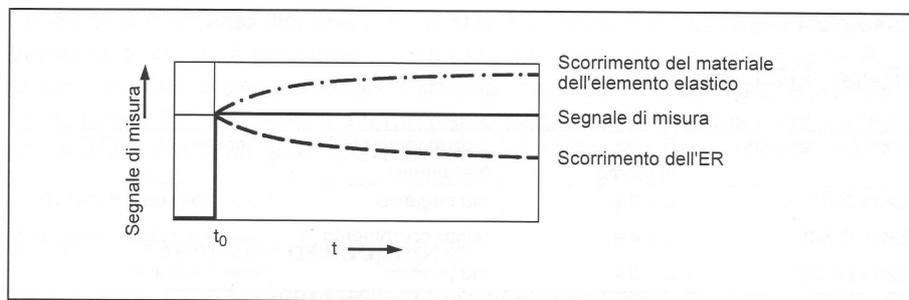


Figura 4.9 – Diagramma idealizzato della compensazione dello scorrimento

Non essendo influenzabili le proprietà dell’elemento elastico è opportuno scegliere l’estensimetro che si approssimi il più possibile al caso reale.

In commercio gli estensimetri vengono proposti con diversi livelli di compensazione dello scorrimento in funzione del rapporto tra lunghezza e larghezza dell’ansa.

Al fine di approssimare nel migliore dei modi il comportamento dell’estensimetro al comportamento ideale sopra citato è necessario determinare lo strain gage più idoneo in maniera sperimentale.

Va comunque considerato che nel nostro caso specifico lo scorrimento, trattandosi di una prova per lo più dinamica, è poco significativo. Quindi la scelta di estensimetri con valori di scorrimento neutrale pare la scelta più appropriata.

### 4.3. L'HARDWARE

L'hardware utilizzato per la nostra applicazione è composto essenzialmente da una scheda USB e da un alimentatore di tensione stabilizzato a + 5 Volt.

La scheda USB ha una superficie di pochi centimetri quadrati e su di essa è montato un microcontroller programmato della Microchip, il PIC18F4553; si tratta di un microcontroller già dotato internamente di porta USB in configurazione "bridge", cioè con conversione USB RS232.

Esso mette a disposizione, su una scheda denominata LX. 1741, 8 ingressi analogici a 12 bit di risoluzione.

Per ogni ingresso analogico è disponibile un'alimentazione a + 5 Volt per alimentare un eventuale sensore, oltre che la massa e ovviamente l'ingresso analogico. E' pertanto possibile utilizzare un normale cavetto schermato a due fili più calza per collegare un qualsiasi sensore al circuito.

Il valore di tensione che applicheremo al circuito sarà di + 5 Volt (massimo valore ammissibile per permettere alla scheda USB di interfacciarsi con il PC mediante porta USB): la tensione in ingresso verrà applicata al convertitore A/D (analogico/digitale) a 12 bit di risoluzione.

12 bit indica il numero di cifre binarie a cui corrisponde la tensione d'ingresso dopo che è stata eseguita la conversione A/D: in pratica, il convertitore A/D trasformerà la tensione applicata in ingresso in un numero binario a 12 cifre.

Poiché il numero binario più alto esprimibile con 12 cifre binarie è 4096 ( $2^{12} = 4096$ ), risulta che la più piccola differenza di tensione apprezzabile sarà uguale a:

$$+ 5 V : 4096 = 0,00122 V = 1,220 mV$$

Quanto detto risulta essere coerente con la scelta dell'utilizzo degli estensimetri per poter misurare la variazione dello stato tensionale interno alle rotaie: essi infatti sono dei reostati che lavorano con delle variazioni di tensione dell'ordine dei microvolt, descrivibili con ingressi analogici a 12 bit.

La scheda sfrutta la porta USB per la trasmissione con il pc : l'ingresso USB ha 4 contatti di cui due sono i dati denominati D + e D -, il terzo è il contatto che porta i 5 Volt e il quarto la massa.

La trasmissione dati nella vecchia RS232 avveniva su due linee specifiche, cioè una TX (trasmetteva il dato) e l'altra RX (riceveva il dato). Nella trasmissione USB i dati che circolano sui terminali D + e D - possono essere indifferentemente di tipo RX o TX ed è solo un complicato software che si occupa di discriminare tra l'uno e l'altro. Per questo motivo la periferica utilizzata per il nostro progetto è dotata di driver che vengono automaticamente installati sul pc i quali permettono di gestire questa particolare problematica.

In definitiva: la trasmissione RS232 utilizza la forma di trasmissione dei dati binari chiamata NRZ – L, acronimo di Bipolar Non Return to Zero – Level, dove:

- “1” è rappresentato dal livello di tensione fisico di solito negativo da – 5 Volt a – 12 Volt;
- “0” è rappresentato dal livello di tensione fisico, di solito positivo, da + 5Volt a + 12 Volt.

Si dice che il segnale oscilla da positivo a negativo rispetto al precedente stato di clock bit. Scandito dal clock, il segnale 0 è indicato da un'uscita positiva, il segnale 1 è indicato da un'uscita negativa.

Il protocollo RS232 è caratterizzato da un inizio e da una fine (bit start e bit stop). Nel grafico è mostrato come si presenta un protocollo tipo RS232. Ogni cifra binaria del testo (8bit) si ricava semplicemente dalla polarità del segnale. Quando il segno del segnale è negativo, avremo un 1, quando il segno del segnale è positivo, avremo uno 0.

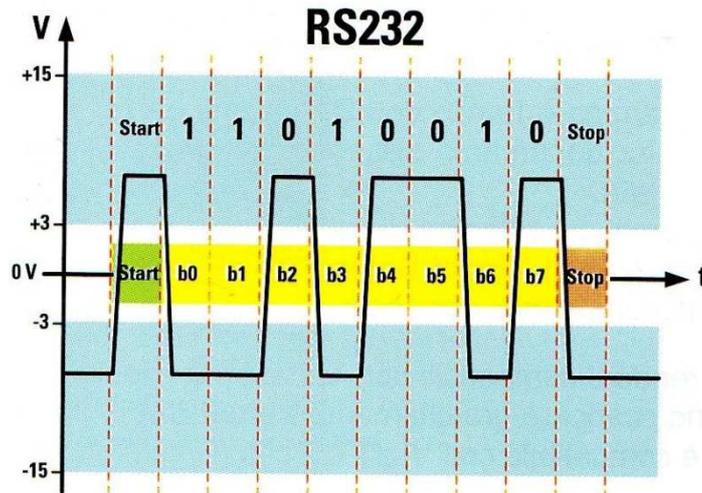


Figura 4.10 – Il protocollo RS232

L'USB utilizza la forma di trasmissione dei dati binari NR – ZI (acronimo di Non Return to Zero Inverted) con un principio simile, ma in questo caso ciò che distingue se un dato è 1 o 0 non è il livello di tensione bensì la transizione tra il più e il meno.

Cioè se vi è transizione lo stato logico è 1 mentre se il livello rimane costante (sia che sia negativo o positivo) lo stato logico è 0.

Quindi anche i convertitori RS232 USB a livello hardware non sono molto complicati in quanto, essendo piccola la differenza a livello elettrico, questa viene compensata da un grande lavoro a livello di software.

Il protocollo USB è molto complesso. Ciò che vede è soltanto una porzione del protocollo generale che si allunga in tanti sottolivelli. Il sistema USB, a differenza dell'RS232, trasferisce l'informazione 1 tutte le volte che il segnale passa da più a meno. Quando invece rimane costante nella zona positiva o nella zona negativa l'informazione è sempre 0. Quindi si tratta di un sistema molto più veloce e con minore possibilità di errore.

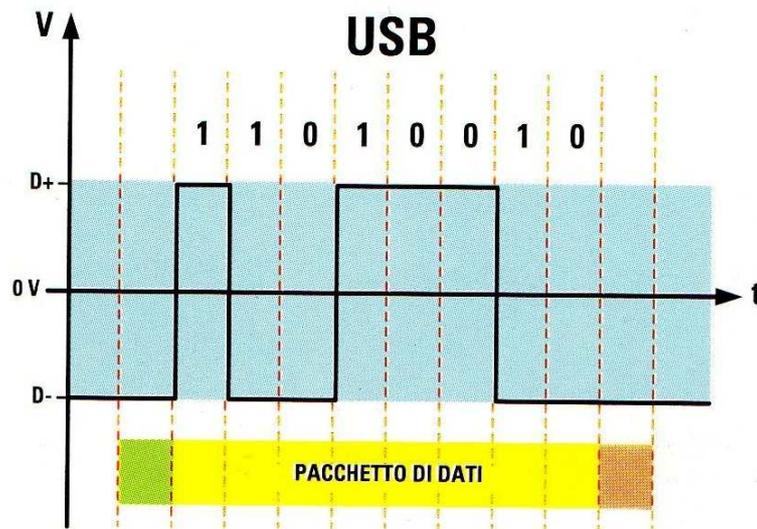


Figura 4.11 – Protocollo USB

Nella scheda è inoltre previsto un diodo led che svolge la funzione di segnalare se la scheda ha superato l'enumerazione, cioè il riconoscimento da parte del PC.



Figura 4.12 – Diodo led

Il termine "led" è un acronimo che sta per "Light Emitting Diode", ovvero "diodo che emette luce". I led sono costituiti da una giunzione P-N realizzata con arseniuro di gallio o con fosforo di gallio, entrambi materiali in grado di emettere radiazioni luminose quando sono attraversati da una corrente elettrica; il valore di tale corrente è compreso fra 10 e 30 mA.

Il funzionamento del led si basa sul fenomeno detto "elettroluminescenza", dovuto alla emissione di fotoni (nella banda del visibile o dell'infrarosso) prodotti dalla ricombinazione degli elettroni e delle lacune allorché la giunzione è polarizzata in senso diretto.

I led hanno un terminale positivo ed uno negativo e per funzionare devono essere inseriti in circuito con la corretta polarità; in genere il terminale positivo è quello più lungo.

Diversamente dalle comuni lampadine, il cui filamento funziona a temperature elevatissime ed è caratterizzato da notevole inerzia termica, i led emettono luce fredda e possono lampeggiare a frequenze molto alte, superiori al Mhz.

Nella figura 4.13 si riporta uno schema elettrico della scheda LX. 1741.

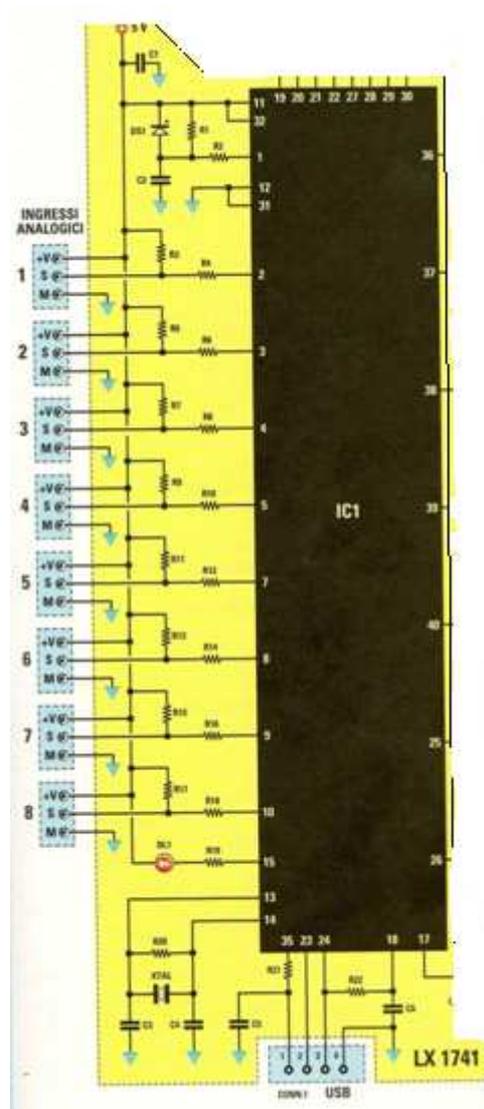


Figura 4.13 – Schema elettrico LX. 1741

L'elenco dei componenti LX. 1741 è il seguente:

- R1 = 4.700 ohm;
- R2 = 470 ohm;
- R3 = 10.000 ohm;
- R4 = 180 ohm;
- R5 = 10.000 ohm;
- R6 = 180 ohm;
- R7 = 10.000 ohm;
- R8 = 180 ohm;
- R9 = 10.000 ohm;
- R10 = 180 ohm;
- R11 = 10.000 ohm;
- R12 = 180 ohm;
- R13 = 10.000 ohm;
- R14 = 180 ohm;
- R15 = 10.000 ohm;
- R16 = 180 ohm;
- R17 = 10.000 ohm;
- R18 = 180 ohm;
- R19 = 390 ohm;
- R20 = 1 megaohm;
- R21 = 10.000 ohm;
- R22 = 1.500 ohm;

#### 4. L'INNOVAZIONE: HARDWARE E SOFTWARE

- C1 = 100.000 pF poliestere;
- C2 = 100.000 pF poliestere;
- C3 = 22 pF ceramico;
- C4 = 22 pF ceramico;
- C5 = 100.000 pF poliestere;
- C6 = 1 microF. poliestere;
- DL1 = diodo led;
- DS1 = diodo 1N4150;
- XTAL = quarzo 20 MHz;
- IC1 = CPU tipo EP1741 programmata;
- CONN.1 = connettore USB;

Nella foto di seguito si possono notare in particolare gli 8 ingressi analogici bipolari, il diodo led (DL1), il connettore USB, il microcontrollore IC1, il collegamento verso il sistema di alimentazione.



*Figura 4.14 – Scheda LX. 1741 montata*

Si è deciso di alimentare la scheda con un alimentatore autonomo, in modo da non sovraccaricare l'alimentazione del pc, evitando così le limitazioni dovute al fatto che quest'ultimo non può erogare correnti elevate.

Per l'alimentazione della scheda USB per le prove di laboratorio descritte nel capitolo 5 si è deciso di utilizzare lo stadio di alimentatore LX. 1701, in grado di fornire le tensioni stabilizzate di 12 e di 5 Volt.

Esso è molto semplice ed è costituito da un trasformatore riduttore seguito da un ponte raddrizzatore a cui sono collegati dei condensatori (da C1 a C4) in modo da ridurre i disturbi di commutazione generati durante il normale funzionamento, un condensatore di livellamento (C5) e due integrati stabilizzatori (IC1 – IC2) che, applicati su un'adeguata aletta di raffreddamento, completano il tutto fornendo le due tensioni di + 5 / + 12 Volt perfettamente stabilizzate.

In figura 4.15 si riporta lo schema elettrico dell'alimentatore utilizzato con tutti i riferimenti sopra citati.

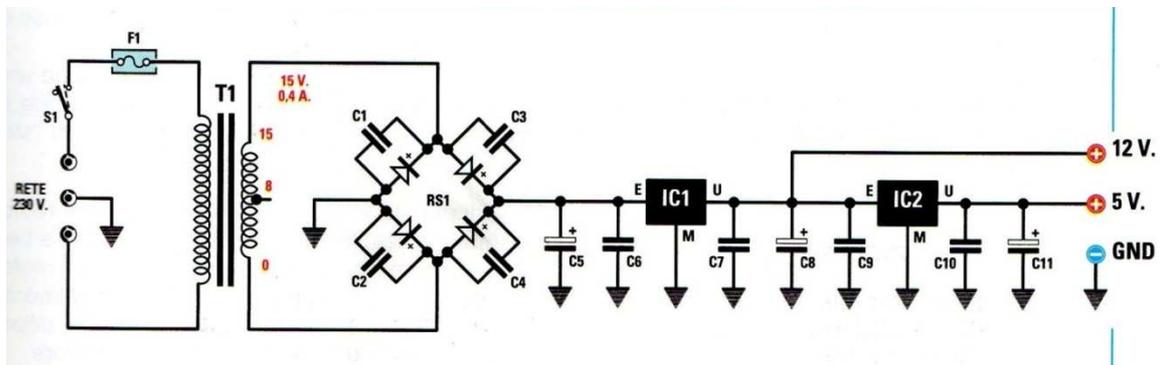


Figura 4.15 – Schema elettrico alimentatore LX. 1701

L'elenco dei componenti dello stadio di alimentazione LX.1701 è il seguente:

- C1 = 10.000 pF ceramico;
- C2 = 10.000 pF ceramico;
- C3 = 10.000 pF ceramico;
- C4 = 10.000 pF ceramico;
- C5 = 1.000 microF. elettrolitico;
- C6 = 100.000 pF poliestere;
- C7 = 100.000 pF poliestere;
- C8 = 100 microF. elettrolitico;
- C9 = 100.000 pF poliestere;
- C10 = 100.000 pF poliestere;
- C11 = 100 microF. elettrolitico;
- IC1 = integrato tipo L.7821;
- IC2 = integrato tipo L.7805;
- RS1 = ponte raddrizzatore 100 V 1 A;

- T1 = trasformatore 6 watt (T006.02), sec. 8-15 V 0,4 A;
- F1 = fusibile 1 A;
- S1 = interruttore.

### 4.4. IL SOFTWARE: ALPHA ViBi 1.1

Il software progettato permette di acquisire un segnale elettrico di tipo binario dall'hardware descritto e, tramite opportune funzioni che verranno illustrate, trasformarlo in un valore di sforzo indicante lo stato di sollecitazione della rotaia nel punto in cui è applicato il sensore (estensimetro).

Il programma è stato interamente sviluppato mediante l'ausilio del linguaggio di programmazione Visual Basic 6.0, che ha permesso di realizzare il codice necessario per la gestione dei dati e l'interfaccia utente.

La scelta del linguaggio Visual è stata dettata dalla notevole versatilità dello stesso e dalla possibilità di creare un'interfaccia grafica intuitiva e del tutto simile agli usuali software utilizzati in ambiente Windows.

Per semplicità descrittiva si procede ad illustrare il funzionamento del programma suddividendolo in diverse sezioni, secondo quanto dettato dalla struttura a blocchi dello stesso<sup>25</sup>. La sequenza non è da intendere come insieme di operazioni indipendenti e successive: il software infatti compie una lettura completa del dato (con tutte le operazioni di trasformazione) in un istante di tempo (500 millisecondi).

---

<sup>25</sup> Le successione delle sezioni non ricalca esattamente l'ordine con cui il software esegue le operazioni di lettura, ma segue la struttura a blocchi (subroutine) con cui è scritto il codice del programma.

#### 4.4.1. L' ACQUISIZIONE E LA GESTIONE DEI DATI

La prima sezione è dedicata ad illustrare le modalità di acquisizione e gestione dati mediante ingresso USB.

Preliminarmente all'utilizzo del software è necessario installare sul proprio PC i driver che permettono al computer di rilevare la periferica hardware connessa mediante porta seriale.

Nel software sono stati aggiunti 10 ingressi denominati Com: il codice, nell'istante in cui l'utente sceglie la Com *i* – esima, effettua una verifica per valutare che ad essa sia effettivamente collegata la periferica in interesse. Per fare ciò si assicura che la porta non sia già “aperta” (utilizzata da una periferica diversa) oppure che la porta non esista (il PC non rileva la presenza di periferiche associate).

Nel caso in cui la porta seriale selezionata sia corretta, il codice sincronizza la stessa con un timer che permette di effettuare il rilievo del segnale elettrico di input con la frequenza di una lettura ogni 500 millisecondi.

Il software è in grado di gestire fino a 24 sensori analogici contemporaneamente, numero necessario per monitorare la procedura di regolazione della lunga rotaia saldata come verrà descritto in seguito (l'hardware progettato gestisce solo 8 sensori: per poter incrementare il numero dei sensori da gestire è necessario disporre tre schede ed un hub che raccolga i dati in ingresso).

Il codice, per mezzo di una apposita funzione, pulisce una stringa<sup>26</sup>, ricevuta in ingresso come input dalla periferica, dai caratteri non numerici dopo l'uguale e converte tale valore in un dato binario utile al software per le successive elaborazioni.

Per poter verificare che effettivamente la periferica sia in comunicazione con il software è possibile osservare il diodo led dell'hardware: se esso lampeggia la comunicazione è attiva.

---

<sup>26</sup> Una stringa, nel linguaggio di programmazione, è intesa una successione di caratteri alfanumerici.

#### 4.4.2. LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO

La seconda sezione è dedicata ad illustrare le funzioni che permettono di trasformare il dato da binario a una grandezza utile per l'applicazione progettuale in interesse.

Il codice, tramite un'apposita funzione, permette di trasformare il dato da binario in Volt.

La relazione analitica che esprime tale trasformazione deriva da una proporzione tra il massimo valore del dato binario con sensori analogici a 12 bit di risoluzione (4096) e la massima tensione nominale applicata al circuito cablato (5 Volt):

$$\frac{nbit}{4096} = \frac{volt}{5}$$

Il codice è stato strutturato in modo tale da effettuare una lettura del dato binario ogni 500 millisecondi; a fini ingegneristici, avendo bisogno di un dato in Volt che sia stabile per poter meglio analizzare le eventuali variazioni tensionali indotte dalla variazione di resistenza dell'estensimetro, il software legge un valore ogni 500 millisecondi ed effettua, ogni 3 secondi, una media aritmetica delle 6 letture, stampando a video tale valore.

Ne consegue quindi che da un lato si ha la perdita dell'istantaneità del dato rappresentato (comunque poco significativo) dall'altro si guadagna notevolmente in termini di precisione dello stesso.

Come verrà descritto in seguito, il dato che interessa ai fini applicativi non è tanto il voltaggio rilevato dall' *i* - esimo sensore, quanto la differenza di voltaggio tra la parte attiva e la parte passiva del circuito a ponte di Wheatstone. Tale differenza identifica proprio la variazione di resistenza elettrica dovuta ad un allungamento/accorciamento della rotaia.

Pertanto il codice elabora i due valori di voltaggio rilevati dalla coppia di estensimetri ed effettua la differenza, stampando a video il valore.

In fase di regolazione, il software è strutturato per effettuare la calibrazione del modello e permette di trasformare il valore di variazione di tensione (Volt) in sforzo (MPa).

Il modello si basa su una relazione di tipo lineare tra sforzo applicato alla rotaia e variazione di voltaggio rilevato. Ciò deriva dalla relazione di proporzionalità esistente

tra deformazione subita dall'estensimetro applicato ad un corpo elastico e variazione di resistenza propria dello stesso:

$$\varepsilon = \frac{1}{F} \times \frac{\Delta R}{R}$$

Poiché sforzi e deformazioni, per un corpo con comportamento elastico lineare secondo la legge di Hooke, sono legati dalla relazione:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

e poiché per la legge di Ohm sussiste una relazione di linearità tra variazione di resistenza e tensione applicata a un circuito:

$$\Delta V = \Delta R \times i$$

anche tra sforzi e variazione di tensione sussiste la stessa tipologia di legame lineare.

Il codice riceve in input, forniti dall'utente e deducibili dalle letture effettuate sui morsetti tendirotaia, due valori di tiro (kN) applicati alla rotaia ai quali associa automaticamente i rispettivi valori di variazione di voltaggio.

La calibrazione avviene esplicitando l'equazione di una retta passante per i due punti individuati (fig. 4.16), in modo tale che per un qualunque successivo valore di input di voltaggio possa fornire il corrispondente valore di sforzo nella rotaia.

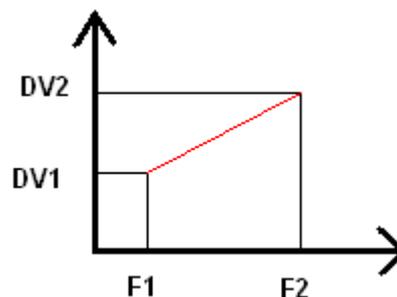


Figura 4.16 – Calibrazione del modello per la regolazione

L'espressione analitica risultante è:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\Delta F}{\Delta V_2 - \Delta V_1} \times \left[ \Delta V + \frac{\Delta V_2 - \Delta V_1}{\Delta F} \times F_1 - \Delta V_1 \right]$$

dove:

- A: è l'area della sezione di rotaia;
- $\Delta F = F_2 - F_1$ ;
- $\Delta V$ : variazione di voltaggio in input (ovvero variazione i – esima di voltaggio associata alla coppia j – esima di sensori rilevata successivamente alla calibrazione del modello).

Il software è in grado di rilevare l'avvenuta calibrazione del modello analitico e di trasformare ogni 3 secondi il dato, mediato su 6 letture, da volt in sforzo e stampare a video il valore corrispondente.

Nel caso in cui l'applicazione del software utilizzata sia invece quella di monitoraggio in esercizio, il software riconosce automaticamente la necessità di effettuare una seconda tipologia di calibrazione.

Per comprendere la funzionalità del programma risulta necessario illustrare alcuni concetti teorici sul funzionamento degli estensimetri e sulla teoria alla base di questa applicazione.

La prima difficoltà riscontrata consiste nel fatto che, secondo quanto indicato nella Specifica Tecnica RFI, il tratto di lunga rotaia saldata regolato attenendosi scrupolosamente alle prescrizioni della normativa, in fase di esercizio non risulta interessato, nella parte centrale, da spostamenti dipendenti dal variare della temperatura. Risulterebbe pertanto impossibile misurare lo stato di sollecitazione interna per temperature operative diverse da quella di regolazione basandosi sul monitoraggio della deformazione mediante l'utilizzo degli strain gages.

La seconda difficoltà riscontrata consiste nel fatto che, come detto nel paragrafo 4.2.2, l'estensimetro è soggetto ad un errore termico; per la maggior parte delle applicazioni

per cui esso viene utilizzato, tale errore deve essere necessariamente compensato per evitare distorsioni nel dato misurato.

La soluzione adottata consiste pertanto nell'utilizzo degli strain gage anche per il monitoraggio in esercizio, con lo scopo di rilevare la variazione di resistenza elettrica dell'estensimetro (e quindi una variazione di tensione elettrica) non più imputabile ad una deformazione dello stesso, ma imputabile semplicemente alla variazione della temperatura.

Nel paragrafo 4.4 infatti, tramite la seguente relazione:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[ \beta_G + F_G \times \left( \frac{1 + K_t}{1 - \nu_0 K_t} \right) (\alpha_S - \alpha_G) \right] \times \Delta T$$

si è voluto indicare la termosensibilità intrinseca della resistenza elettrica: la sua variazione pertanto è indipendente dalle deformazioni subite o meno dal corpo al quale lo strain gage è applicato, ma sussiste una relazione che, come detto, non può essere assunta lineare a priori.

Ricordando che le temperature operative ordinarie delle rotaie nelle regioni italiane possono variare da un minimo di  $-10^{\circ}\text{C}$  a un massimo di  $+60^{\circ}\text{C}$ , possiamo, in riferimento al grafico riportato in figura 4.17, affermare che in un range di temperature compreso tra  $0^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ , per estensimetri in lega costantana, la relazione analitica tra errore termico (inteso come  $\frac{\Delta R}{R}$ ) e temperatura può essere considerata lineare.

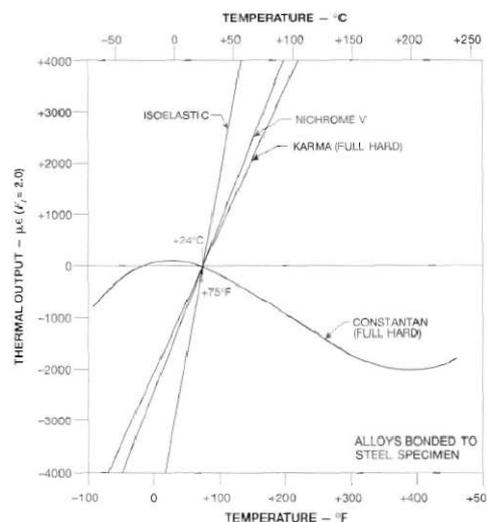


Figura 4.17 – Errore termico in funzione della temperatura

Esplicitando quindi il  $\Delta T$  della precedente equazione come  $T_{operativa} - T_{regolazione}$ , noti due valori di temperatura operativa della rotaia di riferimento (tipicamente la mattina presto e a mezzogiorno) e le corrispondenti variazioni di voltaggi rilevati per variazione delle resistenze delle coppie di estensimetri, è possibile effettuare la calibrazione del modello esprimendo l'equazione di una retta passante per i due punti di coordinate note, secondo quanto riportato nel grafico di figura 4.18:

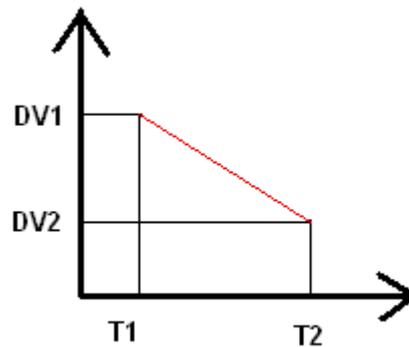


Figura 4.18 – Calibrazione del modello per monitoraggio in esercizio

La relazione analitica che fornisce il valore  $i$  – esimo dello sforzo nella rotaia, rappresentativo dello stato tensionale alla temperatura  $i$  – esima, è pertanto:

$$\sigma = +\alpha \times E \times T_{reg} - \alpha \times E \times \frac{\Delta T}{\Delta V_2 - \Delta V_1} \times \left[ \Delta V + \frac{\Delta V_2 - \Delta V_1}{\Delta T} \times T_1 - \Delta V_1 \right]$$

dove:

- $\Delta T = T_2 - T_1$ ;
- $T_{reg}$ : temperatura di regolazione;
- $E$ : modulo elastico dell'acciaio della rotaia;
- $\alpha$ : coefficiente di dilatazione termica lineare dell'acciaio della rotaia;
- $\Delta V$ : variazione di voltaggio in input (ovvero variazione  $i$  – esima di voltaggio associata alla coppia  $j$  – esima di sensori rilevata successivamente alla calibrazione del modello).

L'ipotesi alla base dell'applicazione del modello consiste nell'assumere che la temperatura operativa dell'estensimetro, responsabile della variazione di resistenza elettrica, sia la medesima della rotaia.

E' da notare che se la temperatura operativa è superiore alla temperatura di regolazione il valore di sforzo calcolato con la precedente equazione è positivo, generando pertanto delle sollecitazioni di compressione. Il software quindi permette di intervenire per tempo sulle rotaie ed evitare l'insorgere di una situazione di questo tipo mediante il monitoraggio in continuo dello stato tensionale interno alle rotaie.

Il software è in grado di gestire autonomamente le differenti funzioni di calibrazione e trasformazione del dato in volt a seconda del tipo di intervento che l'utente intende effettuare.

### 4.4.3. LA REGOLAZIONE DELLA LUNGA ROTAIA SALDATA

Il software gestisce la procedura di regolazione della lunga rotaia saldata in due differenti parti: una prima parte costituita dai calcoli preliminari all'esecuzione della regolazione e una seconda parte inerente la regolazione vera e propria.

#### 4.4.3.1. OPERAZIONI PRELIMINARI

La terza sezione è dedicata ad illustrare la parte di codice che permette di effettuare i calcoli necessari per poter realizzare la procedura di regolazione.

Come verrà descritto in seguito, il software "richiede" una serie di dati in ingresso da parte dell'utente.

Questa parte di codice è "statica": i dati introdotti dall'utente sono riconosciuti dal codice come una serie di variabili che mantengono costante il loro valore durante tutta la fase in cui il programma è in esecuzione.

L'allungamento previsto dell'intera semisezione di regolazione è calcolato mediante la seguente relazione:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$$

dove:

- $\alpha$  = coefficiente di dilatazione termica lineare dell'acciaio della rotaia;
- $L$  = lunghezza semisezione;
- $\Delta T = T_{\text{operativa}} - T_{\text{regolazione}}$ .

Il tiro ai martinetti necessario per imporre tale allungamento è semplicemente fornito dal prodotto tra la deformazione subita dalla rotaia, il modulo elastico della rotaia e l'area della sezione.

$$F = \varepsilon \times E \times A = \frac{\Delta L}{L} \times E \times A$$

La relazione analitica per la determinazione della luce di taglio necessaria per eseguire la saldatura è:

$$l = \Delta L \times 2 + 25 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$$

dove:

- 25 sono i millimetri standardizzati secondo Specifica tecnica RFI necessari per effettuare la saldatura;
- 3 sono i millimetri previsti per il ritiro della saldatura soggetta, dopo l'esecuzione, a raffreddamento.

Lo stato tensionale indotto a seguito del tiro applicato con i morsetti è:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\frac{\Delta L}{L} \times E \times A}{A} = \frac{\Delta L}{L} \times E$$

#### 4.4.3.2. LA REGOLAZIONE

La quarta sezione è dedicata ad illustrare la parte di software che gestisce la procedura di regolazione.

Il software è in grado di gestire fino a 24 sensori, posizionati a coppie in 12 diversi punti della rotaia.

E' opportuno che l'utente consideri la numerazione presente sulla videata del software dei diversi sensori per il loro posizionamento, al fine di evitare che sensori in determinate posizioni proiettino a video dei valori di voltaggio non propri di quel punto. Ciò è necessario in quanto ogni ingresso analogico dell'hardware corrisponde ad uno specifico sensore.

Terminata la regolazione il software memorizza in 12 variabili di tipo double gli sforzi rappresentativi dello stato tensionale delle rotaie rilevati nell'istante di tempo  $i - \text{esimo}$  di fine regolazione.

Successivamente e in modo automatico il programma esegue delle verifiche sui precedenti valori di sforzo: l'esito di tali verifiche, che il codice stampa a video in una apposita text box, stabilisce se la procedura di regolazione è stata eseguita in maniera idonea e conforme alle prescrizioni della Specifica Tecnica R.F.I.

Le verifiche sono di tre tipologie:

- il software verifica che lo sforzo rilevato dai sensori posti in corrispondenza dei giunti di regolazione sia uguale, a meno di un range di tolleranza, allo sforzo previsto e calcolato dal programma all'inizio della procedura di regolazione. Esso corrisponde allo stato tensionale indotto nella rotaia in seguito all'applicazione del tiro con i martinetti tendirotaie e corrispondente al  $\Delta T$  esistente tra temperatura di regolazione e temperatura operativa della rotaia;
- contemporaneamente il software verifica che il valore dello sforzo rilevato dai sensori in corrispondenza del primo punto libero della rotaia successivo ai punti fissi sia uguale, a meno di un range di tolleranza, allo sforzo rilevato dai sensori in corrispondenza dei giunti di regolazione. Questo controllo permette di verificare l'uniformità dello stato tensionale lungo la rotaia, ovvero di convalidare o meno la regolazione effettuata;

- la terza verifica consiste nel valutare lo stato tensionale in corrispondenza dei punti fissi: se la procedura ha avuto esito positivo lo sforzo deve essere nullo (sempre a meno di un fattore di tolleranza, che identifica uno spostamento massimo di 3 mm).

Gli errori che il software eventualmente stampa nell'apposita text box sono di tre tipi:

- stabilisce, in caso di esito negativo della prima delle due verifiche, se lo sforzo in corrispondenza del giunto di regolazione è maggiore o minore dello sforzo calcolato dal software all'inizio della procedura: ciò permette all'operatore di capire con quale tipologia di intervento poter migliorare lo stato tensionale (allentamento dei morsetti se lo sforzo nei giunti risulta essere maggiore, aumento del tiro se viceversa);
- riporta una frase di errore in caso di esito negativo della seconda verifica, limitandosi ad attirare l'attenzione dell'operatore sulla mancata uniformità dello stato tensionale nella rotaia;
- riporta una frase di errore se lo stato di sollecitazione del punto fisso è diverso da zero.

#### 4.4.4. IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

La quinta sezione è dedicata ad illustrare la parte di software che gestisce il monitoraggio in esercizio.

Il software, previo opportuna calibrazione del modello di calcolo utilizzato e descritto nella seconda sezione, è in grado di rappresentare a video, con una frequenza di una stampa ogni 3 secondi, il valore di sforzo nel punto  $i$  – esimo, al variare della temperatura della rotaia.

Ad ogni stampa il codice effettua una verifica del valore di sforzo di ciascun punto con un valore limite, definito nel capitolo 7, al fine di tutelare la rotaia dal rischio di slineamento. L'esito di tali verifiche è stampato a video, mediante una stringa per ciascun sensore, in una apposita text box.

#### 4.4.5. IL SALVATAGGIO DEI DATI

La sesta sezione è dedicata ad illustrare la parte di codice dedicata al salvataggio dei dati.

Questa opzione è stata fornita per poter permettere all'utente di effettuare ulteriori elaborazioni e gestire in modo non vincolato al software i dati della regolazione o del monitoraggio in esercizio.

I dati vengono salvati dal software in un file .txt, nella medesima directory in cui è installato il software all'interno del PC.

Il programma è strutturato in maniera tale che, ad ogni avvio, crei autonomamente un file "aperto" di testo e scriva, con una frequenza pari alla frequenza di elaborazione dati (3 secondi), i valori di sforzo rilevati dai diversi sensori e il numero di sensore a cui si riferisce.

Per non appesantire la memoria del PC si è deciso di evitare il salvataggio automatico dei dati (a volte potrebbe non essere necessario memorizzarli) ma di rendere opzionale la scelta.

Il tipo di file .txt è stato scelto per due motivi:

- semplicità e versatilità del file, nonché possibilità di essere visualizzato da tutti i PC con una normale suite di programmi in dotazione;
- evitare di abbinare al programma un compilatore pdf eventualmente presente sul PC in utilizzo per permettere ai due software di interfacciarsi.

Il codice inoltre salva automaticamente (non più in modo opzionabile) i dati inerenti la procedura di regolazione in un ulteriore file .txt, fornendo una certificazione dell'avvenuta regolazione della rotaia.

#### 4.4.6. COME FUNZIONA IL SOFTWARE

Viene ora fornita una sorta di guida del software progettato; a differenza di quanto esposto fino ad ora, ci si concentrerà maggiormente sull'interfaccia grafica del programma e sulle possibilità di interazione utente – software.

##### 4.4.6.1. INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE

L'installazione del software, utilizzabile su piattaforma Windows, avviene mediante la semplice esecuzione del setup (file .exe) contenuto nella cartella del progetto stesso.

Si ricorda a tale proposito che per poter garantire il corretto funzionamento del programma è necessario preventivamente installare i driver della periferica USB, per permettere al PC di riconoscere la periferica stessa ; essi sono contenuti all'interno della cartella fornita con il software.

Completata l'installazione è possibile avviare il programma “cliccando” sull'apposita icona contenuta all'interno della cartella programmi di Windows.

##### 4.4.6.2. IL PROGRAMMA

Avviato il programma, all'utente si presenta la seguente videata:

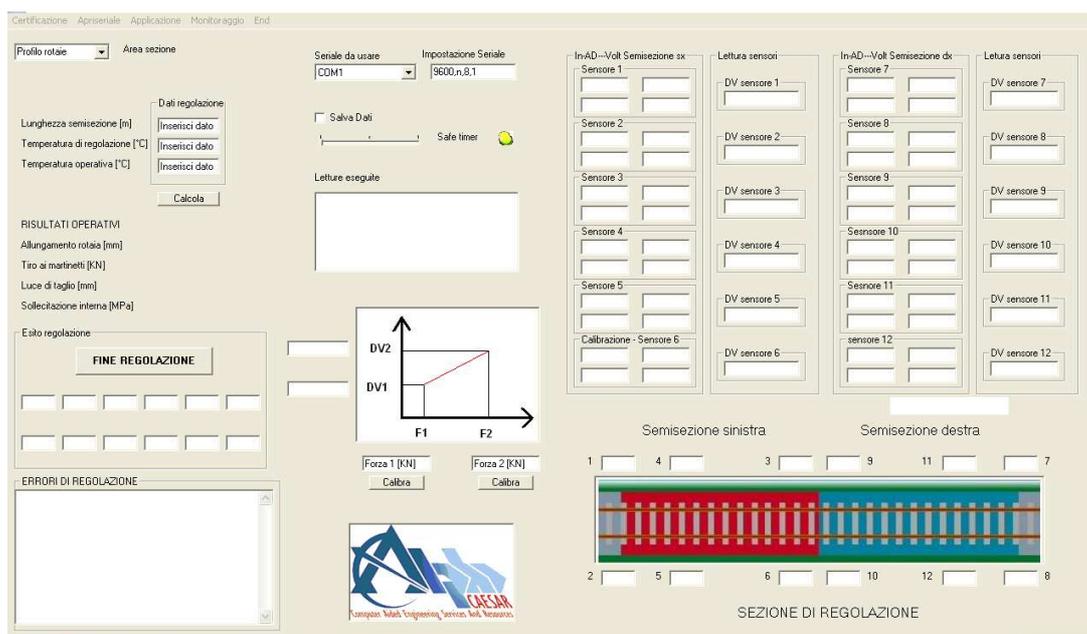


Figura 4.19 – Videata iniziale del software

che rappresenta la schermata principale del software, nella quale è possibile gestire la maggior parte delle funzioni dello stesso.

Il software è stato implementato in modo tale che, per poter iniziare ad utilizzarlo, è obbligatorio da parte dell'utente inserire tutte le informazioni inerenti la località ed il personale coinvolto nella procedura di regolazione; lo scopo è evitare che il programma venga utilizzato da persone non autorizzate o che non possono essere rintracciate per eventuali problemi di natura operativa.

L'utente, tramite la voce del menu Certificazione, rappresentato in figura 4.20, deve necessariamente fornire i seguenti dati:

- Informazioni sulla localizzazione:
  - DCI: comune sotto la giurisdizione del quale si effettua la regolazione;
  - UT: unità territoriale di riferimento;
  - stazione ferroviaria: ovvero la stazione più prossima al tratto di linea in esame.
  
- Informazioni sulla linea:
  - nome della linea;
  - tratta;
  - binario;
  - da km a km: identificazione univoca del tratto in cui si effettua la regolazione.
  
- Informazioni sul personale
  - capo tecnico lavori;
  - capo reparto esercizio;
  - esecutore lavori;
  - certificatore.



Figura 4.20 – Menu certificazione

La videata è rappresentata in figura 4.21:

Figura 4.21 – Videata del menu certificazione

Tramite il comando *salva e chiudi*, tutti i dati vengono memorizzati dal codice in una serie di stringhe che saranno richiamate al momento della stampa del file di certificazione (.txt).

#### 4.4.6.3. LE OPERAZIONI PRELIMINARI ALLA CERTIFICAZIONE

L'utente ora è in grado di poter utilizzare il software.

Prima di poter leggere i dati in seriale dall'hardware associato mediante USB è necessario introdurre una serie di dati per poter permettere al codice di eseguire tutte le operazioni descritte precedentemente (calcolo dell'allungamento previsto, tiro ai martinetti necessario, luce di taglio, sforzo indotto nella rotaia), preliminari alla regolazione.

Esaminando la videata in figura 4.19, la sezione di sinistra è dedicata a tale scopo.

Il programma richiede:

- la scelta del profilo di rotaia: sono stati messi a disposizione due profili, 50 UNI e 60 UNI in quanto sono i profili più frequenti nelle linee ferroviarie italiane; scelto il profilo compare a video l'area della sezione;
- la lunghezza della semisezione: il dato è fondamentale per calcolare l'allungamento previsto;
- la temperatura di regolazione;
- la temperatura operativa.

Gli ultimi due dati sono ricavabili accoppiando l'utilizzo del software ad una sonda termometrica a contatto magnetico.

Mediante il comando *calcola*, il software stampa a video i risultati operativi (nell'esempio si è scelto un profilo 60 UNI, con semisezione di 300 m,  $T_r$  di 30°C e  $T_{op}$  di 15°C):

60 UNI      Area = 76.70 cm<sup>2</sup>

Dati regolazione

Lunghezza semisezione [m]      300

Temperatura di regolazione [°C]      30

Temperatura operativa [°C]      15

Calcola

RISULTATI OPERATIVI

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Allungamento rotaia [mm]     | 54     |
| Tiro ai martinetti [KN]      | 289,92 |
| Luce di taglio [mm]          | 130    |
| Sollecitazione interna [MPa] | 37,8   |

Figura 4.22 – Risultati delle operazioni preliminari alla regolazione; comando calcola

A questo punto è possibile aprire la comunicazione tra il software e l'hardware ed iniziare a leggere i dati in seriale.

#### 4.4.6.4. I DATI IN SERIALE

Per poter leggere i dati dai sensori collegati alla LX. 1741 l'utente deve scegliere dal menu a tendina la COM inerente l'hardware collegato. Per conoscere la COM utilizzata è possibile interpellare il Device Manager di Sistema dal Pannello di Controllo di Windows.

Scelta la COM, mediante la voce del menu *apriseriale* l'utente mette in comunicazione hardware e software.



Figura 4.23 – Menu apriseriale

Tornando alla figura 4.19, se la COM scelta è quella giusta la sezione di destra, dopo i primi 3 secondi di lettura, incomincerà a riempirsi dei valori binari letti dal codice e dei rispettivi valori di voltaggio ed il led dell'hardware incomincerà a lampeggiare.

Ovviamente, non è necessario collegare tutti i 12 sensori che il programma è in grado di leggere; verranno stampati a video solamente i valori dei sensori operativi.

Contemporaneamente verranno stampate nell'apposita text box “DV sensore i” le variazioni di voltaggio rilevate da ciascuna coppia di sensori.

Si riportano una serie di videate per chiarire i passi necessari per aprire la comunicazione:

- scelta della COM:



- menu apriseriale:



- videata con:

- valori di binario rilevati dal software;
- valori corrispondenti di voltaggio;
- variazione di voltaggio tra le due letture relativo al sensore  $i$  – esimo.



#### 4.4.6.5. LA CALIBRAZIONE

Per poter calcolare lo stato tensionale nei punti della rotaia in cui sono collocati i sensori il codice deve essere opportunamente calibrato.

Per fare ciò, nella videata principale del software è presente una apposita sezione.

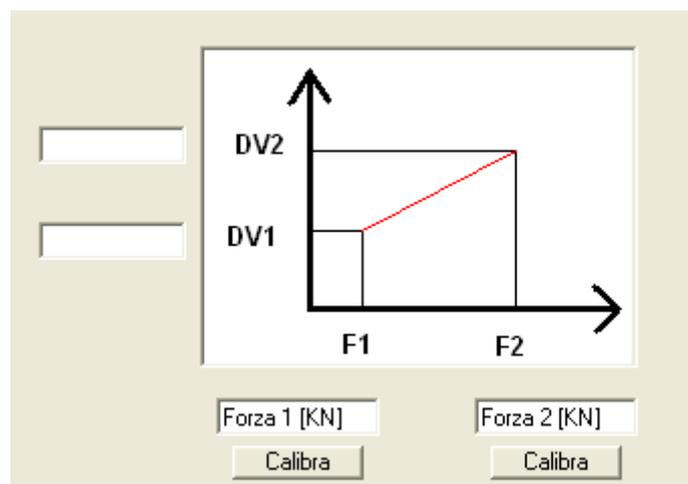


Figura 4.24 – Calibrazione del software

L'utente deve inserire il valore della *Forza 1* nell'apposita text box e, tramite il comando *calibra*, il codice salva all'interno di una variabile e stampa a video, nella text box in corrispondenza di DV1, il valore della variazione di voltaggio nell'istante  $i$  – esimo della calibrazione e rappresentativo di quel tiro applicato ai martinetti.

E' opportuno precisare che la coppia di sensori utilizzata di default dal software per eseguire la calibrazione è la numero 6.



Figura 4.25 – Sensori utilizzati di default dal software per la calibrazione

La stessa procedura è ripetuta per il valore di *Forza 2*.

A questo punto il modello è calibrato e, nell'apposita sezione della videata, incominciano ad essere stampati a video, con una frequenza di stampa ogni 3 secondi, i valori dello stato tensionale della rotaia nei punti in cui sono posizionati i sensori.

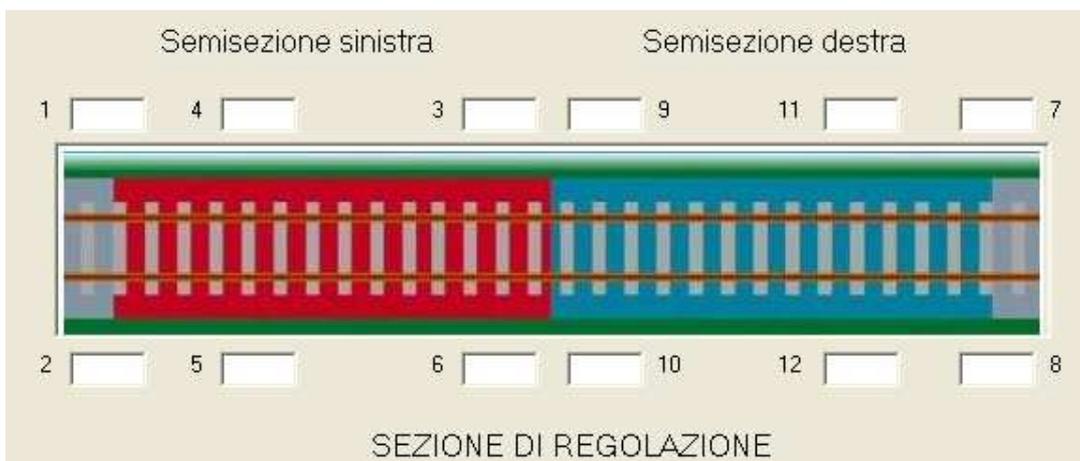


Figura 4.26 – Sezione della videata di stampa dello stato tensionale

E' opportuno precisare che:

- ai sensori 1, 2, 7, 8, corrispondono i punti fissi delle quattro semisezioni;
- ai sensori 3, 6, 9, 10, corrispondono i punti in corrispondenza dei giunti di regolazione;
- ai sensori 4, 5, 11, 12, corrispondono i primi punti liberi delle rotaie successivi ai punti fissi;
- i valori stampati a video variano ogni 3 secondi: si consiglia pertanto all'utente, qualora sia di interesse, di memorizzare i dati tramite l'opportuna check box *Salva Dati*.

Per quanto concerne il comando *Salva Dati*, è stata fornita la possibilità di scegliere la frequenza di salvataggio dei dati: essa può essere di un salvataggio ogni 3, 6 oppure 9 secondi.

#### 4.4.6.6. LA REGOLAZIONE

Il software è stato implementato per poter permettere all'utente di decidere l'istante in cui la regolazione è terminata.

Intervenendo sul comando *Fine Regolazione* il codice permette di memorizzare a video (e su file .txt, automaticamente prodotto nell'istante in cui il comando è richiamato) lo stato tensionale di tutti i punti della rotaia.

Per poter incrementare l'impatto visivo circa il corretto esito della prova, le text box nelle quali viene memorizzato lo stato tensionale si colorano di rosso o verde (secondo il criterio di verifica descritto nel paragrafo 4.4.3.2.).

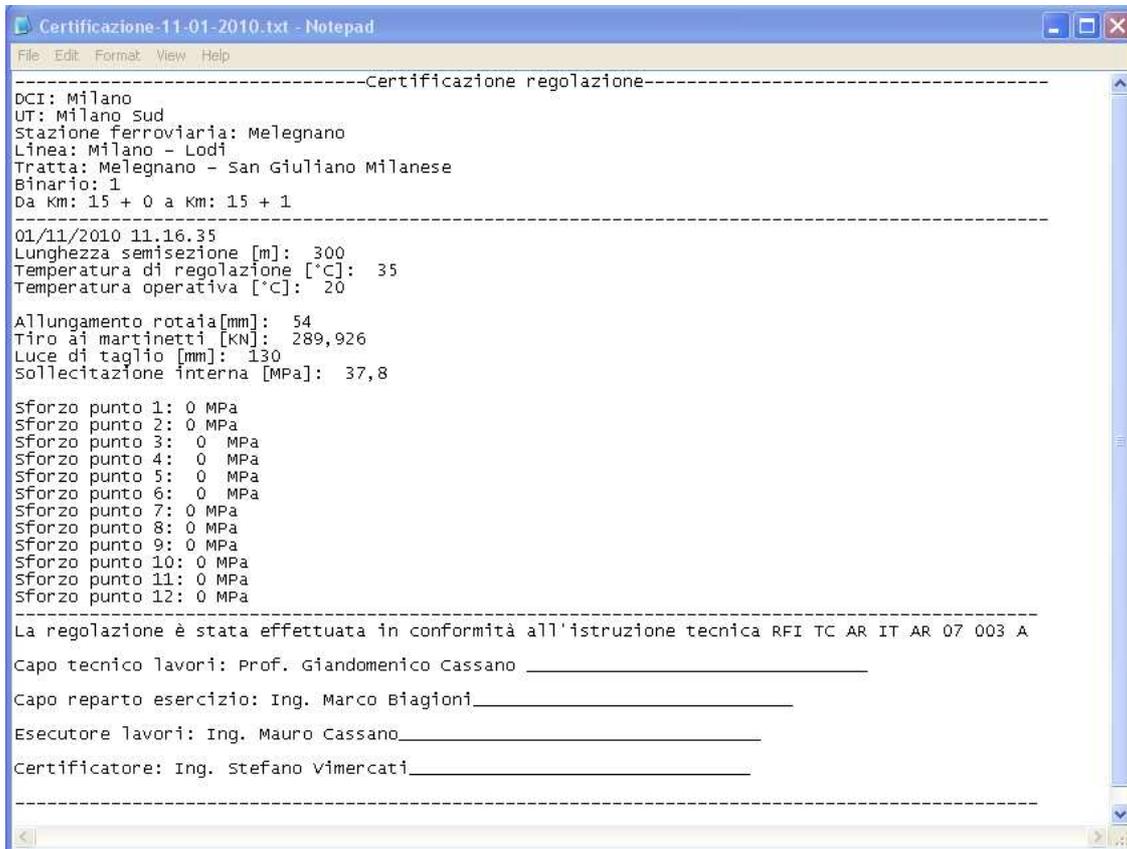
Ovviamente il numero delle text box è uguale al numero di punti misurabili e le stesse sono disposte secondo la numerazione dei sensori.



Figura 4.27 – Comando fine regolazione

#### 4. L'INNOVAZIONE: HARDWARE E SOFTWARE

Si riporta ora un esempio di file .txt, automaticamente prodotto dal software, necessario per certificare la procedura di regolazione effettuata:



```
-----Certificazione regolazione-----
DCI: Milano
UT: Milano Sud
Stazione ferroviaria: Melegnano
Linea: Milano - Lodi
Tratta: Melegnano - San Giuliano Milanese
Binario: 1
Da Km: 15 + 0 a Km: 15 + 1
-----
01/11/2010 11.16.35
Lunghezza semisezione [m]: 300
Temperatura di regolazione [°C]: 35
Temperatura operativa [°C]: 20

Allungamento rotaia [mm]: 54
Tiro ai martinetti [KN]: 289,926
Luce di taglio [mm]: 130
Solllecitazione interna [MPa]: 37,8

Sforzo punto 1: 0 MPa
Sforzo punto 2: 0 MPa
Sforzo punto 3: 0 MPa
Sforzo punto 4: 0 MPa
Sforzo punto 5: 0 MPa
Sforzo punto 6: 0 MPa
Sforzo punto 7: 0 MPa
Sforzo punto 8: 0 MPa
Sforzo punto 9: 0 MPa
Sforzo punto 10: 0 MPa
Sforzo punto 11: 0 MPa
Sforzo punto 12: 0 MPa
-----
La regolazione è stata effettuata in conformità all'istruzione tecnica RFI TC AR IT AR 07 003 A
Capo tecnico lavori: Prof. Giandomenico Cassano _____
Capo reparto esercizio: Ing. Marco Biagioni _____
Esecutore lavori: Ing. Mauro Cassano _____
Certificatore: Ing. Stefano Vimercati _____
-----
```

Figura 4.28 – Certificazione della regolazione

## 4.4.6.7. IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

Il processo di monitoraggio in esercizio dello stato tensionale interno alla rotaia è indipendente dalla parte di codice illustrata finora.

Nella sezione dei menu, tramite il comando *monitoraggio*, l'utente è in grado di richiamare un form indipendente ed autonomo, rappresentato in figura 4.29.

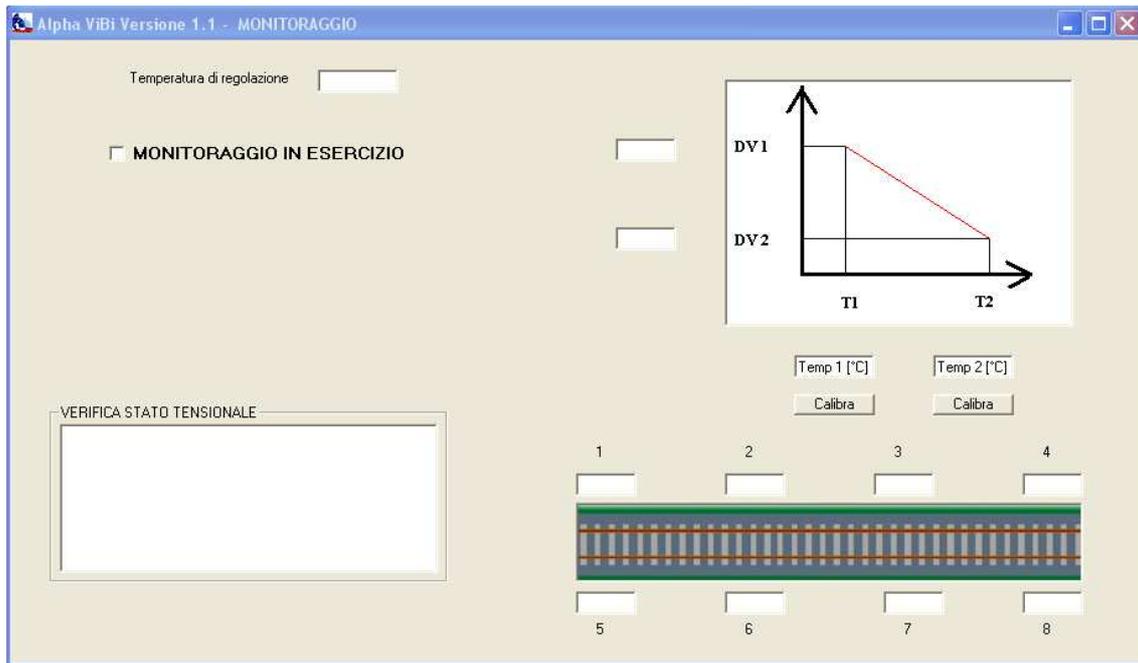


Figura 4.29 – Form di monitoraggio in esercizio



Figura 4.30 – Menu monitoraggio

E' necessario sottolineare che, qualora il monitoraggio non sia successivo alla regolazione ma svolto indipendentemente da essa, l'utente deve preventivamente aprire la comunicazione seriale tra PC e hardware collegato, mediante le procedura illustrata sopra.

In questo form l'utente deve:

- riportare la temperatura di regolazione nell'apposita text box (necessaria per la procedura di calibrazione del modello);

#### 4. L'INNOVAZIONE: HARDWARE E SOFTWARE

- eseguire la calibrazione: la coppia di sensori utilizzati, di default, è sempre la numero 6. L'utente deve inserire due valori di temperatura noti nelle apposite text box ed intervenire sul comando *calibra* (la procedura è del tutto analoga a quella descritta per la calibrazione del modello di regolazione);
- spuntare il check di *Monitoraggio in esercizio*.

Il programma incomincia quindi a monitorare lo stato tensionale e la scritta *Monitoraggio in corso...* compare al di sotto del check; per avvisare l'utente di una situazione d'allarme, in caso di superamento dello stato di sforzo del valore limite definito nel capitolo 7, compare all'interno della form un segnale di pericolo, come mostrato in figura 4.31.



Figura 4.31 – Segnale di pericolo

Si è deciso di utilizzare solamente 8 sensori dei 12 previsti per la procedura di regolazione; in questo caso infatti, non avendo l'esigenza di monitorare i punti fissi delle due semisezioni, è sufficiente disporre le coppie di estensimetri secondo lo schema di figura 4.32.

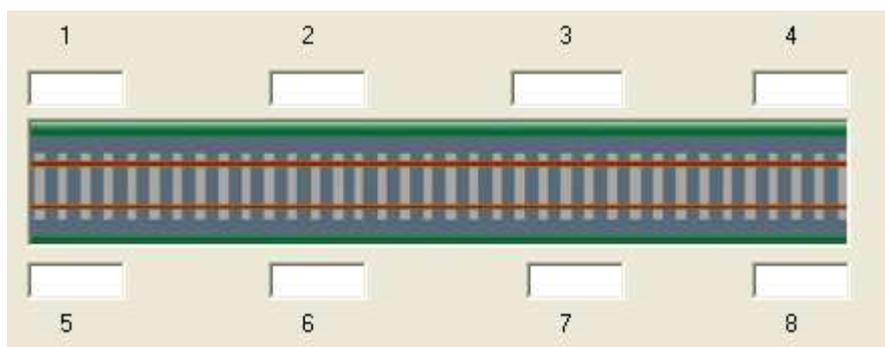


Figura 4.32 – Schema di disposizione dei sensori per il monitoraggio in esercizio

## 5. LE PROVE IN LABORATORIO

Prima di effettuare le prove in sito sulle rotaie di un binario, allo scopo di sperimentare l'apparecchiatura trattata nel presente lavoro di tesi, è stato necessario, preventivamente, affrontare delle prove di laboratorio. Prima di effettuare una regolazione in sito con il supporto dell'hardware e del software sviluppati, era essenziale assicurarsi che entrambi funzionassero correttamente e che fossero pertanto in grado di fornire misurazioni pertinenti e accurate.

Per eseguire le prove di laboratorio è stato necessario:

- completare il montaggio dell'hardware di acquisizione e trasduzione del segnale, grazie all'ausilio e al supporto della società "Alpha Caesar srl.";
- compilare il software di acquisizione da noi sviluppato e creare l'eseguibile del programma;
- scegliere il tipo di estensimetro da utilizzare per le prove;
- incollare l'estensimetro su un apposito supporto ed effettuare il cablaggio dei circuiti elettrici;
- realizzare la prova.

La descrizione del sistema di acquisizione dati (scheda USB e programma applicativo) è già stata ampiamente sviluppata nel precedente capitolo. Procediamo ora a descrivere le successive fasi: scelta dell'estensimetro, incollaggio, cablaggio e realizzazione della prova.

## 5.1. CRITERI DI SCELTA DELL'ESTENSIMETRO

Il primo passo nella definizione di un applicazione estensimetrica è la scelta dello strain gage più idoneo. I parametri che caratterizzano i vari tipi di estensimetri possono influenzare l'installazione e le caratteristiche operative dello stesso. Tali parametri sono:

- lega utilizzata per la griglia;
- materiale di supporto;
- configurazione dello strain gage;
- influenza della temperatura;
- lunghezza operativa;
- opzioni.

In generale, il processo di scelta dell'estensimetro consiste nel determinare la particolare combinazione di parametri che risulta essere la più compatibile con le condizioni ambientali e operative e che allo stesso tempo soddisfi al meglio i vincoli di installazione e operativi. Tali vincoli sono generalmente espressi sotto forma di requisiti, quali:

- accuratezza;
- stabilità;
- temperatura;

- elongazione;
- durabilità;
- resistenza a fatica;
- facilità di installazione.

E' da notare come il processo di scelta dello strain gage venga effettuato con il raggiungimento di una serie di compromessi; ciò deriva dal fatto che la scelta di parametri che tendono a soddisfare uno dei vincoli o requisiti può portare ad allontanarsi dal soddisfacimento degli altri. Sebbene tali compromessi siano spesso necessari, colui che effettua la scelta deve essere pienamente consapevole dell'effetto di tali compromessi in modo da raggiungere un utilizzo ottimale dello strain gage.

### 5.1.1. LEGA UTILIZZATA PER LA GRIGLIA

Il principale fattore che determina le caratteristiche di funzionamento dell'estensimetro è la lega utilizzata per la griglia. Sono disponibili diversi tipi di lega:

- lega costantana: è la lega maggiormente utilizzata, possiede una buona sensibilità alle deformazioni, costante al variare del livello di deformazione e della temperatura. Ha inoltre una resistività sufficiente per ottenere valori di resistenza alti anche in griglie molto piccole; la resistenza non varia fortemente al variare della temperatura. Ha una buona resistenza a fatica e una buona capacità di allungamento. Un ultimo elemento molto importante è che essa può essere utilizzata per autocompensare gli errori di temperatura;
- lega isoelastica: è utilizzata per misurazioni puramente dinamiche, quando non si ha necessità di mantenere un riferimento di zero stabile. La caratterizza in particolare una vita a fatica superiore. Non è soggetta ad autocompensazione della temperatura;
- lega Karma: è caratterizzata da una buona vita a fatica e un'eccellente sensibilità. Viene utilizzata per misure di precisione di deformazioni statiche su

lunghi periodi (mesi o anni) a temperatura ambiente oppure per brevi periodi a temperature elevate. Come la lega costantana, può autocompensare gli errori derivanti dalla temperatura, in particolare offre una più accurata compensazione alle temperature estreme. Il principale inconveniente di questa lega è rappresentato dalla sua difficoltà di saldatura.

### 5.1.2. MATERIALE DI SUPPORTO

Gli estensimetri vengono convenzionalmente fabbricati su un supporto plastico, che svolge le seguenti funzioni:

- consente la manipolazione durante l'applicazione;
- fornisce una superficie incollabile per far aderire l'estensimetro al materiale;
- fornisce isolamento elettrico tra il foglio metallico e l'oggetto in prova.

I materiali di supporto possono essere di due tipi:

- polimide, supporto resistente e flessibile, adatto anche a superfici con raggi di curvatura piccoli e capace di grandi allungamenti, dotato di elevata resistenza allo strappo ed utilizzabile in un range di temperatura compreso tra  $-195^{\circ}\text{C}$  +  $175^{\circ}\text{C}$ ;
- resina epossidica-fenolica, rinforzata con fibra di vetro, caratterizzata da migliori prestazioni su una più ampia gamma di temperature (da  $-269^{\circ}\text{C}$  a  $290^{\circ}\text{C}$ , o per brevi applicazioni fino a  $400^{\circ}\text{C}$ ). Il limite di questo supporto è dato da un allungamento limitato.

Le leghe e i supporti non possono essere scelti liberamente e arbitrariamente, ma la selezione deve essere fatta tra i diversi sistemi lega-supporto disponibili.

### 5.1.3. CONFIGURAZIONE DELLO STRAIN GAGE

In merito alla configurazione dello strain gage, essa si riferisce alla forma della griglia, al numero e all'orientamento delle griglie, alla configurazione dei terminali e ad altre varie caratteristiche costruttive.

Per estensimetri a singola griglia l'idoneità di configurazione per una particolare applicazione deve tenere conto dei seguenti principali fattori:

- i terminali da saldare dovrebbero essere configurati in modo tale da essere compatibili, per dimensioni o orientamento, con lo spazio a disposizione sull'elemento a cui viene applicata l'installazione; inoltre deve permettere delle connessioni che non risultino eccessivamente complicate;
- uno spessore piccolo della griglia minimizza l'errore medio qualora esistano gradienti di deformazione anche nella direzione perpendicolare all'asse dello strain gage; diversamente, una griglia molto spessa aumenta la dissipazione di calore e migliora la sensibilità dell'estensimetro;
- la scelta di un'opportuna resistenza elettrica influenza il segnale di acquisizione: valori tipici sono di 120  $\Omega$ , 350  $\Omega$ , 700  $\Omega$ , 1000  $\Omega$ . Il gage factor, o fattore di sensibilità, è il fattore di proporzionalità tra la variazione unitaria di resistenza  $\Delta R/R$  e la deformazione misurata  $\epsilon$ : tale fattore è determinato per ciascuna serie di produzione ed è specificato su ciascuno strain gage con un valore nominale e la relativa tolleranza;
- il massimo voltaggio ammissibile: un estensimetro può essere considerato come un piccolo radiatore, che converte energia elettrica in calore. Per prevenire il surriscaldamento dell'estensimetro è essenziale scegliere un voltaggio che non sia eccessivamente elevato. Il massimo voltaggio ammissibile per eccitare l'estensimetro è fornito per ciascuna serie e specificato nei cataloghi del prodotto;
- la massima elongazione di un estensimetro è tipicamente del 5%. Oltre tale valore la deformazione misurata non può più essere correttamente rilevata;
- la flessibilità dello strain gage è caratterizzata da un raggio minimo di curvatura che può essere ammesso, senza la necessità di effettuare misure ausiliari

correttive, in ciascuna direzione. I materiali di cui sono costituiti la griglia e il supporto determinano la flessibilità dell'estensimetro e la possibilità o meno di applicarlo anche piegandolo attorno al bordo di un oggetto.

In un'analisi sperimentale dello stato di sollecitazione gli strain gage a singola griglia vengono utilizzati normalmente solo se lo scopo è quello di misurare sollecitazioni monoassiali con direzione degli assi principali nota con ragionevole precisione.

Per stati biassiali di sollecitazione è necessario l'utilizzo di rosette a due o tre elementi per determinare le sollecitazioni principali. Se le direzioni principali sono note si può utilizzare una rosetta a due elementi posti a  $90^\circ$ .

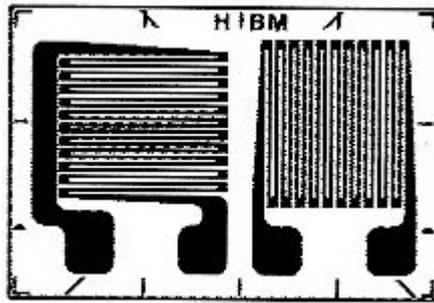


Figura 5.1 – Estensimetro con griglie a  $90^\circ$

Nel più generale dei casi, quando la direzione degli assi principali non è nota a priori, si devono utilizzare rosette a tre elementi in configurazione  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  e  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ .

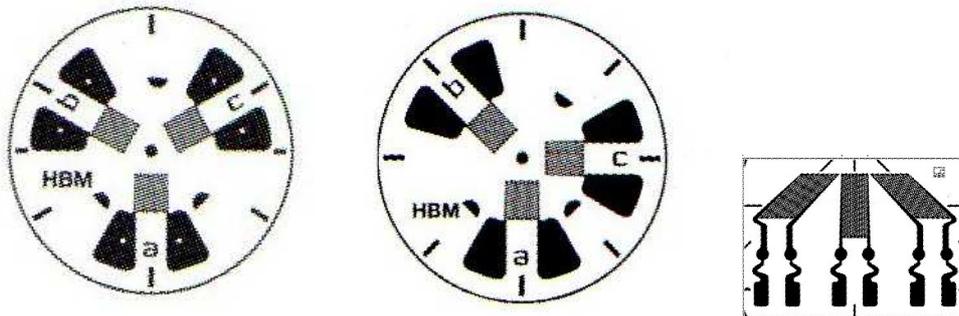


Figura 5.2 – Rosette  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  e  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  in configurazione circolare e rettangolare

### 5.1.4. RANGE OPERATIVO DI TEMPERATURE

L'intervallo di temperature operative è normalmente quello delle temperature ambientali, sempre che tali temperature non determinino alcuna variazione permanente nelle caratteristiche di misurazione dell'estensimetro. Tuttavia per particolari applicazioni in cui sono previste temperature diverse da quelle ambientali, esistono appositi strain gages in grado di operare in tali condizioni.

### 5.1.5. LUNGHEZZA OPERATIVA

Un altro fattore che influenza il comportamento dell'estensimetro è la sua lunghezza di misura, ovvero la lunghezza sensibile o attiva della griglia (figura 5.3).

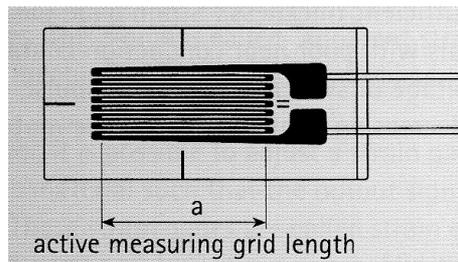


Figura 5.3 – Lunghezza attiva della griglia

Le lunghezze partono da 0,6 mm e arrivano a 150 mm in modo da poter soddisfare le differenti esigenze riscontrabili nelle diverse applicazioni.

La lunghezza della griglia influenza fortemente le prestazioni dell'estensimetro: la misurazione di deformazione effettuata dallo strain gage, infatti, è costituita dalla media delle deformazioni del materiale sull'area che esso ricopre. Se la distribuzione di deformazioni non è uniforme, tanto più lungo è l'estensimetro, e dunque tanto più elevata è l'area di applicazione rispetto all'area di massima deformazione, quanto più bassa sarà la deformazione misurata.

Nella figura 5.4 si mostra l'errore dovuto ad un estensimetro troppo lungo rispetto alla zona di picco di una distribuzione di deformazioni.

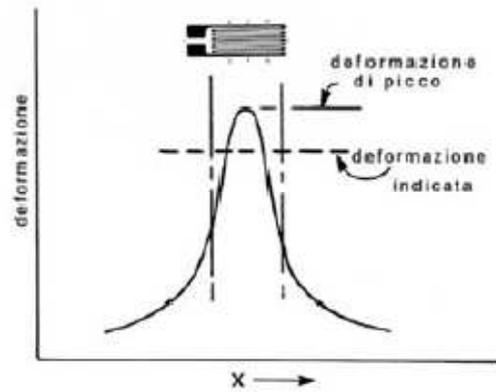


Figura 5.4 – Errore di misurazione di un estensimetro troppo lungo

D'altra parte, l'utilizzo di estensimetri molto piccoli è limitato dal fatto che essi mostrano un ridotto allungamento massimo, una ridotta stabilità sotto deformazione statica e una ridotta resistenza alle deformazioni cicliche, oltre ad essere poco maneggevoli e a presentare ovvie difficoltà di cablaggio.

### 5.1.6. OPZIONI DELL'ESTENSIMETRO

Gli estensimetri possono essere inoltre configurati con ulteriori caratteristiche aggiuntive (opzioni) che possono garantire una riduzione del tempo e dei costi di installazione, migliorare l'affidabilità dell'applicazione o migliorare la protezione dell'estensimetro da agenti esterni aggressivi.

Tra le opzioni disponibili vi sono:

- l'incapsulamento dell'estensimetro con piazzole esposte realizzato con un film sottile che garantisce una protezione maggiore della griglia pur consentendo la saldabilità dei terminali dell'estensimetro grazie a piazzole in rame;
- fili pre-saldati alle piazzole della lunghezza di qualche millimetro che facilitano le operazioni di cablaggio eliminando il rischio di alterazione dell'estensimetro durante le operazioni di saldatura;
- cavi, lunghi anche qualche metro, saldati all'estensimetro e isolati che consentono di eliminare del tutto le operazioni di saldatura.

## 5.2. ESTENSIMETRI SCELTI

Per realizzare le prove di laboratorio necessarie alla verifica del corretto funzionamento del sistema realizzato sono stati utilizzati due tipi di estensimetri: L2A-06-250LW-350 e C2A-06-250LW-350.

La serie L2A-06-250LW-350 è caratterizzata da:

- resistenza pari a  $350 \pm 0,6\%$  ohm;
- lunghezza della griglia pari a 6,35 mm;
- griglia realizzata in lega costantana;
- fili pre-saldati alle piazzole;
- range di temperature operative compreso tra  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- massima deformazione  $\pm 3,0\%$ ;
- gage factor pari a  $2,095 \pm 0,5\%$ .



*Figura 5.5 – Estensimetro L2A-06-250LW-350*

La serie C2A-06-250LW-350 è contraddistinta dalle stesse caratteristiche della serie precedente tranne il range di temperature operative, compreso tra  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e il gage factor pari a  $2,105 \pm 0,5\%$ . La differenza principale sta però nel fatto che questi ultimi sono dotati di cavi già collegati all'estensimetro e isolati, della lunghezza di circa 3 metri.



Figura 5.6 – Estensimetro C2A-06-250LW-350

### 5.3. CONFIGURAZIONE CIRCUITALE

Il principio di una misurazione estensimetrica si basa sul fatto che al variare della lunghezza dell'estensimetro, in seguito ad una sua deformazione, varia la resistenza elettrica dell'estensimetro stesso. E' necessario pertanto realizzare un circuito elettrico che sia in grado di misurare una variazione di tensione in uscita  $E_0$ , variabile con il variare di tali resistenze, alimentandolo con una tensione  $E$ : il circuito viene detto a ponte.

La maggior parte delle misurazioni effettuate con gli estensimetri presenti in commercio sono basate sull'utilizzo di una delle forme del circuito a ponte di Wheatstone. Esso consiste nel collegamento a rombo di 4 resistenze, di cui almeno una variabile; l'applicazione dell'alimentazione e il rilevamento del segnale di tensione  $E_0$  vengono realizzati come mostrato in figura 5.7:

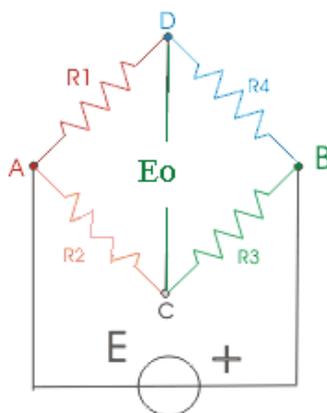


Figura 5.7 – Schema elettrico del circuito a ponte di Wheatstone

Le varie forme del circuito a ponte di Wheatstone, nel caso di misurazioni estensimetriche, differiscono per il numero di resistenze variabili e per il tipo di deformazione che tali resistenze variabili subiscono. Gli estensimetri che subiscono una deformazione e che dunque variano la loro resistenza vengono detti attivi; quelli a resistenza fissa vengono detti passivi.

Nel caso di un solo strain gage attivo, esso è in grado di misurare un sollecitazione monoassiale di trazione o compressione. Nel caso di due strain gage attivi, essi possono misurare entrambi la stessa deformazione se sono applicati su una medesima faccia dell'elemento o se lo stato tensionale è di trazione/compressione semplice, oppure deformazioni di segno opposto quando vengono utilizzati per misurare stati tensionali di flessione. Circuiti con 4 estensimetri attivi hanno applicazione in situazioni in cui lo stato di sollecitazione è di tipo triassiale.

### 5.4. PREPARAZIONE DELLA SUPERFICIE E INCOLLAGGIO DELL'ESTENSIMETRO

In generale gli estensimetri possono essere incollati su qualunque materiale solido, a condizione che la superficie sia adeguatamente pulita. La preparazione della superficie può essere realizzata con metodologie differenti, ma la tecnica descritta di seguito e da noi utilizzata nelle prove di laboratorio offre una serie di vantaggi.

In primo luogo la procedura è stata attentamente studiata ed è già ben sperimentata: in questo modo, se i passaggi sono seguiti accuratamente, viene garantito un incollaggio resistente e affidabile. Seguendo una procedura approssimativa durante la preparazione della superficie si potrebbe ottenere un incollaggio discreto: per un incollaggio di buona e uniforme qualità, in grado di durare nel tempo, i metodi sotto indicati devono essere seguiti scrupolosamente.

Tutte le superfici esposte non accuratamente pulite di recente sono da considerare contaminate e richiedono quindi un processo di pulizia subito prima dell'incollaggio dell'estensimetro. Anche i prodotti utilizzati nella preparazione della superficie devono essere ben conservati e non contaminati.

Gli estensimetri sono forniti in confezioni sigillate e chimicamente puliti e trattati affinché l'adesione al materiale sia perfetta. Si deve considerare che anche solo toccando l'estensimetro con le dita (che sono sempre contaminate) si riduce la qualità dell'incollaggio.

La procedura di preparazione della superficie comprende cinque operazioni base, di seguito elencate nell'ordine usuale di esecuzione:

- sgrassaggio;
- carteggio;
- tracciatura;
- condizionamento;
- neutralizzazione.

Queste cinque operazioni variano e sono modificate in funzione della compatibilità con i diversi materiali.

Lo scopo della preparazione della superficie è quello di renderla pulita, di ottenere una rugosità adeguata all'installazione estensimetrica richiesta, di raggiungere una alcalinità della superficie con PH di circa 7, nonché di disporre una linea tracciata visibile per posizionare ed orientare correttamente l'estensimetro.

Come precedentemente detto la pulizia è vitale nel processo di preparazione della superficie, ma è altresì importante prevenire una successiva ricontaminazione della superficie appena pulita. In particolare è necessario evitare di:

- toccare la superficie pulita con le dita;
- passare più volte la stessa garza sulla superficie o riutilizzare uno stecchetto di cotone;
- portare contaminanti nella superficie pulita dalle zone adiacenti non pulite;
- lasciare che una soluzione (condizionatore o neutralizzatore) evapori sulla superficie;

- a preparazione finale eseguita, lasciare trascorrere due minuti prima dell'incollaggio dell'estensimetro o effettuare la procedura di pulizia ad intervalli, lasciando la superficie esposta all'ambiente.

#### 5.4.1. SGRASSAGGIO

Si effettua lo sgrassaggio della superficie del provino per rimuovere oli, grassi, contaminanti organici e residui chimici solubili. Lo sgrassaggio deve sempre essere la prima operazione, per evitare che i residui del carteggio seguente possano ricontaminare la superficie del materiale.

Nel caso in esame, lo sgrassaggio viene effettuato con bombolette di spray sgrassante a base di clorotene. L'uso di prodotti in contenitore mono-uso, come le bombolette, è consigliato in quanto non esiste il pericolo di contaminazione del solvente stesso.

Applicato il prodotto, si strofina con una garza la zona da sgrassare fino ad ottenere una superficie completamente lucida.

Si consiglia di sgrassare e pulire un'area più ampia di quella in cui verrà applicato l'estensimetro (circa 100 – 150 mm in più per lato) in modo da ridurre la possibilità di ricontaminazione e creare una zona sufficiente anche per l'eventuale applicazione del protettivo.

Le foto mostrano il prodotto sgrassante utilizzato e l'esecuzione della procedura di sgrassaggio.



*Figura 5.8 – Bombola CSM-2 sgrassante*



*Figura 5.9 – Applicazione del CMS-2*

## 5.4.2. CARTEGGIO

Nella preparazione della superficie, il carteggio è usato per togliere gli strati superficiali non graditi (ruggine, vernice, strati galvanici, ossidi, ecc. ) fino ad ottenere una superficie ideale per l'incollaggio. L'operazione del carteggio può essere effettuata in vari modi che dipendono dalle condizioni iniziali della superficie e dal grado di finitura che si desidera ottenere. Per superfici molto rugose può essere necessario iniziare con

una mola abrasiva od una lima. Il carteggio finale può essere eseguito con carte vetrate o meglio carte al carburo di silicio con grana appropriata.

Il grado ottimale di finitura per l'incollaggio dipende dalla natura e dallo scopo dell'installazione: per analisi delle sollecitazioni in generale una rugosità superficiale dell'ordine di 2,5 micrometri è sufficiente ed ha il vantaggio rispetto alle superfici più rugose di essere più facilmente pulibile.

La procedura di carteggio prevede dapprima un trattamento a secco della superficie con carta abrasiva al carburo di silicio grana 320.



*Figura 5.10 – Carteggio a secco*

Quindi si procede al carteggio umido, inumidendo la superficie con un condizionatore compatibile con il materiale di prova. Il condizionatore è una soluzione leggermente acida che generalmente accelera la procedura di pulizia ed in qualche materiale provoca una leggera corrosione.

Terminato il carteggio umido la superficie deve essere asciugata lentamente con garza.

Le seguenti immagini mostrano la boccetta di condizionatore e la procedura di carteggio.



*Figura 5.11 – Particolare del condizionatore e carteggio umido*

### 5.4.3. TRACCIATURA PER L'ORIENTAMENTO DELL'ESTENSIMETRO

La procedura normale per posizionare ed orientare un estensimetro sulla superficie da analizzare consiste nel tracciare una linea, nel punto ove la misura deve essere eseguita, perpendicolare alla direzione della misura stessa. L'estensimetro è poi posizionato in modo che i triangoli di riferimento che definiscono l'asse longitudinale o trasversale della griglia dell'estensimetro siano allineati con la linea di riferimento sulla superficie. Le linee di riferimento devono essere fatte con un utensile che non scalfisca la superficie (grafite o penna a sfera), in modo da non creare un eventuale concentrazione di sollecitazioni.



*Figura 5.12 – Tracciatura delle linee di riferimento*

#### 5.4.4. CONDIZIONAMENTO

Effettuato il tracciamento si procede ad una nuova applicazione di condizionatore e ad una pulitura con degli stecchetti di cotone. Per eliminare eventuali residui si procede inoltre ad una pulitura utilizzando una garza inumidita con condizionatore senza però lasciar asciugare alcuna sostanza sulla superficie poiché questa lascerebbe uno strato di contaminazione che riduce la qualità di incollaggio.

Le foto successive illustrano l'applicazione del condizionatore e la pulitura mediante stecchetti.



*Figura 5.13 – Applicazione del condizionatore e pulitura del provino*

#### 5.4.5. NEUTRALIZZAZIONE

La fase finale della preparazione della superficie consiste nel riportare l'alcalinità della superficie ad un PH compreso tra 7 e 7,5, che rappresenta un valore ideale per tutti i collanti e gli estensimetri.

La neutralizzazione avviene applicando liberamente una notevole quantità di neutralizzatore su tutta la superficie precedentemente trattata, strofinando poi la superficie con stecchetti di cotone e asciugando con una garza.

Nella seguente immagine si mostra la boccetta di neutralizzatore.



*Figura 5.14 – Neutralizzatore*

#### 5.4.6. INCOLLAGGIO

Se tutte le istruzioni per la preparazione della superficie saranno eseguite correttamente essa risulterà ottimamente trattata per accettare l'incollaggio, avendo cura di applicare l'estensimetro o gli estensimetri in un tempo che sia il più possibilmente breve.

L'estensimetro utilizzato è dotato di fili e cavi di collegamento già saldati al corpo dell'estensimetro stesso, i quali verranno poi opportunamente cablati con l'hardware di misurazione.

Per procedere all'incollaggio vero e proprio si deve anzitutto togliere l'estensimetro dalla sua bustina, prendendolo per i fili conduttori senza toccarne il corpo per evitare di contaminarlo.

Si procede poi al posizionamento di una striscia di 10-15 cm di nastro adesivo sopra l'estensimetro e lo si solleva con cura facendo aderire la superficie di appoggio sul nastro, in modo tale che l'estensimetro resti incollato saldamente.

Si prosegue quindi con l'applicazione del catalizzatore sul retro dell'estensimetro, in modo da accelerare il processo di polimerizzazione dell'adesivo. Il catalizzatore va applicato in piccola quantità in modo uniforme e pellicolare grazie all'utilizzo di un pennellino ed evitando di ripassare più volte. Una volta applicato è necessario attendere

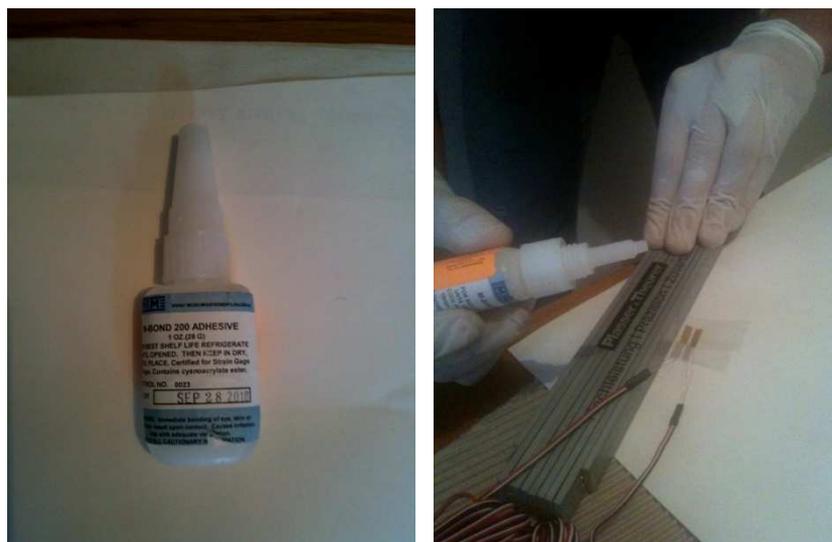
che il catalizzatore asciughi per almeno un minuto a 24°C e 35 – 60% di umidità relativa.



*Figura 5.15 – Catalizzatore*

L'insieme estensimetro/nastro adesivo va posizionato in modo da allineare i segni di riferimento dell'estensimetro con la linea di riferimento tracciata sulla superficie del provino.

Si procede al sollevamento del nastro ed all'applicazione di una o due gocce di adesivo sull'estensimetro, avendo la cortezza di distribuirlo uniformemente su tutta la superficie di incollaggio.



*Figura 5.16 – Particolare dell'adesivo e applicazione dell'adesivo sulla coppia di estensimetri*

Si deve quindi ruotare il nastro in modo tale che l'estensimetro si trovi posizionato sull'area di installazione e tenendo con una mano il nastro, lentamente ma con fermezza, si fa scorrere l'adesivo passando ed esercitando una pressione con una garza sull'insieme nastro/estensimetro in modo tale che quest'ultimo venga a trovarsi allineato alla linea di riferimento tracciata sulla superficie. Immediatamente dopo essere passati con la garza si applica una pressione con un dito sopra l'estensimetro per circa un minuto: il calore del dito aumenta la velocità di polimerizzazione dell'adesivo. In ambienti a bassa umidità (sotto il 30%) o bassa temperatura (sotto i 20°C) la pressione va prolungata per alcuni minuti.



*Figura 5.17 – Azione di pressione sopra l'estensimetro*

Prima di rimuovere il nastro è necessario attendere da due a cinque minuti. La rimozione avverrà tirando il nastro indietro sopra se stesso con un movimento lento e costante, in modo da evitare il sollevamento della griglia ed il danneggiamento dell'installazione. Il nastro può anche essere lasciato come protezione fino a quando non sarà necessario procedere con altre operazioni.



*Figura 5.18 – Coppia di estensimetri incollata al provino*

## 5.5. IL CABLAGGIO

Una volta incollati gli estensimetri è necessario procedere al cablaggio in maniera tale da realizzare il circuito a ponte di Wheatstone. Per realizzare un piano di cablaggio che permetta un collegamento agevole tra i vari elementi del circuito e tra il circuito e la scheda usb, è necessario identificare preliminarmente quale tra le varie configurazioni a ponte sia quella adatta agli scopi delle nostre misurazioni.

Poiché il fine ultimo di questo lavoro di tesi è quello di misurare sollecitazioni di trazione o compressione pura, conseguenti a contrazioni o dilatazioni imposte, anche le prove di laboratorio devono essere orientate in questo senso: la scelta pertanto è ricaduta su due tipi di configurazione a ponte entrambe funzionali a tali esigenze. La prima è quella con un solo estensimetro attivo, in grado di misurare la deformazione principale  $\epsilon$  in direzione dello sforzo applicato; la seconda è quella con due estensimetri attivi, in grado di misurare due deformazioni  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , coincidenti in modulo e in segno.

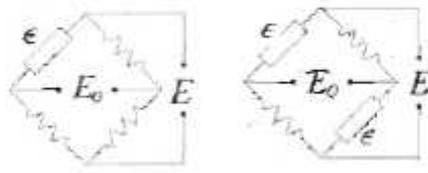


Figura 5.19 – Configurazione a ponte con un colo estensimetro attivo e con due estensimetri attivi

Per ottenere nel concreto tali configurazioni teoriche, si è proceduto come segue.

Due estensimetri C2A-06-250LW-350, dotati di cavi già collegati e isolati, sono stati incollati al lamierino di acciaio costituente il provino. Si riportano di seguito le caratteristiche del provino utilizzato:

- $A = b \times s = 2,6 \text{ mm}^2$  (area della sezione);
- $E = 210000 \text{ MPa}$  (modulo elastico dell'acciaio).

Altri due estensimetri L2A-06-250LW-350, dotati solo di fili pre-saldati alle piazzole, sono stati incollati su un apposita piastrina e a ciascuno dei fili è stato saldato un cavo per costituire il collegamento col resto del circuito.

La realizzazione delle saldature deve essere eseguita utilizzando un saldatore a punta fine regolabile in temperatura. La temperatura di saldatura deve essere impostata a circa  $350^\circ\text{C}$  ed è consigliato l'uso di filo di stagno non corrosivo. La stagnatura viene eseguita applicando pochissimo stagno ed evitando di trasmettere la temperatura della punta del saldatore per più di tre secondi. Prima di saldare i fili dell'estensimetro, questi devono essere spelati e se ne deve pre-stagnare l'estremità; quindi i fili devono essere posizionati sulla zona pre-stagnata e fissati provvisoriamente in posizione. I fili possono così essere saldati senza la necessità di aggiungere altro stagno, limitando a circa tre secondi il tempo di riscaldamento con la punta del saldatore.

Effettuati i collegamenti mediante saldature, occorre rivestire i punti scoperti con nastro isolante in modo da assicurare il completo isolamento di ciascun filo rispetto al resto del circuito elettrico.

Per realizzare i collegamenti tra i cavi saldati ai due estensimetri e i cavi già collegati agli altri due estensimetri si è fatto uso di morsetti mammut, opportunamente fissati con

del nastro adesivo sulla medesima piastrina a cui erano stati incollati i due estensimetri saldati.

In questo modo si è realizzato la seguente configurazione a ponte:

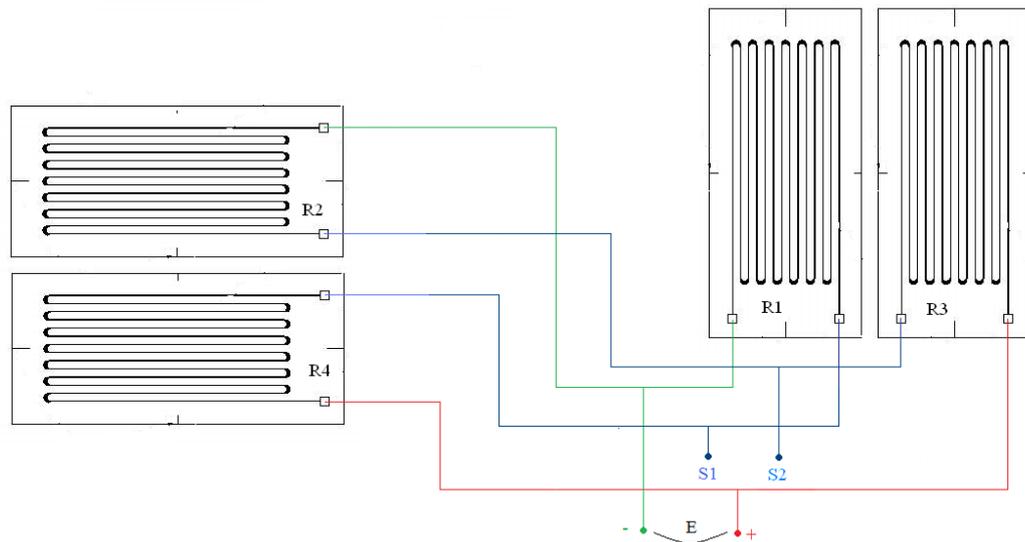


Figura 5.20 – Configurazione circuitale a ponte

In uscita dai morsetti si hanno quattro cavi: due di essi andranno collegati all'alimentazione, gli altri due costituiranno i segnali di voltaggio S1 e S2.

Per il collegamento dei cavi con gli ingressi della scheda hardware, dotati di un'alimentazione a + 5 Volt, della massa e dell'ingresso analogico, è necessario effettuare la saldatura dei fili su un apposito cavetto di attacco.

Lo schema circuitale finale dunque è costituito come segue: una coppia di estensimetri attivi (R2 e R4), costituiti dai due estensimetri C2A-06-250LW-350 con l'asse diretto come lo stato di sollecitazione da misurare, vengono collegati ad una coppia di estensimetri passivi (R1 e R3), non incollati al provino ma comunque collegati elettricamente al circuito e fissati sulla piastrina di supporto. Tale circuito deve essere collegato opportunamente a due degli otto ingressi della scheda usb mediante saldatura dei fili su due cavetti di attacco.

E' necessario collegare i due segnali S1 e S2 ai due ingressi analogici, mentre il polo positivo e quello negativo del circuito vanno collegati rispettivamente a V+ e alla massa. In questo modo l'intero ponte verrà alimentato con la tensione di 5 Volt e l'hardware leggerà i due segnali di tensione corrispondenti ai due ingressi analogici. Il

software calcolerà la differenza tra questi due segnali, la quale varia in funzione del valore delle due resistenze attive ovvero del loro allungamento.

Nel caso in cui, a partire da tale configurazione, si volesse ottenere una configurazione a ponte con un solo estensimetro attivo, è sufficiente scollegare dai morsetti uno dei due estensimetri incollati sul provino e collegare ad esso una resistenza passiva di pari valore.

È necessario precisare che il circuito realizzato non è in grado di compensare le asimmetrie resistive eventualmente provocate dalla resistenza di cablaggio dei singoli rami del ponte. Per rendere il ponte simmetrico si deve pertanto porre la massima cura nell'utilizzare fili di collegamento della medesima lunghezza al suo interno.

Nella realizzazione del cablaggio e degli ancoraggi si deve inoltre assolutamente evitare che i punti di saldatura vengano successivamente sollecitati: si deve quindi provvedere allo scarico delle tensioni nei punti appropriati fissando i fili di collegamento a un elemento fisso in modo da evitare movimenti ed oscillazioni.

Per il cablaggio è consigliato l'utilizzo di fili aventi sezione del conduttore di  $0,03 \text{ mm}^2$  e resistenza di  $0,5 \text{ } \Omega/\text{m}$ : questi verranno fissati all'elemento elastico mediante nastro adesivo isolante.

Si riporta una foto che mostra tutti i componenti del sistema utilizzati.

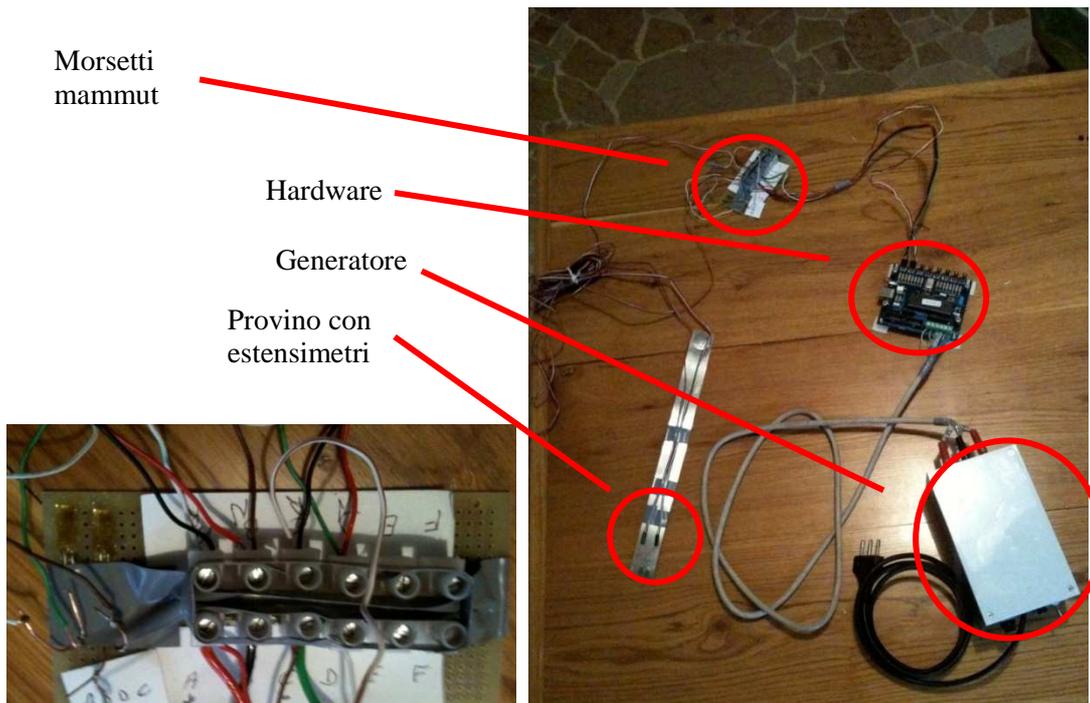


Figura 5.21 – Particolare dei morsetti mammut e insieme dei componenti del sistema utilizzato

## 5.6. RISULTATI ATTESI

Utilizzando uno schema circuitale con due strain gages attivi che misurano deformazioni uguali e dello stesso segno, l'output di variazione di tensione misurato dal ponte è dato da:

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F \times \varepsilon \times 10^{-3}}{2 + F \times \varepsilon \times 10^{-6}}$$

dove:

- $E_0$  è il segnale di tensione letto [mV];
- $E$  è la tensione di alimentazione, pari a 5 V;
- $F$  è il gage factor dell'estensimetro, di valore pari a 2;
- $\varepsilon$  è la deformazione [ $\mu\varepsilon$ ].

Preventivamente all'esecuzione delle prove di laboratorio si procede al calcolo dei valori di deformazione corrispondenti all'applicazione di diversi valori di carico di trazione sul provino e dei conseguenti valori di tensione che si suppone il trasduttore debba fornire in uscita.

*Tabella 5.1 – Risultati attesi con configurazione circuitale a due estensimetri attivi*

| Forza [kg] | $\epsilon$ | $\Delta V_0$ [mV] |
|------------|------------|-------------------|
| 0          | 0,0000000  | 0,00              |
| 1          | 0,0000183  | 0,09              |
| 2          | 0,0000366  | 0,18              |
| 3          | 0,0000549  | 0,27              |
| 4          | 0,0000733  | 0,37              |
| 5          | 0,0000916  | 0,46              |
| 6          | 0,0001099  | 0,55              |
| 7          | 0,0001282  | 0,64              |
| 8          | 0,0001465  | 0,73              |
| 9          | 0,0001648  | 0,82              |
| 10         | 0,0001832  | 0,92              |
| 11         | 0,0002015  | 1,01              |
| 12         | 0,0002198  | 1,10              |
| 13         | 0,0002381  | 1,19              |
| 14         | 0,0002564  | 1,28              |
| 15         | 0,0002747  | 1,37              |
| 16         | 0,0002930  | 1,46              |
| 17         | 0,0003114  | 1,56              |
| 18         | 0,0003297  | 1,65              |
| 19         | 0,0003480  | 1,74              |
| 20         | 0,0003663  | 1,83              |

Il grafico in figura 5.22, che riporta i valori contenuti nella precedente tabella, conferma la relazione di tipo lineare esistente tra carico applicato all'elemento e variazione di voltaggio rilevata, sulla quale si basa il modello da noi sviluppato.

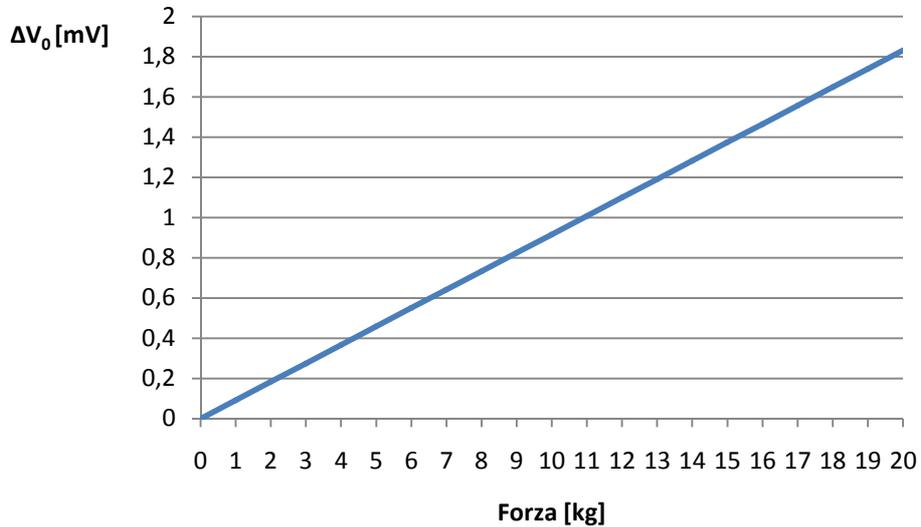


Figura 5.22 – Relazione lineare tra carico applicato e variazione di voltaggio rilevata

Utilizzando invece uno schema circuitale con un solo strain gage attivo l'output di variazione di tensione misurato dal ponte è dato da:

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F \times \varepsilon \times 10^{-3}}{4 + F \times \varepsilon \times 10^{-6}}$$

dove:

- $E_0$  è il segnale di tensione letto [mV];
- $E$  è la tensione di alimentazione, pari a 5 V;
- $F$  è il gage factor dell'estensimetro, di valore pari a 2;
- $\varepsilon$  è la deformazione [ $\mu\varepsilon$ ].

Si riporta, anche per tale configurazione, una tabella contenente i valori di carico e i corrispondenti valori di tensione attesi:

*Tabella 5.2 – Risultati attesi con configurazione circuitale ad un solo estensimetro attivo*

| Forza [kg] | $\varepsilon$ | $\Delta V_0$ [mV] |
|------------|---------------|-------------------|
| 0          | 0,0000000     | 0,00              |
| 1          | 0,0000183     | 0,05              |
| 2          | 0,0000366     | 0,09              |
| 3          | 0,0000549     | 0,14              |
| 4          | 0,0000733     | 0,18              |
| 5          | 0,0000916     | 0,23              |
| 6          | 0,0001099     | 0,27              |
| 7          | 0,0001282     | 0,32              |
| 8          | 0,0001465     | 0,37              |
| 9          | 0,0001648     | 0,41              |
| 10         | 0,0001832     | 0,46              |
| 11         | 0,0002015     | 0,50              |
| 12         | 0,0002198     | 0,55              |
| 13         | 0,0002381     | 0,60              |
| 14         | 0,0002564     | 0,64              |
| 15         | 0,0002747     | 0,69              |
| 16         | 0,0002930     | 0,73              |
| 17         | 0,0003114     | 0,78              |
| 18         | 0,0003297     | 0,82              |
| 19         | 0,0003480     | 0,87              |
| 20         | 0,0003663     | 0,92              |

La relazione di tipo lineare tra carico e variazione di voltaggio è valida, ovviamente, anche per questa configurazione circuitale.

## 5.7. SVOLGIMENTO DELLE PROVE

Per ottenere i valori teorici di voltaggio, ricavati dal calcolo riportato in precedenza, sarebbe necessario realizzare una prova di trazione con controllo del carico. Non avendo a disposizione un macchinario per tale tipologia di prova si è deciso di sollecitare manualmente il provino con un'azione di flessione.

Tale scelta è giustificata dalle seguenti considerazioni:

- i due estensimetri attivi sono stati incollati sulla medesima faccia del provino; una flessione del provino comporta pertanto sui due estensimetri una deformazione uguale in modulo e segno;
- lo scopo di tali prove è semplicemente quello di verificare il corretto funzionamento dell'elettronica e la bontà delle misurazioni di voltaggio, senza fare particolare considerazioni sui carichi che le hanno generate.

Operando in tal modo non è chiaramente possibile verificare la rispondenza tra i carichi applicati e le letture di voltaggio eseguite poiché non si è in grado di stimare il valore equivalente di sollecitazione impressa al provino per flessione.



*Figura 5.23 – Azione di flessione sul provino*

### 5.7.1. RISULTATI DELLE PROVE

Si riportano ora i risultati delle prove di flessione effettuate in laboratorio, inerenti le configurazioni circuitali con due estensimetri attivi e con un solo estensimetro attivo.

#### 5.7.1.1. PROVA CON DUE ESTENSIMETRI ATTIVI

I risultati sono indicati nella tabella seguente, dove:

- nella prima colonna sono riportati gli istanti temporali successivi di rilievo del dato [secondi];
- nella seconda colonna sono riportati i valori di voltaggio riferiti al primo sensore [Volt];
- nella terza colonna sono riportati i valori di voltaggio riferiti al secondo sensore [Volt];
- nella quarta colonna sono riportati i valori di  $\Delta V$  tra il voltaggio del primo sensore e il voltaggio del secondo sensore [Volt].

Tabella 5.3 – Esito della prova con due estensimetri attivi

| $\Delta t$ [sec] | Voltaggio 1 [Volt] | Voltaggio 2 [Volt] | $\Delta V$ [Volt] |
|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 3                | 2,5380             | 2,5368             | 0,0012            |
| 6                | 2,5423             | 2,5340             | 0,0083            |
| 9                | 2,5458             | 2,5250             | 0,0208            |
| 12               | 2,5429             | 2,3220             | 0,2209            |
| 15               | 2,5474             | 2,1674             | 0,3800            |
| 18               | 2,5504             | 2,1814             | 0,3691            |
| 21               | 2,5488             | 2,2571             | 0,2917            |
| 24               | 2,5488             | 2,1816             | 0,3672            |
| 27               | 2,5533             | 2,1381             | 0,4152            |
| 30               | 2,5582             | 2,1368             | 0,4213            |
| 33               | 2,6276             | 2,1429             | 0,4846            |
| 36               | 2,6851             | 2,2168             | 0,4683            |
| 39               | 2,8477             | 2,3675             | 0,4801            |
| 42               | 4,6179             | 2,5130             | 2,1049            |
| 45               | 4,9719             | 1,7080             | 3,2639            |
| 48               | 4,9862             | 0,2016             | 4,7845            |
| 51               | 4,9831             | 0,2187             | 4,7644            |
| 54               | 4,9748             | 0,2047             | 4,7701            |
| 57               | 4,9949             | 0,1953             | 4,7996            |
| 60               | 4,9835             | 0,1980             | 4,7856            |
| 63               | 4,9857             | 0,2059             | 4,7799            |
| 66               | 4,9918             | 0,2002             | 4,7917            |
| 69               | 4,2344             | 0,1914             | 4,0430            |
| 72               | 2,6611             | 0,1921             | 2,4691            |
| 75               | 2,6027             | 0,1890             | 2,4137            |
| 78               | 2,5659             | 0,1841             | 2,3818            |
| 81               | 2,5574             | 0,1880             | 2,3694            |
| 84               | 2,5539             | 0,1664             | 2,3875            |
| 87               | 2,5484             | 0,1986             | 2,3498            |
| 90               | 2,5504             | 1,6746             | 0,8759            |
| 93               | 2,5484             | 2,3698             | 0,1786            |
| 96               | 2,5494             | 2,4841             | 0,0653            |
| 99               | 2,5452             | 2,5307             | 0,0144            |
| 102              | 2,5372             | 2,5352             | 0,0020            |
| 105              | 2,5423             | 2,5352             | 0,0071            |

Si fornisce anche una rappresentazione grafica dei dati rilevati:

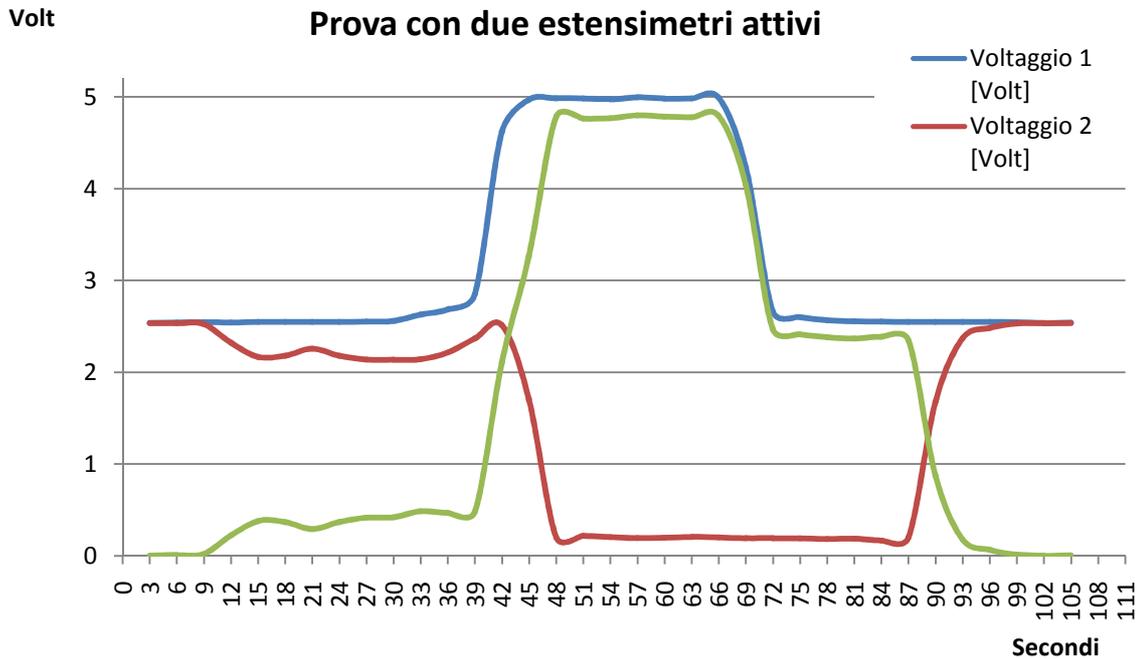


Figura 5.24 – Grafico degli esiti della prova con due estensimetri attivi

Dall'analisi dei dati sperimentali è stato possibile dedurre che la curva “Votaggio 1” in blu e la curva “Votaggio 2” in rosso non sono simmetriche: ciò sta ad indicare che la deformazione subita dai due estensimetri nel corso della prova è diversa.

In particolare, la fase di recupero della deformazione del secondo estensimetro si è verificata solamente quando il provino è stato collocato su un piano perfettamente orizzontale, permettendo così di ripristinare la configurazione di inizio prova.

Ci si aspetterebbe inoltre un andamento regolare delle curve di votaggio, a meno di oscillazioni proprie del segnale elettrico di piccola entità dovute all'instabilità dell'alimentazione. In realtà la curva associata al secondo estensimetro risulta irregolare, con un picco di rilassamento in corrispondenza dei 42 secondi dall'inizio della prova, istante in cui il primo estensimetro raggiunge il massimo della deformazione.

Il motivo di tale comportamento è associato a un cattivo incollaggio del secondo estensimetro al provino: sembra infatti che esso non sia interessato dalle medesime deformazioni del lamierino metallico. Il mal funzionamento dello starin gage inoltre

sembra essere giustificato dalla presenza di ossidazione in corrispondenza delle saldature dei fili sulle piazzole.

Durante l'esecuzione della prova si è osservato che solamente per deformazioni associate ad un voltaggio compreso tra 2,52 Volt e 2,9 Volt il dato rilevato è coerente con le ipotesi di variazione graduale di voltaggio in funzione dell'entità di deformazione impressa. Oltre tale soglia, il voltaggio rilevato raggiunge il valore nominale di alimentazione del circuito pari a 5 Volt, come deducibile dalla figura 5.24.

Il motivo di tale comportamento è associato al fatto che in corrispondenza di circa 2,9 Volt si raggiunge la deformazione massima ammissibile per l'estensimetro.

## 5.7.1.2. PROVA CON UN SOLO ESTENSIMETRO ATTIVO

Si riporta ora una tabella riassuntiva dei dati rilevati in un prova con un solo estensimetro attivo e la loro rappresentazione grafica:

*Tabella 5.4 – Esito della prova con un solo estensimetro attivo*

| $\Delta t$ [sec] | Voltaggio 1 [Volt] | Voltaggio 2 [Volt] | $\Delta V$ [Volt] |
|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 3                | 2,5395             | 2,5386             | 0,0008            |
| 6                | 2,5443             | 2,5370             | 0,0073            |
| 9                | 2,5486             | 2,5368             | 0,0118            |
| 12               | 2,5452             | 2,5376             | 0,0075            |
| 15               | 2,5517             | 2,5374             | 0,0142            |
| 18               | 2,5557             | 2,5366             | 0,0191            |
| 21               | 2,5700             | 2,5378             | 0,0321            |
| 24               | 2,5797             | 2,5397             | 0,0401            |
| 27               | 2,5787             | 2,5358             | 0,0429            |
| 30               | 2,5722             | 2,5356             | 0,0366            |
| 33               | 2,5852             | 2,5370             | 0,0482            |
| 36               | 2,5889             | 2,5370             | 0,0519            |
| 39               | 2,5824             | 2,5460             | 0,0364            |
| 42               | 2,5887             | 2,5380             | 0,0507            |
| 45               | 2,6127             | 2,5386             | 0,0741            |
| 48               | 2,6581             | 2,5376             | 0,1204            |
| 51               | 2,6634             | 2,5360             | 0,1274            |
| 54               | 2,6882             | 2,5354             | 0,1528            |
| 57               | 2,7242             | 2,5384             | 0,1857            |
| 60               | 2,7592             | 2,5389             | 0,2203            |
| 63               | 2,7637             | 2,5358             | 0,2279            |
| 66               | 2,8369             | 2,5368             | 0,3001            |
| 69               | 2,9262             | 2,5362             | 0,3900            |
| 72               | 2,8839             | 2,5366             | 0,3473            |
| 75               | 2,7995             | 2,5380             | 0,2614            |
| 78               | 2,7171             | 2,5374             | 0,1796            |
| 81               | 2,6949             | 2,5346             | 0,1603            |
| 84               | 2,6615             | 2,5356             | 0,1259            |
| 87               | 2,6276             | 2,5362             | 0,0913            |
| 90               | 2,6123             | 2,5342             | 0,0781            |
| 93               | 2,5832             | 2,5372             | 0,0460            |
| 96               | 2,5718             | 2,5362             | 0,0356            |
| 99               | 2,5629             | 2,5366             | 0,0262            |
| 102              | 2,5777             | 2,5368             | 0,0409            |
| 105              | 2,5620             | 2,5368             | 0,0252            |
| 108              | 2,5397             | 2,5366             | 0,0031            |
| 111              | 2,5466             | 2,5378             | 0,0087            |

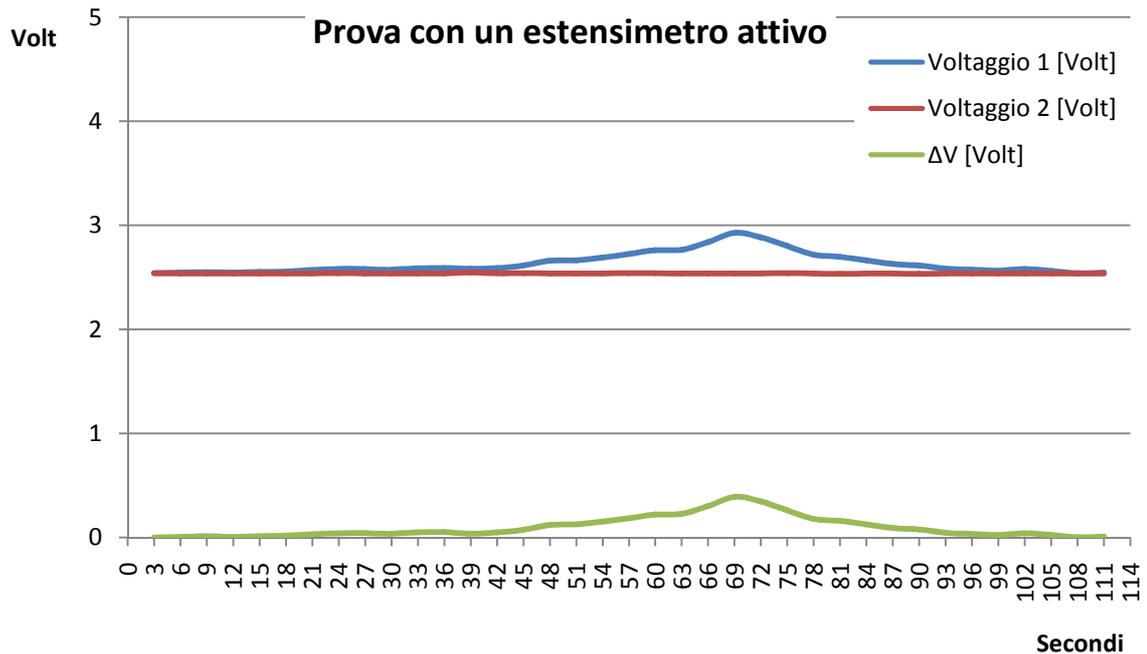


Figura 5.25 – Grafico dell'esito della prova con un solo estensimetro attivo

La prova è stata eseguita contenendo le deformazioni al di sotto del valore limite dell'estensimetro.

Come è lecito attendersi uno dei due segnali è costante e pari a 2,5 Volt circa, poiché un ramo del ponte è costituito da due resistenze costanti di 350  $\Omega$ . Il secondo segnale varia gradualmente da 2,5 Volt, corrispondente alla condizione di estensimetro attivo indeformato, a un valore di 2,9 Volt oltre il quale si raggiunge la condizione di massima deformazione ammissibile per l'estensimetro.

La configurazione circuitale ad un solo estensimetro attivo si è rivelata idonea per misurare lo stato di sollecitazione impresso al provino in laboratorio; nonostante ciò si rende necessario accertare, mediante le successive prove in sito, che la variazione di tensione fornita da tale configurazione sia sensibile alle deformazioni subite dalla rotaia, in relazione ai carichi effettivi applicati durante la regolazione.

## 6. LA PROVA IN SITO

Nel presente capitolo si procede ad illustrare le prove effettuate su una rotaia, presso un binario della stazione di Voghera. La prova è stata effettuata martedì 23 novembre 2010 in assenza di precipitazioni atmosferiche e con temperature al di sopra dello zero termico (5 – 10 °C).

L'autorizzazione ad eseguire la prova è stata concessa dall'ing. Francesco Abate, responsabile dell'Unità Territoriale di Milano – Linee Sud. Il geom. Marco Albanese, Capo Reparto Esercizio Lavori Voghera, e Massimo Scabini, Capo Tronco Lavori Voghera, ci hanno messo a disposizione una squadra di 10 operatori di supporto nonché tutti i mezzi tecnici necessari (incavigliatrici, martinetti tendirotaie, segarotaie per il taglio, pozioni saldanti, ecc.) per le operazioni necessarie alla regolazione della rotaia.

## 6.1. DESCRIZIONE DEL SITO DELLA PROVA

La stazione ferroviaria di Voghera è adibita al servizio viaggiatori e ubicata all'intersezione tra le linee Milano – Genova e Alessandria – Piacenza nella provincia di Pavia.



Figura 6.1 – Stazione di Voghera e fascio binari

Lo scalo ferroviario è dotato di 10 binari:

- due dedicati alla linea Alessandria – Piacenza;
- due binari dedicati alla linea Milano – Genova;
- sei binari di circolazione.

La stazione è preceduta da un fascio binari privo di banchine che incrementa la potenzialità dello scalo ferroviario.

Il binario utilizzato per la prova, adibito alla circolazione dei treni nella tratta Voghera – Tortona, è collocato all'interno del fascio binari dello scalo ed ha le seguenti caratteristiche:

- lunghezza pari a oltre 250 metri;
- rotaie tipo 50 UNI;
- traverse in c.a.p.;

- attacchi tipo K;
- velocità di percorrenza a 30 km/h.



*Figura 6.2 – Binario di prova*



*Figura 6.3 – Particolare delle traverse in ca.p. e dell'attacco tipo k del binario di prova*

## 6.2. PECULIARITA' DEL SISTEMA PER LA PROVA IN SITO

Il sistema con cui si sono effettuate le misurazioni è il medesimo presentato nelle prove di laboratorio, a meno di alcune modifiche. Si è scelto di utilizzare la configurazione a ponte con un solo estensimetro attivo, che ha mostrato di essere adeguata alla lettura dei dati e che oltretutto presenta una minor difficoltà di cablaggio in sito.

In particolare, le modifiche apportate riguardano il sistema di alimentazione e le modalità di cablaggio del circuito.

### 6.2.1. SISTEMA DI ALIMENTAZIONE

Una delle differenze tra la realizzazione delle prove in laboratorio e di quelle in sito è costituita dall'assenza di una linea elettrica a cui poter collegare un alimentatore: è stato necessario, pertanto, studiare un sistema di alimentazione della scheda USB e dell'intero circuito che fosse alternativo rispetto a quello utilizzato in laboratorio.

A tale scopo si è pensato di fornire l'alimentazione elettrica mediante l'utilizzo di due batterie in parallelo da 9 Volt ciascuna. Tuttavia, poiché la scheda USB deve essere necessariamente alimentata con una tensione di 5 Volt, è stato indispensabile applicare alle batterie un circuito che abbatta la tensione a tale valore nominale. Per realizzare il circuito stabilizzatore ci si è serviti di elementi semiconduttori denominati diodi zener.

Il diodo zener si comporta da elemento stabilizzatore di tensione: è un componente assai semplice ed economico, dotato di due elettrodi, il catodo e l'anodo, come ogni altro modello di diodo. Esteriormente, il diodo zener può assumere forme ed espressioni diverse, ma la sua composizione interna riflette sempre il medesimo concetto strutturale: quello caratteristico di un diodo a semiconduttore, costruito con una ben precisa geometria ed opportuno drogaggio, allo scopo di sopportare, senza subire danni, un determinato valore di tensione inversa<sup>27</sup> applicata ai suoi terminali.

---

<sup>27</sup> Per tensione inversa si intende una tensione che polarizza il diodo in senso contrario, con l'anodo sulla linea di alimentazione negativa ed il catodo su quella positiva

In figura sono rappresentati, sulla sinistra, il diodo zener utilizzato (5 Volt, 1 Watt) nella sua configurazione esteriore, mentre a destra è riportato il simbolo elettrico dello zener universalmente adottato nella stesura degli schemi elettrici.

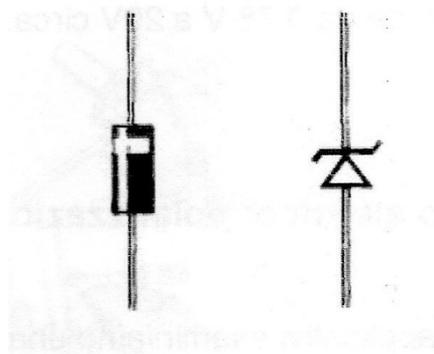


Figura 6.4 – Diodo zener (5 Volt, 1 Watt) e simbolo elettrico

Come si può osservare, il catodo è facilmente individuabile tramite l'anello-guida riportato in prossimità dell'elettrodo omonimo.

#### 6.2.1.1. POLARIZZAZIONE INVERSA

La tensione inversa richiesta dal funzionamento del diodo zener, è uno dei suoi parametri caratteristici. Il diodo, quando è polarizzato in senso inverso, aumenta la tensione di barriera ostacolando il flusso di corrente. Questo concetto è valido fino a precisi valori di tensione, dato che da un certo punto in poi si manifesta la distruzione totale del componente: una volta superata la massima tensione inversa, si incontra una zona di forte conduzione che, generando una reazione a catena, conduce rapidamente il diodo alla sua distruzione.

Tuttavia, drogando il cristallo di silicio, cioè aggiungendo ad esso alcune impurità, è possibile controllare la reazione a catena in modo da evitare la rottura del diodo; occorre però limitare anche la corrente che scorre attraverso il componente tramite opportune resistenze. La zona in cui il diodo può tranquillamente lavorare, senza autodistruggersi, assume il nome di zona di break down.

Il diodo zener deve essere polarizzato inversamente: esso non conduce corrente finché la tensione applicata ai suoi elettrodi è inferiore a quella di lavoro.

Per provare la caratteristica elettrica del diodo zener quando è polarizzato inversamente si può fare riferimento allo schema di figura.

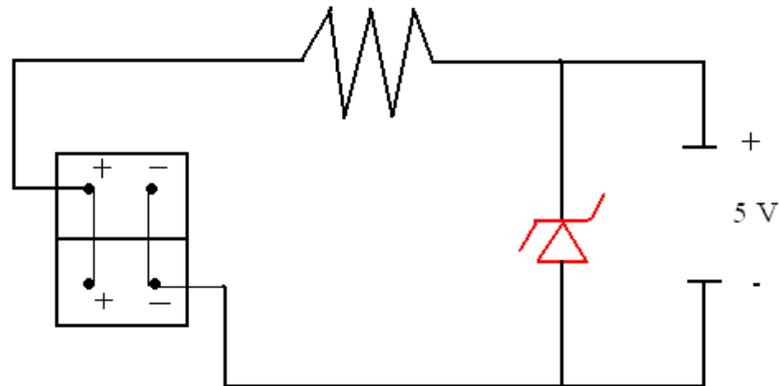


Figura 6.5 – Schema elettrico del circuito di alimentazione con diodo zener

Le due batterie collegate in parallelo garantiscono una tensione di ingresso di 9 Volt; inserendo la resistenza R1 pari a circa 100 ohm, che impedisce il cortocircuito del diodo, il tester sarà in grado di misurare un valore di tensione di 5 V.

Nella pratica corrente, sostituendo il tester con un carico elettrico, questo è alimentato costantemente con la tensione di 5 V, pur assumendo come alimentazione il valore di 9 Volt massimi.

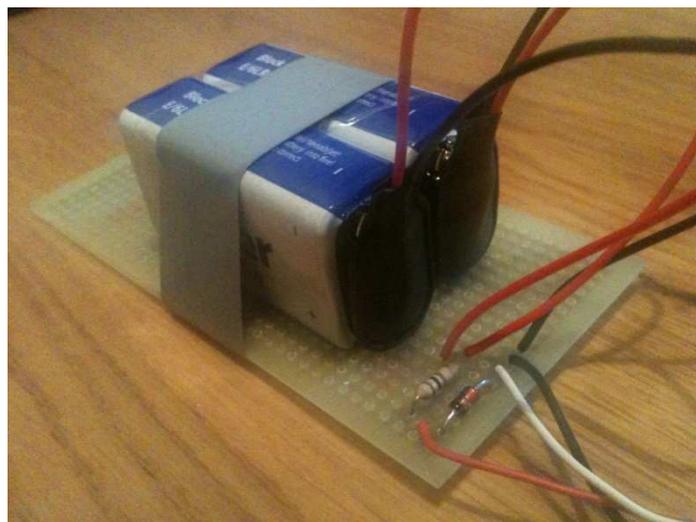


Figura 6.6 – Circuito di alimentazione

## 6.2.2. PREPARAZIONE DEL CIRCUITO E CABLAGGIO

Un'altra tra le principali problematiche connessa all'utilizzo del sistema progettato è costituita dalle maggiori difficoltà di realizzare i collegamenti del circuito in una situazione, come quella che si è verificata in sito, priva di tutte le comodità e le apparecchiature di cui si dispone in laboratorio. E' necessario, pertanto, realizzare preventivamente tutti i collegamenti del circuito, sia quelli tra i vari estensimetri del ponte, sia quelli tra gli estensimetri e la scheda usb che quelli con il sistema di alimentazione a batterie. Per fare ciò sono stati collocati tutti gli elementi del circuito, opportunamente cablati, in un contenitore in metallo, di dimensioni adeguate, e fissati al suo interno.

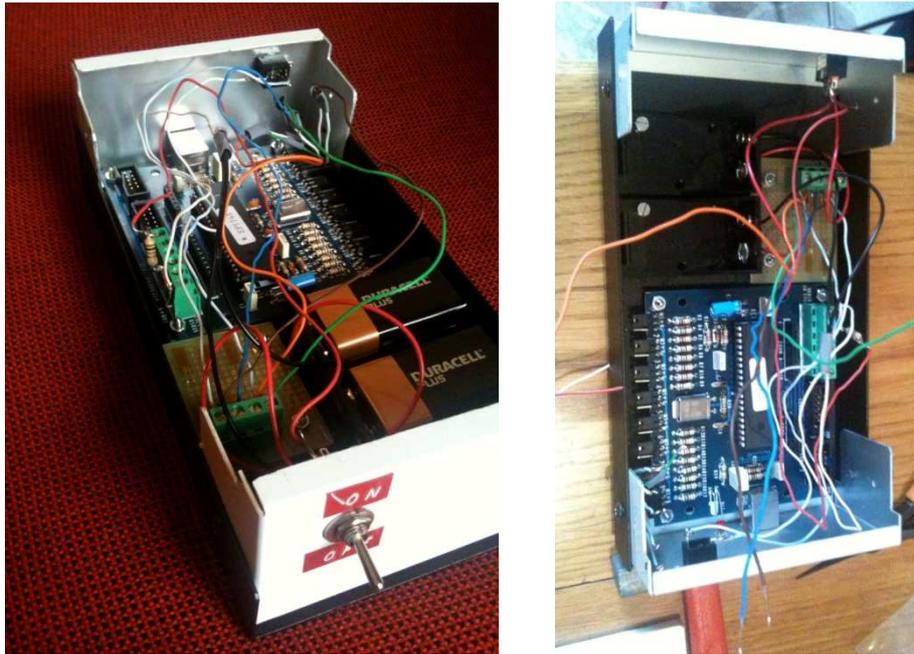
L'estensimetro C2A-06-250LW-350 utilizzato per la prova è collegato al circuito mediante una presa jack bipolare, posizionata su un lato della scatola.



*Figura 6.7 – Particolare della presa jack, del led e dell'ingresso USB sul lato del contenitore*

Nelle successive figure si riporta il contenitore con tutti i componenti hardware collegati. Sono facilmente individuabili le batterie per l'alimentazione, la scheda hardware LX. 1741 e la piastrina utilizzata come supporto per i tre estensimetri passivi necessari per realizzare il circuito a ponte di Wheatstone.

Per poter gestire la carica delle batterie è stato inserito nel circuito di alimentazione un interruttore a leva, che può essere azionato esternamente alla scatola: ponendolo sulla posizione ON le batterie vengono collegate al circuito.



*Figura 6.8 – Contenitore in metallo con i componenti hardware collegati*

Nella versione definitiva e pronta per l'utilizzo in sito, il contenitore si presenta come in figura 6.10:



*Figura 6.9 – Contenitore a fine realizzazione*

## 6.3. ESECUZIONE DELLA PROVA

La prova è consistita nell'effettuare la regolazione del binario e verificare che le forze applicate e le sollecitazioni registrate dal dispositivo progettato siano coerenti con gli allungamenti attesi. In particolare, solo una delle due semisezioni da regolare è stata monitorata dal sistema elettronico progettato mentre l'altra è stata regolata con le normali procedure manuali e visive.

Si descrivono di seguito tutte le operazioni svolte per l'esecuzione della prova.

### 6.3.1. INCOLLAGGIO

La prima operazione eseguita in sito è stata quella di incollare gli estensimetri attivi sulla rotaia. Come previsto dal software sviluppato per la regolazione, è stato necessario incollare tre estensimetri, due alle estremità della semisezione da regolare (in corrispondenza del giunto di regolazione e subito prima del punto fisso) e uno in corrispondenza del punto fisso.

La procedura di trattamento della superficie e di incollaggio è la medesima utilizzata per la prova di laboratorio e descritta nel capitolo 5. In aggiunta, prima di eseguire il trattamento vero e proprio della superficie, è stato necessario utilizzare un trapano munito di spazzola d'acciaio per eliminare la patina di ruggine accumulatasi nel tempo sul gambo della rotaia.



*Figura 6.10 – Preparazione della superficie del gambo*



*Figura 6.11 – Sgrassaggio della superficie e incollaggio degli estensimetri*

Ciascuno strain gage è stato incollato sul gambo in direzione dell'asse; in questo modo la variazione di resistenza elettrica è imputabile esclusivamente ad un allungamento o accorciamento della rotaia in senso longitudinale.



*Figura 6.12 – Estensimetri incollati al gambo della rotaia*

La procedura è stata eseguita di primo mattino: ciò ha consentito che trascorresse un tempo sufficiente tra l'incollaggio e l'esecuzione della prova, eseguita in tarda mattinata, per garantire un'ideale presa dell'adesivo tra lo strain gage e la rotaia.

### 6.3.2. CALCOLI PRELIMINARI

In riferimento all'Istruzione Tecnica RFI TC AR IT AR 07 003 A, preliminarmente all'esecuzione della prova, sono stati eseguiti i calcoli per determinare l'allungamento della rotaia, da ripartire nei quarti in cui la semisezione è suddivisa, e il tiro necessario a generarlo.

La temperatura di regolazione associata al binario è di 30°C, essendo parte di una linea secondaria con velocità di percorrenza inferiore a 100 km/h.

La temperatura della rotaia è stata rilevata mediante l'utilizzo di una sonda termometrica magnetica: al momento della regolazione, essa è risultata pari a 8 °C.



*Figura 6.13 – Sonda termometrica applicata alla rotaia*

Si riportano di seguito i calcoli eseguiti dal software.

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- A dropdown menu at the top left set to "50 UNI".
- A text label "Area = 63.62 cm2" to the right of the dropdown.
- A section titled "Dati regolazione" (Adjustment Data) containing three input fields:
  - "Lunghezza semisezione [m]" (Half-section length [m]) with the value "100".
  - "Temperatura di regolazione [°C]" (Adjustment temperature [°C]) with the value "30".
  - "Temperatura operativa [°C]" (Operating temperature [°C]) with the value "8".
- A "Calcola" (Calculate) button below the input fields.
- A section titled "RISULTATI OPERATIVI" (Operative Results) containing a table of results:
 

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Allungamento rotaia [mm]     | 26,4   |
| Tiro ai martinetti [KN]      | 352,70 |
| Luce di taglio [mm]          | 74,8   |
| Sollecitazione interna [MPa] | 55,44  |

Figura 6.14 – Calcoli preliminari eseguiti dal software

### 6.3.3. TAGLIO DELLA ROTAIA

Per poter imprimere l'allungamento mediante il tiro della rotaia è stato necessario procedere al taglio della stessa in corrispondenza del giunto di regolazione, posto in mezzzeria della sezione da regolare (100 m dai due punti fissi).

Il taglio è stato eseguito mediante l'utilizzo di una segarotaie Stumec – Geismar, tipo 4205 di cui si riportano le principali caratteristiche tecniche:

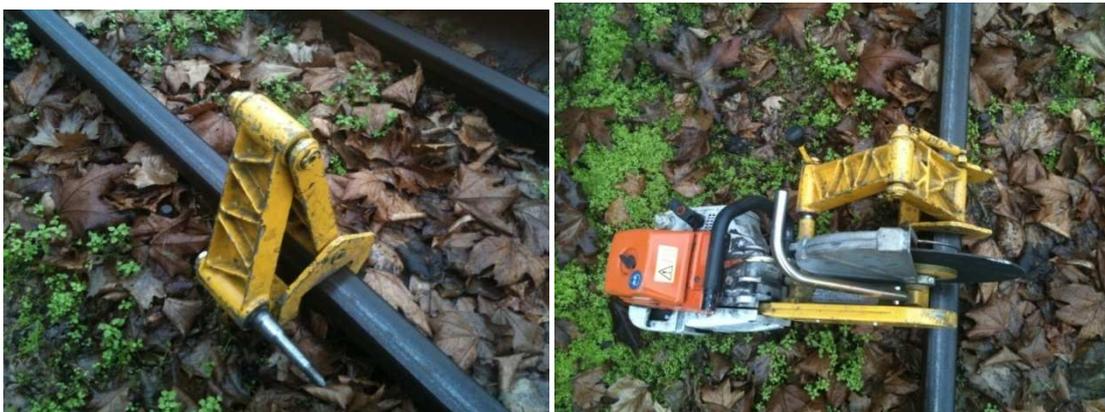
- motorizzazione a 2 tempi;
- diametro del disco di 406 mm;
- velocità di taglio pari a 3800 giri/minuto.

La segarotaie è dotata dei seguenti dispositivi di sicurezza: sistema esclusivo di ripresa del taglio, innesto centrifugo, arresto di emergenza e carter di protezione.



*Figura 6.15 – Segarotaie Stumec – Geismar tipo 4205*

Per garantire il corretto posizionamento del macchinario, in corrispondenza del punto di taglio, viene fissato al fungo della rotaia un morsetto a cui è collegata la segarotaie; in questo modo si assicura che il taglio sia eseguito in maniera perfettamente verticale.



*Figura 6.16 – Particolare del morsetto e segarotaie pronta all'uso*

La rotaia è stata tagliata iniziando dal fianco del fungo, per avere un attacco più facile. Dopo l'attacco, la penetrazione del disco è stata condotta in modo deciso sollecitando tutta la potenza del motore, ma senza sforzarlo: un taglio durante il quale la

penetrazione non fosse decisa, porterebbe ad una alterazione del potere di taglio del disco e ad un riscaldamento anormale o alla distruzione del disco stesso.

Durante il taglio la macchina è stata azionata con un movimento di va e vieni. Il taglio è stato realizzato senza fermarsi, in modo da non dover rientrare in un taglio già iniziato.

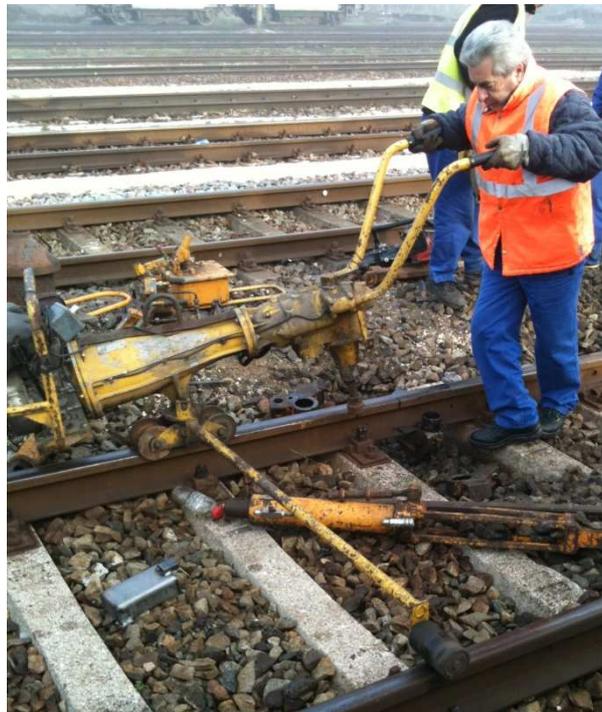


*Figura 6.17 – Realizzazione del taglio della rotaia*

A fine taglio si è ridotta la spinta esercitata sulla segarotaie onde evitare di essere sbilanciati o che il disco urtasse un corpo estraneo.

### 6.3.4. OPERAZIONI DI LIBERAZIONE DELLA ROTAIA

Eseguito il taglio della rotaia, sono stati allentati gli organi di attacco delle due traverse in corrispondenza dei due punti fissi e si è tracciato un riscontro sulla suola di ciascuna rotaia. L'allentamento della traversa dei due punti fissi ha lo scopo di isolare quella traversa da qualsiasi azione possa essere indotta al binario dalle successive operazioni di regolazione. L'operazione seguente è stata quella di allentare gli organi d'attacco procedendo dal giunto di regolazione verso i punti fissi.



*Figura 6.18 – Allentamento degli organi di attacco*

Per essere comunque certi che il binario sia del tutto privo di vincoli nelle semisezioni in cui gli organi d'attacco sono già stati allentati si è proceduto, mediante leve, al sollevamento della rotaia e alla loro liberazione dagli appoggi con uno scuotimento verticale, utilizzando le leve stesse.

Terminate queste operazioni, si è applicato il morsetto tendirotaie.

### 6.3.5. TIRO CON I MARTINETTI TENDIROTAIE

In relazione ai calcoli sviluppati precedentemente, risulta necessario imprimere un allungamento alla rotaia di 26,4 mm. Per fare ciò, è stato utilizzato un morsetto tendirotaie oleodinamico della Thermit Italiana s.r.l.

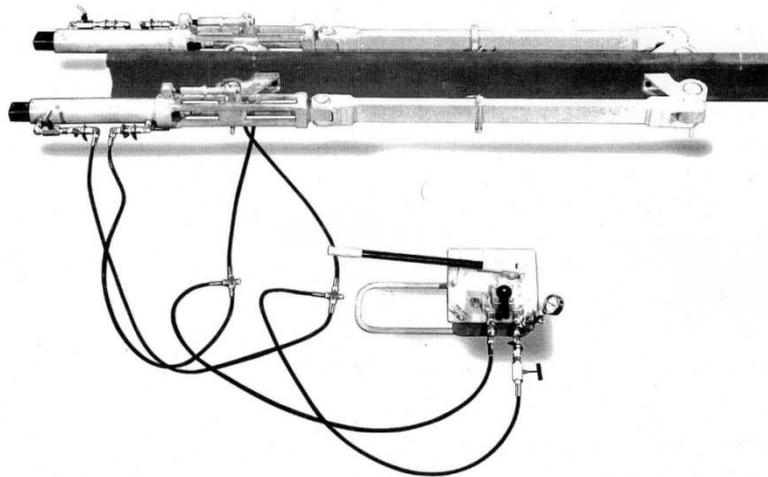


Figura 6.19 – Morsetto tendirotaie della Thermit Italiana s.r.l.

L'attrezzatura è costituita da:

- set oleodinamico con pompa idraulica manuale, tubi flessibili, valvole di raccordo e manometro;
- ganasce di fissaggio alla rotaia per profilo 50 UNI;
- perni e cilindri idraulici.



Figura 6.20 – Morsetto tendirotaie della Thermit Italiana s.r.l. e particolare del manometro

## 6.4. RISULTATI DELLA PROVA

Sulla base dei calcoli teorici riportati, è stato eseguito il taglio della rotaia: la luce ottenuta è stata misurata con un calibro ed è risultata pari a 74 mm (ricavato approssimativamente da:  $2 \times 26,4 + 25 - 3$ ).

Per poter utilizzare il software progettato è stato necessario effettuare la calibrazione del modello analitico contenuto nel programma. Per fare ciò, in riferimento a quanto detto nel capitolo 4, è stato necessario disporre di due valori di forza, arbitrariamente definiti, da applicare con i martinetti alla rotaia.

Dalla lettura della pressione riportata sul manometro collegato all'impianto oleodinamico dei martinetti è stato possibile dedurre, conoscendo il diametro dei pistoni pari a 54 mm, il valore delle due forze indotte alla rotaia.

Essa è data da:

$$F = \frac{p}{10} \times \frac{\pi D^2}{4} \times 2 \text{ [kN]}$$

dove:

- p è la pressione letta sul manometro in bar;
- D è il diametro del pistone del martinetto in mm.

La presenza di un fattore moltiplicativo pari a 2 dipende dal fatto che su ciascuna rotaia agiscono due pistoni in parallelo.

Nella tabella seguente si riassumono l'entità delle forze indotte e i rispettivi valori di variazione di voltaggio registrati dal software.

*Tabella 6.1 – Parametri di calibrazione del modello analitico*

| Forza [kN] | $\Delta V$ [Volt] |
|------------|-------------------|
| 0          | 0,00456           |
| 91,6       | 0,00478           |

Eseguita la calibrazione e riportati i martinetti in posizione di riposo, è stata eseguita la regolazione della rotaia.

Agendo sulla pompa idraulica dei martinetti è stato applicato un tiro crescente alle semirotaie; il nostro sistema ha letto un incremento graduale della sollecitazione interna in entrambi i punti in cui sono stati applicati gli estensimetri, mentre l'estensimetro applicato al punto fisso indicava una sollecitazione interna pari a zero.

Nell'istante in cui il segnale relativo all'estensimetro collocato nel punto prossimo al giunto di regolazione ha fornito un valore di sforzo di 55,22 MPa si è deciso di interrompere l'incremento di tiro in quanto la sollecitazione interna era prossima al valore teorico calcolato e a conferma le tacche sui quarti hanno subito lo spostamento previsto.

Si riportano i risultati relativi all'andamento della sollecitazione interna registrati nei due punti della rotaia.

*Tabella 6.2 – Dati rilevati relativi all'estensimetro in corrispondenza del giunto di regolazione*

| t [sec] | $\Delta V$ [Volt] | Sollecitazione interna [MPa] |
|---------|-------------------|------------------------------|
| 0       | 0,00456           | 0,00                         |
| 3       | 0,00461           | 3,05                         |
| 6       | 0,00466           | 6,16                         |
| 9       | 0,00470           | 9,15                         |
| 12      | 0,00475           | 12,07                        |
| 15      | 0,00479           | 15,05                        |
| 18      | 0,00484           | 18,17                        |
| 21      | 0,00488           | 21,02                        |
| 24      | 0,00493           | 23,94                        |
| 27      | 0,00498           | 27,06                        |
| 30      | 0,00503           | 30,24                        |
| 33      | 0,00507           | 33,22                        |
| 36      | 0,00512           | 36,08                        |
| 39      | 0,00516           | 38,80                        |
| 42      | 0,00520           | 41,46                        |
| 45      | 0,00524           | 44,12                        |
| 48      | 0,00528           | 46,78                        |
| 51      | 0,00532           | 49,31                        |
| 54      | 0,00536           | 51,97                        |
| 57      | 0,00537           | 52,62                        |
| 60      | 0,00538           | 53,27                        |
| 63      | 0,00539           | 53,92                        |
| 66      | 0,00540           | 54,57                        |
| 69      | 0,00541           | 55,22                        |

Tabella 6.3 – Dati relativi all'estensimetro posto prima del punto fisso

| t [sec] | $\Delta V$ [Volt] | sollecitazione interna [MPa] |
|---------|-------------------|------------------------------|
| 0       | 0,00456           | 0,00                         |
| 3       | 0,00460           | 2,85                         |
| 6       | 0,00465           | 5,58                         |
| 9       | 0,00469           | 8,63                         |
| 12      | 0,00474           | 11,55                        |
| 15      | 0,00478           | 14,21                        |
| 18      | 0,00483           | 17,32                        |
| 21      | 0,00487           | 20,18                        |
| 24      | 0,00492           | 23,10                        |
| 27      | 0,00496           | 25,95                        |
| 30      | 0,00500           | 28,74                        |
| 33      | 0,00504           | 31,40                        |
| 36      | 0,00509           | 34,19                        |
| 39      | 0,00513           | 36,85                        |
| 42      | 0,00517           | 39,58                        |
| 45      | 0,00521           | 42,30                        |
| 48      | 0,00525           | 44,90                        |
| 51      | 0,00529           | 47,50                        |
| 54      | 0,00533           | 50,22                        |
| 57      | 0,00534           | 50,87                        |
| 60      | 0,00536           | 52,17                        |
| 63      | 0,00537           | 52,82                        |
| 66      | 0,00538           | 53,46                        |
| 69      | 0,00538           | 53,46                        |

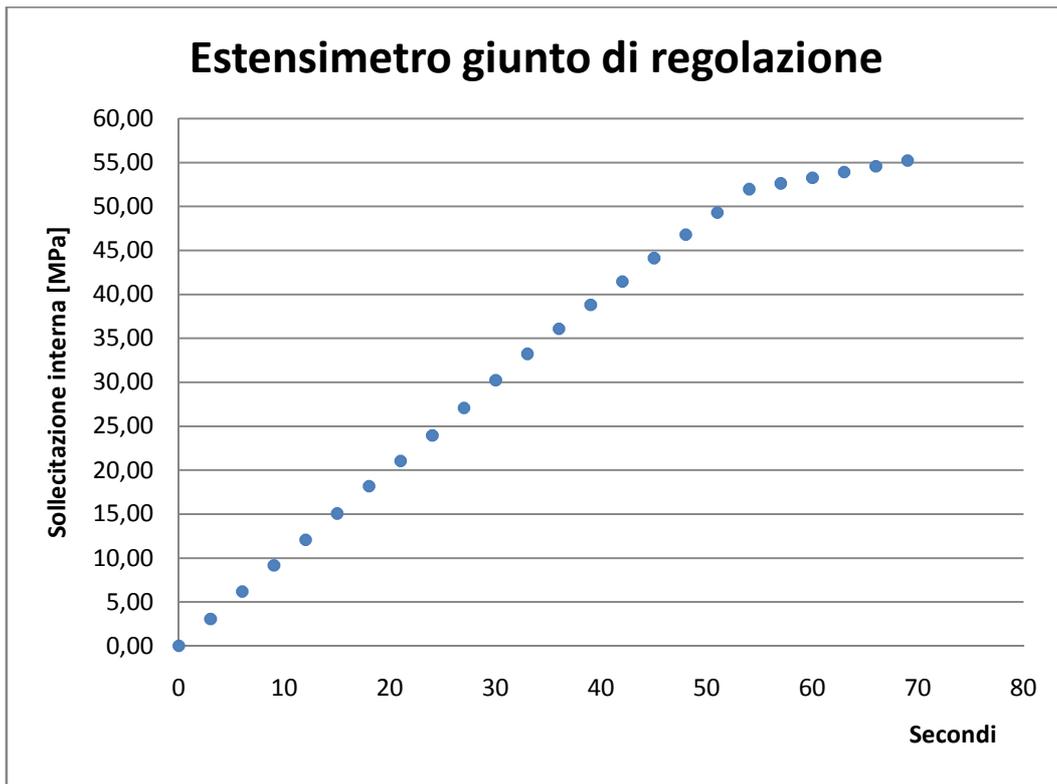


Figura 6.21 – Sollecitazione interna rilevata in prossimità del giunto di regolazione

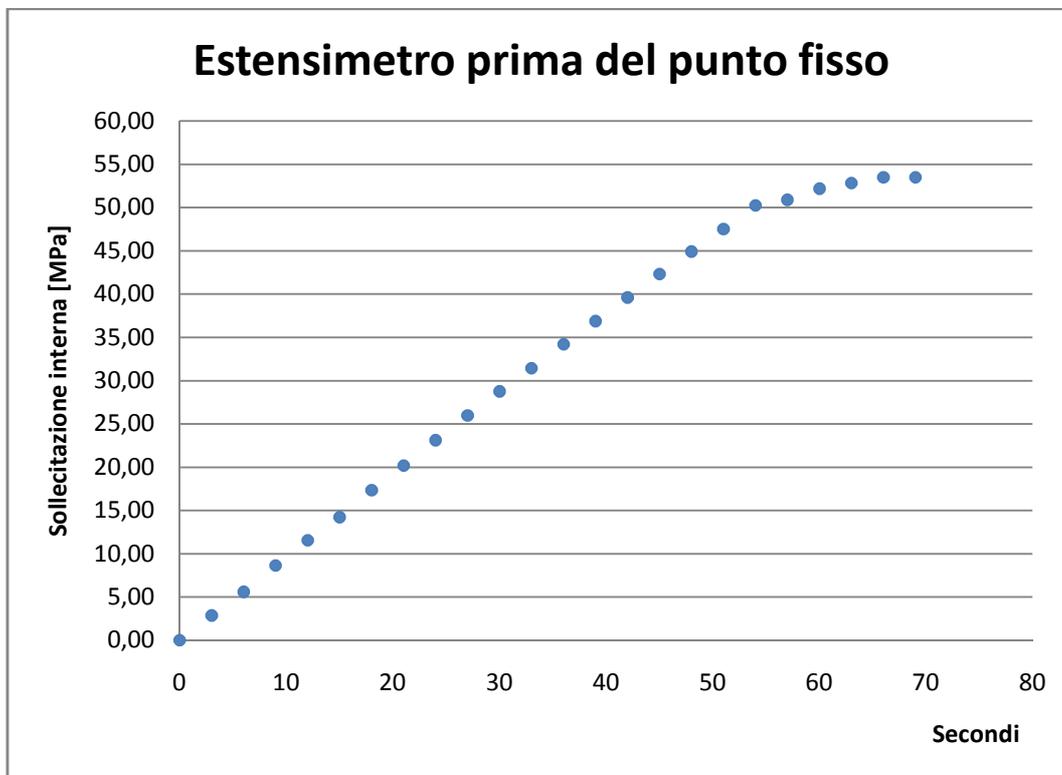


Figura 6.22 – Sollecitazione interna rilevata prima del punto fisso

E' possibile osservare che lo stato di sollecitazione interna misurato nei due punti è risultato pressoché lo stesso, a meno di piccoli errori determinati dall'instabilità del dato. A tale proposito si riporta la videata del software che mostra come la semisezione in monitoraggio sia stata regolata correttamente.



Figura 6.23 – Videata di fine regolazione di Alpha ViBi 1.1

Si può notare come Alpha ViBi 1.1 riporti il valore zero in tutte le textbox relative ai tratti di rotaia non monitorati. I messaggi di errore comparsi a video sono pertanto da non prendere in considerazione.

Inoltre lo stato di sollecitazione riscontrato in corrispondenza del punto fisso e pari a 0,24 MPa corrisponde ad uno spostamento del punto stesso di 0,11 mm, valore ampiamente al di sotto dei limiti prescritti dall'Istruzione Tecnica RFI di  $\pm 2$  mm.

La correttezza della regolazione è stata accertata anche mediante la verifica della congruenza delle tacche riportate su ciascun quarto che ha dato esito positivo.

Per poter avere un riscontro sul tiro effettivamente applicato alla rotaia dai martinetti, al termine della procedura si è effettuata una lettura del manometro, che misurava circa 770 bar. Con l'espressione analitica riportata in precedenza, è stato possibile calcolare la

corrispondente forza applicata che è risultata pari a 352,5 kN. Tale valore conferma che è stato pressoché raggiunto il tiro teorico di 352,7 kN.

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva di confronto tra i risultati attesi e i risultati ottenuti.

*Tabella 6.4 – Riassunto dei risultati della prova*

|                                | Teorico | Prova |
|--------------------------------|---------|-------|
| Diametro pistoni martinetti    | -       | 54    |
| Allungamento della rotaia [mm] | 26,4    | 26,4  |
| Luce di taglio [mm]            | 74,8    | 74    |
| Tiro ai martinetti [kN]        | 352,7   | 352   |
| Sollecitazione interna [MPa]   | 55,44   | 55,33 |
| Pressione al manometro [bar]   | -       | 770   |

## 6.5. OPERAZIONI CONCLUSIVE

Si sono infine serrati gli organi di attacco delle rotaie.

Col morsetto ancora in presa, sono state accuratamente allineate, in preparazione della saldatura, le testate delle rotaie. Avvenendo per colata, la saldatura prevede la predisposizione di forme refrattarie nella zona da saldare, nonché la sigillatura delle stesse per evitare la fuoriuscita della miscela fusa. In fase di raffreddamento, per assecondare il ritiro del materiale di riporto, la saldatura è stata compressa, agendo sul morsetto con la cadenza di 3 serraggi al minuto per circa 15 minuti.



*Figura 6.24 – Operazione di saldatura alluminotermica*

E' stato possibile quindi rimuovere il morsetto e conseguentemente i cunei d'allineamento e i residui di saldatura.



*Figura 6.25 – Rimozione dei residui di saldatura*

E' stato effettuato infine il serraggio degli organi d'attacco del binario alle 40 traverse a cavallo del Giunto di Regolazione e si è proceduto alla molatura della rotaia in corrispondenza della saldatura.



*Figura 6.26 – Operazione di molatura*

## 6.6. PROVA PER IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

Per verificare che la teoria relativa al monitoraggio in esercizio della lunga rotaia saldata, non potendo disporre di un tratto di linea per lungo tempo, tanto da poter rilevare differenze di temperatura notevoli, si è deciso di effettuare una prova in sito immediatamente successiva alla regolazione.

Riscaldando, mediante l'uso del cannello, la rotaia sulla quale sono stati incollati gli estensimetri è stato possibile registrare la conseguente variazione di temperatura e di conseguenza una variazione di resistenza dell'estensimetro e della relativa sollecitazione interna conseguente alla dilatazione impedita.



*Figura 6.27 – Riscaldamento della rotaia con cannello*

Con la sonda termometrica è stata rilevata una variazione di temperatura di 17 °C (da 8 °C a 25 °C): lo stato di sollecitazione di trazione rilevato da Alpha ViBi 1.1 è passato da 55,2 MPa a 12,5 MPa, mostrando come gli estensimetri siano in grado di misurare la variazione di sollecitazioni anche in condizioni di rotaia con dilatazioni completamente impedito. Ciò conferma l'ipotesi da noi formulata alla base della teoria descritta nel capitolo 4, ovvero la linearità dell'andamento dell'errore termico dell'estensimetro in lega costantana in un range di temperature compreso tra 0 °C e + 130 °C.

Ne consegue che, qualora le temperature superassero la temperatura di regolazione, il sistema inizierebbe a registrare dei valori negativi di sollecitazione interna, corrispondenti a uno stato di compressione.

# 7. IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

Lo sviluppo di tecniche di monitoraggio e di diagnostica dell'infrastruttura riveste, in Italia, importanza fondamentale nel processo di separazione fra il gestore dell'infrastruttura stessa e gli operatori di trasporto.

Il gestore dell'infrastruttura necessita, in genere, di tecniche di monitoraggio dell'infrastruttura stessa per diversi scopi, quali:

- assicurare la continua manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria per garantire l'efficienza e consentire agli operatori di trasporto di svolgere il proprio lavoro in sicurezza;
- monitorare il passaggio dei convogli per accertarsi che non siano presenti veicoli la cui marcia impartisca sollecitazioni anomale all'armamento causando un peggioramento delle condizioni geometriche della linea;

- garantire, unitamente agli operatori di trasporto, il rispetto dei parametri di impatto ambientale, riconducibili, per quanto concerne l'infrastruttura, al rumore emesso al transito dei convogli ferroviari.

In particolare, per quanto riguarda la sicurezza della circolazione la problematica presa in considerazione nel presente lavoro di tesi è connessa alle escursioni termiche, che producono un'alterazione all'equilibrio delle sollecitazioni interne dell'acciaio che compone la rotaia. In estate si verificano incrementi di temperatura, con il possibile slineamento dei binari; in inverno invece si verificano decrementi di temperatura, che possono determinare la rottura delle rotaie. Queste, quando vengono posate, sono regolate ad una temperatura di circa 30/35 gradi per annullare le tensioni interne. Tale valore permette alla rotaia, in interazione con le traverse (di legno o di cemento armato precompresso), di contenere lo slineamento quando la rotaia è soggetta a forti escursioni termiche<sup>28</sup> positive.

### 7.1. MONITORAGGIO DELLE SOLLECITAZIONI DI TRAZIONE

Alle basse temperature, la rotaia ferroviaria tenderebbe a contrarsi per effetto della diminuzione di temperatura rispetto a quella di regolazione. Le deformazioni risultano parzialmente impedito dalle resistenze che ostacolano il movimento della rotaia (attacchi, traverse, massicciata), pertanto si crea uno stato di sollecitazione di trazione.

Se lo sforzo di trazione nella rotaia, alle basse temperature, supera un certo valore limite, l'acciaio può rompersi in punti singolari quali le saldature.

La diagnostica dello stato di sanità interna delle rotaie può essere effettuata mediante controlli ad ultrasuoni manuali o con sonde montate su veicoli; in questo secondo caso

---

<sup>28</sup> È da tener presente che la temperatura che è registrata sulla rotaia è molto più alta rispetto a quella ambientale: in particolare nelle aree più esposte all'irraggiamento del sole con un livello di raffreddamento d'aria basso, le temperature registrate sui binari sono altissime e possono raggiungere anche i 60 °C.

la posizione delle sonde e la presenza di un fluido di accoppiamento (acqua) limita sia la tipologia di difetti osservabile che la velocità della rilevazione. Un'altra metodologia indiretta di controllo è offerta dal BACC (Blocco Elettrico Automatico a Correnti Codificate) che costituisce lo standard FS tradizionale per la ripetizione dell'aspetto dei segnali in locomotiva. In tale sistema le rotaie sono percorse da correnti alternate opportunamente codificate che, nel caso di rottura completa di una rotaia, ovviamente si interrompono occupando il circuito di binario corrispondente ed impedendo di fatto l'apertura dei segnali. Quest'ultimo sistema non ha validità generale in quanto non tutte le amministrazioni ferroviarie usano sistemi che utilizzano le rotaie come supporto per la trasmissione delle informazioni sul segnalamento e, soprattutto, il controllo è di tipo "digitale", ossia non è possibile rilevare la rottura finché non è completa. Inoltre al momento della chiusura del circuito non c'è ovviamente modo di sapere quanta parte di rotaia è mancante, il che obbliga ad un'ispezione immediata con chiusura della circolazione.

Come già descritto in precedenza, la mancata continuità di una rotaia a seguito della rottura non comporta problemi rilevanti in termini di sicurezza della circolazione: il convoglio ferroviario infatti supera il punto di rottura con un sobbalzo senza che per questo vi siano situazioni di pericolo legate al possibile deragliamento del treno. Per tale motivo il problema delle basse temperatura risulta di rilevanza secondaria, in considerazione delle conseguenze poco rilevanti che ne derivano sulla circolazione ferroviaria.

Nonostante ciò, la rottura di un binario per trazione comporta delle complicazioni dal punto di vista del comfort degli utenti e dell'usura del materiale rotabile e dell'infrastruttura.

Infatti:

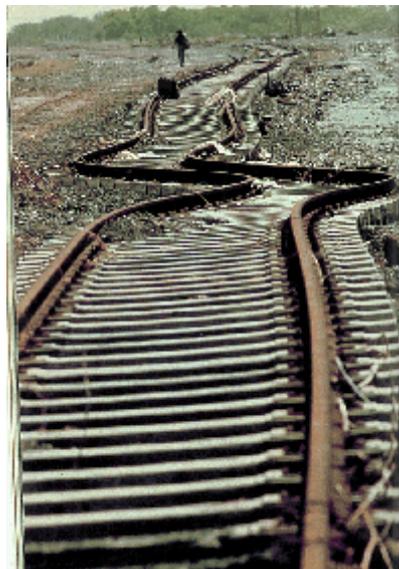
- i sobbalzi che il convoglio subisce al momento del passaggio in corrispondenza della rottura implicano delle fastidiose accelerazioni verticali per i passeggeri del treno;
- gli stessi sobbalzi sollecitano in maniera dinamica sia il rodiggio che il binario nel tratto dove si trova la rottura, affrettandone l'usura.

Laddove si verifica la rottura è necessario pertanto che i tecnici intervengano tagliando un tratto di rotaia lungo almeno 3 m e sostituendolo con uno spezzone, ripristinando poi la continuità mediante due saldature.

### 7.2. MONITORAGGIO DELLE COMPRESSIONI E FENOMENO DI SLINEAMENTO

Alle alte temperature la rotaia ferroviaria tende a dilatarsi per effetto dell'aumento di temperatura rispetto a quella di regolazione: le deformazioni risultano però impedito dalle resistenze in gioco, determinando uno stato di sollecitazione di compressione.

Se lo sforzo di compressione nella rotaia supera un certo valore limite il binario può instabilizzarsi fino a giungere allo slineamento.



*Figura 7.1 – Binario slineato*

Il controllo dell'aumento di temperatura della rotaia avviene in vari modi. Sulla rete fondamentale italiana, circa 10.500 chilometri, nelle zone in cui la temperatura potrebbe raggiungere valori superiori rispetto alla media vengono installati dei sensori termici sulle rotaie. Questi rimandano informaticamente i dati rilevati alla Sala operativa

regionale che controlla 24 ore al giorno lo stato dell'infrastruttura ferroviaria. Sulle linee ferroviarie secondarie, dove invece non vengono installati sensori, i tecnici sono incaricati di vigilanze straordinarie e di un controllo manuale della temperatura della rotaia, soprattutto nelle zone più esposte al sole e nelle ore più calde della giornata.

Una volta analizzati i dati, la Sala operativa regionale in base ad una sorta di codice allarme stile Triage ('bianco', 'verde', 'giallo' e 'rosso') adotta provvedimenti via via più restrittivi in funzione della sicurezza della circolazione ferroviaria. Con il codice 'bianco/verde' la situazione è sotto controllo e non vengono adottati particolari provvedimenti. Con il codice giallo il personale che controlla le linee ferroviarie viene incaricato di vigilare i tratti di binario interessati, intensificando il monitoraggio della temperatura.

In base ai dati viene quindi decisa l'eventuale riduzione cautelativa della velocità dei treni. Quando la temperatura registrata sui binari è di 58°C (codice giallo) la velocità è fissata a 100 km/h, quando invece la temperatura della rotaia raggiunge i 60°C (codice rosso) la velocità viene ridotta a 50 km/h. In questo secondo caso i controlli sono più intensi e possono determinare anche interventi strutturali.

Tutte le azioni che i tecnici di RFI compiono, secondo regole ben precise e secondo anche l'esperienza maturata nel corso degli anni, garantiscono l'impossibilità di deformazione delle rotaie, situazione questa che inevitabilmente comporterebbe, fra l'altro, l'interruzione della circolazione ferroviaria.

Nel corso della presente trattazione più volte si è fatto riferimento alla pericolosità del fenomeno dello slineamento del binario per la sicurezza della circolazione dei convogli. Tale fenomeno consiste in una modifica dell'assetto originario dell'asse ferroviario, il quale risulta subire delle deviazioni che possono provocare, al limite, lo svio<sup>29</sup> dei mezzi ferroviari.

E' stato riportato nel capitolo 3, al paragrafo 3.10, il metodo prescritto nella Istruzione Tecnica RFI TC AR IT AR 07 003 A con cui RFI controlla gli eventuali spostamenti longitudinali e trasversali della rotaia che si sono già verificati oppure si verificano al momento del rilievo.

---

<sup>29</sup> Il fenomeno dello svio ha luogo quando per qualche motivo si ha un iniziale sollevamento di una ruota della *i* - esima carrozza componente il convoglio in modo tale che il contatto con la rotaia avvenga unicamente tramite il bordino che preme sul fianco del fungo della rotaia.

Per comprendere meglio la pericolosità del fenomeno dello slineamento si riportano di seguito una serie di dati inerenti ad incidenti verificatisi per cause imputabili a tale evento, dati reperiti dal “Rapporto annuale sulla sicurezza delle ferrovie”, anno 2009, redatto da ANSF, Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie.

### 7.2.1. ANALISI DI INCIDENTALITA'

L'infrastruttura ferroviaria nazionale concessa in gestione a Rete Ferroviaria Italiana S.p.A. ha un'estensione di 16685 km e permette la circolazione di convogli appartenenti a diverse imprese ferroviarie (Trenitalia S.p.A., LeNord ecc).



Figura 7.2 – Estensione dell'infrastruttura ferroviaria nazionale

## 7. IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

I dati di traffico sulla rete, comunicati da ogni singola impresa nella Relazione annuale sulla sicurezza per l'anno 2009, sono riportati in tabella 7.1.

*Tabella 7.1 – Traffico anno 2009 [treni x km]*

| Operatore ferroviario                | Dati di traffico 2009 su rete RFI |                   |                  |                    |                    |                                      |                                 |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
|                                      | Treni x km passeggeri             | Treni x km merci  | Treni x km altro | Tot treni x km     | % sul traffico tot | Treni x km totali attrezzati con ATP | % treni x km attrezzati con ATP |
| Trenitalia S.p.A.                    | 266.365.000                       | 36.110.000        | 4.702.000        | 307.177.000        | 95,03              | 267.196.000                          | 87,0                            |
| Le Nord                              | 758.334                           | 0                 | 0                | 758.334            | 0,23               | 538.366                              | 71,0                            |
| Rail Traction Company                | 0                                 | 2.296.067         | 0                | 2.296.067          | 0,71               | 1.262.837                            | 55,0                            |
| SERFER - Servizi Ferroviari s.r.l.   | 28.601                            | 837.825           | 0                | 866.426            | 0,27               | 866.426                              | 100,0                           |
| HUPAC S.p.A.                         | 0                                 | 18.614            | 30.634           | 49.248             | 0,02               | 20.205                               | 41,0                            |
| Ferrovie Emilia Romagna s.r.l.       | 1.700.000                         | 0                 | 0                | 1.700.000          | 0,53               | 703.245                              | 41,4                            |
| Nord Cargo                           | 0                                 | 1.430.269         |                  | 1.430.269          | 0,44               | 1.053.013                            | 73,6                            |
| Ferrovia Adriatico Sangritana s.r.l. | 661.270                           | 209.796           | 0                | 871.066            | 0,27               | 738.812                              | 84,8                            |
| S&B CARGO ITALIA                     |                                   | 1.899.358         |                  | 1.899.358          | 0,59               | 759.743                              | 40,0                            |
| METROCAMPANIA NORD EST s.r.l.        | 393.815                           | 0                 | 0                | 393.815            | 0,12               | 165.597                              | 42,0                            |
| SAD                                  | 1.057.332                         | 0                 | 0                | 1.057.332          | 0,33               | 1.057.332                            | 100,0                           |
| Captrain ex SNCF Fret Italia         | 0                                 | 284.333           | 78.062           | 362.395            | 0,11               | 362.395                              | 100,0                           |
| RAILONE                              | 0                                 | 0                 | 0                | 0                  | 0,00               | 0                                    | 0,0                             |
| Ferrovie Udine Cividale s.r.l.       | <b>Dato non fornito</b>           |                   |                  |                    |                    |                                      |                                 |
| Crossrail Italia s.r.l.              | 0                                 | 209.909           | 0                | 209.909            | 0,06               | 209.909                              | 100,0                           |
| Veolia Cargo Italia s.r.l.           | 0                                 | 105.000           | 0                | 105.000            | 0,03               | 57.300                               | 54,6                            |
| Ferrovie del Gargano s.r.l.          | 264.940                           | 0                 | 0                | 264.940            | 0,08               | 0                                    | 0,0                             |
| RFI                                  | 0                                 | 0                 | 174.460          | 174.460            | 0,05               | 174.460                              | 100,0                           |
| Inrail                               | 0                                 | 87.862            | 0                | 87.862             | 0,03               | 87.862                               | 100,0                           |
| Compagnia Ferroviaria Italiana       | 0                                 | 120.000           | 0                | 120.000            | 0,04               | 0                                    | 0,0                             |
| Sistemi territoriali                 | 994.000                           | 111.000           | 0                | 1.105.000          | 0,34               | 20.400                               | 1,8                             |
| Trasporto Ferroviario Toscano S.p.A. | 0                                 | 68.930            | 0                | 68.930             | 0,02               | 68.930                               | 100,0                           |
| Nuovo Trasporto Viaggiatori          | 0                                 | 0                 | 2.469            | 2.469              | 0,00               | 2.469                                | 100,0                           |
| Ferrottramviaria                     | 63.098                            | 0                 | 0                | 63.098             | 0,02               | 63.098                               | 100,0                           |
| Ferrovia Centrale Umbra s.r.l.       | 923.144                           | 0                 | 0                | 923.144            | 0,29               | 319.492                              | 34,6                            |
| Gruppo Torinese Trasporti S.p.A.     | 349.000                           | 0                 | 0                | 349.000            | 0,11               | 246.000                              | 70,5                            |
| FERROVIA LINEA s.r.l.                | 0                                 | 385.292           | 0                | 385.292            | 0,12               | 385.292                              | 100,0                           |
| Rail Italia                          | 0                                 | 3.920             | 7.768            | 11.688             | 0,00               | 11.688                               | 100,0                           |
| DB SCHENKER Italia                   | 0                                 | 522.561           | 0                | 522.561            | 0,16               | <b>Dato non fornito</b>              |                                 |
| Ferrovie della Calabria              | 0                                 | 0                 | 0                | 0                  | 0,00               | 0                                    | 0,00                            |
| Arenaways                            | 0                                 | 0                 | 0                | 0                  | 0,00               | 0                                    | 0,00                            |
| Interporto Servizio Cargo            | 0                                 | 0                 | 0                | 0                  | 0,00               | 0                                    | 0,00                            |
| GTS                                  | 0                                 | 0                 | 0                | 0                  | 0,00               | 0                                    | 0,00                            |
| <b>TOTALE</b>                        | <b>273.558.534</b>                | <b>44.700.736</b> | <b>4.995.393</b> | <b>323.254.663</b> | <b>100,00</b>      | <b>276.370.871</b>                   | <b>85,5</b>                     |

## 7. IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

Nella tabella seguente si riporta un confronto dei dati di traffico registrati negli anni 2008/2009 dai vari operatori ferroviari:

*Tabella 7.2 – Confronto dei dati di traffico sulla rete RFI tra il 2008 e il 2009*

| Operatore ferroviario                | Dati di traffico su rete RFI |                    |                             |                               |                                     |                    |                             |                               |
|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                                      | 2008                         |                    |                             |                               | 2009                                |                    |                             |                               |
|                                      | Tot treni km                 | % sul traffico tot | treni km attrezzati con ATP | % treni km attrezzata con ATP | Tot treni km                        | % sul traffico tot | treni km attrezzati con ATP | % treni km attrezzata con ATP |
| Trenitalia S.p.A.                    | 326.171.000                  | 96,16              | 260.752.000                 | 79,9                          | 307.177.000                         | 95,00              | 267.196.000                 | 87,0                          |
| Le Nord                              | 581.406                      | 0,17               | 130.532                     | 22,5                          | 758.334                             | 0,20               | 538.366                     | 71,0                          |
| Rail Traction Company                | 2.450.000                    | 0,72               | 0                           | 0,0                           | 2.296.067                           | 0,70               | 1.262.837                   | 55,0                          |
| Impresa Ferroviaria Italiana S.p.A.  | 231.390                      | 0,07               | 0                           | 0,0                           | <b>CdS revocato ad ottobre 2008</b> |                    |                             |                               |
| SERFER - Servizi Ferroviari s.r.l.   | 820.574                      | 0,24               | 231.200                     | 28,2                          | 866.426                             | 0,30               | 866.426                     | 100,0                         |
| HUPAC S.p.A.                         | 55.000                       | 0,02               | 0                           | 0,0                           | 49.248                              | 0,00               | 20.205                      | 41,0                          |
| Ferrovie Emilia Romagna s.r.l.       | 1.360.000                    | 0,40               | 502.000                     | 36,9                          | 1.700.000                           | 0,50               | 703.245                     | 41,4                          |
| Nord Cargo                           | 1.054.396                    | 0,31               | 93.915                      | 8,9                           | 1.430.269                           | 0,40               | 1.053.013                   | 73,6                          |
| Ferrovia Adriatico Sangritana s.r.l. | 681.000                      | 0,20               | 520.000                     | 76,4                          | 871.066                             | 0,30               | 738.812                     | 84,8                          |
| DB SCHENKER RAILION ITALIA s.r.l.    | 528.836                      | 0,16               | 160.711                     | 30,4                          | 522.561                             | 0,20               | <b>Dato non fornito</b>     |                               |
| S&B CARGO ITALIA                     | 1.824.347                    | 0,54               | 191.324                     | 10,5                          | 1.899.358                           | 0,60               | 759.743                     | 40,0                          |
| METROCAMPANIA NORD EST s.r.l.        | 396.559                      | 0,12               | 2.133                       | 0,5                           | 393.815                             | 0,10               | 165.597                     | 42,0                          |
| SAD                                  | 270.000                      | 0,08               | 94.000                      | 34,8                          | 1.057.332                           | 0,30               | 1.057.332                   | 100,0                         |
| SNCF FRET ITALIA                     | 367.838                      | 0,11               | 0                           | 0,0                           | 362.395                             | 0,10               | 362.395                     | 100,0                         |
| RAILONE                              | 13.965                       | 0,00               | 6.689                       | 47,9                          | 0                                   | 0,00               | 0                           | 0,0                           |
| Ferrovie Udine Cividale s.r.l.       | 27.080                       | 0,01               | 0                           | 0,0                           | <b>Dato non fornito</b>             |                    |                             |                               |
| Crossrail Italia s.r.l.              | 54.786                       | 0,02               | 0                           | 0,0                           | 209.909                             | 0,06               | 209.909                     | 100,0                         |
| Veolia Cargo italia s.r.l.           | 3.000                        | 0,00               | 0                           | 0,0                           | 105.000                             | 0,03               | 57.300                      | 54,6                          |
| Ferrovie del Gargano s.r.l.          | 43.320                       | 0,01               | 0                           | 0,0                           | 264.940                             | 0,08               | 0                           | 0,0                           |
| RFI                                  | 680.956                      | 0,20               | 0                           | 0,0                           | 174.460                             | 0,05               | 174.460                     | 100,0                         |
| Sistemi Territoriali S.p.A.          | 226.000                      | 0,07               | 0                           | 0,0                           | 1.105.000                           | 0,34               | 20.400                      | 1,8                           |
| Trasporto Ferroviario Toscano S.p.A. | 83.172                       | 0,02               | 0                           | 0,0                           | 68.930                              | 0,02               | 68.930                      | 100,0                         |
| Ferrovia Centrale Umbra s.r.l.       | 756.096                      | 0,22               | 75.800                      | 10,0                          | 923.144                             | 0,29               | 319.492                     | 34,6                          |
| Gruppo Torinese Trasporti S.p.A.     | 332.000                      | 0,10               | 240.000                     | 72,3                          | 349.000                             | 0,11               | 246.000                     | 70,5                          |
| FERROVIA LINEA s.r.l.                | 188.000                      | 0,06               | 81.000                      | 43,1                          | 385.292                             | 0,12               | 385.292                     | 100,0                         |
| Inrail                               | <b>CdS Emessi nel 2009</b>   |                    |                             |                               | 87.862                              | 0,03               | 87.862                      | 100,0                         |
| Rail Italia                          |                              |                    |                             |                               | 11.688                              | 0,00               | 11.688                      | 100,0                         |
| Ferrovie della Calabria              |                              |                    |                             |                               | 0                                   | 0,00               | 0                           | 0,0                           |
| Compagnia Ferroviaria Italiana       |                              |                    |                             |                               | 120.000                             | 0,04               | 0                           | 0,0                           |
| Arenaways                            |                              |                    |                             |                               | 0                                   | 0,00               | 0                           | 0,0                           |
| Interporto Servizio Cargo            |                              |                    |                             |                               | 0                                   | 0,00               | 0                           | 0,0                           |
| Nuovo Trasporto Viaggiatori          |                              |                    |                             |                               | 2.469                               | 0,00               | 2.469                       | 100,0                         |
| Ferrottramviaria                     |                              |                    |                             |                               | 63.098                              | 0,02               | 63.098                      | 100,0                         |
| <b>TOTALE</b>                        | <b>339.200.721</b>           | <b>100,00</b>      | <b>263.081.304</b>          | <b>77,6</b>                   | <b>323.254.663</b>                  | <b>100,00</b>      | <b>276.370.871</b>          | <b>85,5</b>                   |

L'andamento della sicurezza nell'anno 2009 è pesantemente segnato dal disastro ferroviario occorso a Viareggio il 30 giugno 2009 che ha causato gravissime conseguenze in termini di vittime e danni.

Peraltro nel 2009 si è registrata una diminuzione generalizzata del numero degli incidenti rispetto agli anni precedenti. Nella figura 7.3 è rappresentato l'andamento del numero di incidenti nel periodo 1992 – 2009. In corrispondenza dell'anno 2006 è riportata una linea rossa che indica la modifica da parte dell'U.I.C. (Union International des Chemins de fer) del valore dei danni oltre il quale l'incidente deve essere comunicato all'U.I.C. stessa e della differente identificazione di un ferito grave.

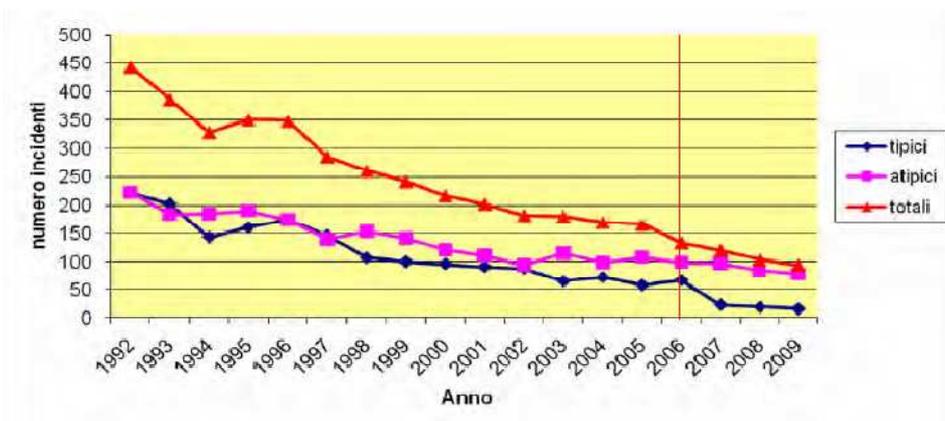


Figura 7.3 – Andamento dell'incidentalità nel periodo 1992 – 2009

Il grafico in figura 7.4 indica il trend delle singole tipologie di incidenti riferito al periodo 1992 - 2008: all'interno dei deragliamenti si considerano anche gli incidenti collegabili a fenomeni di slineamento del binario.

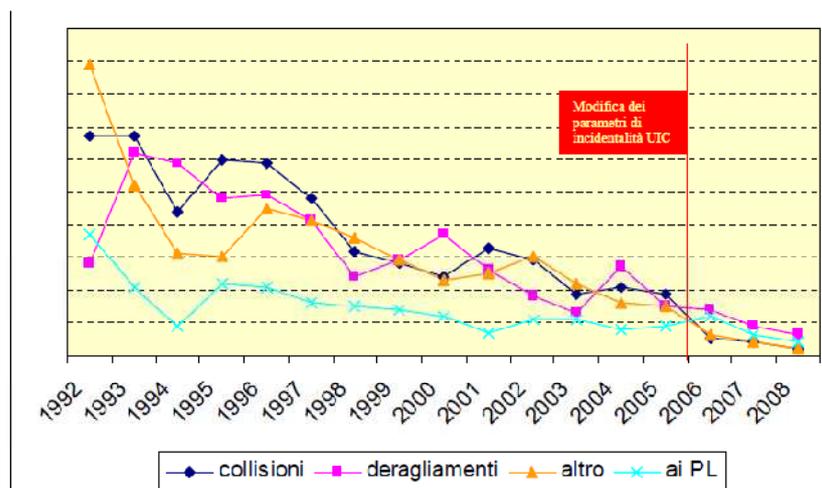


Figura 7.4 – Andamento degli incidenti nel periodo 1992 - 2008 suddiviso per singole tipologie

Nel corso del 2008 sono stati realizzati interventi per minimizzare le principali cause di incidente emerse dall'analisi di incidentalità, tra cui:

- cadute dei viaggiatori dai treni in movimento;
- protezione della marcia dei treni;
- cantieri di lavoro;
- manutenzione infrastruttura;
- spezzamenti ETR;
- rottura alberi di trasmissione ETR 4XX.

Lo slineamento del binario rientra nelle problematiche che riguardano la manutenzione dell'infrastruttura. Con questo termine si intende la verifica a livello nazionale dell'applicazione delle disposizioni e prescrizioni tecniche relative all'esercizio ed alla manutenzione della lunga rotaia saldata e la verifica dell'efficacia del sistema di controllo dello stato tensionale del binario in corrispondenza dei periodi dell'anno soggetti a rilevanti variazioni termiche.

Si riporta ora, per completezza, una tabella indicante l'andamento degli incidenti nel periodo 2005 – 2008:

Tabella 7.3 – Andamento degli incidenti nel periodo 2005 - 2008

| INCIDENTI                                                                       | 2005       |                                  | 2006       |                                  | 2007       |                                  | 2008       |                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
|                                                                                 | n.         | per<br>miliardo<br>di<br>tr x km |
| <b>collisioni di treni</b>                                                      | <b>5</b>   | <b>14,771</b>                    | <b>4</b>   | <b>11,564</b>                    | <b>4</b>   | <b>11,672</b>                    | <b>2</b>   | <b>5,896</b>                     |
| collisioni di treni<br>contro ostacoli                                          | 3          | 8,862                            | 3          | 8,673                            | 4          | 11,672                           | 2          | 5,896                            |
| collisioni tra treni                                                            | 2          | 5,908                            | 1          | 2,89                             | 0          | 0                                | 0          | 0,000                            |
| <b>deragliamenti di<br/>treni</b>                                               | <b>6</b>   | <b>17,725</b>                    | <b>11</b>  | <b>31,802</b>                    | <b>8</b>   | <b>23,344</b>                    | <b>8</b>   | <b>23,585</b>                    |
| incidenti ai passaggi<br>a livello                                              | 25         | 73,853                           | 32         | 92,515                           | 19         | 55,441                           | 9          | 26,533                           |
| incidenti alle<br>persone provocati<br>da materiale<br>rotabile in<br>movimento | 90         | 265,87                           | 76         | 219,723                          | 83         | 242,191                          | 79         | 232,900                          |
| incendi al materiale<br>rotabile                                                | 4          | 11,816                           | 4          | 11,564                           | 4          | 11,672                           | 2          | 5,896                            |
| altri                                                                           | 4          | 11,816                           | 5          | 14,45                            | 3          | 8,754                            | 3          | 8,844                            |
| <b>TOTALE</b>                                                                   | <b>134</b> | <b>395,851</b>                   | <b>132</b> | <b>381,625</b>                   | <b>121</b> | <b>353,073</b>                   | <b>103</b> | <b>303,655</b>                   |

Si può notare come la categoria “deragliamento di treni”, della quale fanno parte i deragliamenti per slineamento, rappresenti una voce significativa sul totale degli incidenti, soprattutto se si considera che, a differenza degli incidenti a persone che spesso sono imputabili alla negligenza o alla mancata osservanza di prescrizioni di sicurezza, questi incidenti sono imputabili a difetti strutturali o ad un piano di manutenzione inadeguato.

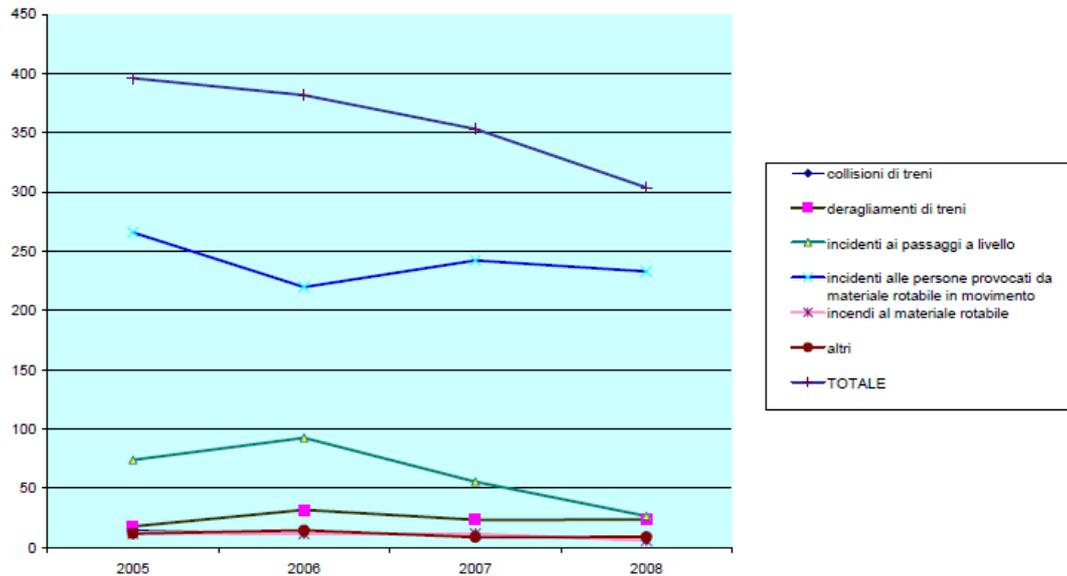


Figura 7.5 – Andamento degli incidenti nel periodo 2005 – 2008 [miliardi di treni x km]

### 7.2.1.1. INCIDENTI IMPUTABILI ALLO SLINEAMENTO

Dall’analisi dell’allegato C.2 (“Elenco degli incidenti raccolti per l’elaborazione degli Indicatori Comuni di Sicurezza della Direttiva 2004/49/Ce anno 2008 avvenuti sull’Infrastruttura Ferroviaria Nazionale”) del rapporto annuale sulla sicurezza delle ferrovie anno 2008 sono stati estratti e vengono riportati gli eventi incidentali connessi allo slineamento del binario:

- 8/1/2008, Roma Smistamento – Fidene: svio di mezzo di trazione o rotabili in composizione treno.  
Cause: irregolarità alla geometria del binario – slineamento;
- 21/6/2008, Vipiteno: svio di mezzo di trazione o rotabili in composizione treno.  
Cause: irregolarità alla geometria del binario – slineamento;

## 7. IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

- 26/6/2008: Contursi Terme – Sicignano degli Alburini (Pisa): svio di mezzo di trazione o rotabili in composizione treno.  
Cause: irregolarità alla geometria del binario – slineamento;
- 11/12/2008: Falconara – Butera: svio di mezzo di trazione o rotabili in composizione treno.  
Cause: irregolarità alla geometria del binario – slineamento.

Per quanto concerne gli incidenti di Vipiteno e Pisa, la Commissione Ministeriale di Indagine predisposta dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ha accertato che le cause sono imputabili a particolari variazioni di temperatura operative dei binari.

Ovviamente questi sono solo alcuni degli esempi in merito, che fortunatamente non hanno dato origine a conseguenze particolarmente gravi.

Basta ricordare però l'incidente a seguito del deragliamento di un 656 a Serravalle Scrivia nel 2004 a causa dello slineamento di un binario, che comportò la morte di una donna e il ferimento di 38 persone, per comprendere la reale pericolosità e drammaticità che un fenomeno di slineamento può comportare.



*Figura 7.6 – Deragliamento del 656 a Serravalle*

## 7.3. L'APPLICAZIONE PROGETTUALE

Alla luce di quanto emerso in merito alla pericolosità del fenomeno dello slineamento, il dispositivo progettato è utilizzabile per monitorare lo stato tensionale interno alla rotaia in fase di esercizio.

Esso utilizza l'hardware e il software descritti nel capitolo 4 e permette agli operatori RFI di intervenire preventivamente sul binario, rispetto al verificarsi dello slineamento, con tagli della rotaia o regolazione della circolazione dei convogli.

Il sistema prevede l'impiego di un numero variabile di sensori da 1 a 8, da disporre secondo la numerazione indicata nella videata di monitoraggio del software; in questo modo, ogni sensore è identificativo dello stato tensionale di un punto preciso, identificabile univocamente dalla postazione di controllo.

Al verificarsi, in uno degli 8 punti monitorati, di uno stato tensionale al di sopra del valore limite prescritto, il software mostra un segnale di allarme; con un monitoraggio in continuo è possibile intervenire prima dell'insorgere di tale situazione.

Di seguito si riportano le considerazioni svolte per la definizione del limite di sforzo ammissibile.

### 7.3.1. ANALISI DI INSTABILITA'

#### 7.3.1.1. CARICO CRITICO SECONDO EULERO

Secondo il metodo di Eulero, il carico critico di un'asta soggetta a sforzo assiale di compressione si determina, attraverso l'ipotesi di elasticità del materiale, imponendo che l'asta permanga equilibrata anche per configurazioni "lievemente" inflesse fuori dall'assetto rettilineo dell'asse.

L'espressione analitica per il calcolo è la nota formula di Eulero:

$$P_E = \frac{\pi^2 \times E \times J}{l_0^2}$$

dove:

- $P_E$  è il carico critico che corrisponde allo stato limite di instabilità elastica;
- $E$  è il modulo elastico del materiale;
- $J$  è il momento di inerzia della sezione;
- $l_0$  è la lunghezza di libera inflessione.

Per quanto riguarda la lunghezza di libera inflessione dell'asta, essa corrisponde alla distanza tra due punti di flesso della deformata teorica sotto carico critico ed assume il valore fornito dall'espressione:

$$l_0 = \beta \times l$$

dove  $\beta$  è un coefficiente che dipende dalle condizioni di vincolo all'estremità.

In termini di tensione, ponendo  $\sigma_E = \frac{P_E}{A}$ , si ottiene:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \times E}{\lambda^2}$$

dove  $\lambda = \frac{l_0}{i_m}$  è la snellezza dell'asta, rapporto tra lunghezza di libera inflessione ed il

raggio giratore di inerzia della sezione ( $i_m = \sqrt{\frac{J}{A}}$ ).

E' da notare che, per valori di snellezza elevati, la tensione corrispondente al carico critico assume un valore basso, tale da poter risultare inferiore alla tensione di snervamento dell'acciaio: in questo caso l'elemento strutturale si instabilizzerà prima di raggiungere lo snervamento.

Nel caso in cui la snellezza assuma invece valori più contenuti (es. elementi tozzi), il collasso non avviene più per instabilità ma per snervamento del materiale.

### 7.3.1.2. MODELLIZZAZIONE STRUTTURALE DEL BINARIO

Per la determinazione del carico critico è necessario modellare adeguatamente l'elemento strutturale in esame, ovvero il binario ferroviario.

In riferimento a quanto scritto nel capitolo 1, l'analisi può essere effettuata valutando separatamente due schematizzazioni: la prima prevede di considerare una rotaia avente lunghezza compresa tra due traverse successive, intendendo l'elemento come indipendente dal resto della struttura; la seconda prevede di considerare il binario nel suo complesso inteso come l'insieme di due rotaie collegate con le traverse.

Per quanto concerne la prima schematizzazione è possibile calcolare il carico critico utilizzando il modello di asta incastrata agli estremi: la scelta della tipologia di vincolo è legata al fatto che gli organi di attacco tra binario e traverse costituiscono, in senso trasversale, un vincolo che impedisce ogni spostamento e ogni rotazione.

Per tale motivo la lunghezza di libera inflessione coincide con l'intera lunghezza dell'elemento e pertanto  $\beta$  assume un valore pari a 0,5.

In riferimento ad una sezione di tipo 60 UNI e ad uno spartito tra traverse di 60 cm, la tensione corrispondente al carico critico risulta essere pari a:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \times E}{\lambda^2} = \frac{3,14^2 \times 210000 \text{ MPa}}{11,6^2} = 15381 \text{ MPa}$$

con:

- area della sezione pari a 76,7 cm<sup>2</sup>;
- momento d'inerzia pari a 512,3 cm<sup>4</sup>.

Per quanto riguarda il momento d'inerzia è necessario riportare alcune precisazioni.

L'elemento può essere soggetto a instabilità per flessione nel piano orizzontale oppure nel piano verticale. Nel primo caso si utilizza il momento d'inerzia riferito all'asse verticale (Y – Y) della sezione, nel secondo si utilizza il momento d'inerzia riferito all'asse orizzontale (X – X) della sezione<sup>30</sup>.

Quindi, in riferimento alla formula per il calcolo del carico critico precedentemente riportata, è necessario utilizzare il più piccolo tra i due valori di momento d'inerzia al

<sup>30</sup> Per la schematizzazione della sezione, vedi Specifica Tecnica di Prodotto RFI TCAR SP AR 02 001 A.

quale corrisponde il minimo valore di carico critico. In riferimento alla sezione della rotaia, l'instabilità che si considera è quella per flessione nel piano orizzontale.

Si può notare come il valore di tensione calcolato risulti ampiamente superiore al limite di snervamento dell'acciaio da rotaie tipo R350LHT<sup>31</sup>, pari a 350 MPa. Ne consegue che l'elemento arriverà a rottura ben prima di raggiungere l'instabilità per carico critico, subendo il collasso per snervamento.

Per quanto riguarda la seconda schematizzazione, è possibile assimilare il complesso rotaie – traverse a due aste composte con calastrelli: lo schema strutturale è costituito da due correnti uniti tra loro da elementi trasversali (calastrelli) di collegamento. Nel caso del binario ferroviario i due correnti sono costituiti dalle due rotaie mentre le traverse svolgono il ruolo dei calastrelli.

Le grandezze geometriche necessarie come dati di ingresso del modello sono:

- la lunghezza totale del tratto di binario da considerare ( $l$ );
- lo spartito delle traverse ( $a$ );
- la distanza tra gli assi delle rotaie del binario ( $d$ );
- i momenti di inerzia rispettivamente della rotaia e delle traverse ( $J_1, J_2$ ).

Per la distanza  $a$  tra una traversa e la successiva si assume il valore tipico utilizzato in ferrovia, pari a 60 cm. La distanza  $d$  tra gli assi delle rotaie è invece pari, nella rete ferroviaria italiana, a 145 cm.

Per il calcolo del momento di inerzia della sezione di rotaia  $J_1$  si assumono valide le considerazioni e i valori utilizzati nella precedente schematizzazione, mentre il momento di inerzia  $J_2$  può essere calcolato conoscendo la sezione di una traversa: per quelle in c.a.p., che risultano essere la tipologia maggiormente utilizzata ad oggi, la sezione risulta variabile da un valore massimo alle estremità (base maggiore di 30 cm e altezza di 19 cm) ad un valore minimo al centro (base maggiore di 20 cm e altezza di 15 cm). In prima approssimazione e a favore di sicurezza, il momento d'inerzia può essere assunto pari a quello minimo della sezione e pari a  $J_2 = 5625 \text{ cm}^4$ .

---

<sup>31</sup> L'acciaio tipo R350LHT risulta essere, tra gli acciai per rotaia, quello con limite di snervamento più alto.

Considerando il sistema nel suo complesso, con le traverse solidali alle due rotaie, è necessario calcolare una snellezza ideale della struttura, da inserire poi nel calcolo della tensione di carico critico, data da:

$$\lambda^* = \sqrt{\lambda^2 + \lambda_1^2}$$

dove:

$$\lambda = \frac{l}{\frac{d}{2}} \quad ; \quad \lambda_1^2 = \frac{\pi^2}{12} \times \left(\frac{a}{i_1}\right)^2 \times \left[1 + 2 \frac{J_1/a}{J_2/d}\right]$$

Il problema teorico che si presenta a questo punto, se si vuole calcolare la snellezza ideale della struttura, è quello di definire un valore di lunghezza di libera inflessione a partire dalla lunghezza del tratto di binario che si vuole analizzare. Se si considera che nella realtà i tratti continui di lunga rotaia saldata, tra un giunto e il successivo, possono assumere lunghezze anche di alcuni km, ci si rende conto come tale modello strutturale risulti troppo schematico per simulare il comportamento di un binario ferroviario: infatti, anche assumendo che la lunghezza del binario da prendere in considerazione sia di solo 1 km, il valore di tensione corrispondente al carico critico che ne deriva è pari a 1 MPa. Ciò significherebbe che anche sbalzi di temperatura di pochi gradi possono essere sufficienti a provocare tale sollecitazione nella rotaia, instabilizzando il binario e portandolo allo slineamento.

La semplice osservazione del fenomeno reale mostra però come il binario si slinei solo per salti termici molto più elevati e soprattutto per tratti più contenuti, non certamente coincidenti con l'interasse tra una traversa e la successiva ma nemmeno pari all'intero sviluppo del binario tra un giunto e il successivo.

Un modello strutturale adeguatamente sviluppato dovrebbe infatti prendere in considerazione una serie di elementi fino a qui trascurati:

- il binario, raggiunto il carico critico, giunge a slineamento solo a seguito del passaggio di un convoglio ferroviario che solleciti trasversalmente (a causa del moto di serpeggiamento o della forza centrifuga in curva) il binario stesso; pertanto

in una trattazione completa del fenomeno andrebbe analizzato questo aspetto, tenendo conto anche del peso proprio del convoglio;

- le rotaie e le traverse posseggono un peso proprio non trascurabile che può costituire un effetto stabilizzante per l'intero binario;

- i tratti rettilinei di binario consecutivi sono intervallati dai tratti curvilinei, in funzione della geometria del tracciato planimetrico, pertanto la lunghezza complessiva da considerare può risultare inferiore a quella compresa tra due giunti successivi;

- le traverse non sono libere di deformarsi o di spostarsi ma sono annegate completamente nella massicciata, il che implica la presenza di resistenze al movimento non trascurabili.

### 7.3.1.3. DEFINIZIONE DELLO SFORZO LIMITE

Per tutti questi motivi il calcolo di uno sforzo limite in funzione del carico critico dovrebbe essere sviluppato con un modello strutturale coerente con quanto detto. Per quanto concerne gli scopi del presente lavoro di tesi si è deciso di definire tale limite di sforzo interno alla rotaia, da non superare in fase di esercizio, a partire dalla massima escursione termica positiva presumibile rispetto alla temperatura di regolazione.

Se infatti lo stato tensionale indotto da una variazione termica compresa tra la temperatura di regolazione (35°C) e la massima temperatura operativa della rotaia (60°C) non comporta problemi di slineamento del binario, è presumibile assumere come sforzo limite quello corrispondente a tale salto termico.

Si riporta ora il calcolo di tale sforzo limite:

$$\sigma = E \times \varepsilon = E \times \alpha \times \Delta T = (2,1 \times 10^5 \text{ MPa}) \times (1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) \times 25 \text{ }^\circ\text{C} = 63 \text{ MPa}$$

### 7.3.2. IL MONITORAGGIO

Visto lo schema del progetto presentato, è necessario disporre lungo linea di una postazione di monitoraggio dotata di un PC collegato mediante USB all'hardware; in tale postazione deve essere presente almeno un addetto RFI.

In riferimento a quanto detto nel capitolo 4, il dispositivo è in grado di monitorare lo stato di sollecitazione interno alla rotaia per temperature operative variabili tra 0°C e 130°C; al di sotto dei 0°C infatti non è più possibile eseguire la linearizzazione del thermal output (vedi figura 4.5) e quindi il modello utilizzato risulta inapplicabile.

Come descritto nello stesso capitolo, il software gestisce sedici segnali corrispondenti a otto rilevazioni di variazione di voltaggio. Si è deciso di ridurre il numero di sensori gestibili in quanto non è più necessario, come nella fase di regolazione, monitorare lo stato dei punti fissi.

Gli otto sensori possono essere disposti con interasse variabile in funzione delle esigenze dell'utente (si consiglia comunque di mantenere un interasse compreso tra 50 m e 150 m, ovvero disporre un estensimetro ad ogni estremità di sezione di rotaia prodotta ed eventualmente un terzo nella mezzeria).

Gli strain gages devono essere incollati sulla rotaia secondo la procedura decritta nel capitolo 6, oppure, qualora presenti, possono essere utilizzati gli estensimetri impiegati precedentemente per la regolazione del tratto di lunga rotaia saldata.

Per garantire la protezione degli estensimetri dagli agenti atmosferici e da eventuali sversamenti accidentali di oli o sostanze acide sulle rotaie, si consiglia di applicare sull'estensimetro i seguenti prodotti chimici (in riferimento al catalogo HBM):

- NG 150: prodotto resistente all'acqua e agli oli ma poco a sostanze acide. Resiste in un range di temperature operative tra - 269°C e + 150°C; deve essere applicato sulla rotaia mediante l'utilizzo di una spazzola;



*Figura 7.7 – NG 150*

- SG 250: prodotto molto resistente a contatto con sostanze acide e a contatto con acqua. Resiste in un range di temperature operative tra  $-70^{\circ}\text{C}$  e  $+250^{\circ}\text{C}$ ; viene fornito in un tubetto, deve essere applicato direttamente sull'estensimetro formando un rivestimento in gel.



*Figura 7.8 – SG 250*

In riferimento al paragrafo 4.4.2., il sistema sfrutta la variazione di temperatura operativa, responsabile della conseguente variazione di resistenza dell'estensimetro, per rappresentare lo stato di sforzo nella rotaia.

E' opportuno sottolineare che gli estensimetri passivi, utilizzati per realizzare il circuito a ponte di Wheatstone e quindi per misurare la variazione di resistenza elettrica, devono essere isolati termicamente. Qualora non lo fossero, il sistema rileverebbe una variazione di resistenza elettrica che introdurrebbe un errore termico nel dato rilevato, che quindi non sarebbe più rappresentativo dello stato di sollecitazione interno alla rotaia.

Gli strain gage passivi devono essere pertanto collocati all'interno di contenitori di dimensioni adeguate, in polipropilene o polistirolo espanso, che possono essere incollati al lato della rotaia.

Il sistema prevede l'impiego di tre schede LX. 1741 con un hub che permette l'acquisizione dei dati e l'invio in seriale, mediante una sola connessione USB, degli stessi al PC.

Ciascuna coppia di sensori deve essere collegata alla scheda LX. 1741 mediante l'impiego di cavi elettrici di sezione di  $0,3\text{ mm}^2$ .

E' necessario disporre di un PC lungo linea che permetta l'acquisizione e l'elaborazione dei dati mediante il software descritto nel capitolo 4.

Ovviamente il dispositivo progettato non è esente da ulteriori migliorie future.

In una successiva fase di sviluppo si può prevedere di dotare i sensori di una centralina di raccolta dati che, tramite un modulo di trasmissione wireless, sia in grado di trasmettere al PC (munito di un ricevitore) i dati non più in forma seriale ma in forma wireless evitando quindi l'impiego dei cavi di cablaggio.

L'introduzione del sistema wireless permetterebbe inoltre di allestire, in un'unica postazione centrale, il monitoraggio in continuo di un numero teoricamente illimitato di punti lungo linea.

Si realizzerebbero così due tipi di vantaggi:

- una riduzione dei costi di gestione e di installazione del sistema, oltre ad una riduzione dei costi di personale addetto;
- una riduzione notevole della complessità di installazione del sistema.

Le centraline di acquisizione dati potrebbero essere disposte secondo gli schemi in figura 7.9:

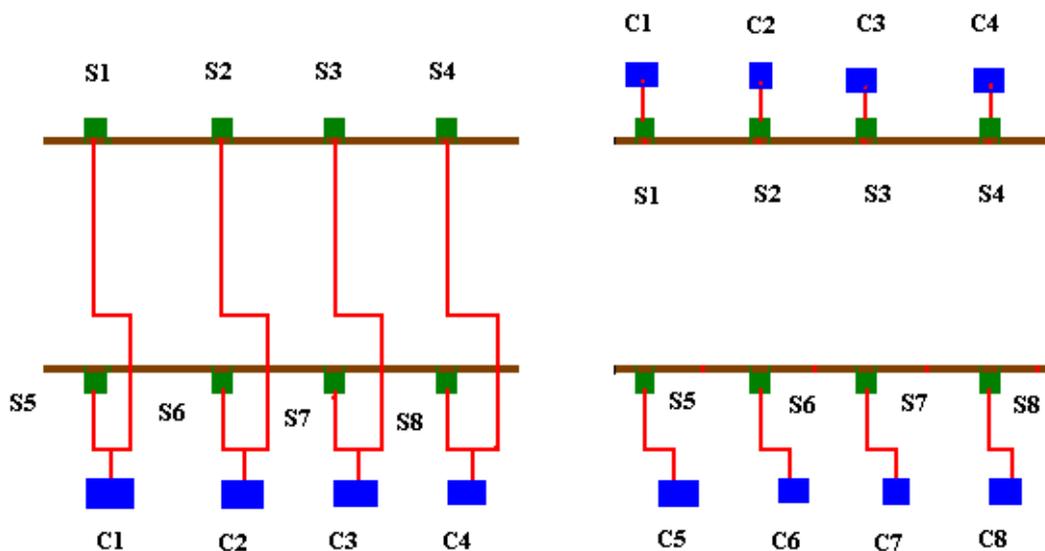


Figura 7.9 – Schemi di posa delle centraline di acquisizione dati

Nel primo schema si prevede di gestire due coppie di sensori con una sola centralina; in questo modo si utilizzerebbero 4 centraline di acquisizione dati e i cavi di collegamento tra i sensori delle due rotaie sarebbero collocati al di sotto dei binari.

## 7. IL MONITORAGGIO IN ESERCIZIO

Nel secondo schema si prevede di associare ad ogni sensore una centralina di acquisizione dati, semplificando notevolmente il collegamento sensori – centralina ma incrementando il numero delle centraline stesse da 4 a 8.

## 8. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha portato alla realizzazione di un nuovo sistema per la regolazione ed il controllo della lunga rotaia saldata. A tale scopo, sono stati studiati, progettati e collaudati tutti i componenti hardware e software.

In particolare, l'hardware è costituito da una centralina di acquisizione dati, composta da una scheda USB tipo LX. 1741 e da un sistema di alimentazione a doppia batteria in parallelo; i sensori utilizzati sono degli estensimetri ad alta precisione che permettono di rilevare lo stato di sollecitazione nella rotaia.

Il software Alpha ViBi 1.1, interamente sviluppato in ambiente Visual Basic, è in grado di acquisire i dati in ingresso, di elaborarli e di gestire le procedure di regolazione e monitoraggio della lunga rotaia saldata.

Le prove effettuate sul campo hanno confermato la validità del sistema sviluppato, mostrando come la procedura di regolazione possa essere realizzata con sufficiente precisione se monitorata con degli estensimetri applicati sulla rotaia. Ciò attesta la possibilità di utilizzare un nuovo approccio alla regolazione, che si basa sulla congruenza delle sollecitazioni e non più sulla congruenza degli spostamenti.

Inoltre, è stato verificato che il sistema è in grado di rilevare effettivamente le sollecitazioni interne alla rotaia al variare della temperatura, in particolare in fase di

temperatura crescente, anche quando gli spostamenti della rotaia risultano completamente impediti. In questo modo è possibile monitorare in esercizio la lunga rotaia saldata, adottando delle restrizioni nel caso in cui venga registrato il superamento di una sollecitazione limite di compressione, opportunamente definita, e scongiurando così il pericolo di svio dei convogli.

Tuttavia il sistema progettato non è esente da possibili sviluppi futuri, che interessano l'hardware, il software, la modalità di trasmissione dei dati e l'utilizzo degli estensimetri.

Per quanto riguarda l'hardware, la principale difficoltà riscontrata nell'utilizzo del dispositivo è relativa alle modalità di alimentazione della scheda di acquisizione dati.

La mancanza di corrente elettrica utilizzabile in sito ci ha costretto a predisporre un sistema a batterie collegato ad un diodo zener per l'abbattimento della tensione a 5 Volt. Per assicurare una maggiore stabilità dell'alimentazione, fattore che determinerebbe una minore variabilità del dato acquisito, e per eliminare il problema della breve durata delle normali batterie si potrebbe munire il sistema di batterie al litio ricaricabili.

Ciò nonostante, tale accorgimento non sarebbe adatto all'impiego per il monitoraggio in esercizio, per il quale si potrebbero sfruttare, ove esistenti, le correnti codificate di binario che sono poste alla tensione di 6 Volt.

Il software realizzato in questa prima versione è in grado di gestire tutte le funzioni fondamentali per la regolazione ed il controllo della lunga rotaia saldata. Si prevede, nei prossimi aggiornamenti, di dotare il programma della possibilità di realizzare autonomamente delle rappresentazioni grafiche dell'andamento dello stato di sollecitazione monitorato dai vari sensori, nonché di adattarlo ad eventuali evoluzioni nella modalità di acquisizione del dato.

E' opportuno sottolineare che la definizione della sollecitazione limite di compressione, utilizzata dal software per verificare che lo stato di sollecitazione non raggiunga valori tali da determinare il pericolo di slineamento del binario, è stata formulata con una prima analisi semplificata del problema strutturale. Si ritiene necessario, pertanto, sviluppare un opportuno modello strutturale del complesso rotaie – traverse – ballast basato sullo schema di due aste castrate e considerando anche elementi fondamentali quali l'interazione con i convogli ferroviari e il vincolo costituito dalla massicciata.

L'evoluzione più significativa potrebbe riguardare la modalità di trasmissione del dato tra le centraline di acquisizione (schede USB LX. 1741) e l'elaboratore, consistente nell'utilizzo della tecnologia wireless. Ciò comporterebbe di dotare ciascuna centralina di un modulo di trasmissione dati e di fornire al PC un modulo di acquisizione wireless. In questo modo sarebbe possibile gestire estensimetri collocati a distanze notevoli e monitorare da un'unica postazione tratti estesi di una o più linee.

La principale difficoltà operativa riscontrata durante l'esecuzione della prova in sito è stata la problematicità dell'incollaggio dell'estensimetro al gambo della rotaia. Infatti, se in laboratorio è stato utilizzato un provino dotato di una superficie levigata che ha permesso un incollaggio agevole e preciso, in sito si è stati costretti a operare con la superficie del gambo della rotaia che, essendo esposta agli agenti atmosferici, si è presentata fortemente arrugginita e non perfettamente levigata. L'incollaggio quindi poteva non essere garantito da un contatto perfettamente solidale tra il gambo e l'estensimetro, rischiando di inficiarne il corretto funzionamento.

Si è pertanto concluso che le difficoltà legate all'incollaggio dello strain gage renderebbero il sistema inadatto ad un agevole impiego sul campo. Il problema può essere superato incollando preventivamente l'estensimetro di misura su un apposito provino di materiale elastico collocato su un piccolo telaio di sostegno. Esso può essere reso solidale alla rotaia mediante la realizzazione di un dispositivo di ancoraggio o inganasciamento opportunamente progettato per adattarsi alla sagoma della rotaia.

# BIBLIOGRAFIA

- Nicodemi, W. (2007) *Metallurgia. Principi generali*, Bologna, Zanichelli.
- Nicodemi, W. (2009) *Acciai e leghe non ferrose*, Bologna, Zanichelli.
- Lucchini S.p.A. *Rotaie e laminati per armamento ferroviario*.  
<<http://www.lucchini.com/index.html>>, 2008.
- Norma UNI 1 aprile 2004, n. 13674, *Railway applications - Track - Rail - Vignole railway rails 46 kg/m and above*.
- Norma UNI 30 aprile 1991, n. 3141, *Rails for railroads - Types, dimensions and tolerances*.
- Norma UNI 1 dicembre 2006, n. 10027, *Designation systems for steels - Part 1: Steel names*
- Specifica tecnica 28 settembre 2004, RFI TCAR SP AR 02 001 A, *Rotaie e barre per aghi*.
- Istruzione tecnica 19 giugno 2006, RFI TC AR IT AR 07 003 A, *Istruzione sulla costituzione ed il controllo delle lunghe rotaie saldate (l.r.s.)*.
- ASM International *Thermal Properties of Metals*,  
<<http://www.asminternational.org>> (2002)
- Corvino, L. [s. d.] *La termica del binario (volume 7)*, Roma, CIFI.
- Corvino, L. [s. d.] *Costruzione, controllo e manutenzione delle lunghe rotaie saldate (volume 5)*, Roma, CIFI.
- Corvino, L. [s. d.] *Saldatura alluminotermica ed elettrica a scintillio delle rotaie*, Roma, CIFI.
- Mayer, L. (1986) *Impianti ferroviari – tecnica ed esercizio*, Roma, CIFI.
- Carrera, G. (2006) *Appunti di automazione navale I*, Genova.
- HBM *Strain gages and accessories*, <<http://www.hbm.com>>.
- HBM *La via ai trasduttori di misura*, <<http://www.hbm.com>>.

- Vishay Intertechnology, Inc. *Strain gage technology technical data*, <<http://vishaymg.com>> (2006).
- Vishay Intertechnology, Inc. *Precision strain gages*, <<http://vishaymg.com>> (2007).
- Nuova elettronica, n. 234 (2008) *Generatore di DDS da 2,3 a 2,8 Ghz*.
- Nuova elettronica, n. 239 (2009) *Scheda USB per mille applicazioni*.
- Nuova elettronica, n. 241 (2009) *Monitorare le crepe dei muri con l'USB*.
- Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (2008) *Rapporto annuale sulla sicurezza delle ferrovie*, Firenze, ANSF.
- Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (2009) *Rapporto annuale sulla sicurezza delle ferrovie*, Firenze, ANSF.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Italia (2009) *Relazione conclusiva della commissione ministeriale di indagine sugli svii avvenuti dall'08.06.2008 al 14.07.2008*, Roma.
- Toniolo, G. (1994) *Appunti di tecnica delle costruzioni: elementi strutturali in acciaio*, Milano, Masson.
- Istituto di Scienza delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano (1972) *Lezioni di scienza delle costruzioni*, Milano, Tamburini editore.
- Bracciali, A. & Delprete, C. & Pezzati, A. [s. d] *Diagnostica e monitoraggio delle rotaie ferroviarie*, Firenze.
- La Stampa (2007) *"Troppo caldo, i binari si dilatano". Le FS riducono le velocità dei treni*, Roma.
- Net Tech s.r.l. (2007) *Sistema informatizzato per rilievo, controllo, registrazione e certificazione della costituzione della lunga rotaia saldata*, Voghera.
- Net Tech s.r.l. (2007) *Controllo lunga rotaia saldata – Certirail*, Voghera.
- Davis, M. (2003) *Costruire applicazioni con Visual Basic 6.0/.NET*, [s. l.] Hoepli.
- Epsilon Technology Corp *Extensometer Catalog*, Jackson USA.