



**UNIVERSITA' "MEDITERRANEA" DI REGGIO CALABRIA
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE**

CORSO DI INFRASTRUTTURE FERROVIARIE

LECTURE 02.1 - TERMICA DEL BINARIO

Docente: Ing. Marinella Giunta



Termica del binario

La temperatura della rotaia posta all'aperto varia in relazione alle mutevoli condizioni ambientali.

Poiché la rotaia è in acciaio, se la stessa è sottoposta ad una variazione di temperatura (Δt), si allunga se la variazione è in aumento ($\Delta t > 0$) e si accorcia in caso contrario ($\Delta t < 0$).

L'entità dell'allungamento, a parità di Δt , dipende dalla natura del materiale e dalla lunghezza della barra secondo la nota relazione:

$$\Delta l = \alpha l \Delta t$$

ove per l'acciaio α **coefficiente di dilatazione termica** vale $12 \cdot 10^{-6}$ [$1/^\circ\text{C}$],).

Se la **rotaia è libera** di muoversi l'allungamento sarà pari proprio a Δl e non nasceranno sollecitazioni nella rotaia.



Allungamento/accorciamento libero della rotaia

Il tabella sono riportati i valori di allungamento della rotaia per un incremento di temperatura di 1° C.

Lunghezza rotaia	ΔL per °C
12 [m]	$12 \cdot 10^{-6} \cdot 12.000 = 0,144 [mm]$
18 [m]	$12 \cdot 10^{-6} \cdot 18.000 = 0,216 [mm]$
24 [m]	$12 \cdot 10^{-6} \cdot 24.000 = 0,288 [mm]$
30 [m]	$12 \cdot 10^{-6} \cdot 30.000 = 0,360 [mm]$
36 [m]	$12 \cdot 10^{-6} \cdot 36.000 = 0,432 [mm]$
48 [m]	$12 \cdot 10^{-6} \cdot 48.000 = 0,576 [mm]$

Nell'ipotesi che la rotaia sia libera da ogni vincolo e comunque fissa rispetto al suo punto centrale gli allungamenti o accorciamenti si svilupperanno al 50% su ciascuna testata.



Forza di trazione/compressione per compress/dilataz impedita

Qualora la dilatazione fosse del tutto impedita all'interno della rotaia nascerebbe una forza di compressione (se viene impedita la dilatazione) o di trazione (se viene impedita la compressione).

Se sottoponiamo la rotaia ad una compressione o ad una trazione longitudinale in campo elastico, vale la legge di Hooke

$$\Delta l = N \cdot l / E \cdot A$$

dove N è la forza applicata, A la sezione della rotaia, E è il modulo di elasticità dell'acciaio, pari a 20.600.000 N/cm².

È evidente che, impedendo alla rotaia di dilatarsi o contrarsi in corrispondenza di un Δt , dovrà valere la seguente uguaglianza:

$$\alpha \cdot \Delta t = N \cdot l / (E \cdot A)$$

e quindi

$$N/A = \alpha \cdot E \cdot \Delta t$$

da cui indicando con σ la tensione sulla rotaia risulta:

$$\sigma = N/A = 247 \Delta t \text{ N/cm}^2$$

e quindi la forza sulla rotaia sarà pari a

$$N = 247 A \Delta t.$$



Forza di trazione/compressione per compress/dilataz impedita

Per una variazione di temperatura di 1°C gli sforzi di trazione/compressione nel caso di dilatazione impedita risultano i seguenti:

Tipo di rotaia	Forza di compressione o trazione per ogni °C
36 UNI	1105 kg
46 UNI	1500 kg
50 UNI	1525 kg
60 UNI	1845 kg

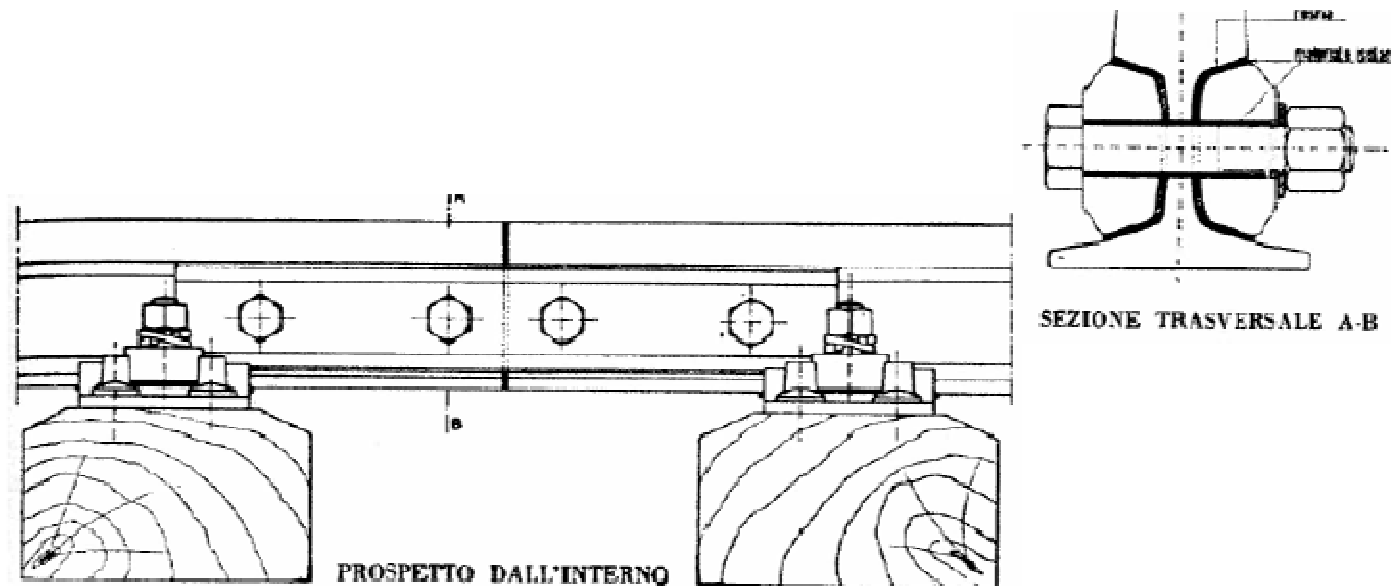


Resistenze alla dilatazione libera

Nella realtà, le rotaie giuntate poste in opera subiscono una serie di resistenze che si oppongono alla dilatazione libera.

Le resistenze alla dilatazione/contrazione libera sono:

1. Resistenza di attrito che si sviluppa nelle giunzioni tra le ganasce e le testate delle rotaie giuntate, per la pressione imposta dalle chiavarde



Resistenze alla dilatazione libera

Il valore di tale resistenza dipende soprattutto dall'entità del serraggio delle chiavarde, dalla ruvidezza dei piani a contatto e dalla loro lubrificazione. In media si può ritenere che tale resistenza sia circa **6000 kg** per ciascuna coppia di ganasce a condizione che le superfici di contatto siano lubrificate come prescritto e che le chiavarde siano state strette con le normali chiavi in dotazione

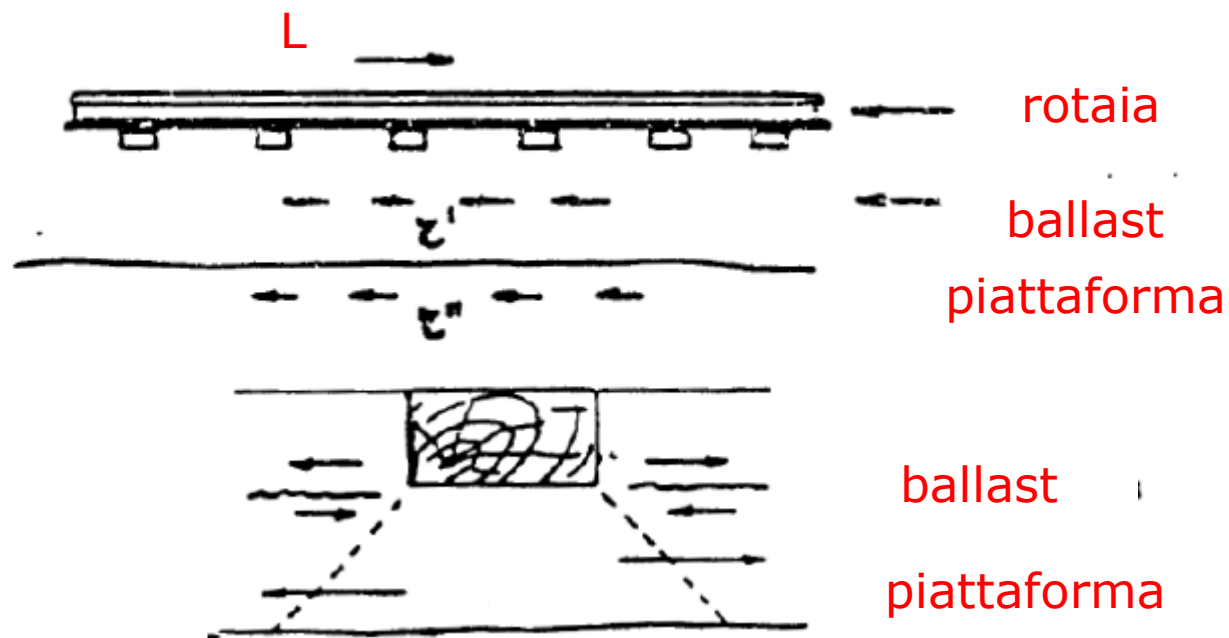
Nota la forza sviluppata da una rotaia quando viene impedita la libera dilatazione/contrazione per ogni grado di variazione di temperatura, si può calcolare quale è il salto di temperatura necessario per vincere la resistenza media di 6000 kg:

Tipo di rotaia	Salto di temperatura occorrente per vincere la resistenza d'attrito della giunzione
36 UNI	$6000 : 1105 = 5,4 \text{ } ^\circ\text{C}$
46 UNI	$6000 : 1500 = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$
50 UNI	$6000 : 1525 = 3,9 \text{ } ^\circ\text{C}$
60 UNI	$6000 : 1845 = 3,3 \text{ } ^\circ\text{C}$



Resistenze alla dilatazione libera

2. Resistenza di attrito tra il ballast e la traversa cui sono ancorate le rotaie per mezzo degli organi di attacco





Resistenze alla dilatazione libera

Sono molti gli elementi da considerare nella determinazione del valore di tale resistenza. Esperienze di campo hanno permesso di stabilire due valori medi sui quali basare il calcolo:

$r = 600$ kg per metro di rotaia, per binario tipo I

$r = 300$ kg per metro di rotaia, per binario tipo II

Calcoliamo, per esempio, la resistenza allo scorrimento di una rotaia lunga 36 m, fissata agli appoggi ma non collegata alle estremità con le rotaie adiacenti, nell'ipotesi di binario tipo I ($r = 600 \text{ Kg/m}$).

*Consideriamo il punto centrale C. 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 T in testa non incontra alcuna resistenza, mentre il punto prossimo al centro incontra la massima resistenza pari a $600 \text{ Kg/m} * L/2 = 600 * 18 = 10.800 \text{ Kg}$.*



Resistenze alla dilatazione libera

I valori della resistenza massima degli appoggi per ciascuna rotaia sono riportati nella seguente tabella:

lunghezza della rotaia	Resistenza allo scorrimento	
	r = 300 kg/m	r = 600 kg/m
m 12	1.800 kg	3.600 kg
m 18	2.700 kg	5.400 kg
m 24	3.600 kg	7.200 kg
m 30	4.500 kg	9.000 kg
m 36	5.400 kg	10.800 kg
m 48	7.200 kg	14.400 kg



Resistenze alla dilatazione libera

Il salto di temperatura necessario a far sorgere nella rotaia la forza di compressione o di trazione occorrente per far superare la resistenza allo scorrimento degli appoggi è riportato nella seguente tabella:

Salto di temperatura in °C necessario per superare la resistenza degli appoggi ($r = 600 \text{ Kg/m}$)				
Lunghezza della rotaia (metri)	TIPO DI ROTAIA			
	36 UNI	46 UNI	50 UNI	60 UNI
12	3,2	2,4	2,4	2
18	4,8	3,6	3,6	3
24	6,4	4,8	4,8	4
30	8	6	6	4,8
36	9,8	7,2	7	5,8
48	13	9,6	9,4	7,8





Resistenze alla dilatazione libera

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

Per esempio, in una rotaia di 36 metri del tipo 60 UNI per superare la resistenza degli appoggi occorre un salto di temperatura = 6°C

La variazione di lunghezza per °C in regime di dilatazione libera = 0,43 mm

La variazione di lunghezza della rotaia alla fine del salto termico  :
 $0,5 \times 0,43 \times 6 = 1,3$ mm

Per diversi tipi e lunghezze di rotaia la tabella seguente riporta la variazione di lunghezza cos  calcolata:



Resistenze alla dilatazione libera

Variazione di lunghezza della rotaia (mm) dalla condizione di riposo fino al superamento della resistenza degli appoggi ($r = 600 \text{ kg/m}$)				
Lunghezza della rotaia (metri)	TIPO DI ROTAIA			
	36 UNI	46 UNI	50 UNI	60 UNI
12	0,2	0,2	0,2	0,1
18	0,5	0,4	0,4	0,3
24	0,9	0,7	0,7	0,6
30	1,4	1,1	1,1	0,9
36	2,1	1,5	1,5	1,3
48	3,8	2,8	2,7	2,3

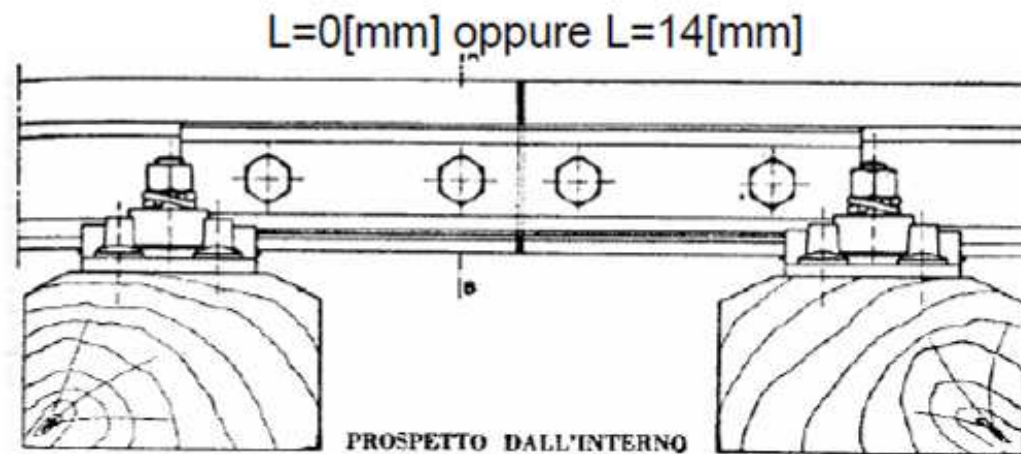
Per quanto riguarda infine la forza interna (di compressione o di trazione) che sorge nella rotaia per presenza del vincolo, essa ha valore zero in testata, dove la rotaia è libera, e valore massimo pari alla resistenza allo scorrimento al centro.

In definitiva l'effetto di una variazione di temperatura ΔT su una rotaia si esplica in una dilatazione se la rotaia è libera, in una forza interna se la rotaia non è libera di dilatarsi, parte in dilatazione e parte in forza interna, se la resistenza del vincolo è limitata e viene superata per l'insorgere della forza interna medesima.



Resistenze alla dilatazione libera

3. **Ostacolo a successive dilatazioni delle rotaie** quando la dilatazione chiude le luci di dilatazione interposte tra le testate delle rotaie attigue e le testate sono a contatto



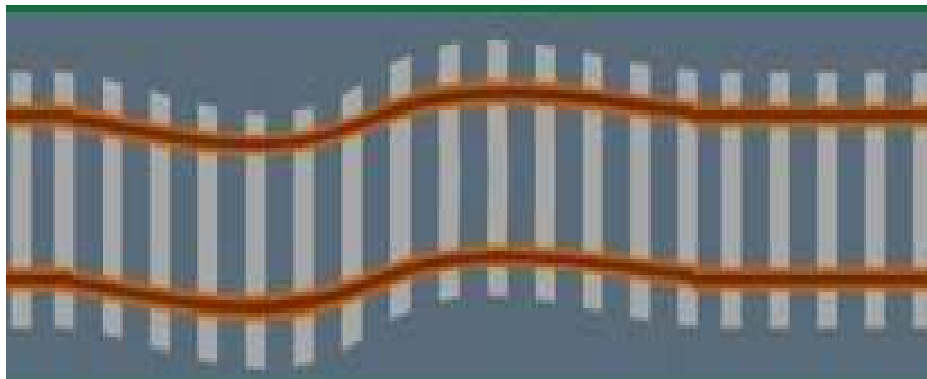
3. **Ostacolo a successive contrazioni delle rotaie** quando si raggiunge la luce massima di 14 mm che gli organi di attacco possono permettere



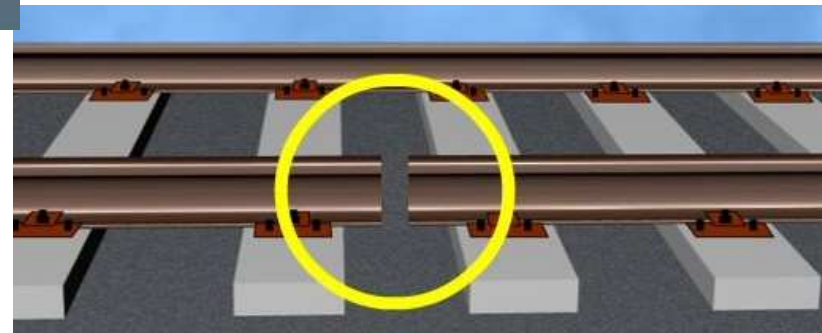
Fenomeni di slineamento/rottura

I vincoli all'allungamento e accorciamento della rotaia determinano rispettivamente sollecitazioni di compressione e trazione nella rotaia.

All'aumentare della temperatura si possono avere fenomeni di slineamento per instabilità flessionale a compressione, mentre al diminuire della temperatura si possono avere rotture delle rotaie per eccessiva trazione



Slineamento



Rottura





Modalità di posa in opera del binario

- 1) Si misura la temperatura delle rotaie sul gambo in posizione non esposta al sole;
- 2) Sulla tabella della rispettiva categoria si legge la luce di posa corrispondente alla temperatura rilevata;
- 3) Il rilievo della temperatura va ripetuto man mano che si procede nella posa;
- 4) Le rotaie vanno posizionate sugli attacchi cercando di ottenere luci di posa corrette;
- 5) Rincalzatura e riguarnitura del ballast;
- 6) Le luci vengono realizzate interponendo fra le testate delle rotaie piastrine metalliche di spessore variabile da 1 a 10 mm., luci maggiori si ottengono utilizzando più piastrine in parallelo;
- 7) Le piastrine vanno tolte subito dopo la posa, ad evitare che aumenti di temperatura non vengano imprigionate;
- 8) Si montano gli organi di attacco previa lubrificazione con olio e grafite



Tabella delle luci di posa

Lunghezza rotaia in [m]	LUCI DI POSA IN [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 IN °C																			
9	35	26	17	8	-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	27	18	9	-1	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	34	27	20	13	6	-1	-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28	21	14	7	0	-7	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	33	28	24	19	14	10	5	0	-4	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	29	25	20	15	11	6	1	-3	-8	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	33	29	25	22	18	15	11	8	4	1	-3	-6	-10	-	-	-	-	-	-
	29	26	30	19	16	12	9	5	2	-2	-5	-9	-	-	-	-	-	-	-
30	32	29	26	24	21	18	15	12	10	7	4	1	-2	-4	-7	-	-	-	-
	30	27	25	22	19	16	13	11	8	5	2	-1	-3	-6	-9	-	-	-	-
36	32	29	27	25	22	20	18	15	13	11	8	6	4	1	-1	-3	-6	-8	-10
	30	28	26	23	21	19	16	14	12	9	7	5	2	0	-2	-5	-7	-9	-
48	31	30	28	26	24	23	21	19	17	16	14	12	10	9	7	5	3	2	0
	29	27	25	24	22	20	18	17	15	13	11	10	8	6	4	3	1	-1	-

Binario di tipo I

Le luci di dilatazione su riportate sono riferite ad un binario con attacchi indiretti in numero maggiore o uguale al 30% su ballast normale.



Tabella delle luci di posa

ESCURSIONE DELLE TEMPERATURE DA - 10°C A +60°C PER UNA TEMPERATURA DI POSA DI 31°C	Lunghezza rotaia in [m]	LUCI DI POSA IN [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 IN °C																		
9	35	26	17	8	-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	27	18	9	-1	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	34	27	20	13	6	-1	-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	28	21	14	7	0	-7	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	33	28	24	19	14	10	5	0	-4	-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	29	25	20	15	11	6	1	-3	-8	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	33	29	25	22	18	15	11	8	4	1	-3	-6	-10	-	-	-	-	-	-	
	29	26	30	19	16	12	9	5	2	-2	-5	-9	-	-	-	-	-	-	-	
30	32	29	26	24	21	18	15	12	10	7	4	1	-2	-4	-7	-	-	-	-	
	30	27	25	22	19	16	13	11	8	5	2	-1	-3	-6	-9	-	-	-	-	
36	32	29	27	25	22	20	18	15	13	11	8	6	4	1	-1	-3	-6	-8	-10	
	30	28	26	23	21	19	16	14	12	9	7	5	2	0	-2	-5	-7	-9	-	
48	31	30	28	26	24	23	21	19	17	16	14	12	10	9	7	5	3	2	0	
	29	27	25	24	22	20	18	17	15	13	11	10	8	6	4	3	1	1	-1	

Binario di tipo II

Le luci di dilatazione su riportate sono riferite ad un binario con attacchi indiretti in numero minore al 30% su ballast ghiaioso.





Modalità di posa in opera del binario

Nelle gallerie poiché il binario è esposto a sbalzi di temperatura molto limitati, la posa delle rotaie va sempre eseguita con luce di dilatazione nulla.

Le luci di dilatazione delle giunzioni di rotaie isolate elettricamente, per circuiti di binario, vengono calcolate come da tabelle precedenti maggiorate di 5 mm, in quanto 5 mm è lo spessore dello strato dielettrico interposto tra le testate delle due rotaie.

Se la giunzione è formata da rotaie di diversa lunghezza il valore della luce si calcola in funzione della media delle lunghezze delle rotaie.





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 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 si possono distinguere le seguenti fasi:

- 1) *dilatazione parzialmente impedita*, che si verifica in temperatura crescente o decrescente fino a quando non saranno superate le resistenze;
- 2) *dilatazione libera*, che si verifica quando, vinte tutte le resistenze, la rotaia si dilata (o si ritira) seguendo la legge della libera dilatazione;
- 3) *dilatazione totalmente impedita* che si verifica quando si raggiunge, in temperatura decrescente, l'apertura massima delle luci consentita dalla geometria dell'organo di giunzione (14 mm), o in temperatura crescente, la chiusura totale delle luci.



Ciclo termico della rotaia

Esempio

Consideriamo una fila di rotaie del tipo 60 UNI da 36 metri, posate alla temperatura di 15°C, appartenente a un binario di tipo I ($r = 600$ kg/m). Al momento della posa le luci risultano di 7 mm, supponiamo di studiare il primo ciclo termico delle rotaie, nelle ipotesi che la temperatura cresca da +15°C a +60°C e decresca di nuovo sino a -10°C, toccando cioè i valori dell'escursione termica normale in Italia.

Per la rotaia in questione:

- ✓ *Forza di trazione compressione per ogni °C = 1850 kg*
- ✓ *Salto termico per vincere la resistenza degli organi di attacco 3,3°C*
- ✓ *Resistenza offerta dagli organi di appoggio = $36 \cdot 600 \cdot 0,5 = 10800$ kg*
- ✓ *Salto termico per superare la resistenza agli appoggi = 5,8°C*





Ciclo termico della rotaia

a) Aumento di temperatura da +15°C a +18,3°C

In un primo tempo la resistenza opposta dalle ganasce di giunzione allo scorrimento di ciascuna rotaia impedisce la dilatazione. In ogni sezione della rotaia l'aumento di temperatura determina una forza di compressione crescente, che raggiunge il valore di 6.000 kg, pari alla resistenza massima della giunzione, dopo un salto di temperatura di 3,3°.

In definitiva alla temperatura di 18,3°C la rotaia risulta compressa da una forza di 6000 kg, la luce ha ancora il valore iniziale di 7 mm.





Ciclo termico della rotaia

b) Aumento di temperatura da +18,3°C a + 24°C

Superata la temperatura di 18,3°C, vinta quindi la resistenza della giunzione, la testata della rotaia si muove e, crescendo ancora la temperatura per altri 5,8°C, cioè fino a circa 24°C, si muoveranno gli altri punti della rotaia fino al centro, man mano che nei punti stessi si supera la resistenza allo scorrimento degli appoggi.

Alla temperatura di 24°C si avrà un aumento di lunghezza di ogni rotaia di 1,3 mm e di conseguenza una riduzione di 1,3 mm della luce fra una rotaia e l'altra.

A tale temperatura dunque la forza di compressione risulta di 6.000 kg in testata di $6.000+10.800=16.800$ kg al centro della rotaia ed assume valori intermedi negli altri punti, la luce ha valore di 5,7 mm.



Ciclo termico della rotaia

c) Aumento di temperatura da + 24°C a +37°C

Superate a 24°C tutte le resistenze d'attrito la rotaia si dilata fino alla chiusura delle luci, come se fosse libera. A quale temperatura si chiudono le luci? La rotaia dovrà allungarsi ancora di 5,7mm e si può imporre tale proporzione:

$$\Delta T: 5,7 = 1: 0,43$$

Da questa proporzione si ricava:

$$\Delta T = \frac{5,7}{0,43} = 13^{\circ}C$$

La chiusura delle luci avviene quindi alla temperatura di $24^{\circ} + 13^{\circ} = 37^{\circ}C$

A tale temperatura dunque, la forza di compressione rimane di 6.000 kg in testata e di 16.800 kg al centro della rotaia, la luce ha valore zero.





Ciclo termico della rotaia

d) Aumento di temperatura da +37°C a +60°C

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 di valore proporzionale al salto stesso. Se, come ipotizzato si raggiungessero i 60°C, il salto termico risulterebbe di 23°C e l'aumento della forza di compressione risulterebbe di 42.435 kg. Alla temperatura di 60°C dunque la forza di compressione risulta in testata pari a 48.435 kg, al centro $16.800+42.435=59.235$ kg, la luce ha valore zero.





Ciclo termico della rotaia

e) Diminuzione della temperatura da +60°C a +37°C

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 scendendo la temperatura fino a 37°C la forza di compressione in ogni punto della rotaia diminuisce rispetto al valore di 42.435 kg. Dunque a tale temperatura la forza di compressione risulta pari a 6.000 kg in testata, 16.800 kg al centro della rotaia, la luce ha valore zero.

f) Diminuzione della temperatura da +37°C a 33,7°C

Il salto termico di 3,3°C determina una ulteriore diminuzione dello sforzo di compressione della rotaia pari a 6.000 kg.

Per cui a +33,7°C si ha, una forza di compressione pari a zero in testata e $16.800 - 6.000 = 10.800$ kg al centro della rotaia, la luce ha valore zero.





Ciclo termico della rotaia

g) Diminuzione della temperatura da + 33,7°C a +30,4°C

Se la rotaia fosse libera dal vincolo della giunzione, un ulteriore abbassamento della temperatura farebbe spostare almeno la testata e determinerebbe quindi l'apertura della luce. Ma la testata non può spostarsi prima che venga superata la resistenza d'attrito della giunzione, il cui valore è di 6.000 kg. Quindi l'apertura della luce, almeno in testata, non potrà verificarsi prima che insorga per effetto della variazione di temperatura una forza di trazione pari a 6.000 kg. Ciò avviene per un salto di temperatura di -3,3°C cioè a +30,4°C. Dunque alla temperatura di 30,4°C si ha una forza di trazione pari a 6.000 kg in testata, una forza di compressione pari a $10.800 - 6.000 = 4.800$ kg al centro, con variazioni lineari nei punti intermedi, una luce ancora nulla.





Ciclo termico della rotaia

h) Diminuzione della temperatura da +30,4°C a 19°C

A 30,4°C può avere inizio l'apertura della luce, poiché in testata si è raggiunta una forza di trazione di 6.000 kg, pari alla resistenza d'attrito della giunzione. Scendendo la temperatura al di sotto di 30,4°C, a partire dalla testata verso il centro, cresce nella rotaia la forza di trazione, fino a superare in ogni punto la resistenza complessiva, allo scorrimento verso il centro, degli appoggi e delle giunzioni.

A quale temperatura tutta la semirotaia supera la resistenza complessiva dei vincoli?

Perché ciò avvenga, al centro della rotaia si dovrà avere una forza di trazione pari alla somma di 10.800 kg (resistenza allo scorrimento degli appoggi di una semirotaia) e di 6000 kg (resistenza di attrito della giunzione) uguale cioè a 16.800 kg.

Se inoltre si tiene conto che a 30,4°C al centro della rotaia vi è ancora una forza di compressione di 4.800 kg il salto di temperatura deve essere tale da annullare questa compressione. Si ha quindi:



Ciclo termico della rotaia

- per annullare la forza di compressione di 4.800 kg

$$\Delta T' = \frac{4.800}{1.845} = 2,6^{\circ}\text{C}$$

- per indurre una forza di trazione di 16.800 kg

$$\Delta T'' = \frac{16.800}{1.845} = 9^{\circ}\text{C}$$

Complessivamente ci vorrà un salto di temperatura di $-11,6^{\circ}\text{C}$. Quindi alla temperatura della rotaia di circa 19°C ($30,4-11,6$) $^{\circ}\text{C}$, la contrazione subita risulta doppia rispetto alla variazione di 1,3 mm calcolata al punto b). La rotaia si accorcia, perciò, di 2,6 mm ed uguale valore assume la luce. Riassumendo alla temperatura di 19°C la forza di trazione vale 6.000 kg al centro della rotaia, la luce risulta di 2,6 mm.



Ciclo termico della rotaia

i) Diminuzione della temperatura da +19°C a -7,5°C

Superate tutte le resistenze di attrito, la rotaia si accorcia, in conseguenza della diminuzione di temperatura, seguendo la legge della dilatazione libera, fino all'apertura completa delle luci.

Il salto di temperatura necessario per indurre un accorciamento della rotaia di altri 11,4 mm e quindi per portare la luce dal valore precedente di 2,6 mm al valore massimo di 14 mm si ricava dalla proporzione:

$$\Delta T: 11,4 = 1: 0,43$$

Da cui risulta

$$\Delta T = \frac{11,4}{0,43} = 26,5^{\circ}\text{C}$$

La completa apertura delle luci si ha quindi alla temperatura di $19^{\circ} - 26,5^{\circ} = -7,5^{\circ}\text{C}$; a tale temperatura la forza di trazione risulta pari a 6.000 kg in testata e a 16.800 kg al centro della rotaia, la luce ha il valore massimo di 14 mm.





Ciclo termico della rotaia

j) Diminuzione della temperatura da -7,5°C a -10°C

In questo intervallo di temperatura la rotaia è impedita di accorciarsi dagli organi di giunzione: ogni diminuzione di temperatura al di sotto di -7,5°C determina soltanto una variazione della forza di trazione. Tale forza per un salto di temperatura di -2,5°C, sarà cresciuta in tutta la rotaia del valore :

$$2,5 \times 1.845 = 4.612 \text{ kg}$$

A -10°C si avrà quindi, una forza di trazione di $6.000 + 4.612 = 10.612$ kg in testata e di $16.800 + 4.612 = 21.412$ kg al centro della rotaia, la luce ha valore massimo di 14 mm.





Ciclo termico della rotaia

k) Aumento di temperatura da -10°C a $-7,5^{\circ}\text{C}$

Finché in ogni punto la rotaia risulta tesa, ovviamente essa non potrà allungarsi per effetto dell'aumento di temperatura: l'unico effetto dell'aumento di temperatura sarà una diminuzione della forza di trazione (come nella dilatazione impedita).

Nell'intervallo considerato la forza di trazione diminuisce in ogni punto del valore di 4.612 kg calcolato al punto precedente. Alla temperatura di $-7,5^{\circ}\text{C}$ la forza di trazione vale 6.000 kg in testata e 16.800 kg al centro della rotaia, la luce ha valore 14 mm.





Ciclo termico della rotaia

l) Aumento di temperatura da $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Questo salto di temperatura di $+3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ determina un'ulteriore diminuzione di 6.000 kg della forza di trazione in ogni punto della rotaia. Per cui a $-4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ la forza di trazione risulta pari a zero in testata, a $16.800 - 6.000 = 10.800$ kg al centro della rotaia, la luce ha ancora valore di 14 mm.

m) Aumento di temperatura da $-4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$

A causa della resistenza di attrito della giunzione, la testata della rotaia non può spostarsi finché in essa non si accumulino, per effetto della variazione della temperatura, una forza di compressione pari a 6.000 kg. Ciò avviene evidentemente per un salto di temperatura di $+3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, cioè a $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A questa temperatura di circa $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ si ha una forza di compressione di 6.000 kg in testata, una forza di trazione di $10.800 - 6.000 = 4.800$ kg al centro della rotaia, la luce massima è di 14 mm.





Ciclo termico della rotaia

n) Aumento di temperatura da -1°C a $+10,6^{\circ}\text{C}$

Superata la resistenza della giunzione, per l'effettivo scorrimento la rotaia deve superare la resistenza di attrito degli appoggi.

Perché la rotaia superi la resistenza complessiva dei vincoli, al centro della rotaia si dovrà avere una forza di compressione pari a 16.800 kg (somma della resistenza di giunzione e di quella degli appoggi).

Il salto di temperatura deve quindi annullare la forza di trazione di 4.800 kg tuttora presente e indurre la forza di compressione di 16.800 kg. Essa avrà quindi il valore di $+11,6^{\circ}\text{C}$, come calcolato al punto h). La rotaia analogamente si allunga, alla fine del salto termico considerato, di 2,6 mm.

In definitiva alla temperatura di $+10,6^{\circ}\text{C}$ la forza di compressione vale 6.000 kg in testata e 16.800 kg al centro della rotaia, la luce ha valore di 11,4 mm.





Ciclo termico della rotaia

o) Aumento di temperatura da $+ 10,6^{\circ}\text{C}$ a $+ 37^{\circ}\text{C}$

Superate tutte le resistenze, la rotaia, con l'aumento della temperatura si dilata seguendo la legge della dilatazione libera. La chiusura della luce avverrà per un allungamento della rotaia di 11,4 mm, dopo un salto di temperatura di $26,5^{\circ}\text{C}$ e quindi di nuovo a circa 37°C . A tale temperatura poiché la rotaia si trova nella medesima condizione calcolata al punto c), la forza di compressione è di 6.000 kg in testata e di 16.800 kg al centro. La luce ha valore zero.

Si chiude a questo punto il ciclo termico.



Ciclo termico della rotaia

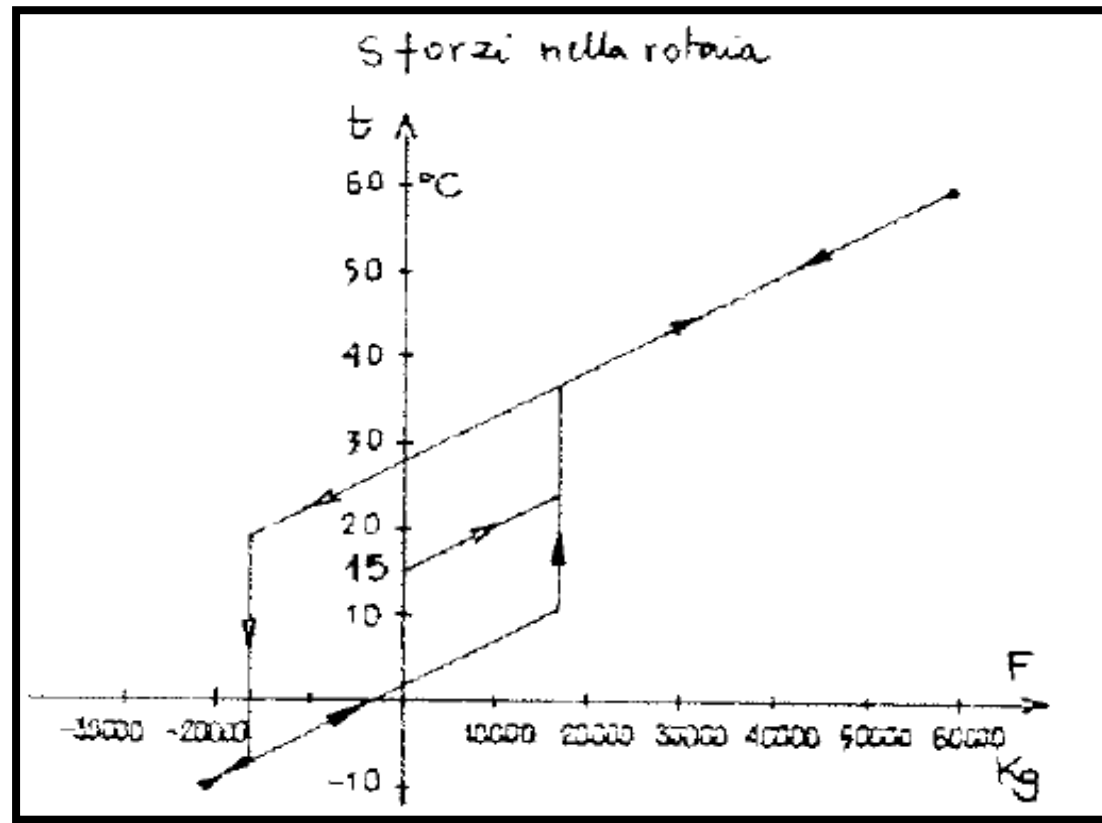
Si chiude a questo punto il ciclo termico. Nella seguente tabella sono riportati, per ciascuna temperatura, i valori della forza di compressione o di trazione nella rotaia ed i corrispondenti valori della luce.

Temperatura °C	Forza di compressione (+) o di trazione (-) in kg nella rotaia vincolata da 36 m tipo 60 UNI posata a 15°C		Luce mm
	In mezzeria	In testata	
+15	0	0	7
+18,3	+6000	+6000	7
+24	+16800	+6000	5,7
+37	+16800	+6000	0
+60	+59235	+48435	0
+37	+16800	+6000	0
+33,7	+10800	0	0
+30,4	+4800	-6000	0
+19	-16800	-6000	2,6
-7,5	-16800	-6000	14
-10	-21412	-10612	14
-7,5	-16800	-6000	14
-4,2	-10800	0	14
-1	-4800	+6000	14
+10,6	+16800	+6000	11,4
+37	+16800	+6000	0

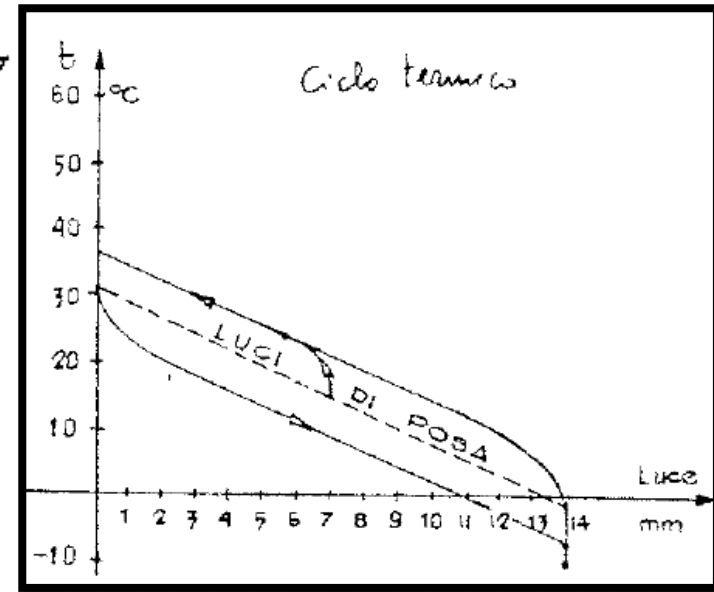
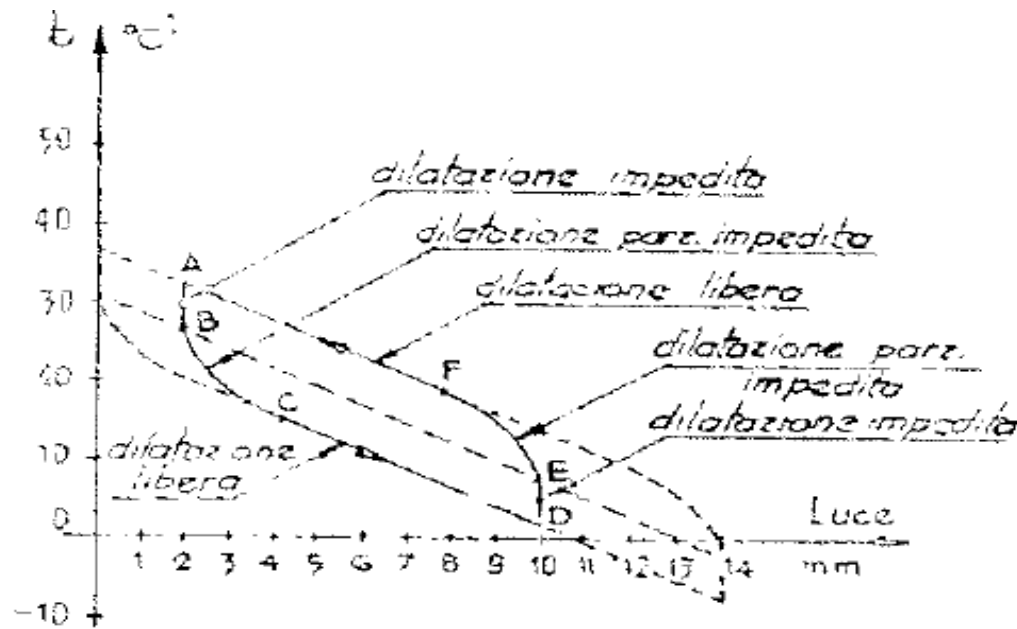


Ciclo termico della rotaia

Nella seguente tabella sono riportati, per ciascuna temperatura, i valori della forza di compressione o di trazione nella rotaia ed i corrispondenti valori della luce.



Ciclo termico della rotaia



La lunga rotaia saldata

All'aumentare della lunghezza della rotaia aumenta la resistenza di attrito e la rotaia così può non essere tutta interessata alla variazione di lunghezza.

Si definisce **lunghezza limite o critica l_c** la lunghezza della rotaia per la quale la somma delle resistenze d'attrito eguaglia la forza termica indotta dal massimo valore dell'escursione stagionale.

La **lunghezza critica l_c** è quella lunghezza per cui si ha:

$$R_g + r_m \cdot \frac{l_c}{2} = N_{\max} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot A$$

Essendo $\alpha E = 237$ si ha:

$$R_g + r_m \cdot \frac{l_c}{2} = N_{\max} = 237 \cdot \Delta T \cdot A$$

$$l_c = 237 \cdot \Delta T \cdot A - R_g \cdot \frac{2}{r_m}$$

Δt escursione massima rispetto al valore medio della temperatura di esercizio

R_g resistenza alle giunzioni

r_m resistenza di attrito agli appoggi



La lunga rotaia saldata

La lunga rotaia saldata è pertanto una rotaia in cui esiste un **tronco centrale immobile** ($L - L_c$) che rimane ferma durante la massima escursione termica alla quale può essere soggetta.

Vantaggi della lunga rotaia saldata:

- **riduce la resistenza a rotolamento** per il ridotto numero di giunzioni e quindi riduce l'energia complessivamente richiesta per la trazione;
- **riduce i costi di manutenzione** del binario e delle scorte di magazzino per la riduzione del numero delle giunzioni.
- **riduce i costi di manutenzione del materiale rotabile.**

L'escursione di temperatura prevista è fra $- 10 \text{ °C}$ e $+ 60 \text{ °C}$

La massima sollecitazione di trazione è: $E(60 + 10) = 9,48 \text{ kN/cm}^2$

Temperatura di regolazione: 30 °C per linee ordinarie

La massima sollecitazione di compressione è: $E(60 - 30) = 7,11 \text{ kN/cm}^2$

Temperatura di regolazione: 35 °C per linee ad alta velocità

La massima sollecitazione di compressione è: $E(60 - 35) = 5,93 \text{ kN/cm}^2$





La lunga rotaia saldata

La **lunga rotaia saldata** ha i seguenti vantaggi:

- migliore comfort di viaggio;
- minore usura dell'armamento e del rodiggio;
- minori costi di manutenzione e sostituzione dei collegamenti di testata.

Ha tuttavia le seguenti limitazioni:

- non può essere inserita su tracciati con raggi planimetrici inferiori a 300-400 m;
- deve essere interrotta in corrispondenza di alcuni tipi di deviatori (a cuore di rotaia assemblato) di giunti incollati (per il segnalamento) o di ponti in ferro senza massicciata.

