	FERROVIAS **TENSÕES NOS TRILHOS**	Prof.. Eduardo C. S. Thomaz Notas de aula

Verificação das tensões nos trilhos

Dormentes de Madeira

- O peso do trem é descarregado sobre os trilhos.
- Os trilhos se apóiam sobre os dormentes.
- Os dormentes distribuem o peso do trem sobre a camada de pedra britada.
- A camada de pedra britada se apóia sobre o terreno.
- O peso do trem é bastante “espalhado” até chegar ao terreno natural.

Dormentes de Madeira

- Dormentes de eucalipto, classificados pela Norma NBR 7511, tanto para ferrovias como metrovias.
- As dimensões são especificadas pelo projetista, observando os limites estabelecidos na Norma:

bitola	comprimento (m)		largura (m)		altura (m)	
	min	max	min	max	min	max
1,000	1,90	2,00	**0,22**	**0,24**	**0,16**	**0,17**
1,435	2,55	2,65				
1,600	**2,65**	**2,80**				
tolerâncias	0,05(m)		0,01(m)		0,015(m)	

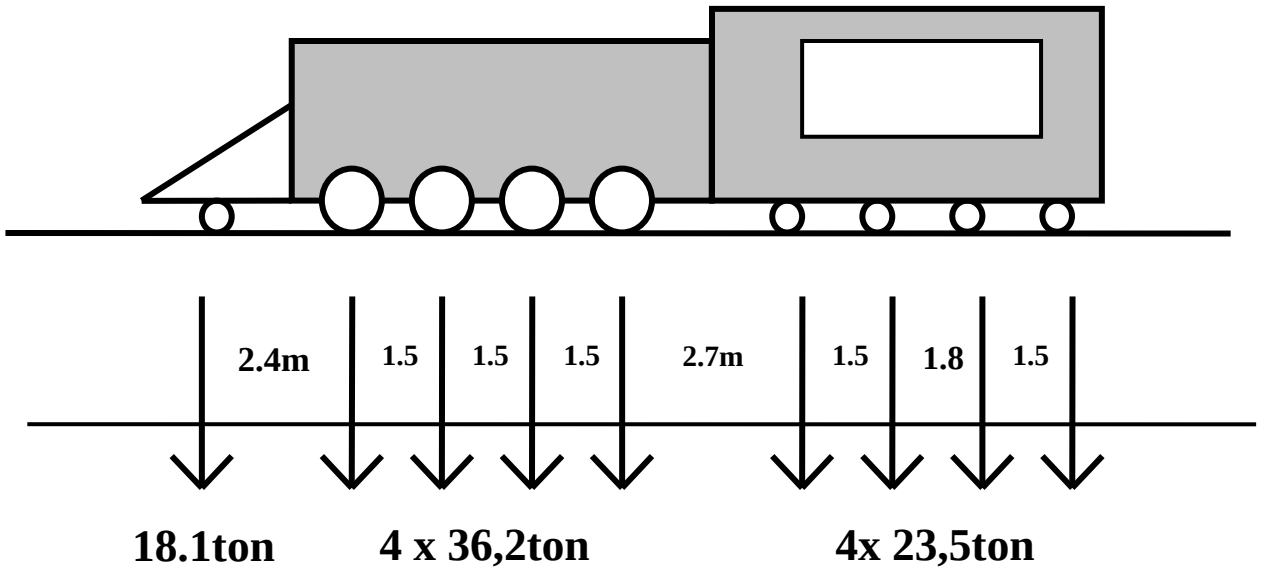
Dormentes de Concreto

- *Dormentes de madeira eram os mais usados nas ferrovias.*
- *Para reduzir o corte de árvores e para aumentar a durabilidade estão sendo substituídos por dormentes de concreto.*
- *Estão sendo usados também dormentes de aço.*
- *A última pesquisa é o uso de dormentes fabricados com plástico reciclado de garrafas PET ou com borracha de pneus velhos.*
- *Os dormentes de madeira duram de 15 a 20 anos, o de aço, de 35 a 40 anos e a expectativa para o concreto é ainda maior. Para o plástico ainda não há uma medição precisa.*

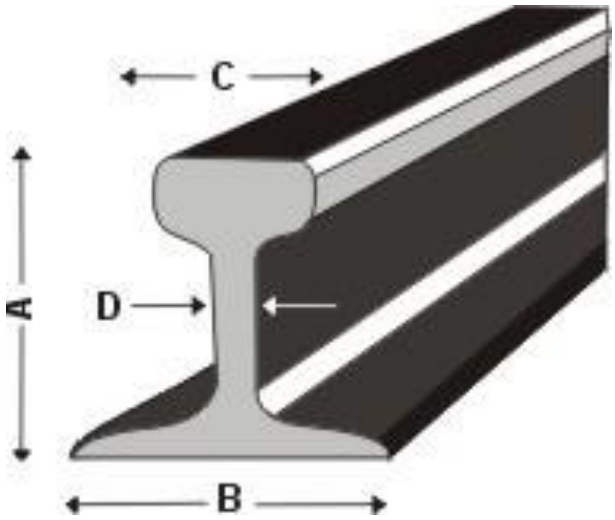
Dormente de Concreto

Trem Tipo - Cargas por eixo

Locomotiva Cooper 80



Trilhos



Trilhos		Dimensões				Módulo de Resistência	
		(mm)				W (cm3)	
TR	Kg/m	A	B	C	D	Boleto	Patim
25	**24,6**	**98,4**	**98,4**	**98,4**	**54,0**	**81.6**	**86,7**
32	**32,0**	**112,7**	**112,7**	**112,7**	**61,1**	**120,8**	**129,5**
37	**37,1**	**122,2**	**122,2**	**122,2**	**62,7**	**149,1**	**162,9**
45	**44,6**	**142,9**	**142,9**	**130,2**	**65.1**	**205,6**	**249,7**
50	**50,3**	**152,4**	**152,4**	**136,5**	**68,2**	**247,4**	**291,7**
57	**56,9**	**168,3**	**168,3**	**139,7**	**69,0**	**294,8**	**360,7**
68	**67,6**	**185,7**	**185,7**	**152,4**	**74,6**	**391,6**	**463,8**

TRILHOS		Dimensões mm			Módulo de Resistência cm³		
TR	Kg/m	A	B	C	D	Boleto	Patim
25	24,6	98,4	98,4	54,0	11,1	81,6	86,7
32	32,0	112,7	112,7	61,1	12,7	120,8	129,5
37	37,1	122,2	122,2	62,7	13,5	149,1	162,9
45	44,6	142,9	130,2	65,1	14,3	205,6	249,7
50	50,3	152,4	136,5	68,2	14,3	247,4	291,7
57	56,9	168,3	139,7	69,0	15,9	294,8	360,7
68	67,6	185,7	152,4	74,6	17,5	391,6	463,8

Segundo Winkler e Zimmermann, em uma viga contínua sobre base elástica, sujeita à aplicação de uma carga concentrada, o momento fletor vale:

$$M = \left(\frac{PL}{4}\right) \times \frac{\left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{x}{L}\right)\right]}{e^{\left(\frac{x}{L}\right)}} \qquad \text{onde:} \qquad L = \sqrt[4]{\frac{4 \times E \times I}{C \times b}}$$

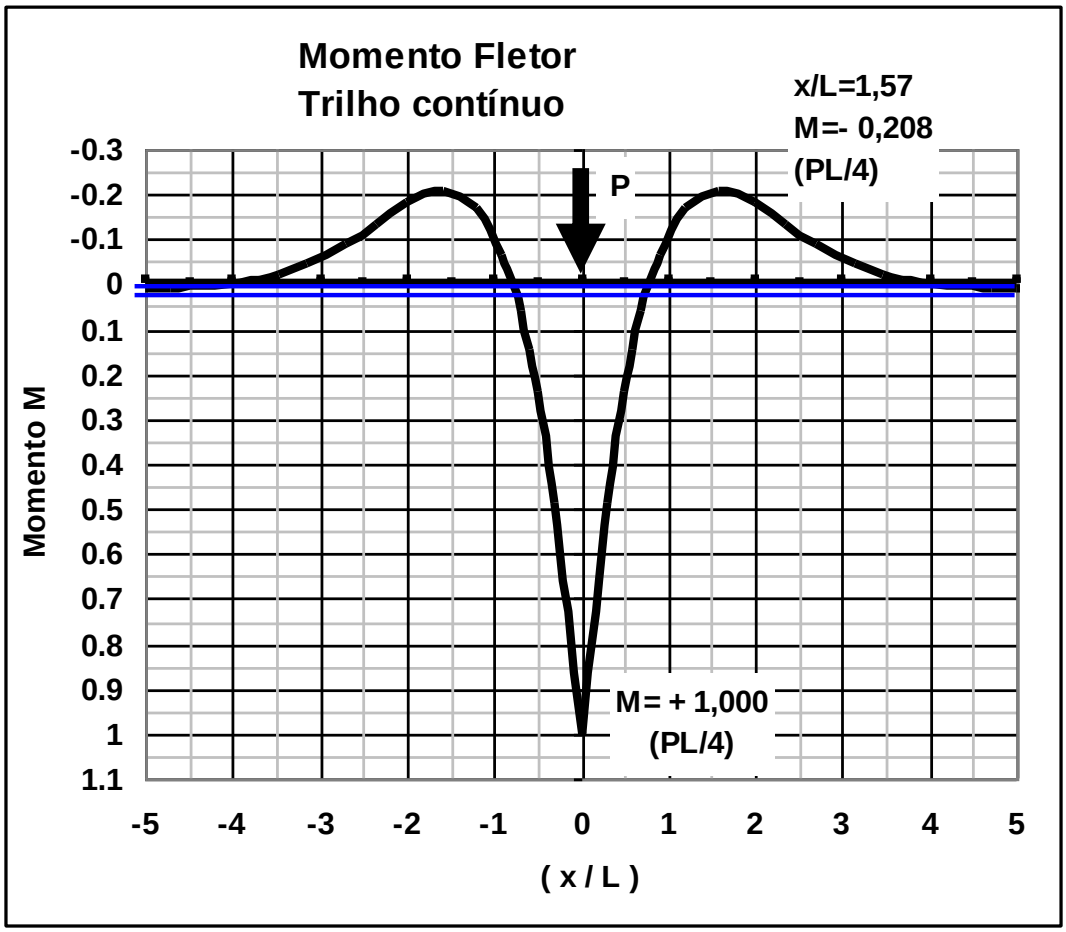
x = distância da seção ao ponto de aplicação da carga.

E = módulo de elasticidade da viga

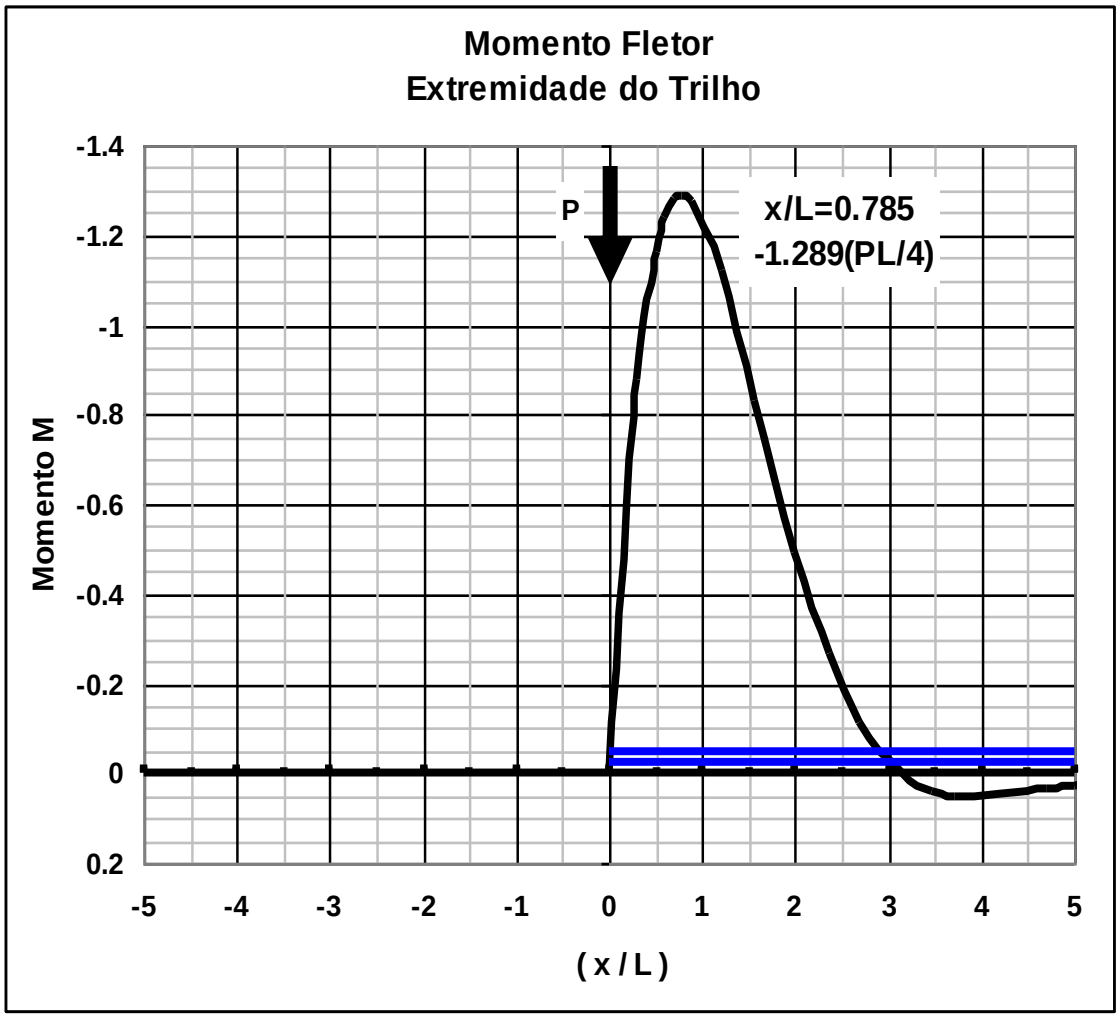
I = momento de inércia da viga (cm^4)

C = coeficiente de recalque da base, ($kgf/cm^3 = \frac{\left(kgf/cm^2\right)}{cm}$)

b = largura da viga (cm)



Ver L adiante .

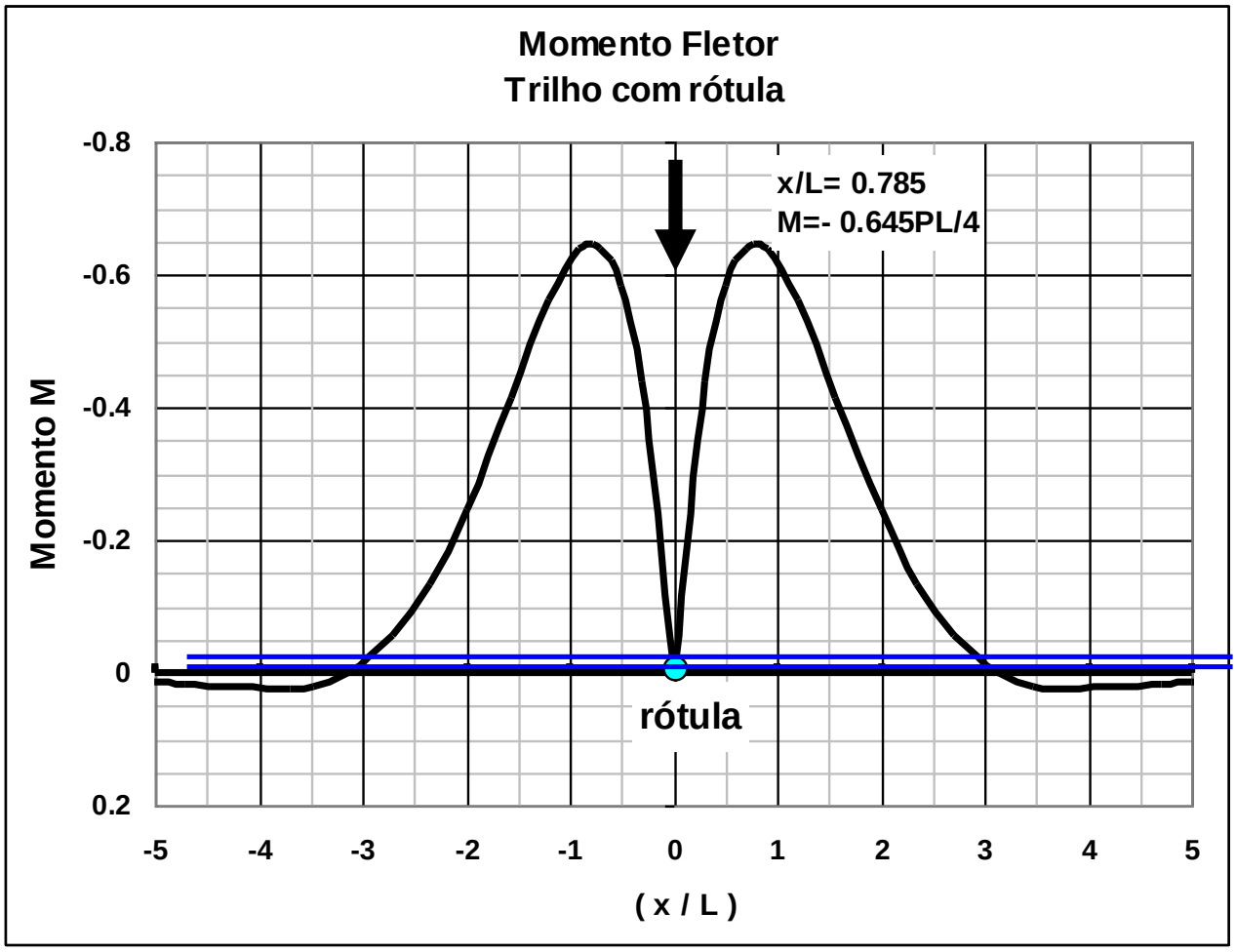


O momento fletor no trilho para uma carga P atuando na extremidade do trilho vale:

$$M = -\left[4 \times \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{x}{L}\right)}{e^{\left(\frac{x}{L}\right)}} \right] \times \left(\frac{P \times L}{4} \right)$$

O momento máximo vale : $Mmáx. = -1{,}289 \times \left(\frac{P \times L}{4} \right)$

Ver L adiante .



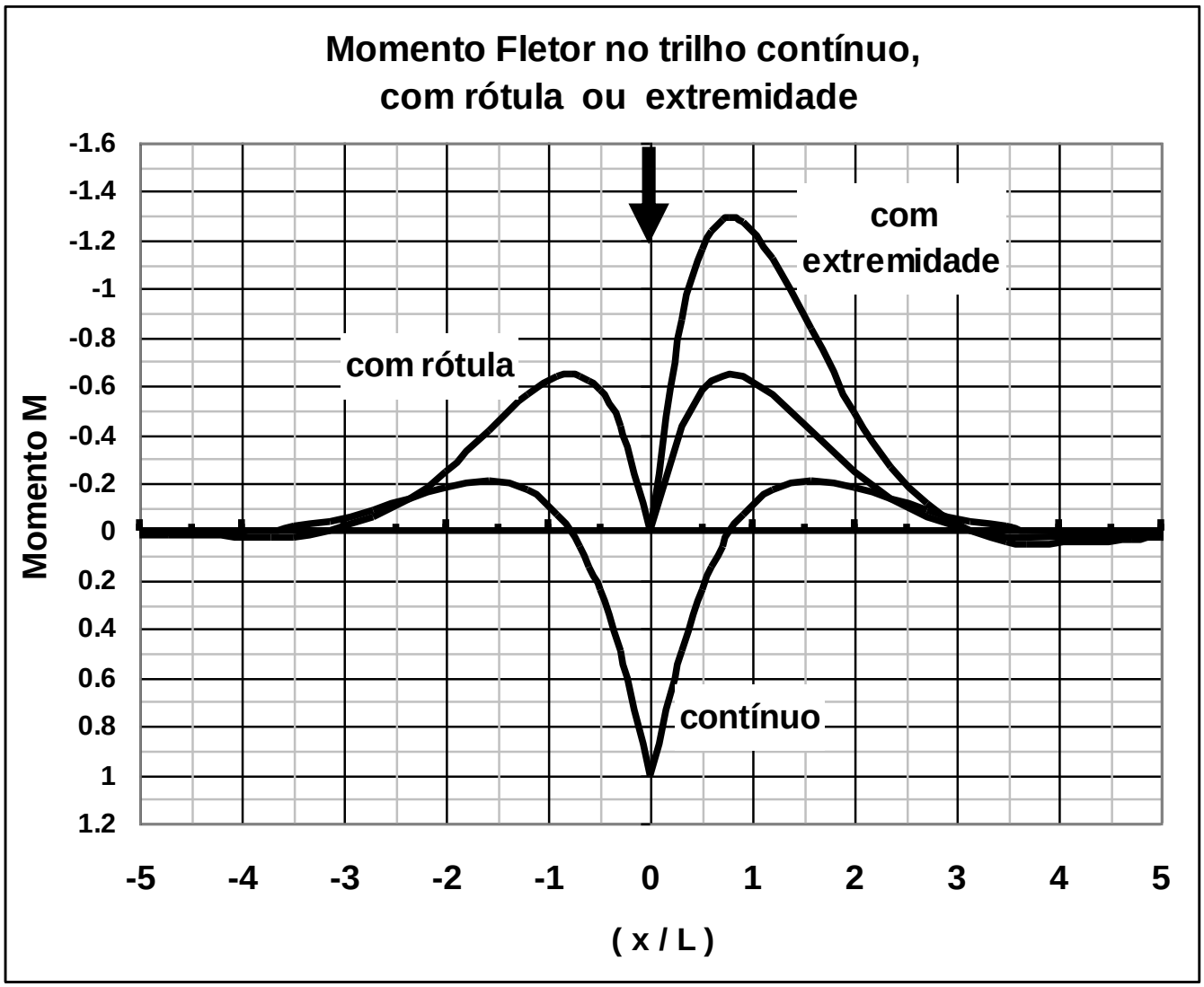
O momento fletor no trilho para uma carga P atuando na extremidade do trilho vale:

$$M = -\left[2 \times \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{x}{L}\right)}{e^{\left(\frac{x}{L}\right)}} \right] \times \left(\frac{P \times L}{4} \right)$$

O momento máximo vale : $M_{máx.} = -0{,}645 \times \left(\frac{P \times L}{4} \right)$

Ver L adiante .

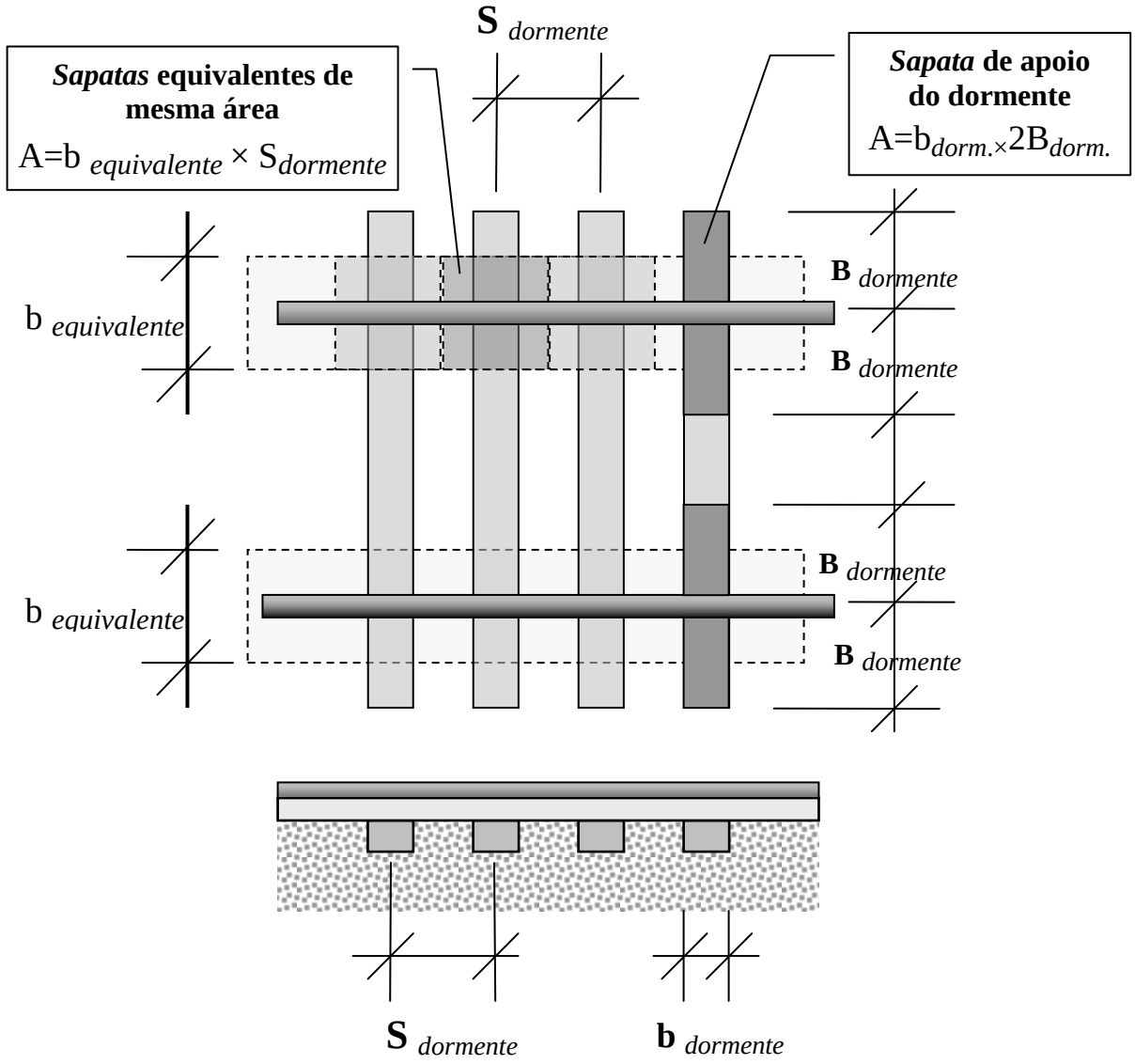
Resumo



Ver L adiante .

No caso de uma ferrovia, com os trilhos apoiados em dormentes transversais, segundo H. Saller , no livro *"Einheitliche Berechnung des Eisenbahnoberbaues"* , ver referência em Robert Hanker : *"Eisenbahnoberbau"* **:**

$$\mathbf{L} = \sqrt[4]{\frac{4 \times E \times I}{C \times b_{equivalente}}} \qquad \text{com} \quad b_{equivalente} = \left(\frac{b_{dormente} \times \left(2 \times B_{dormente} \right)}{S_{dormente}} \right)$$



Para se obter a largura equivalente para uma viga continua equivalente aos dormentes, iguala-se a área da sapata de apoio do dormente à área da viga equivalente **:**

$$b_{dormente} \times \left(2 \times B_{dormente}\right) = b_{equivalene} \times S_{dormente}$$

$$b_{equivalente} = \frac{b_{dormente} \times \left(2 \times B_{dormente}\right)}{s_{dormente}}$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \times E \times I}{C \times b_{equivalente}}} = \sqrt[4]{\frac{4 \times E \times I}{C \times \left(\frac{b_{dormente} \times \left(2 \times B_{dormente}\right)}{s_{dormente}}\right)}}$$

C= coeficiente de recalque da base , (kgf / cm^3) = $\frac{\left(kgf / cm^2\right)}{cm}$

Com base em ensaios e medições feitos nas ferrovias européias, pode-se estimar o valor do coeficiente de recalque C :

Valores do coeficiente de recalque C= $\frac{\left(\mathbf{kgf / cm^2}\right)}{\mathbf{cm}}$,
segundo Robert Hanker, em "Eisenbahnoberbau".

Sub-leito		**argila rija**	**argila dura, areia compacta**	**solo residual em corte, rocha**
Faixa de valores		5 a 10	10 a 20	20 a 50
Valor proposto	*Lastro com brita*	5	15	25
	Lastro com Seixo rolado	5	10	15

E = módulo de elasticidade do trilho (2 100 000 kgf /cm^2)

I = momento de inércia do trilho em cm^4 (TR68 J =3949cm^4)

$b_{dormente.}$ = largura do dormente (cm) = (24cm)

$B_{dormente.}$ = comprimento do balanço do dormente, medido a partir do eixo do trilho (cm) = ≈ 60cm.

s = espaçamento entre os eixos dos dormentes (cm) = 55 cm

Coeficiente de recalque

Valores do coeficiente de recalque $\frac{\left(\mathbf{kgf/cm^2}\right)}{\mathbf{cm}}$, *segundo* ***Terzaghi.***

Ver: "Fundações"- Volume 1- pág. 169 - Dirceu A. Velloso e Francisco R. Lopes - 1996

Argila		**Rija**	**Muito rija**	**Dura**
Faixa de valores		1,6 a 3,2	3,2 a 6,4	> 6,4
Valor proposto para argilas		2,4	4,8	9,6
Areia		**Fofa**	**Méd. compacta**	**Compacta**
Faixa de valores		0,6 a 1,9	1,9 a 9,6	9,6 a 32
Valor proposto para areias	*acima do* N.A.	1,3	4,2	16
	abaixo do N.A	0,8	2,6	9,6

- O coeficiente de recalque do subleito pode ser avaliado na obra com um ensaio de placa.
- Aplica-se uma carga na placa, divide-se a carga P*(kgf)* pela área da placa A *(cm^2)* e obtêm-se a pressão aplicada ao solo $\sigma\left(\text{kgf}/\text{cm}^2\right)$.
- Mede-se o recalque $\delta(\text{cm})$.
- A relação, pressão / recalque , $\sigma\left(\text{kgf}/\text{cm}^2\right)/\ \delta(\text{cm})$, é o valor do coeficiente de recalque C.
- Outra maneira de estimar o valor de C $\left(\text{kgf}/\text{cm}^3\right)$ é a correlação com o ensaio CBR, conforme indicado pelo relatório 330R-92 do Comitê ACI 330 "*Guide for Design and Construction of Concrete Pavements"*. – editado por Richard O. Albright - 1992.

"Guide for Design and Construction of Concrete Pavements" *Relatório ACI 330R-92*			
Tipo de solo	Qualidade do Suporte	**C** $\frac{\left(\text{kgf}/\text{cm}^2\right)}{\text{cm}}$	CBR
Solos finos onde predominam partículas de silte e argila	baixo	2,1 *a* 3,3	2,5 *a* 3,5
Misturas de areia e seixos com quantidade moderada de silte e areia	médio	3,6 *a* 4,7	4,5 *a* 7,5
Misturas de areia e seixos relativamente livres de finos	alto	5,0 *a* 6,1	8,5 *a* 12

Exemplo :

Com C= $5\ \frac{\left(kgf/cm^2\right)}{cm}$

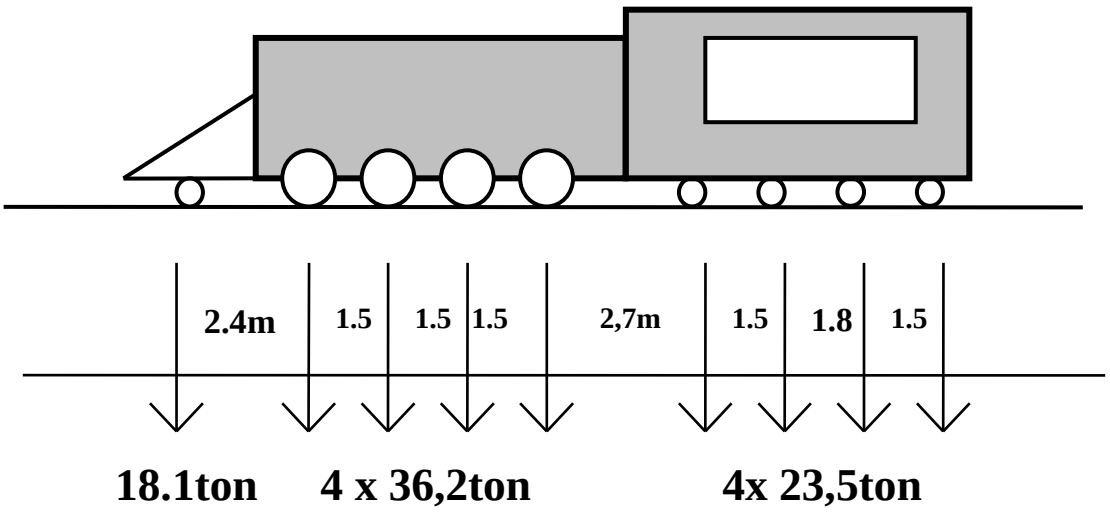
$$b_{equivalente} = \frac{b_{dormente} \times \left(2 \times B_{dormente}\right)}{s} = \frac{24cm \times (2 \times 60cm)}{55cm} = 52,4cm$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \times E \times J}{C \times b_{equivalente}}} = \sqrt[4]{\frac{4 \times 2100000\left(\frac{kgf}{cm^2}\right) \times 3949cm^4}{5\left(\frac{kgf}{cm^2}\right) \times 52,4cm}} = 106cm$$

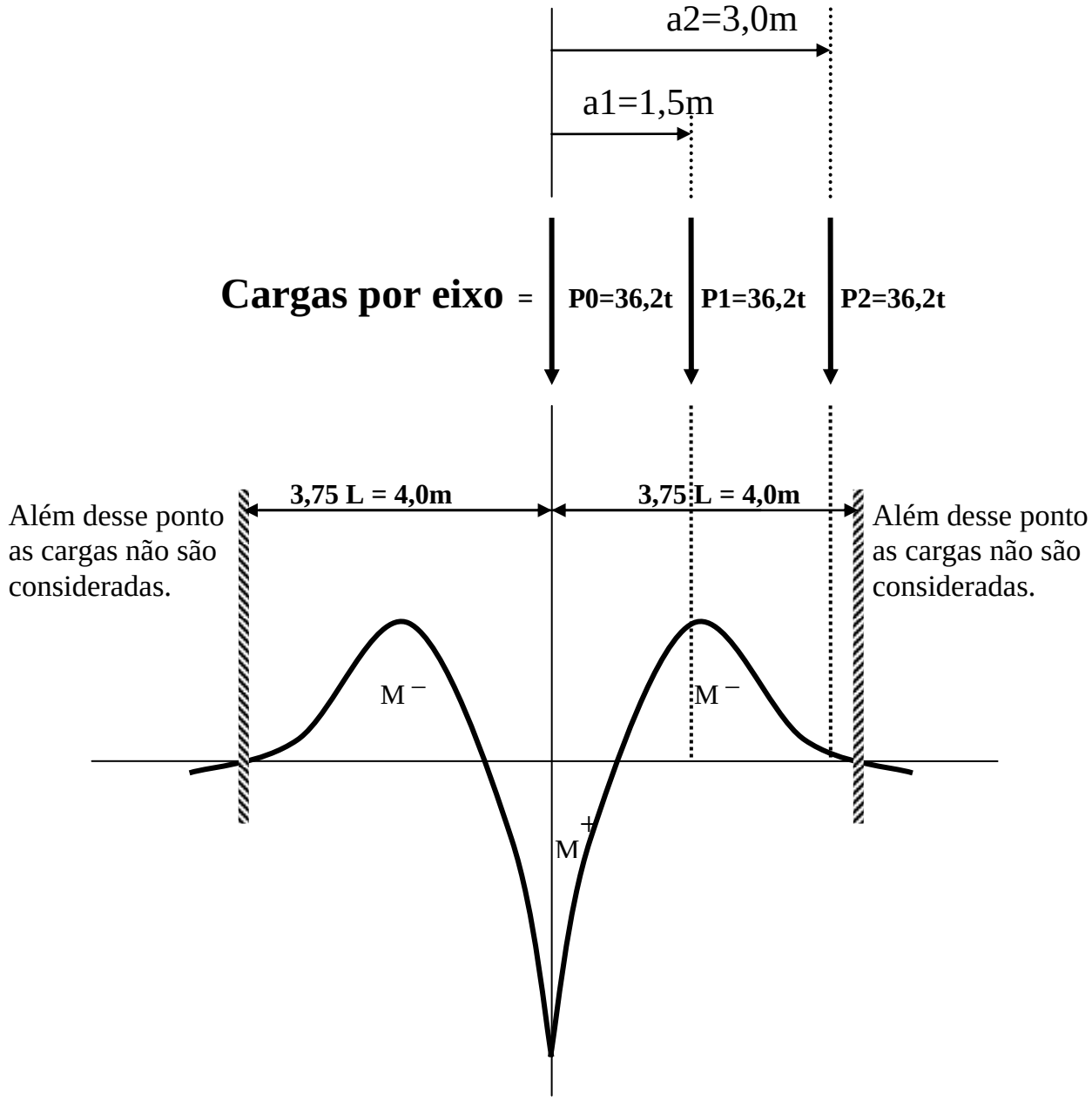
Limite externo do trecho de influência = 3,75×L = 4,0 m

Ponto de momento fletor máximo negativo = 1,57×L =1,66m

Para o exemplo em questão, considerando a passagem de uma locomotiva Cooper E80, teremos uma roda sobre a seção, causando momento fletor positivo, e duas rodas causando momento fletor negativo.



Ver a posição dos eixos na figura adiante. As cargas mostradas são as cargas de cada eixo. Para cálculo do trilho, dividir a carga do eixo por dois, para termos as cargas em cada roda.



Pelo Método de Winkler + Zimmermann + H. Saller, segundo Robert Hanker:

$$M = \frac{PL}{4} \times \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{x}{L}\right) \right] \times e^{\left(-\frac{x}{L}\right)} = \frac{PL}{4} \times \mu \quad \text{com:}$$

$$\mu = \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{x}{L}\right) \right] \times e^{-\left(\frac{x}{L}\right)}$$

Carga P0 = (36,2 / 2) t =18,1t / roda x/L=0 μ0 = **1,0000**

Carga P1 = (36,2/2) t = 18,1t / roda x/L = 150cm / 106cm = 1,41

$$\mu 1 = \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{x}{L}\right) \right] \times e^{-\left(\frac{x}{L}\right)} =$$

$$\mu 1 = \left[\cos\left(1{,}41_{\ radianos}\right) - \operatorname{sen}\left(1{,}41_{\ radianos}\right) \right] \times e^{-1{,}41} =$$

$$\mu 1 = [+0{,}1601 - 0{,}9871] \times 0{,}2441 = -\mathbf{0{,}20187}$$

Carga P2 = (36,2/2) t =18,1t / roda x/L = 300cm / 106cm = 2,82
300/71=4,22

$$\mu 2 = \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{x}{L}\right) \right] \times e^{-\left(\frac{x}{L}\right)} =$$

$$\mu 2 = \left[\cos\left(2{,}82_{\ radianos}\right) - \operatorname{sen}\left(2{,}82_{\ radianos}\right) \right] \times e^{-2{,}82} =$$

$$\mu 2 = [(-0{,}9487) - (0{,}3161)] \times 0{,}05960 = -\mathbf{0{,}07538}$$

Momento fletor em *um trilho* seguindo o método de Winkler + Zimmermann + H.Saller :

$$M = \left(\frac{P \times L}{4}\right) \times (\mu 0 + \mu 1 + \mu 2)$$

$$M^{(+)} = \left(\frac{18{,}1\text{t} \times 1{,}06\text{m}}{4}\right) \times [\, 1{,}00 - 0{,}20187 - 0{,}07538 \,] = 3{,}47 \text{ tm}$$

Variando o coeficiente C, *os momentos fletores variam.*

C (kgf/cm2)/cm	L (cm)	M (+) (t.m)
5	106	3,47
25	71	2,66

Efeito da Velocidade do trem

$$k_V = \left(1 + \frac{[V\,(\text{km/h})]^2}{30000}\right)$$

Para V = 50 km/h ; $k_V = \left(1 + \frac{50^2}{30000}\right) = 1{,}08$

$$M = 1{,}08 \times 3{,}47 \text{ tm} = 3{,}75 \text{ tm}$$

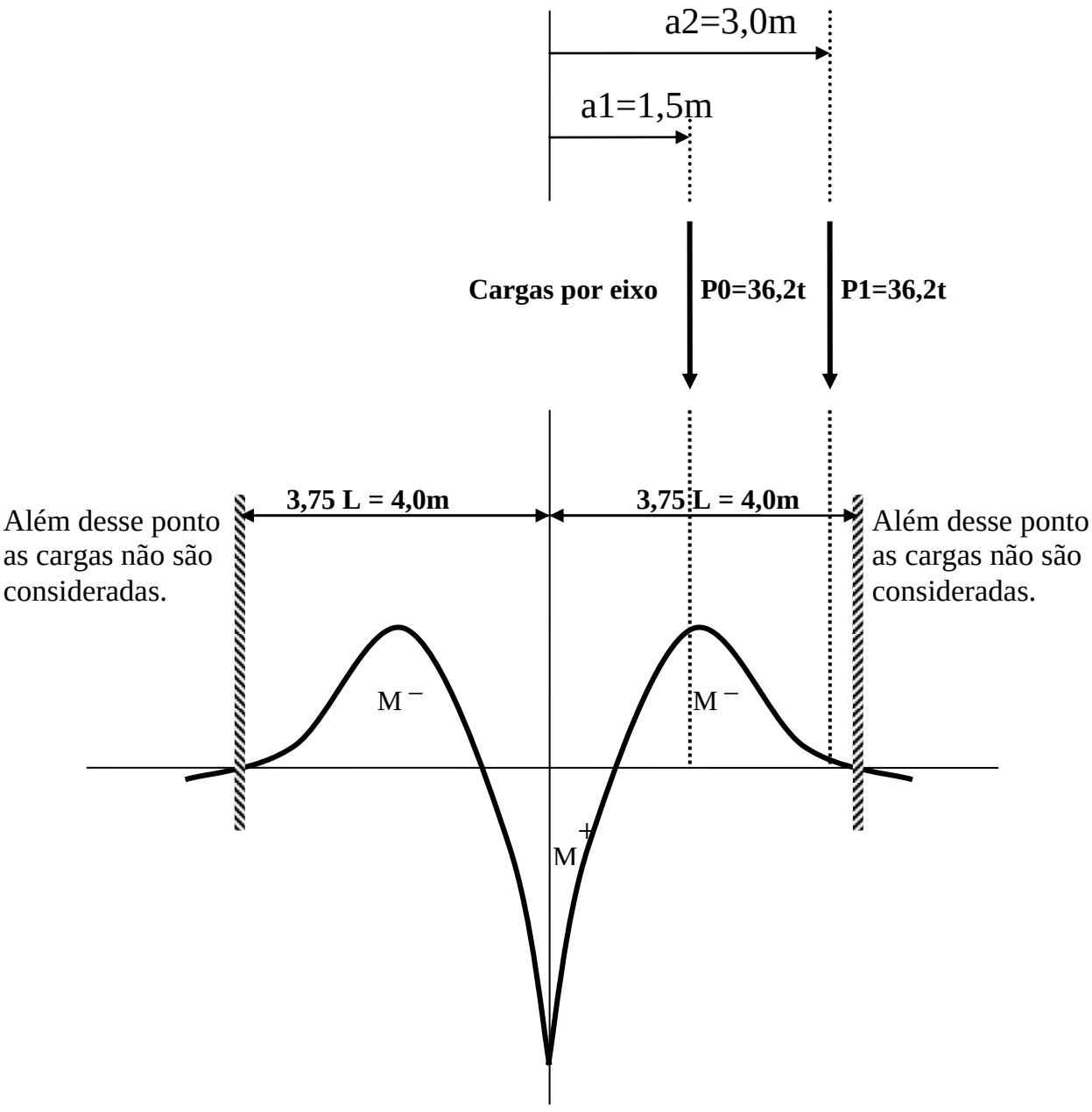
Tensão no trilho TR68 :

W *boleto* = 391,6 cm^3
W *patim* = 463,8 cm^3

$$\sigma_{boleto} = \frac{3{,}75 \times 1000 \times 100 \ kgf.cm}{391{,}6 cm3} = 957 \left(\frac{kgf}{cm^2}\right) \text{ compressão}$$

$$\sigma_{patim} = -\frac{3{,}75 \times 1000 \times 100 \text{ kgf.cm}}{463{,}8\text{cm}3} = -808 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right) \text{ tração}$$

Considerando o momento fletor negativo máximo:



Carga P0= (36,2/2) t = 18,1t / roda x/L = 150cm / 106cm = 1,41

$$\mu 0 = \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) - \text{sen}\left(\frac{x}{L}\right)\right] \times e^{-\left(\frac{x}{L}\right)} =$$

$$\mu 0 = \left[\cos\left(1{,}41\ _{radianos}\right) - \text{sen}\left(1{,}41\ _{radianos}\right)\right] \times e^{-1{,}41} =$$

$$\mu 0 = [+0{,}1601 - 0{,}9871] \times 0{,}2441 = -0{,}20187$$

Tensão no trilho TR68 :

W *boleto* = 391,6 cm^3
W *patim* = 463,8 cm^3

$$M^{(-)} = \left(\frac{P \times L}{4}\right) \times (\ \mu 0\ ) = (\ 18{,}1\ t \times 1{,}06m\ /4) \times (-\ 0{,}20187\ ) = -\ 0{,}968\ tm$$

$$k_V = \left(1 + \frac{[V\ (km/h)]^2}{30000}\right)$$

Para V = 50 km/m ; $k_V = \left(1 + \frac{50^2}{30000}\right) = 1{,}08$

$$M = 1{,}08 \times 0{,}968\,tm = 1{,}045\ tm$$

$$\sigma_{boleto} = \frac{-1{,}045 \times 1000 \times 100\ kgf.cm}{391{,}6cm3} = -267\left(\frac{kgf}{cm^2}\right)\ \text{tração}$$

$$\sigma_{patim} = \frac{-(-1{,}045) \times 1000 \times 100\ \text{kgf.cm}}{463{,}8\text{cm}3} = 225\left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)\ \text{compressão}$$

$$M^{(+)} = \left(\frac{18{,}1t \times 1{,}06m}{4}\right) \times [\ 1{,}00 - 0{,}20187 - 0{,}07538\ ] = +3{,}47\ tm$$

$$\sigma_{boleto} = \frac{3{,}75 \times 1000 \times 100\ kgf.cm}{391{,}6cm3} = 957\left(\frac{kgf}{cm^2}\right)\ \text{compressão}\ <\ 1500\ \text{kgf/cm2}$$

$$\sigma_{patim} = -\frac{3{,}75 \times 1000 \times 100\ \text{kgf.cm}}{463{,}8\text{cm}3} = -808\left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)\ \text{tração} < 1500\ \text{kgf/cm2}$$

Fadiga do aço do trilho , segundo o diagrama de Goodmann :

Tensão média $\sigma m = \frac{957 + (-267)}{2} = 345 kgf/cm2$

$$af = \sigma f \times \left(1 - \frac{\sigma m}{\sigma R}\right) = 4520\left(kgf/cm^2\right) \times \left(1 - \frac{345\left(kgf/cm^2\right)}{8600\left(kgf/cm^2\right)}\right) = 4339\left(kgf/cm^2\right)$$

$$\sigma \max = \sigma m + af = 345 + 4339 = 4684 kgf/cm2$$

Coeficiente de segurança =2,0

Tensão admissível necessária = 4684 /2 = 2342 kgf/cm2

Tensão admissível normalmente usada = 1500 kgf /cm2 OK

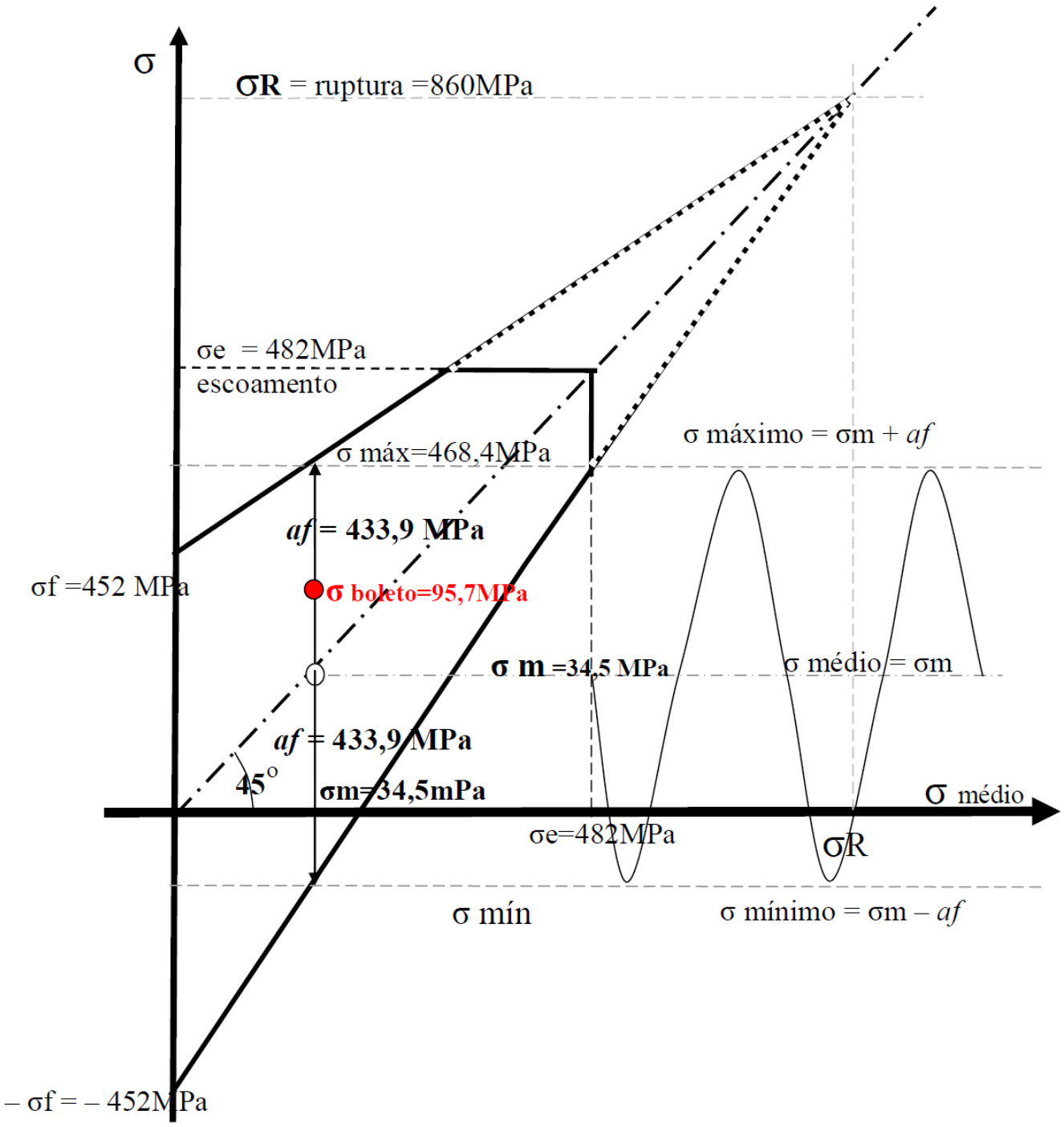
Ver os ensaios de fadiga nas páginas 45/96 e 50/96 .

↓

↓

SEGUE

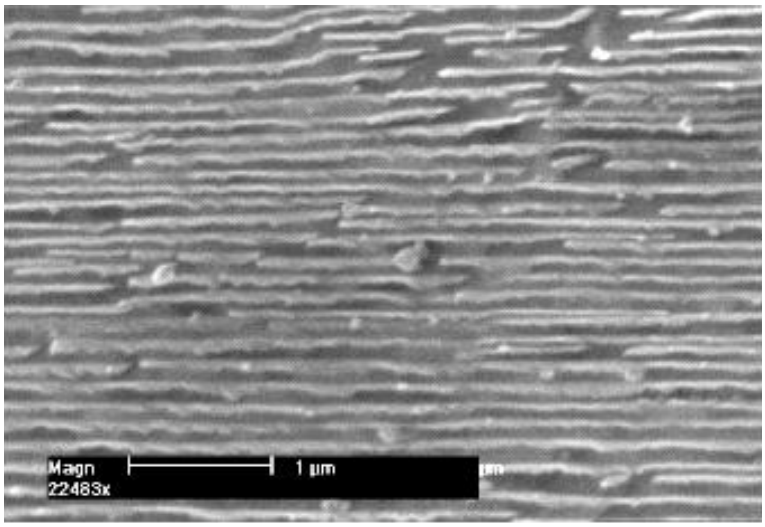
Diagrama de Goodman (sem escala)



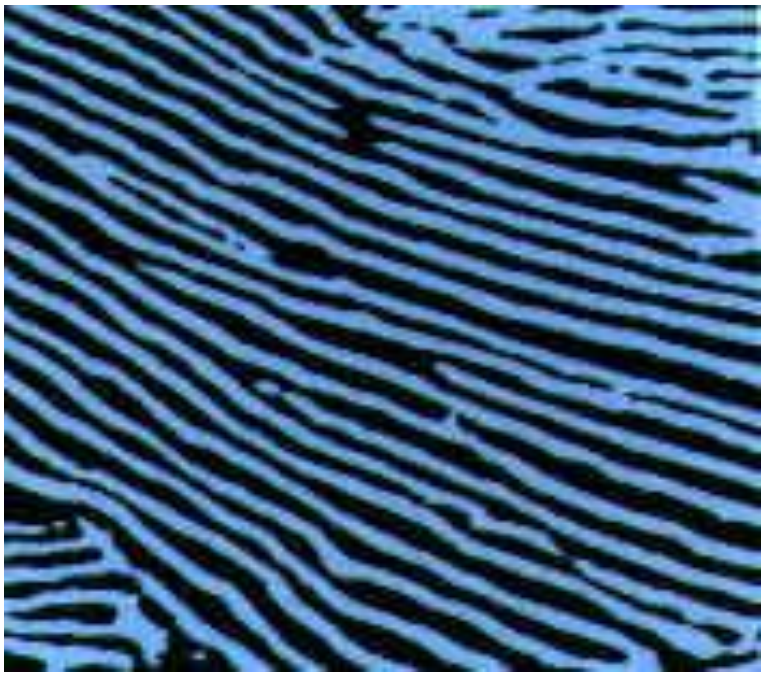
- σf = Tensão de fadiga do material em ensaios alternativos (R= –1)
- σf = 4520 kgf/cm2 ensaio alternativo de tração × compressão
- $af = \sigma f \times \left(1 - \frac{\sigma m}{\sigma R}\right)$

Aço dos trilhos

- **Os aços usados nos trilhos têm microestrutura perlítica.**
- **A perlita é composta por lamelas paralelas alternadas de ferrita e cementita.**



Micrografia de trilho mostrada em : "Avaliação mecânica e metalúrgica em trilho ferroviário utilizado em via contínua". Autores: Macedo, M.L.K. ; Silva, A. A. M. ; Barlavento, M. A. e Reguly, A.



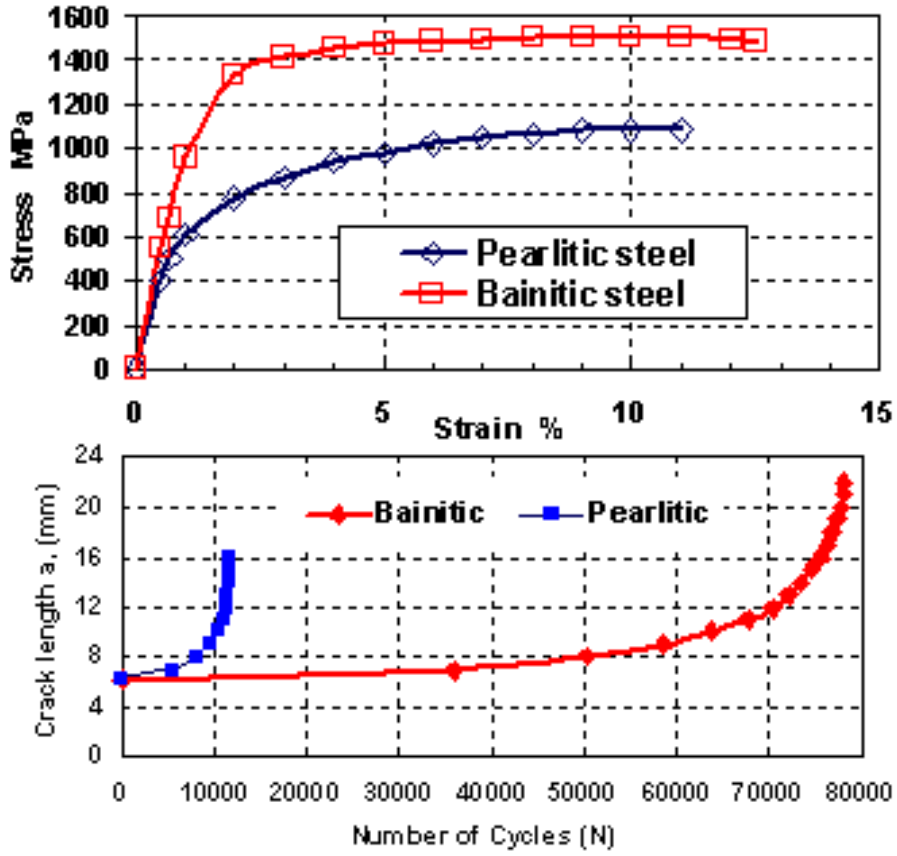
Microestrutura de aço perlítico de trilho. ***O espaçamento inter-lamelar é de 0,30 micrometros. A imagem colorida mostra a cementita em azul claro e a ferrita em preto -"British steel – Innovation in Rail Steel" - Science in Parliament- July-August 1996***

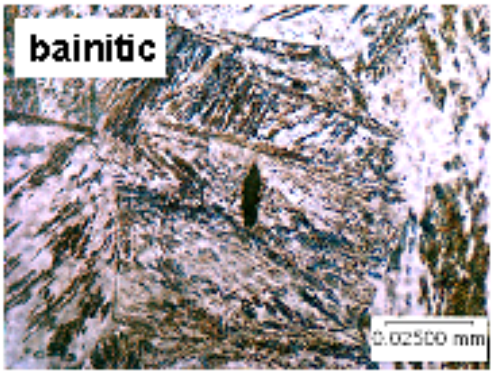
U.S. Department Of Transportation - Federal Railroad Administration

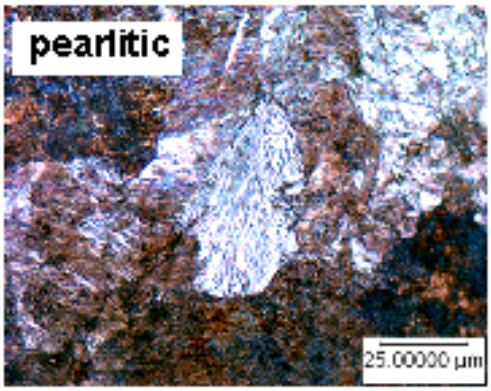
https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/2136/rr0602.pdf

Fracture and Fatigue Damage Tolerance of Bainitic and Pearlitic Rail Steels - February 2006

Figure 1. Microstructure - Mechanical properties and fatigue relationships of Bainitic and pearlitic rail steels.







This attests to the superior fatigue damage tolerance of the bainitic rail steel and provides evidence to support the superior rolling fatigue damage tolerance of the bainitic rail steel reported in the literature.

+++

Hoje são usados também trilhos com aço bainítico.

This article was published originally in *Science in Parliament*. It is reproduced with permission. This presentation has been adapted for the world wide web and enhanced for teaching purposes. British steel – Innovation in Rail Steel -

Microstructure of BAINITIC rail steel. The width of red layers is about 0.8 micrometres. This is an optical micrograph which does not reveal the true fine structure of the bainite which contains plates that have dimensions less than 0.2 micrometres (a higher resolution transmission electron micrograph is available showing these fine plates with intervening austenite films *Figure*.).

Os trilhos não apenas desgastam , mas também quebram..

Sua tenacidade inerente é fraca devido à presença da fase carbetos, que são quebradiços.

Fracture can occur from relatively minor stress-concentrating features inside the rail, or on the surface, as a result of manufacture or subsequent handling damage.

At least one European railway network suffers almost 4000 rail fractures every year.

These are rarely dangerous, as modern track signalling systems and routine inspections will find most.

They do however have a high replacement cost and can be very disruptive to the network.

Pearlitic rails have been developed almost to their limit and British Steel as a major supplier to the world market therefore asked itself, "What other structures are available?

Do any offer better properties?" The answer is "yes".

"Steel" is an extremely versatile material. If a suitable series of small alloying additions are made, or the correct heat treatment chosen, then other types of structures can be produced.

O aço dos trilhos ferroviários apresenta as seguintes propriedades mecânicas :

even under dry running conditions. Yates (1996) has reported that the fracture toughness of bainitic steel ranges between 50 and 60 MPa $m^{1/2}$, while that for pearlitic rail steel is between 30 and 35 MPa $m^{1/2}$. Singh et al.

Propriedade do aço do trilho	Símbolo	**Aço Perlita**	**Aço Bainita**
Tensão de ruptura por tração Strength requirements are now 710 N mm^{-2} for the "Normal" grade and 880 N mm^{-2} for the so called "Wear Resistant" grade.	fu	**1000 MPa a 1100 MPa (*mínimo 880 MPa*)**	**1500 MPa**
Tensão de escoamento	**fy**	**480 MPa a 600 MPa**	**1000 MPa a 1200 MPa**
Alongamento de ruptura	εu	16 % (*mínimo 10%*)	

Fator crítico de intensidade de tensão	**KIc**	29 a 34 MPa.m$^{1/2}$ (*mínimo* $29\ MPa \times \sqrt{m}$)	50 a 60 MPa.m$^{1/2}$
Módulo de elasticidade	E	210 GPa	210 GPa
Teor de carbono	**C %**	**0,60% a 0,82%**	**0,07% a 0,52%**
Teor de cromo	Cr %	0,15% a 0,30%	0 a 2,7%
Teor de manganês	Mn %	0,70% a 1,00%	0,35 a 4,5
Fósforo	Ph %	0,04%	
Silício	Si %	0,10% a 0,23%	0,20% a 1,00%
Níquel	Ni %		0 a 4,0 %
Molibdenio	Mo %		0,20 % a 0,6%
Dureza Brinell	HB	Usual 260 a 300 **(CVRD exige 280 a 320)**	
Resistência ao choque Izod		0,28kgm	
Variação de tensão na fadiga	R=-1	**280 MPa** (sem romper com 5 milhões de ciclos)	

↓

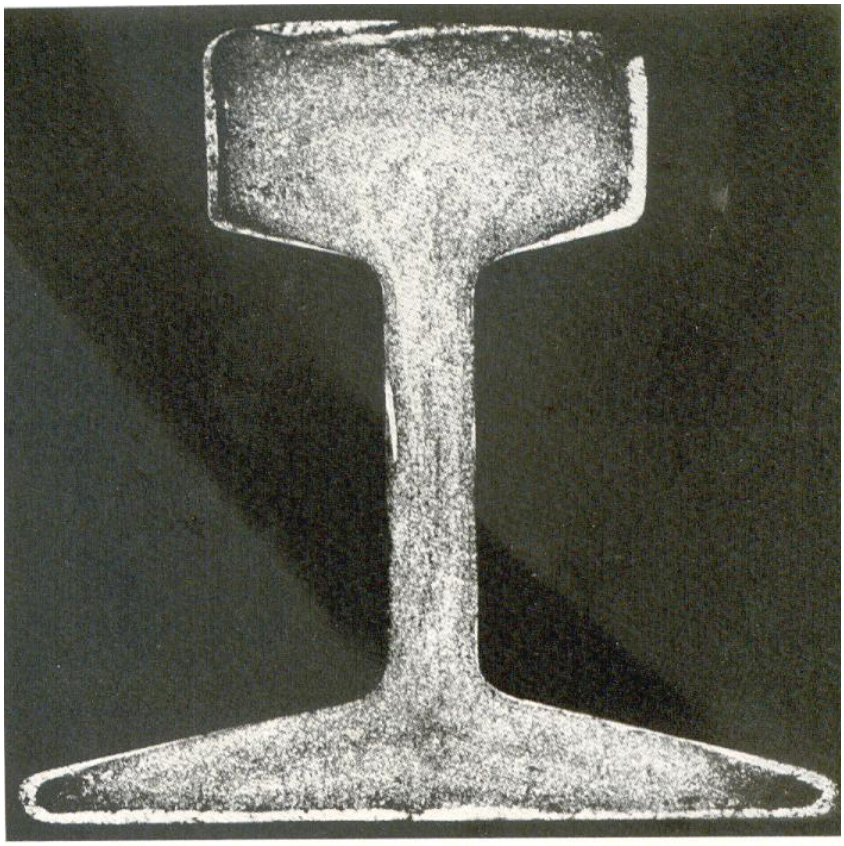
↓

DESCARBONATAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO TRILHO.

"*Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*"

Autor : Hubertus Colpaert - Editora Edgar Blucher.

IPT / SP

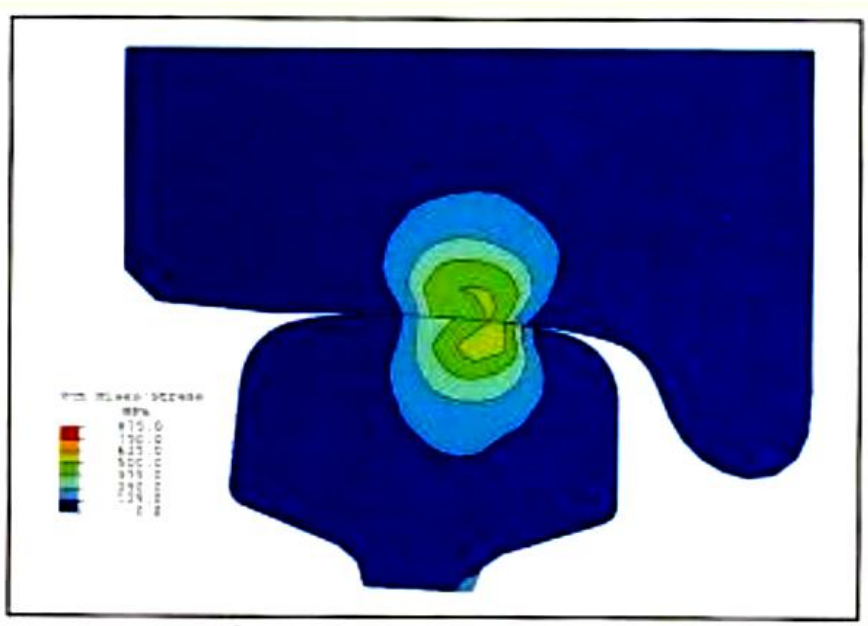


- **Macrografia de um trilho. O ataque ao aço foi feito com reativo de iodo.**
- **Seção transversal apresentando intensa descarbonatação junto à superfície, nas faixas claras. Na alma do trilho nota-se também uma pequena dobra descarbonatada.**
- **A descarbonatação na superfície nada mais é que a oxidação do carbono do aço pelo oxigênio do ar.**
  - **$2C+O_2 = 2CO$**
- **A descarbonatação pode ocorrer também pela ação do anidrido carbônico e pelo vapor de água.**
  - **$C + CO_2 = 2CO$**
  - **$C + 2H_2 = CH_4$**
- **A descarbonatação do aço ocorre durante o tratamento térmico do trilho. Torna o aço menos duro, o que é ruim para a resistência ao desgaste do boleto do trilho.**
- **A descarbonatação pode ser evitada pelo uso de atmosfera protetora no interior do forno onde é feito o tratamento térmico.**
- **Para detectar falhas nos trilhos,em ferrovias de tráfego pesado, a inspeção dos trilhos deve ser feita no máximo a cada 6 meses.**
- **Se o desgaste vertical do boleto, mais a metade do desgaste horizontal do boleto, for maior que 11mm o trilho deve ser substituído.**

FADIGA NOS BOLETOS DOS TRILHOS DEVIDA ÀS ALTAS TENSÕES DE CONTATO

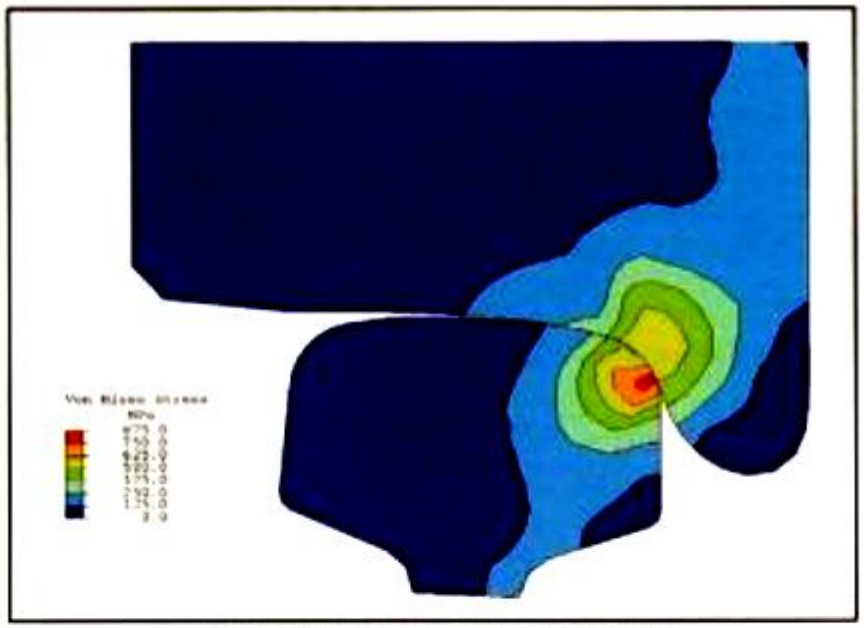
https://www.soue.org.uk/souenews/issue6/jenkinlect.html

TRILHO RETO



Contact Stresses on Straight Track

TRILHO CURVO



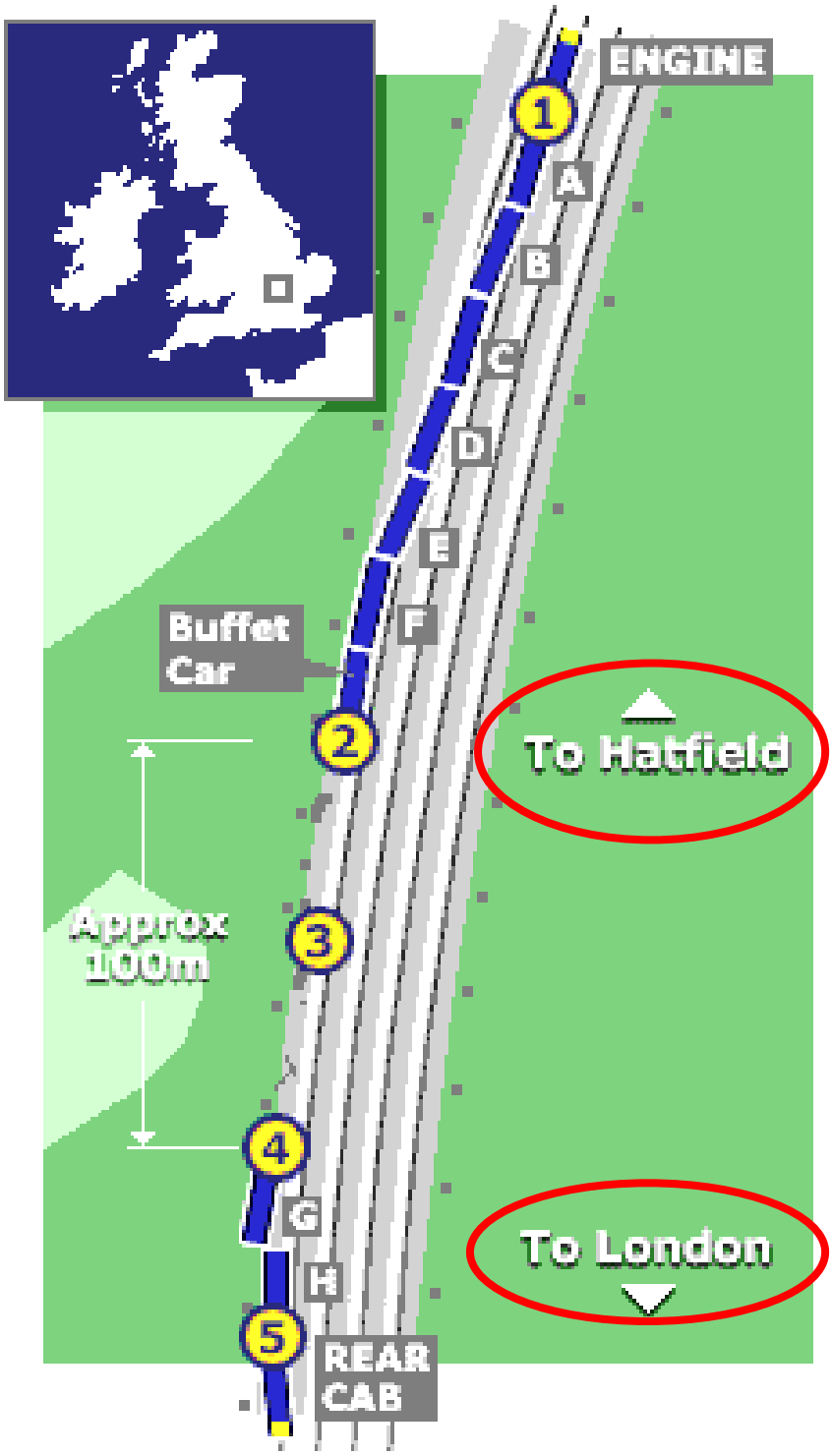
Contact Stresses on Tight Curved Track

Figure 4: Top: Position of contact in normal running
Bottom: Movement to gauge corner produces higher contact stresses

ACIDENTE CAUSADO POR FADIGA NOS BOLETOS DOS TRILHOS CURVOS

17 / OUTUBRO / 2000

“ High-speed derailment at Hatfield on the main NE line in October 2000…



… when a heavily cracked rail broke into 300 pieces ”

Acidente causado pela fadiga nos trilhos

RELATÓRIO FINAL

https://www.railwaysarchive.co.uk/docsummary.php?docID=465

Train Derailment at Hatfield:
A Final Report by the Independent Investigation Board
July 2006

At 12.23 on Tuesday 17 October 2000, train ID38 travelling from London Kings Cross to Leeds derailed roughly 0.5 miles (0.8km) south of Hatfield Station. The train, operated by Great North Eastern Railway (GNER), was carrying one hundred and seventy passengers and twelve GNER staff. Four passengers were killed and over seventy people were injured, four seriously, including two of the GNER staff.

O trem descarrilou e se dividiu em varias partes
CAUSA = RUPTURA DO TRILHO POR FADIGA

At 12.23 on Tuesday **17 October 2000**, train ID38 travelling from London Kings Cross to Leeds derailed roughly 0.5 miles (0.8km) south of Hatfield Station.

Rail Condition observed at Site

5.7 The diagram below shows a cross-section through a rail and the terminology used by HSL/AEATR in this summary.

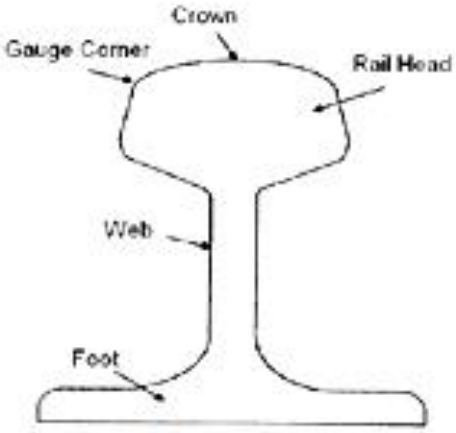


Diagram 2

Illustration from Casework Report

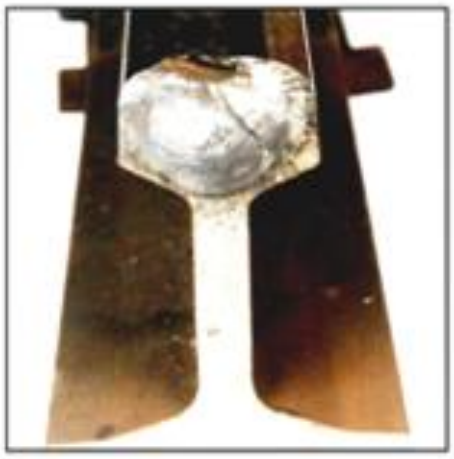


Figure 58 The most southerly fracture

item 7.73
From the above records, it is clear that as early as January 1999, the rail at Welham Green curve was in poor condition ....
7.73 Dos registros acima, é claro que já em janeiro de 1999, o trilho na curva de Welham Green estava em más condições

By the end of December 99, there were two separate **RCF/GCC** defect references for Welham Green curve in the defect database.
No final de dezembro de 99, havia duas referências separadas de defeitos RCF / GCC para a curva de Welham Green no banco de dados de defeitos.

(RCF= Rolling Contact Fatigue) = *Fadiga de contato de rolamento*
and
(GCC = Gauge Corner Cracking) =*Trinca no canto do boleto*

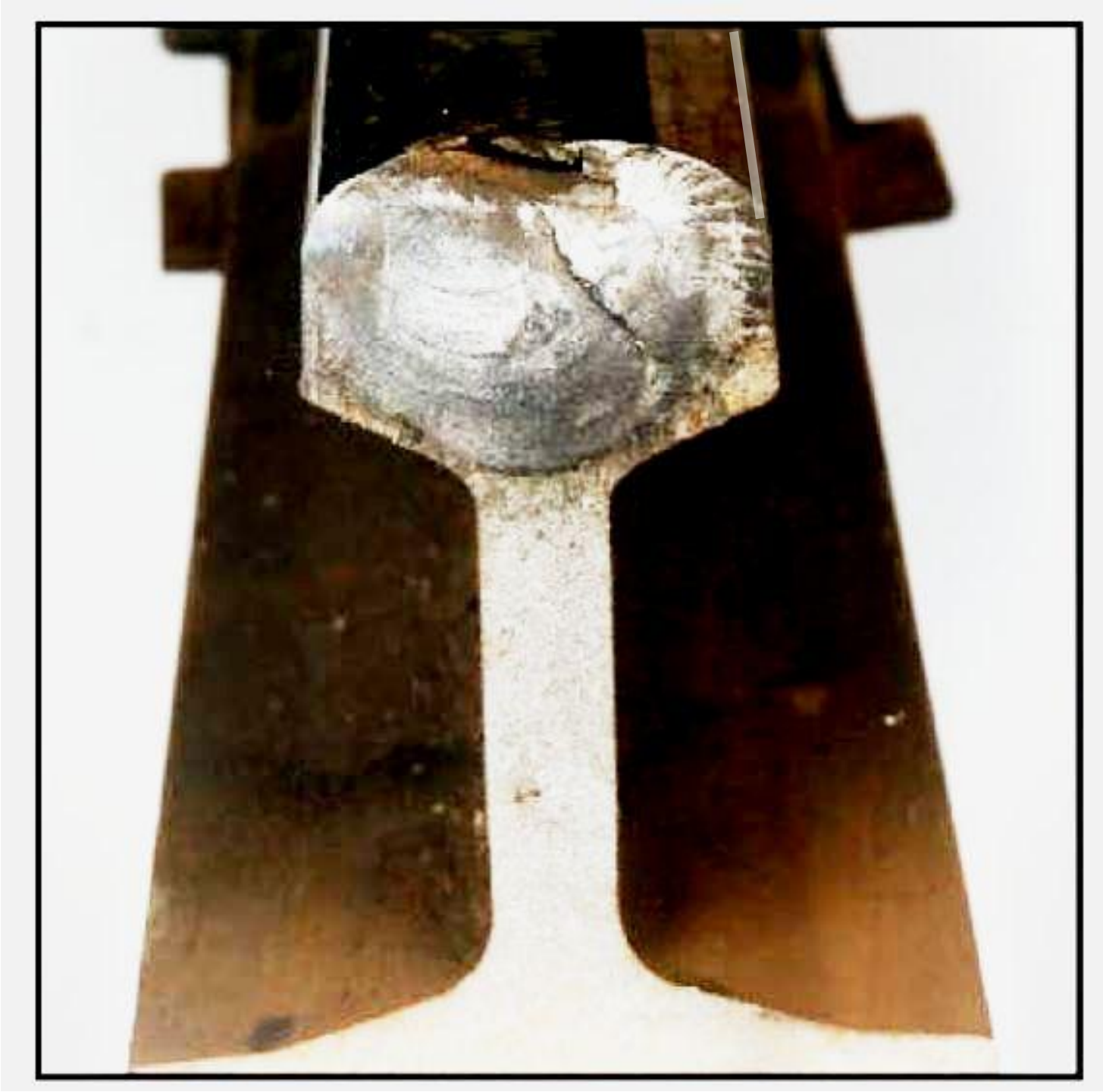
A correção ocorreu em 09/05/2000.

Um mês depois, o local foi testado por ultra- som e os defeitos permaneceram.

At 12.23 on Tuesday ***17 October 2000***, train ID38 travelling from London to Leeds **derailed.**

RUPTURA POR FADIGA DO BOLETO DO TRILHO

Figure 58 The most southerly fracture



RUPTURA POR FADIGA DO BOLETO DO TRILHO

Figure 62 Showing fatigue crack through approximately 30% of the rail head

RUPTURA POR FADIGA DO BOLETO DO TRILHO

Figure 63 Showing fatigue crack through approximately 80% of the rail head

RUPTURA POR FADIGA DO BOLETO DO TRILHO

Figure 64 Showing fatigue crack through approximately 70% of the rail head

RUPTURA POR FADIGA DO BOLETO DO TRILHO

Figure 65 One of the fractures at 325m with the polished area showing

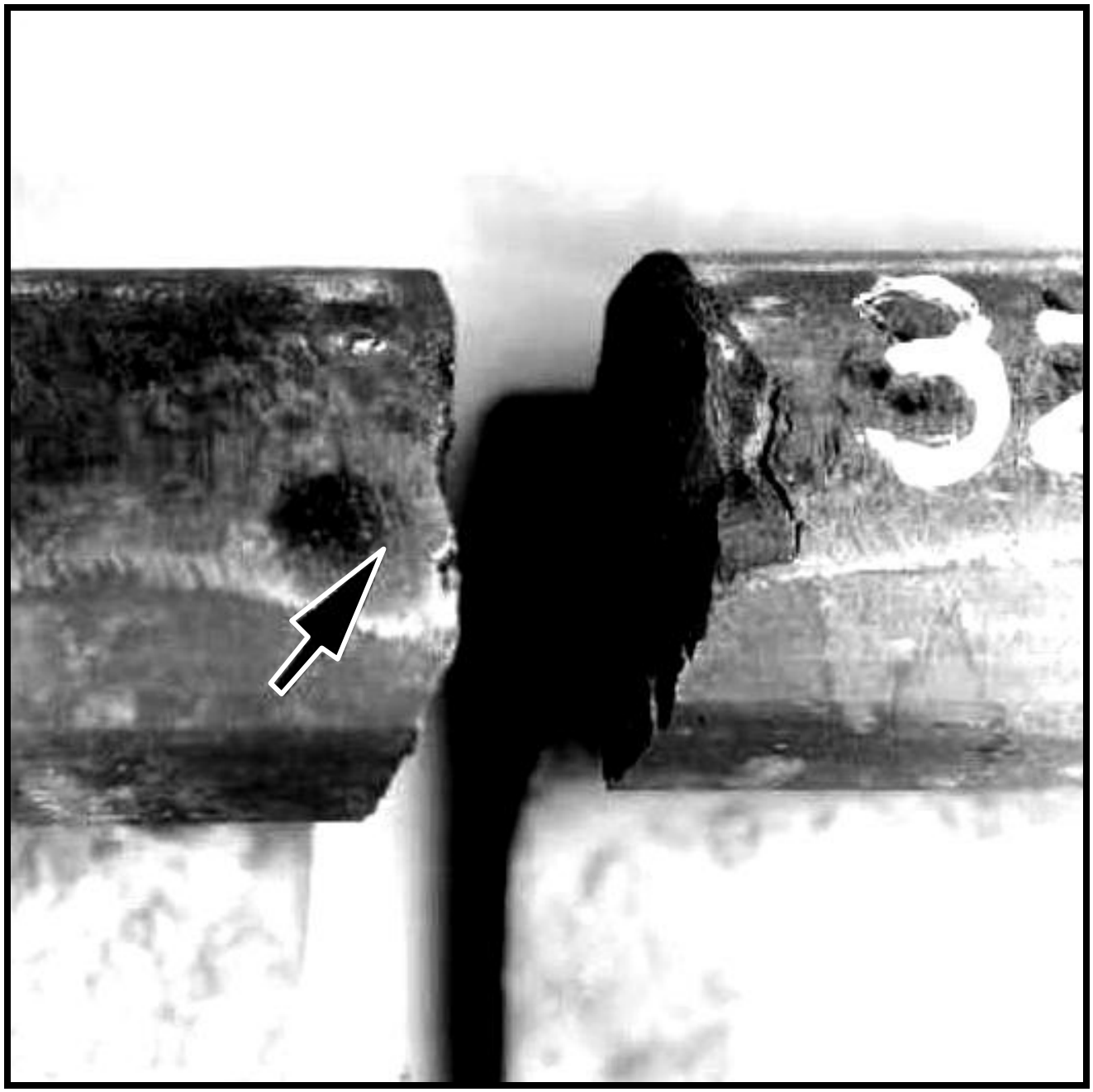


IMAGEM DO TRILHO QUEBRADO = 35 METROS ≈ 200 PEDAÇOS

VER FOTO NA PÁGINA 39

Figure 54 Reconstruction of fractured rail

ROWN COPYRIGHT

ENSAIOS DE FADIGA

https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/45/4/45_4_203/_pdf/-char/en

Fatigue Property Analysis of Rail Steel Based on Damage Mechanics

Kengo IWAFUCHI / Yukio SATOH / Yutaka TOI / Satoshi HIROSE

https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/45/4/45_4_203/_pdf/-char/en

3.2 Tensile test

A tensile test was conducted with cylindrically shaped test pieces prepared to conform to Type JIS Z 2201 14A with a diameter of 8 mm as shown in Fig. 2. The test piece was obtained from just beneath the running surface of a new JIS 50 kg N rail with the axis of cylinder kept parallel to the direction of the length of rail. A ten-

Kengo IWAFUCHI
Senior Researcher,

Yukio SATOH
Senior Researcher,

Frictional Materials, Materials Technology Div.

Yutaka TOI
Professor,

Satoshi HIROSE

Computational Solid Mechanics, Dept. Mechanical and Biofunctional Systems,
Institute of Industrial Science, University of Tokyo

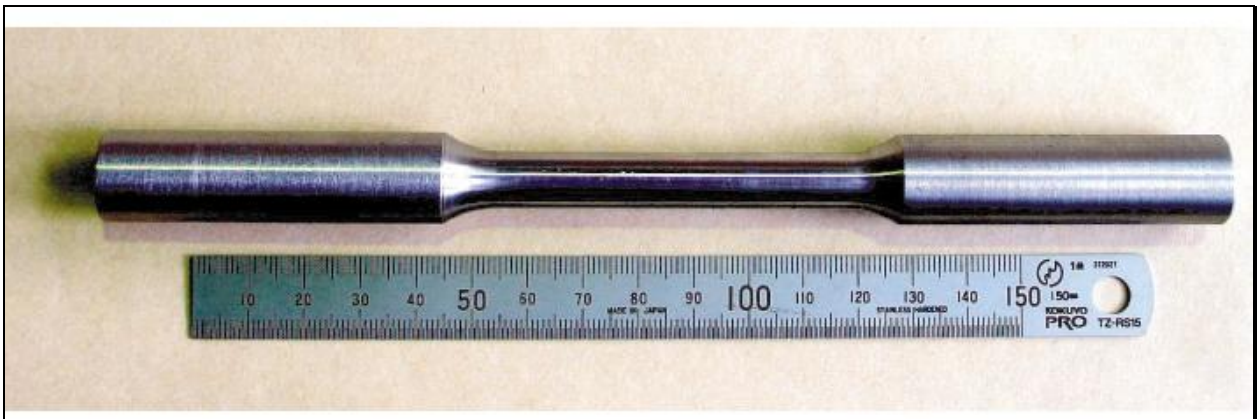


Fig. 4 Fatigue test piece

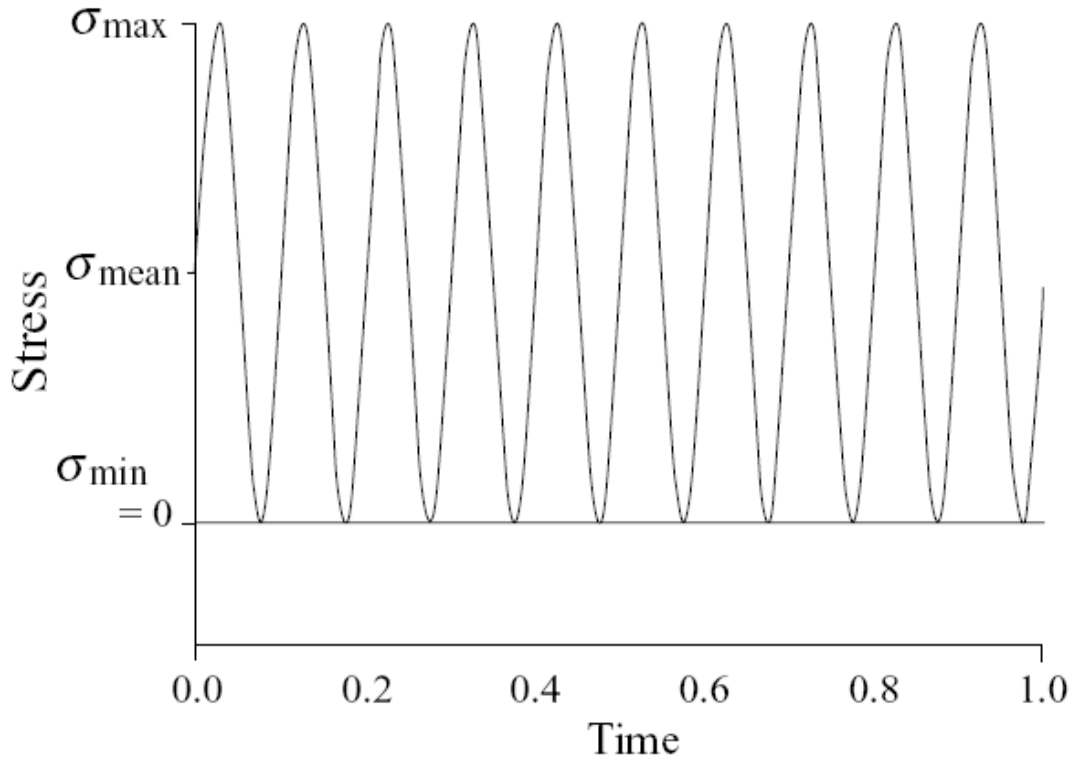


Fig. 5 Schematic illustration of cyclic loading at the stress ratio of 0

3.4 Determination of material parameters for damage

Material parameters for damage were determined based on the stress-strain curve and the S-N curve of rail steel. Equations (7)-(11) were simplified as follows in order to make them appropriate to the uni-axial loading condition and applied to the analysis of the curves.

$$\sigma = (1-D)E(\varepsilon - \varepsilon^{vp}) \tag{12}$$

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \gamma \left\langle \frac{|\sigma|}{(1-D)\left\{q + (x_0 - q)e^{-\beta|\varepsilon^{vp}|}\right\}} - 1 \right\rangle^{m} \times \frac{1}{(1-D)} \tag{13}$$

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S_1} \right)^{S_2} |\dot{\varepsilon}|, \qquad -Y = \frac{|\sigma|^2}{2E(1-D)} \tag{14}$$

Since the amount of calculation required for the stress-strain analysis could be decreased by using the simplified constitutive equation Eq. (12) for the uni-axial loading condition, the analysis was executed as a fully coupled analysis.

The material and damage model used in this study involves the 14 material parameters listed in Table 2. Of the 14 material parameters, three parameters, E (Young's modulus), x_0 (yield stress) and σ_f (fatigue limit), which are labeled "experimental" in Table 2 are determined directly by the results of experiments, and four parameters, ν (Poisson's ratio), m (3rd viscoplastic parameter), S_2^e (2nd elastic damage parameter) and S_2^p (2nd plastic damage parameter), which are labeled "fixed" are fixed values given by the model and approximation in the analysis.

The other seven parameters labeled "analytical" have to be determined through numerical analysis.

In the process to determine the parameters, a series of calculations which simulated the tensile and fatigue tests numerically was repeated with the parameters slightly modified at each repetition until a good agreement was achieved between the calculated and experi-

Table 2 Material parameters of rail steel

Behavior type	Determination method	Parameter	Value
Elastic	Experimental	E (Young's modulus) / GPa	215
	Fixed	ν (Poisson's ratio)	0.3
Viscoplastic	Analytical	γ (viscosity) / s^{-1}	200
	Analytical	q (1st viscoplastic parameter) / MPa	1000
	Experimental	x_0 (yield stress) / MPa	482
	Analytical	β (2nd viscoplastic parameter)	29
	Fixed	m (3rd viscoplastic parameter)	1.0
Damage	Analytical	S_1^e (1st elastic damage parameter) / MPa	200
	Fixed	S_2^e (2nd elastic damage parameter)	1.0
	Analytical	S_1^p (1st plastic damage parameter) / MPa	0.97
	Fixed	S_2^p (2nd plastic damage parameter)	1.0
	Analytical	ε_{pd} (damage strain threshold)	0.035
	Analytical	D_{cr} (critical damage at crack initiation)	0.197
	Experimental	σ_f (fatigue limit) / MPa	452

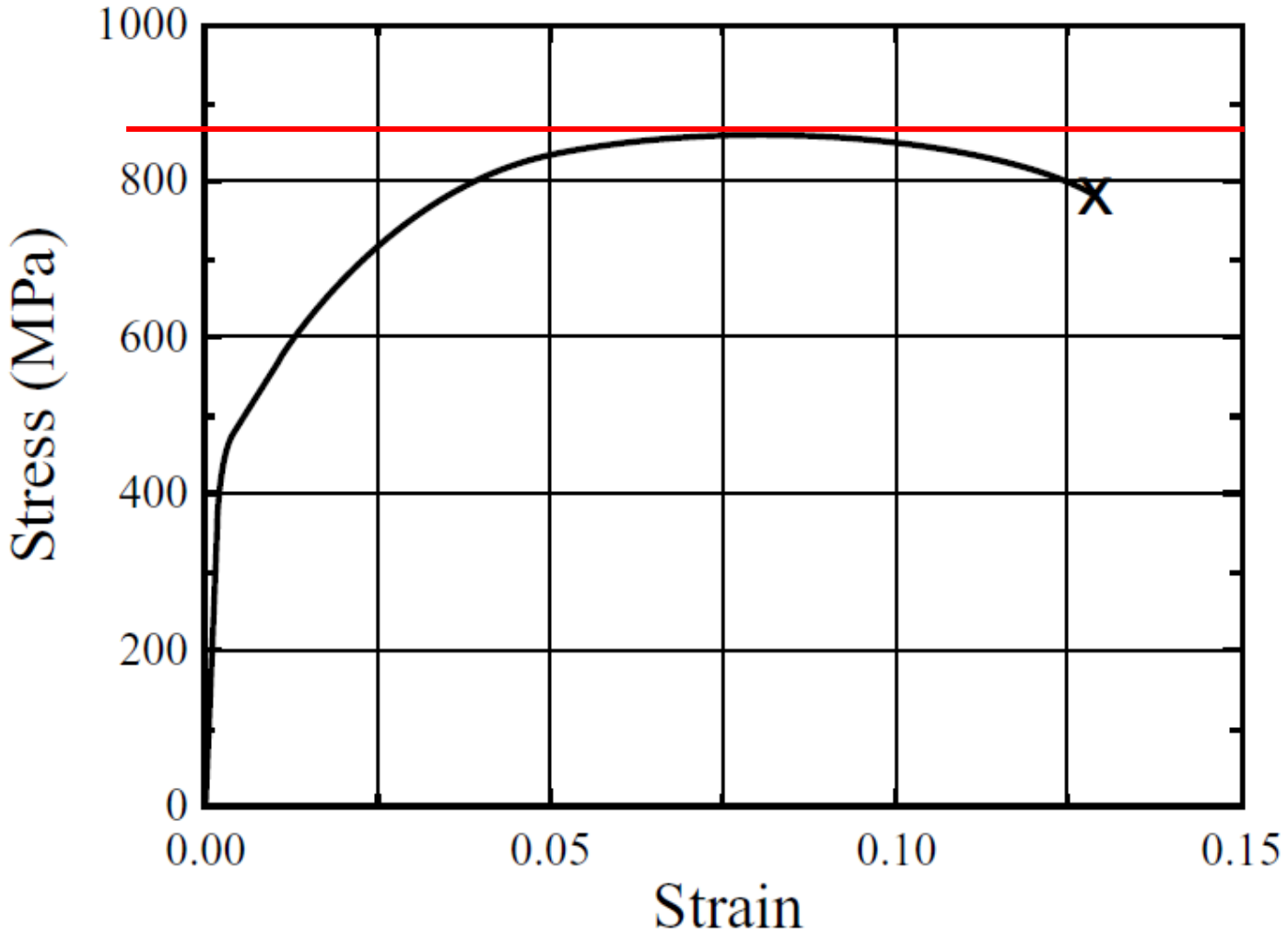
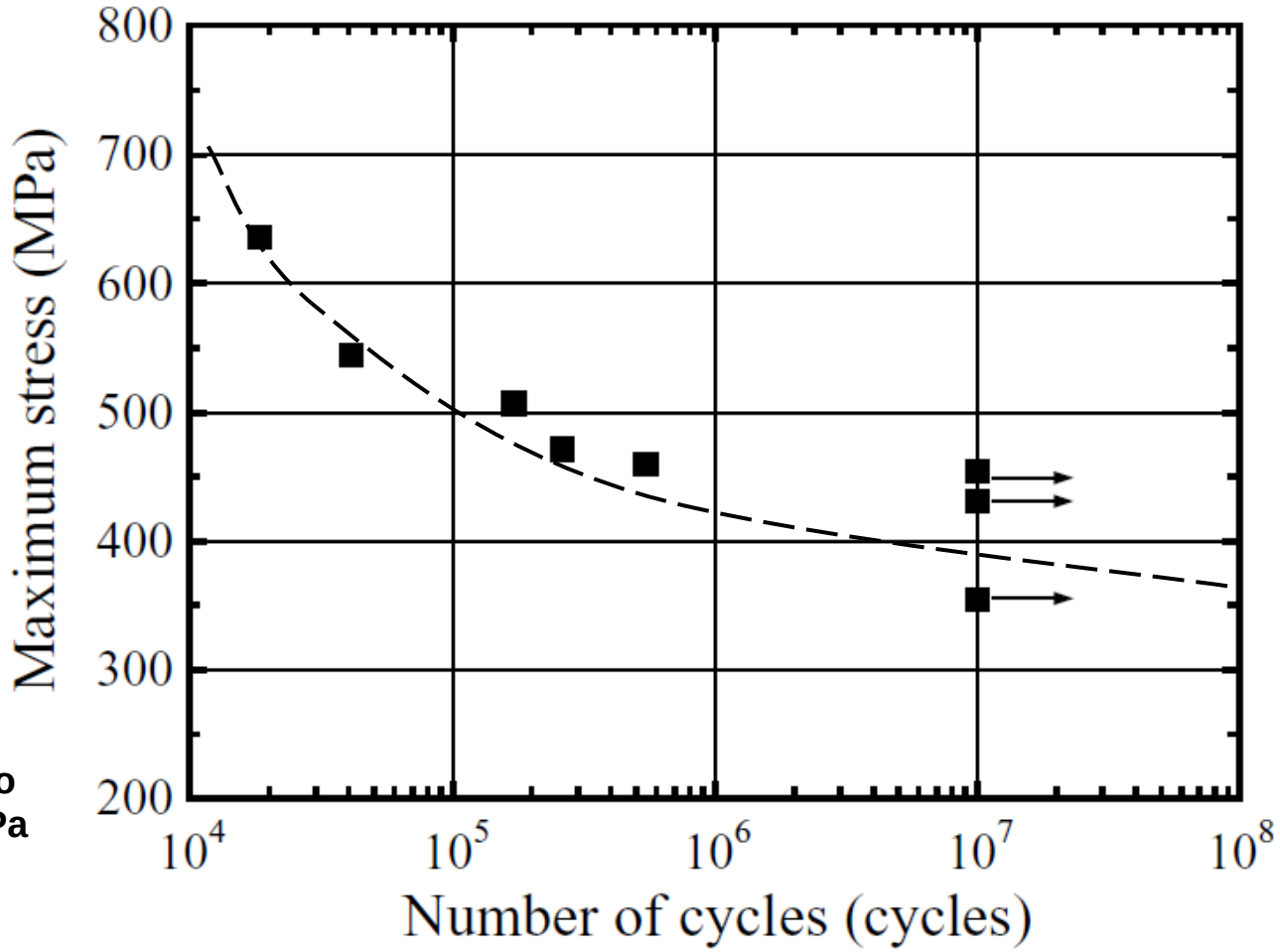


Fig. 3 Rail steel stress-strain curve obtained by uni-axial tensile test



Usa-se como limite 150 MPa

Fig. 6 Rail steel S-N curve obtained by a uni-axial fatigue test at the stress ratio of 0

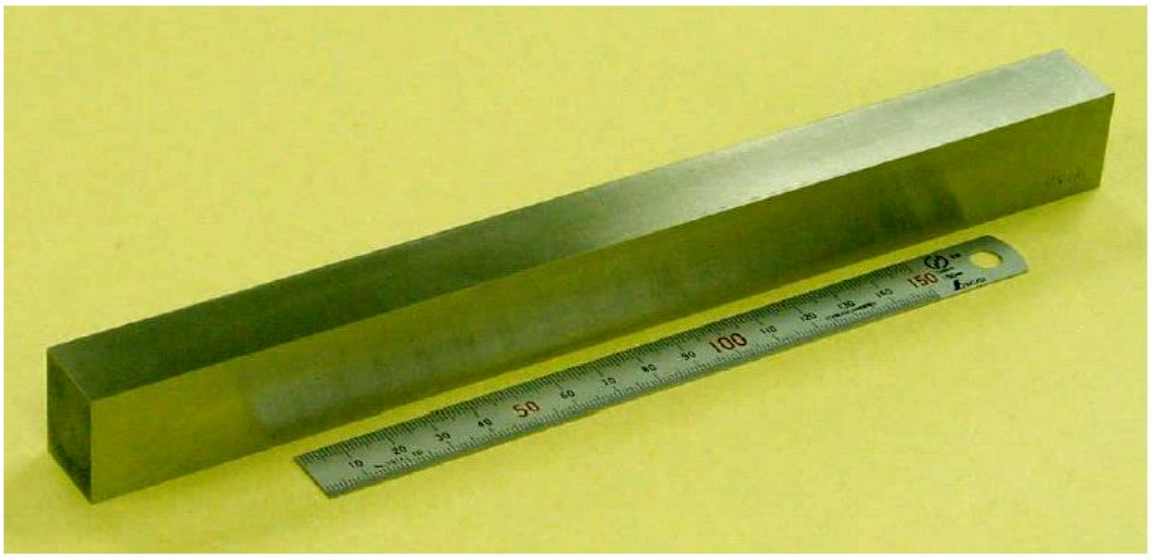


Fig. 9 Three-point bending fatigue test piece

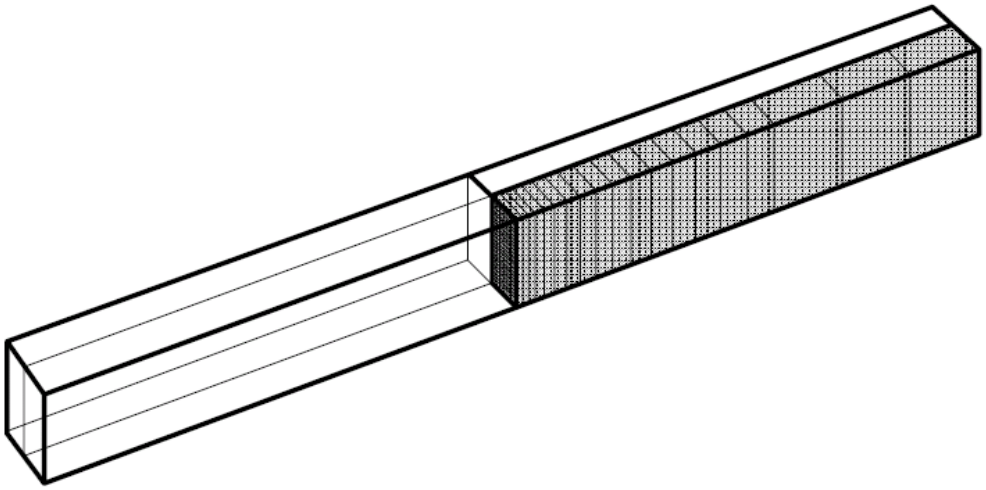


Fig. 10 A quarter finite element model of square bar test piece

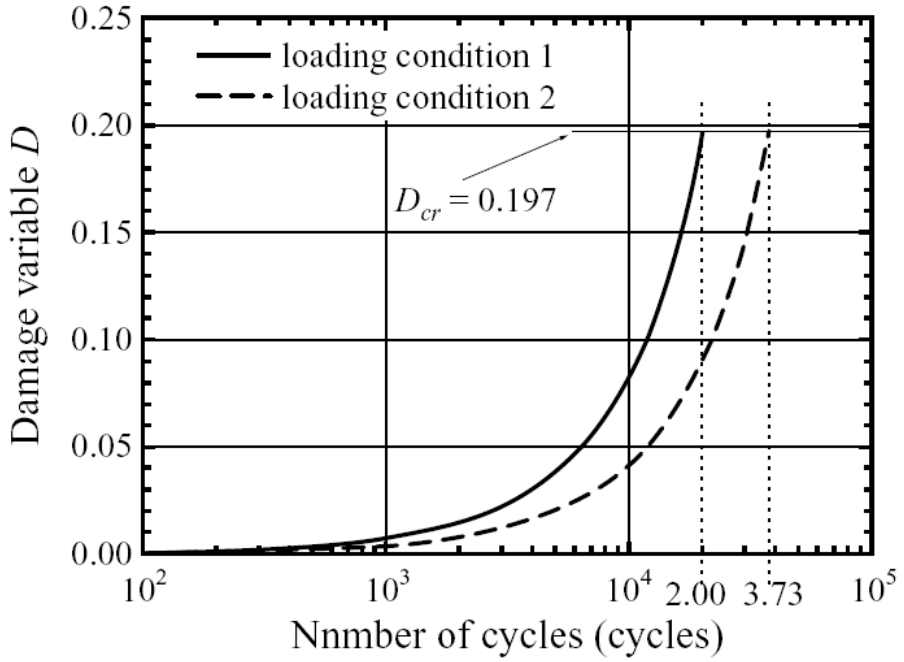


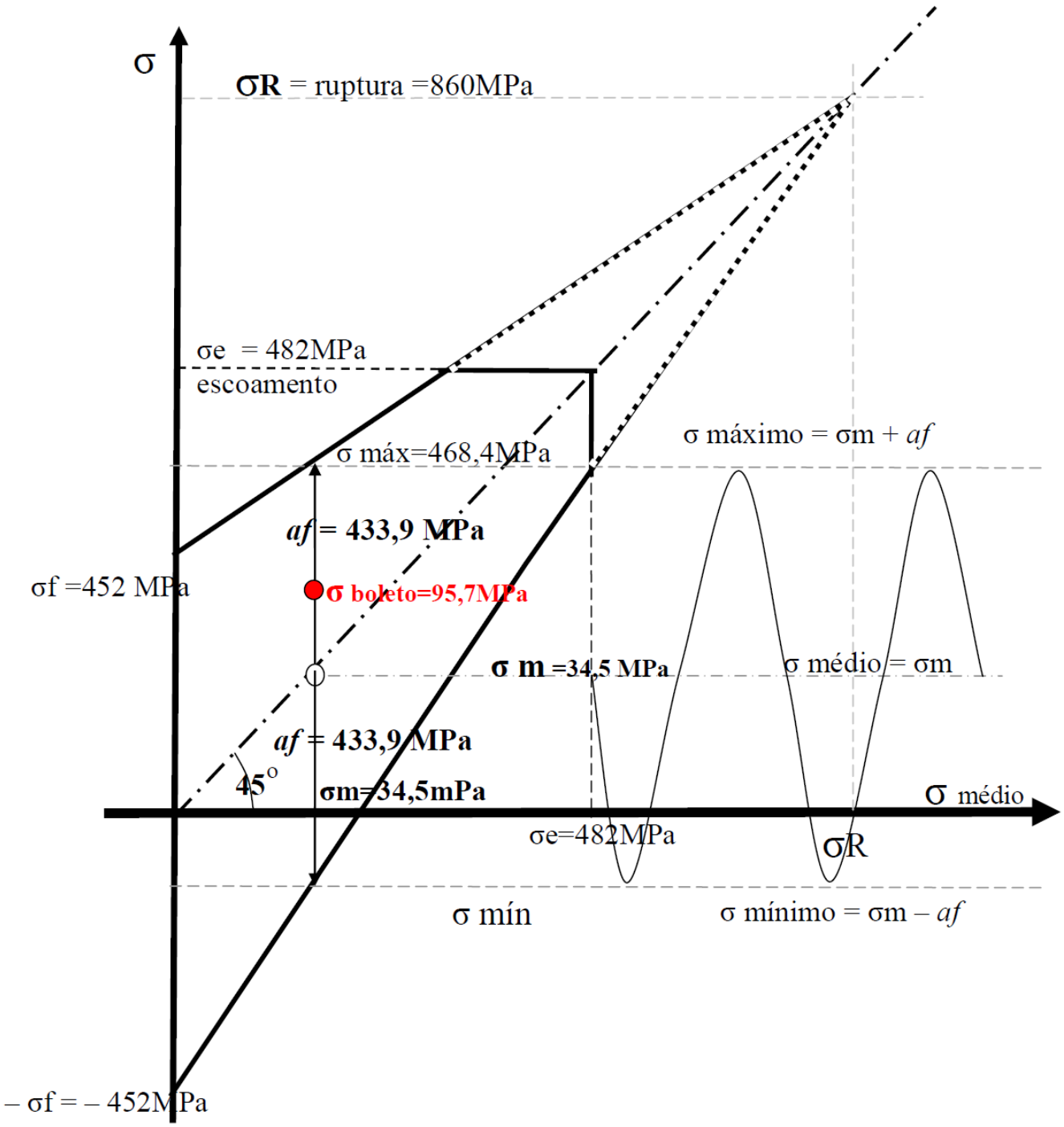
Fig. 11 Variation of the damage variable *D* with the number of cycles

Table 3. The good agreement of the values given in the table shows that the analysis based on damage mechanics is one of the useful methods for prediction of rail life.

Table 3 Three-point bending fatigue life of square bar test piece

Loading condition	1	2
Maximum equivalent stress	668 MPa	584 MPa
Minimum equivalent stress	32 MPa	32 MPa
Experiment	2.70 x 10^4 cycles	3.93 x 10^4 cycles
Analysis	2.00 x 10^4 cycles	3.73 x 10^4 cycles

Diagrama de Goodman (sem escala)



- σf = Tensão de fadiga do material em ensaios alternativos (R= –1)
- σf = 4520 kgf/cm2 ensaio alternativo de tração × compressão
- $af = \sigma f \times \left(1 - \frac{\sigma m}{\sigma R}\right)$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Estudo da Propagação de Trincas Transversais por Fadiga em Trilhos Ferroviários

Porto Alegre 2000

https://www.youtube.com/watch?v=uwqZ6lQcy-k

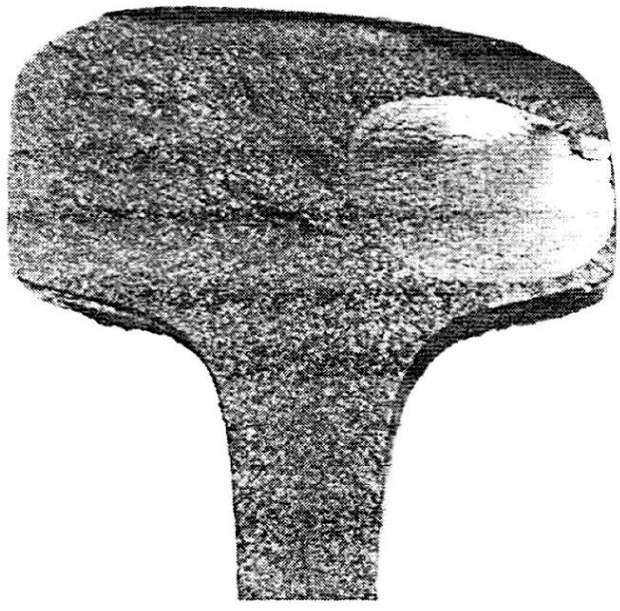
Inácio da Fontoura Limberger

https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14347/000295619.pdf?sequence=1&isAllowed=y

EFC Estrada de Ferro Carajás /// LAMEF Laboratório de Metalurgia Física

A figura 2.13 mostra uma fratura por fadiga do tipo transversal retirada da EFC, onde é possível observar todas as características também descritas por Skinner e Judd (1981) para este tipo de defeito.

Figura 2.13



Superfície de uma fratura transversal por fadiga ocorrida na EFC, (Lamef, 1996).

Segundo Steeles, Rungta e Rice (1987) as trincas transversais tem a mesma morfologia descrita anteriormente e a sua nucleação também ocorre junto a inclusões não metálicas, porém com uma ressalva: as microtrincas iniciais dependem somente da forma e do tamanho das inclusões e não da sua composição química, indicando que as inclusões de sulfeto de manganês também podem dar origem a trincas transversais de fadiga.

4.3.4.2 Flexão à Quatro Pontos em Segmento de Trilhos

Os ensaios realizados com os segmentos de trilhos em tamanho real mostraram que o comportamento em relação à fadiga para os materiais dos trilhos novos e usados, foi o mesmo que os encontrados nos ensaios de flexão rotativa com corpos de prova de dimensões reduzidas, ou seja, o material dos trilhos usados apresentou melhor resistência à fadiga que o material dos trilhos novos.

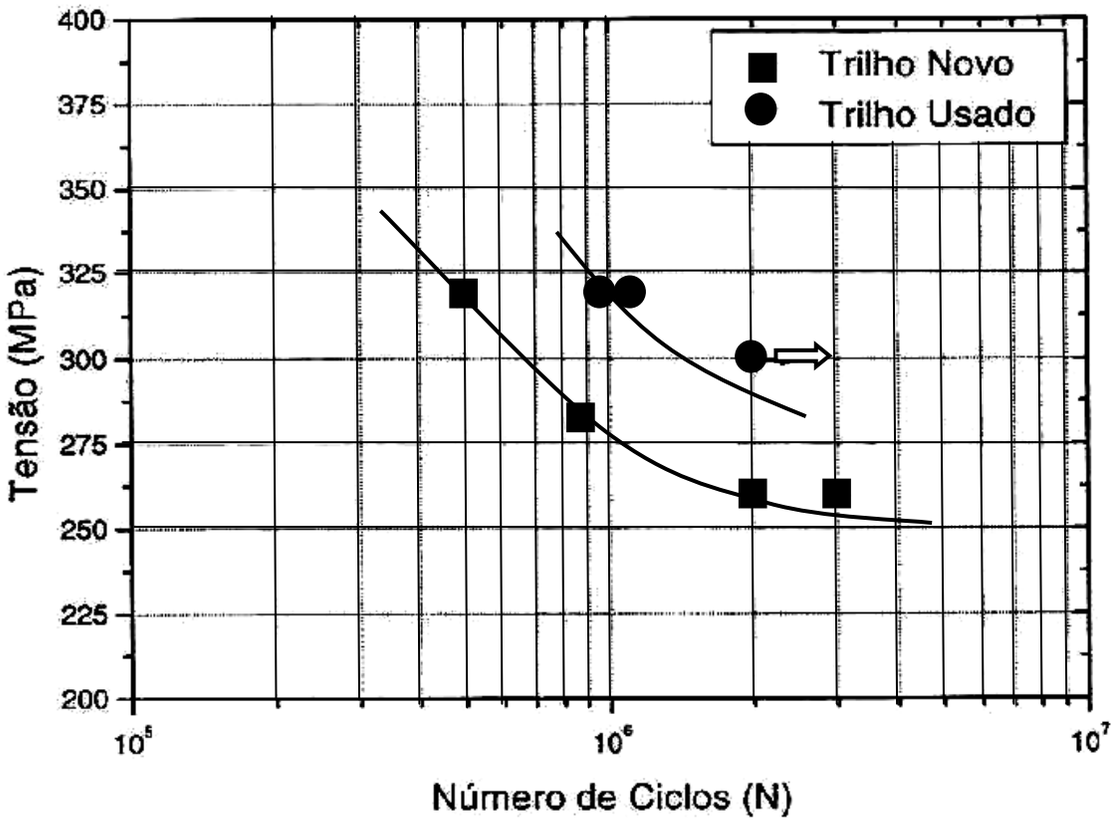


Figura 4.27 - Pontos de um Diagrama de Wöhler obtidos por flexão à quatro pontos em segmentos de trilhos.

Usa-se como limite 150 MPa

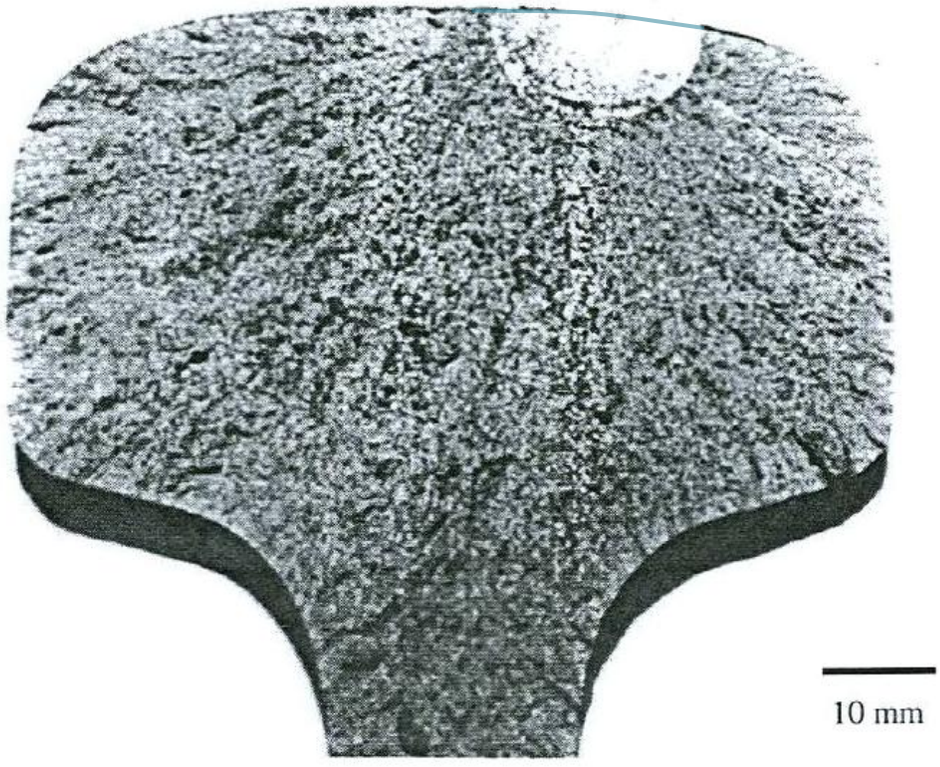


Figura 4.28 - Superfície da fratura do boleto de um trilho novo ensaiado em fadiga por flexão à quatro pontos.

Figura 4.29 - Superfície da fratura do boleto de um trilho usado ensaiado em fadiga por flexão à quatro pontos.

ENSAIOS DE FADIGA

Richard C. Rice

Shell and Detail Fracture Formation in Railroad Rails.

" *Case Studies for Fatigue Education, ASTM STP 1250, Ralph I. Stephens, Ed, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp. 109-138*. "

https://www.astm.org/stp1250-eb.html

" ...

A dramatic example of a detail fracture is shown in Fig. 1.
This detail fracture, labeled AT-5, shows the typically observed oval shape that expands with increasing rail traffic across the head of the rail, while remaining contained within the head of the rail until quite large.

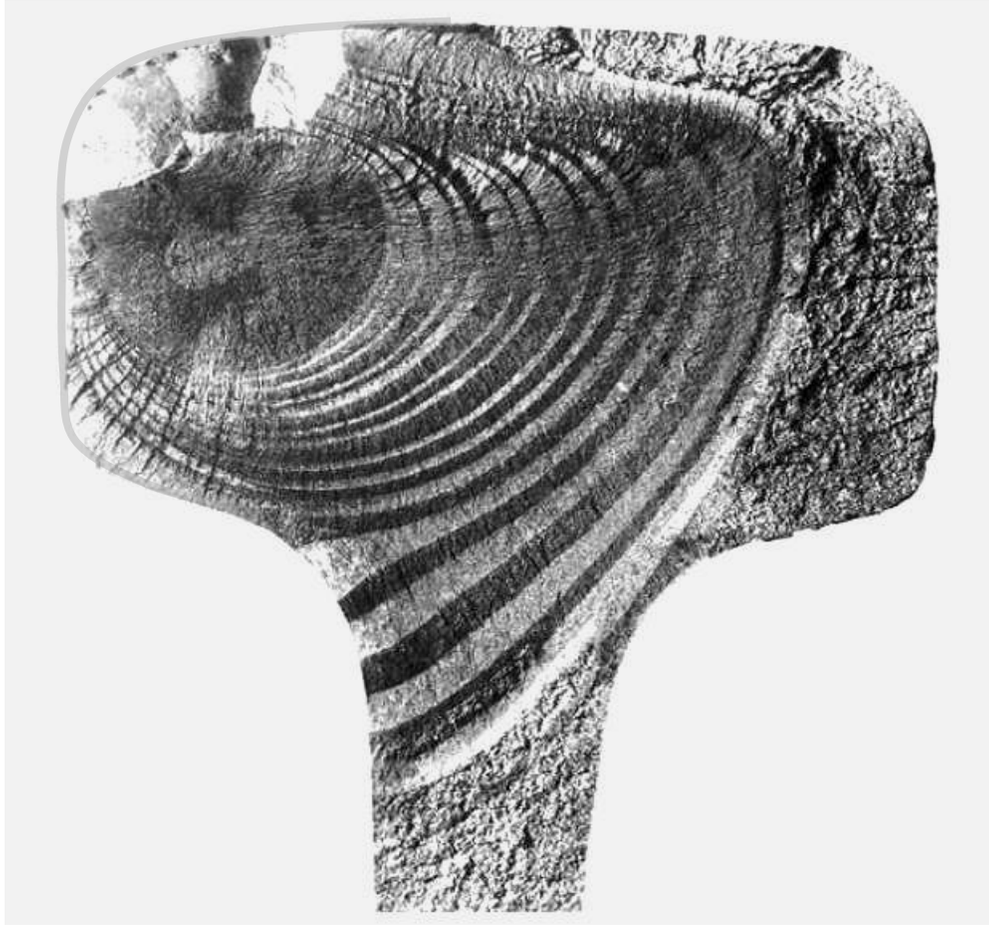


FIG. I - Detail fracture in rail AT-5

Examples of other detail fractures are shown in Figs. 2 through 5. Although each detail fracture has unique features, there are obvious similarities between them.
All of the transverse cracks emanated from a shell crack beneath the gage corner of the rail head, and they all propagated downward and across the head of the rail, largely contained by the gage face and the running surface of the rail.

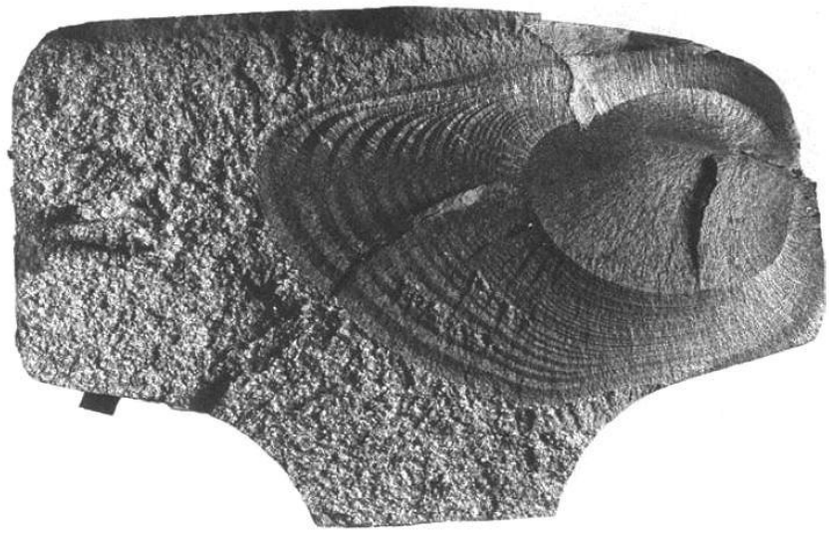


FIG. 2 - Detail and shell fracture in rail NW-4

FIG. 3 - Detail fracture in rail AT- IO
View of transverse crack.

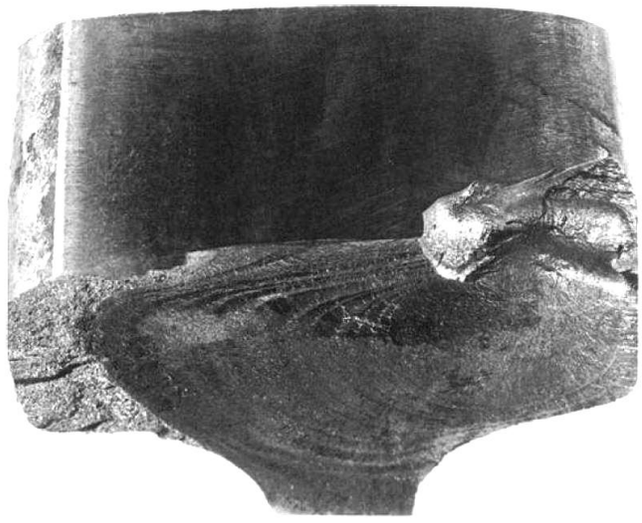
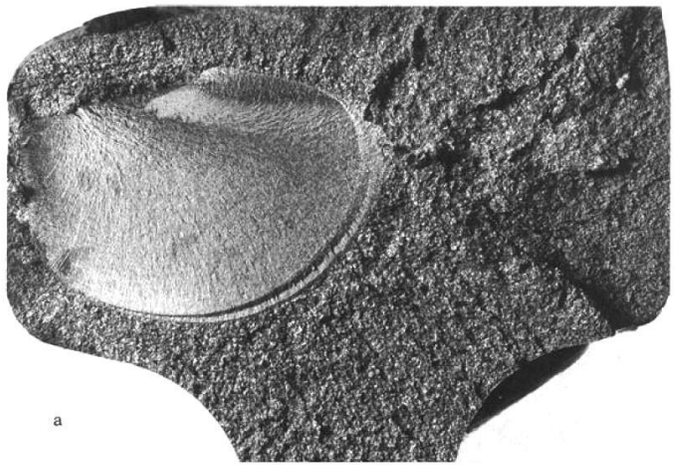
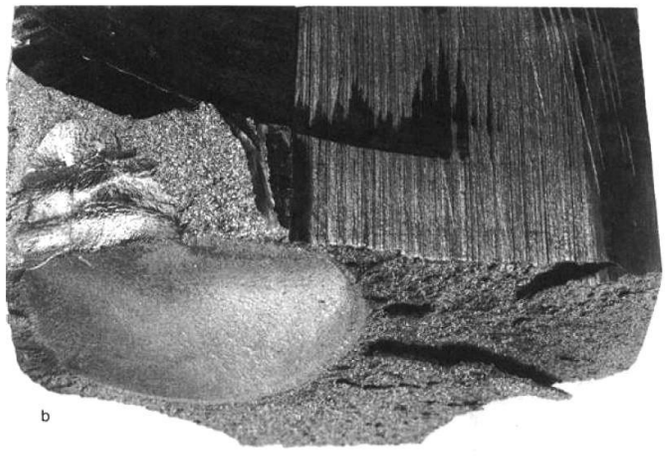


FIG. 4 - Detail and shell fracture in rail NW-22.



(a) View of transverse crack.



(b) View of shell crack.

FIG. 5 - Detail fracture in rail SP-2

. . . "

MONITORAMENTO PERMANENTE

DOS TRILHOS

DETECTA FALHAS DE FADIGA

NOS BOLETOS

DAVID BROEK - FractuResearch Inc

Rails are inspected for cracks by means of a car equipped with **ultrasonic and magnetic inspection** devices running along the rail.
Cracks in different directions may initiate at various locations in the rail head; these are internal flaws of quasi-elliptical shape.
Some are in a longitudinal plane, either vertical or horizontal, some in a transverse plane (commonly called detail cracks).
An example of the latter is shown in Figure 14.21

Os trilhos são inspecionados quanto a trincas por meio de um carro equipado com dispositivos de inspeção ultra-sônica e magnética que passa ao longo do trilho.
Trincas em direções diferentes podem iniciar em vários locais na cabeça do trilho; são falhas internas de formato quase elíptico.
Algumas estão em um plano longitudinal, tanto vertical como horizontal, algumas em um plano transversal (comumente chamadas de fissuras de detalhes).
Um exemplo desta última é mostrado na Figura 14.21

The Practical Use of Fracture Mechanics

DAVID BROEK - FractuResearch Inc., Galena, OR, USA

Kluwer Academic Publishers Dordrecht

Teoria da fratura, aplicada à fadiga em Trilhos

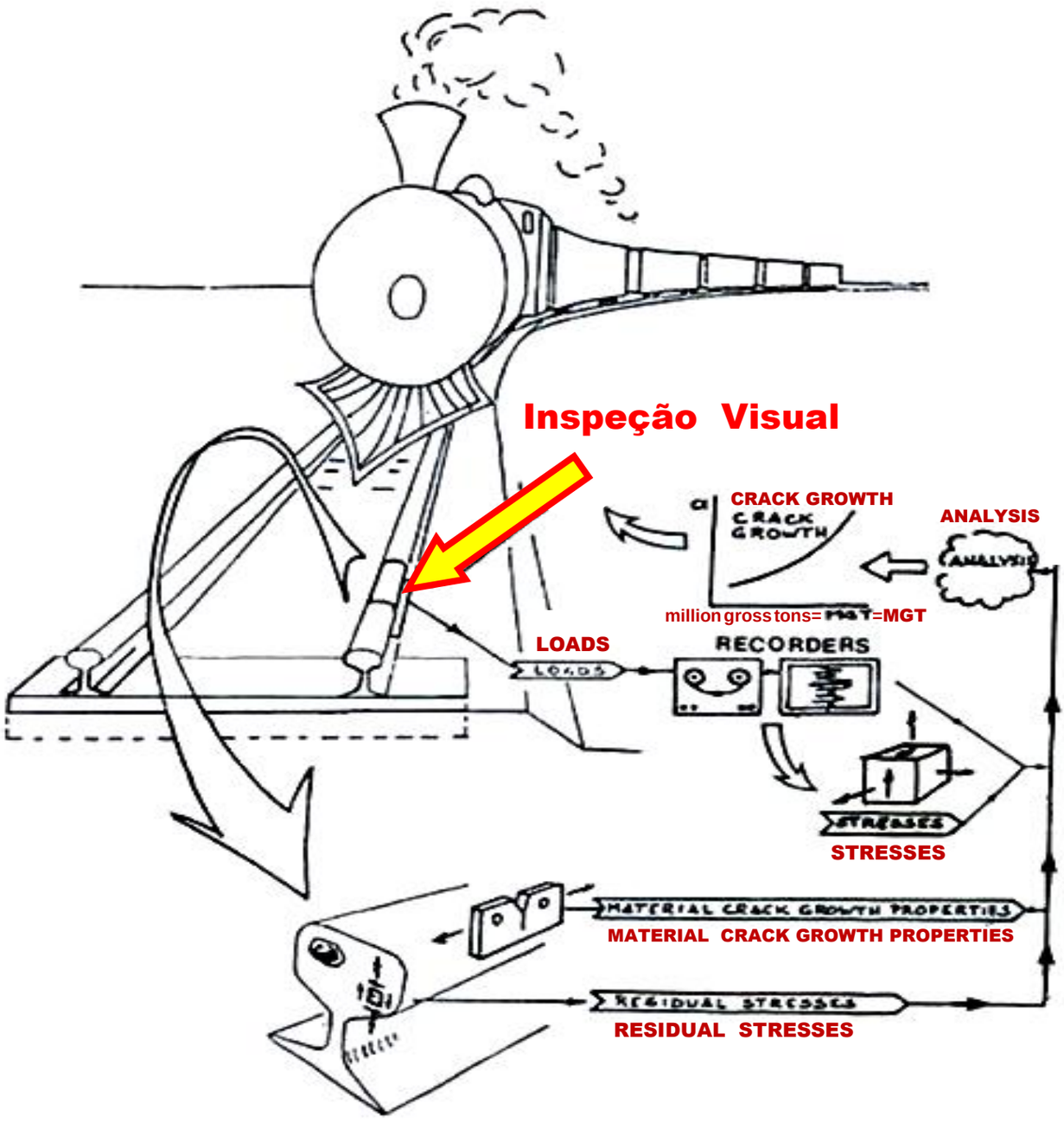


Figure 14.20. **Ingredients of analysis of cracks in railroad rails.**

(a)Rails are inspected for cracks by means of a car equipped with ultrasonic and magnetic inspection devices running along the rail. Cracks in different directions may initiate at various locations in the rail head; these are internal flaws of quasi-elliptical shape. Some are in a longitudinal plane, either vertical or horizontal, some in a transverse plane (commonly called detail cracks).

(b) *Loads and stresses*

Track was straingaged (Figure 14.20) at several locations to measure load-spectra for various kinds of usuage [19]. Finite element analysis was performed [20]

Falha em Bolha, mostrada por DAVID BROEK

Figure 14.21. Fracture of railroad rail as a result of detail crack. Courtesy TSC and Battelle.

Energodiagnostika

Metal Magnetic Memory Method - Diagnostics of rails, wheel pairs, locomotive parts and other products used in the railway transport

http://www.energodiagnostika.com/app-mmm-rels.html

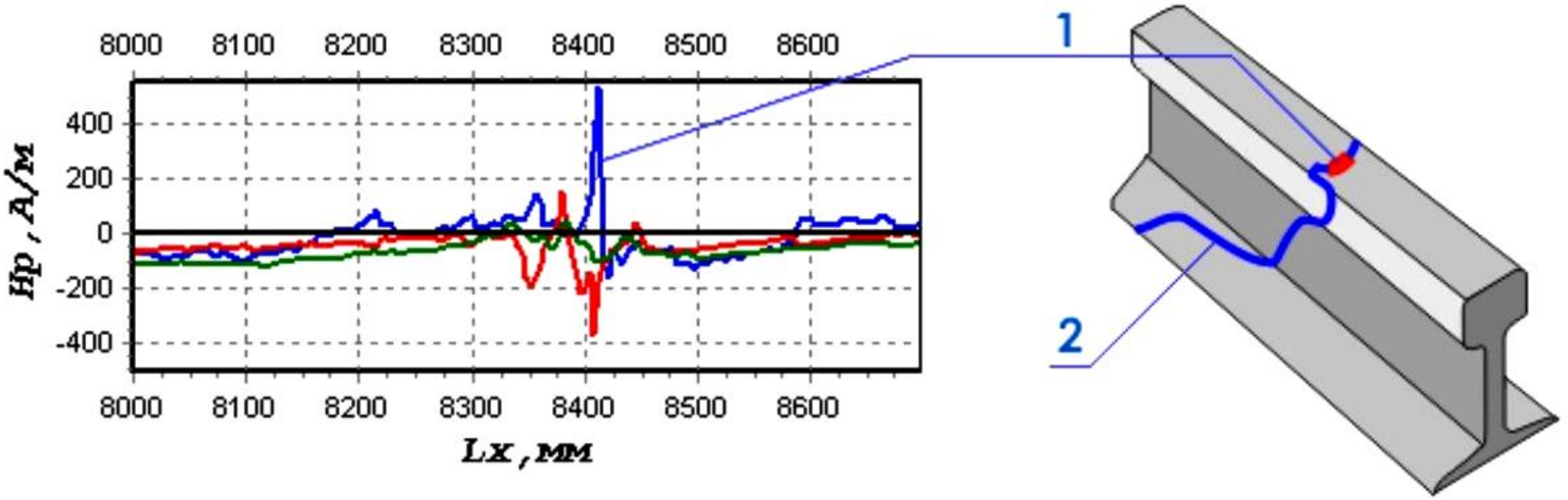


Fig.2. Rail inspection using a specialized trolley: 1- crack; 2 - SC line.

Stress Concentration (SC) zones

"*Estudo comparativo do comportamento de aços (trilhos) premium na tenacidade à fratura e na propagação de trinca por fadiga, em aplicação ferroviária*" - **Thiago Gomes Viana - U. F. OURO PRETO**

https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/5699/6/DISSERTA%c3%87%c3%83O_EstudoComparativoComportamento.pdf

PATINADO

Fratura TR68 boleto - Acidente trem C153 - Ferrovia Centro Atlântica - 27/11/11.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

ESPECIALIZAÇÃO EM TRANSPORTE DE CARGA FERROVIÁRIO

PATRICK GUEDES PEDRONI

ANÁLISE DE FALHAS DAS FRATURAS DE TRILHOS:

O CASO DA FERROVIA DO AÇO

Rio de Janeiro 2008

http://transportes.ime.eb.br/etfc/monografias/MON034.pdf

TRINCA HORIZONTAL NO BOLETO (HORIZONTAL SPLIT HEAD – HSH):

É uma fratura no plano horizontal que se desenvolve de modo progressivo, longitudinalmente e paralelamente ao topo do boleto, se distanciando da superfície de rolamento em no mínimo 1/3 da altura do boleto. Pode atingir mais de 20cm ao longo do trilho. O seu crescimento, ao longo do seu comprimento, é relativamente rápido, podendo, pois, mudar sua orientação para o plano transversal.

Figura 17: Trinca horizontal no boleto do trilho. FONTE MRS Logística.

TRINCA DE PATINAÇÃO DE RODA *(ENGINE BURN FRACTURE – EBF)*:

É uma fratura no plano transversal provocada pela patinação de roda que se desenvolve logo abaixo da marca de patinação. Ela se encaminha em direção à alma do trilho e no sentido da parte externa do boleto.

Figura 18: Patinado em trilho. FONTE: MRS Logística

TRINCA VERTICAL NO BOLETO *(VERTICAL SPLIT HEAD - VSH) :*

É uma fratura no plano vertical que se desenvolve de modo progressivo e longitudinalmente ao centro do boleto, conforme exposta a figura a seguir, podendo atingir mais de 2m ao longo do comprimento do trilho.
O crescimento desta trinca é relativamente rápido até que ela aflore em algum ponto da extensão do trilho.

Figura 16: Trinca vertical no boleto. FONTE: MRS Logística

ESTADO PLANO DE TENSÃO RESIDUAL

P. J. WEBSTER, X. WANG AND G.MILLS

References

[1] P.J. Webster, X. Wang and G. Mills, in *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Measurement of Residual Stress using Neutron Diffraction*, Oxford, Kluwer Academic Publishers, 517-524 (1992).

[2] P.J. Webster, *Neutron News* **2**, 19-22 (1991).

Principal Publication and Authors

P.J. Webster (a,b), D.J. Hughes (a,b), G. Mills (a), G.B.M. Vaughan (c), *Materials Science Forum* **404-407**, 767-772 (2002).

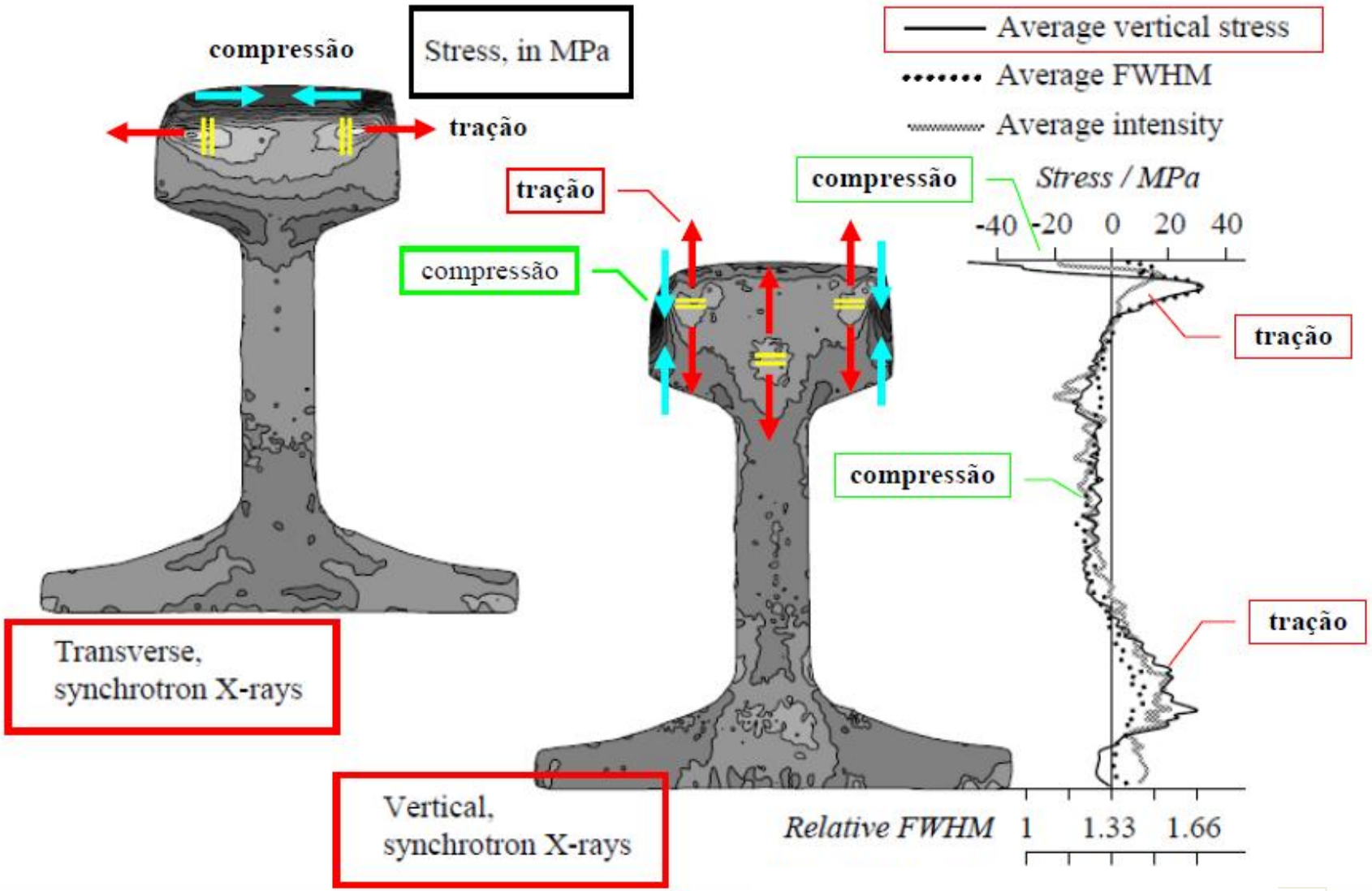
(a) Institute for Materials Research, University of Salford, Manchester (UK)

(b) FaME38 at ILL-ESRF

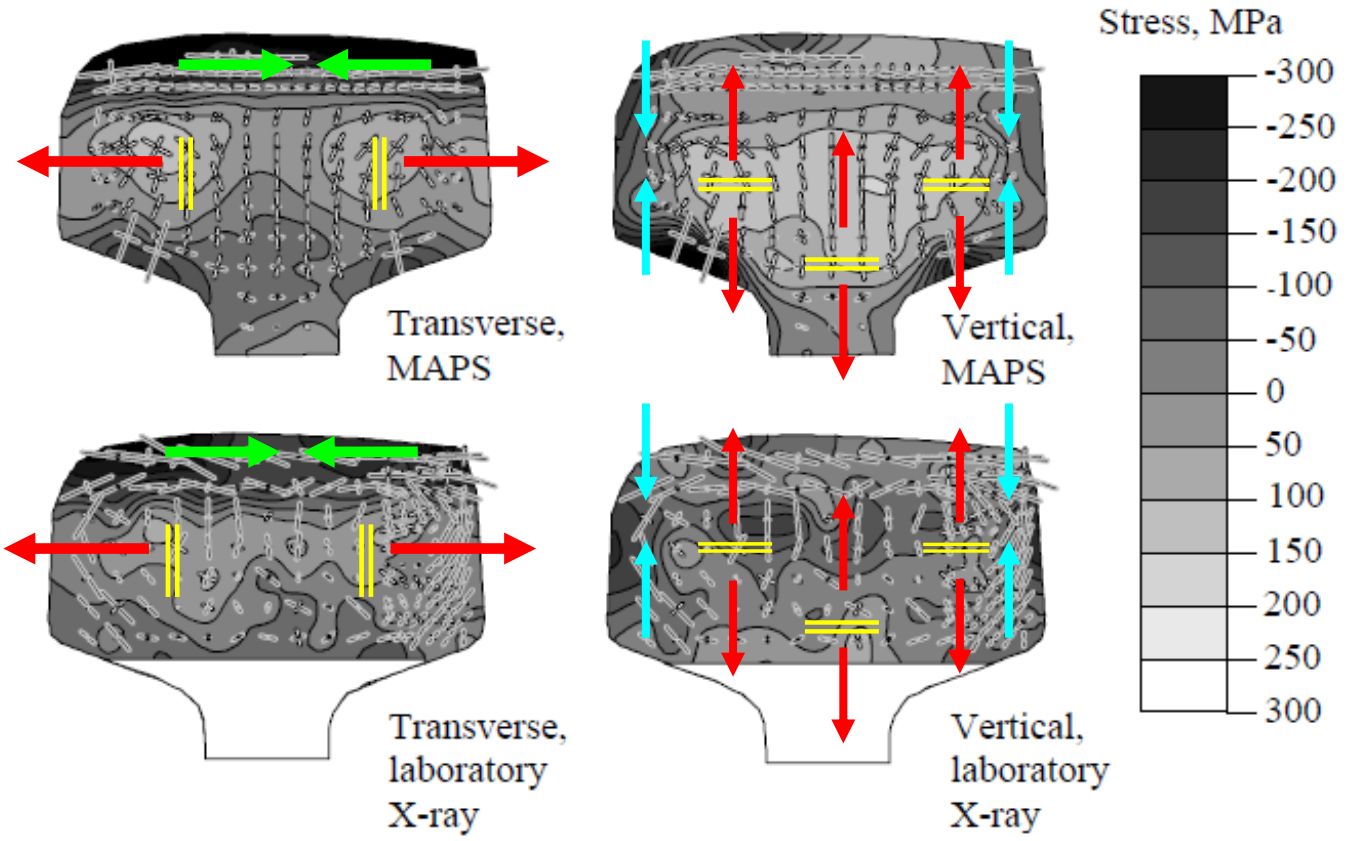
(c) ESRF

Estado Plano de Tensão Residual

Componentes horizontal e vertical da tensão residual em um trilho usado, com desgaste na superfície superior.
São mostradas as direções principais de tensão determinadas pelo Magnetic Measurement System = MAPS e também pelo Raio X .



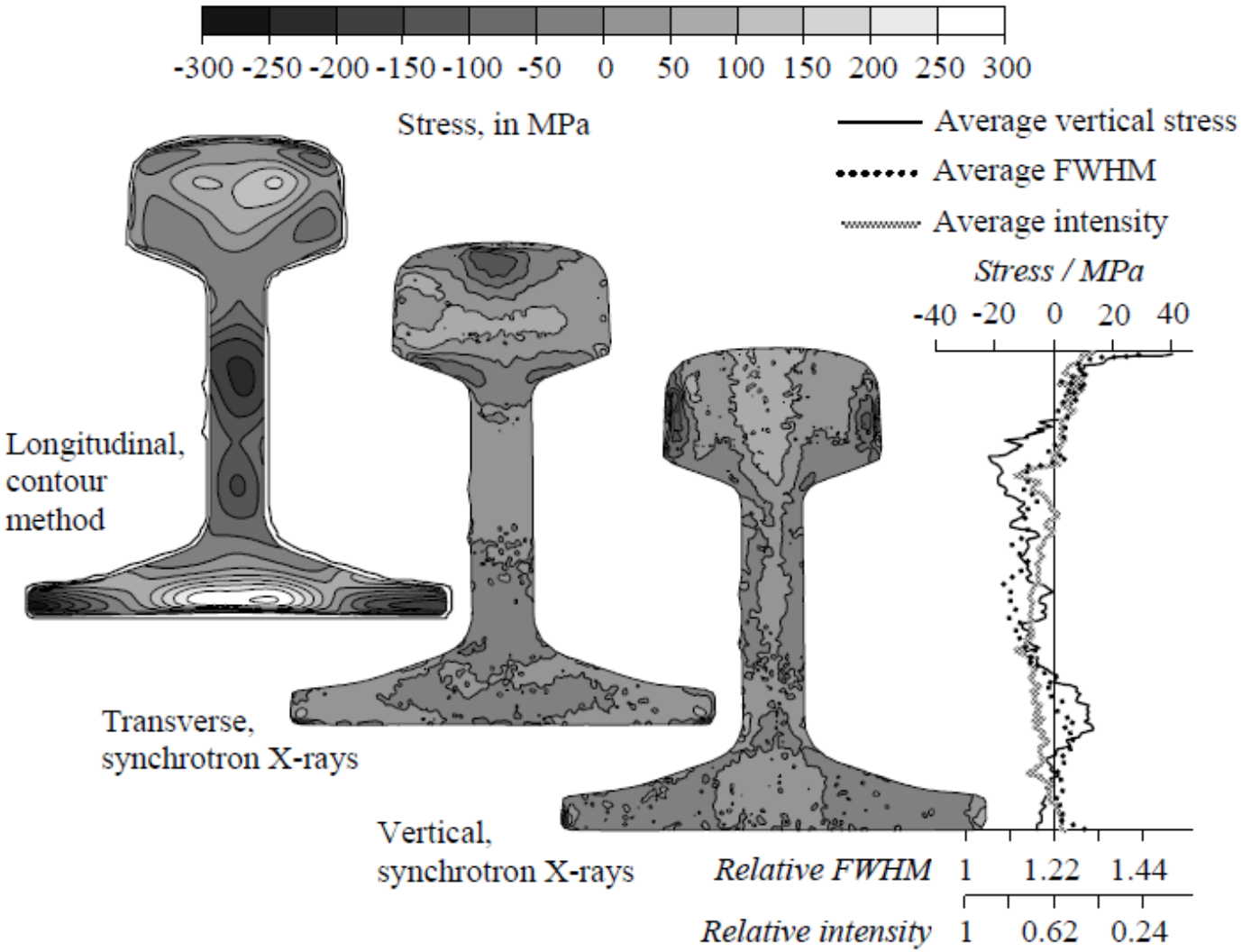
Estado plano de tensão Residual



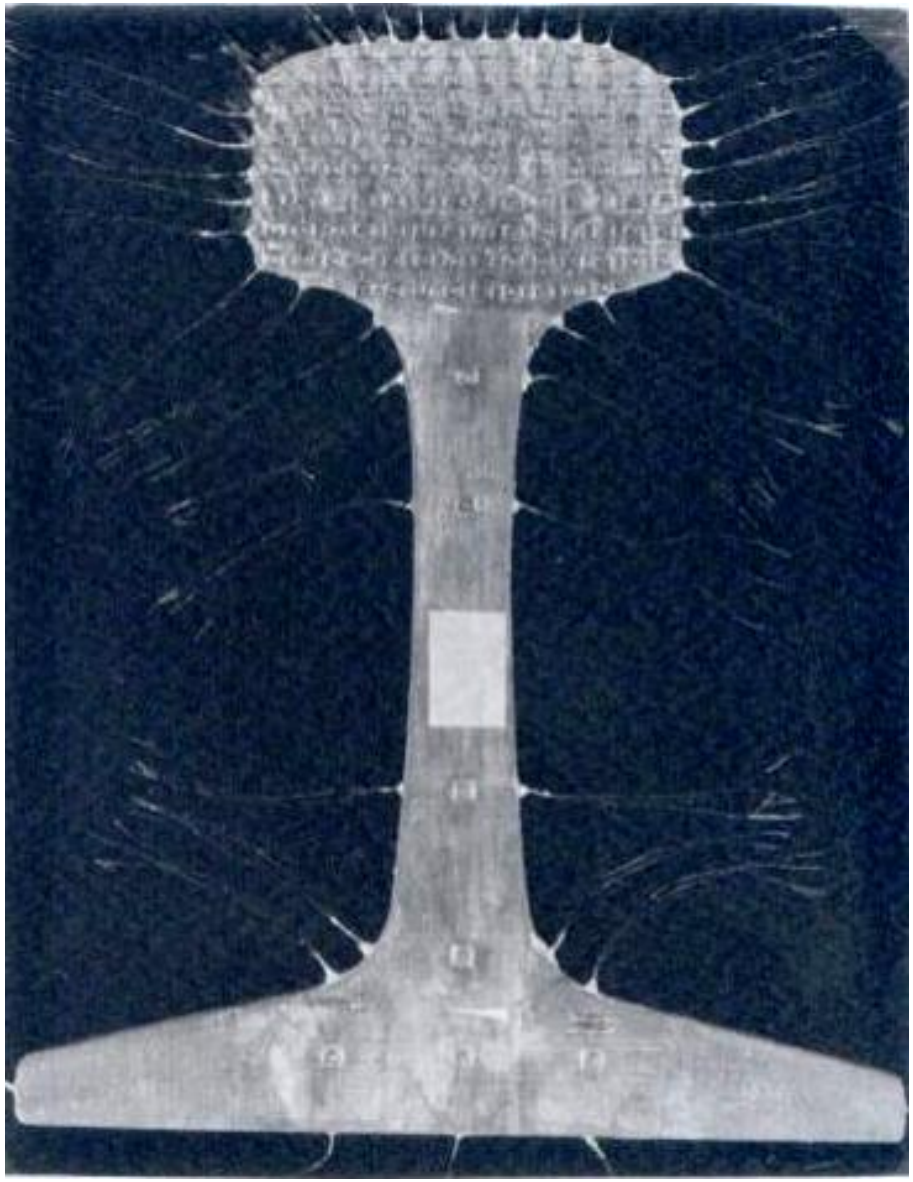
Eventual Fissura vertical por fadiga

Eventual Fissura horizontal por fadiga

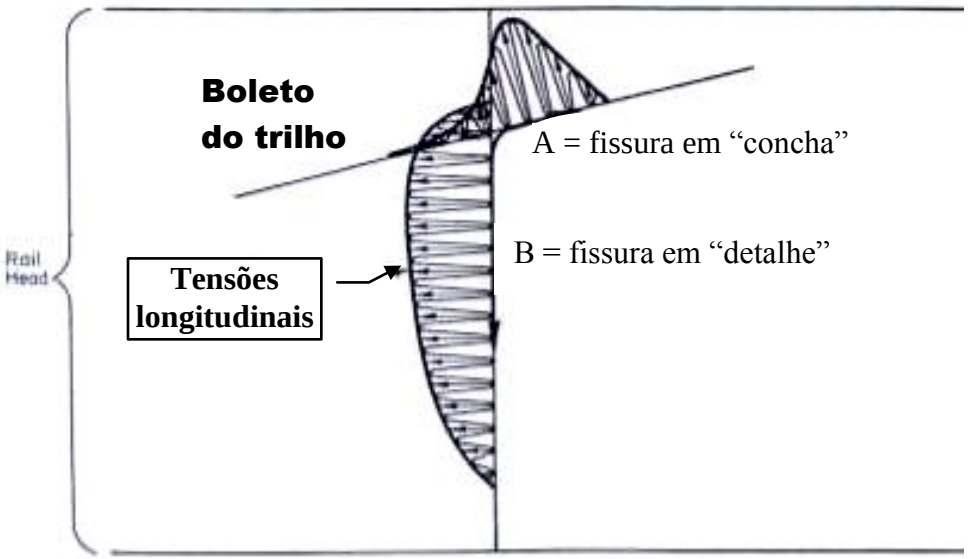
Figure 1 Longitudinal (before slicing), transverse and vertical (after slicing) components of the residual stress in a new roller straightened rail sample. A plot of the vertical stress averaged across the width of the rail as a function of vertical position is shown (right). The corresponding FWHM and integrated intensity variations are also shown.



Strain gages no trilho para medida de tensão residual



TENSÕES NO BOLETO DO TRILHO



Tensões cíclicas na fissura "concha" A, e na fissura transversal B

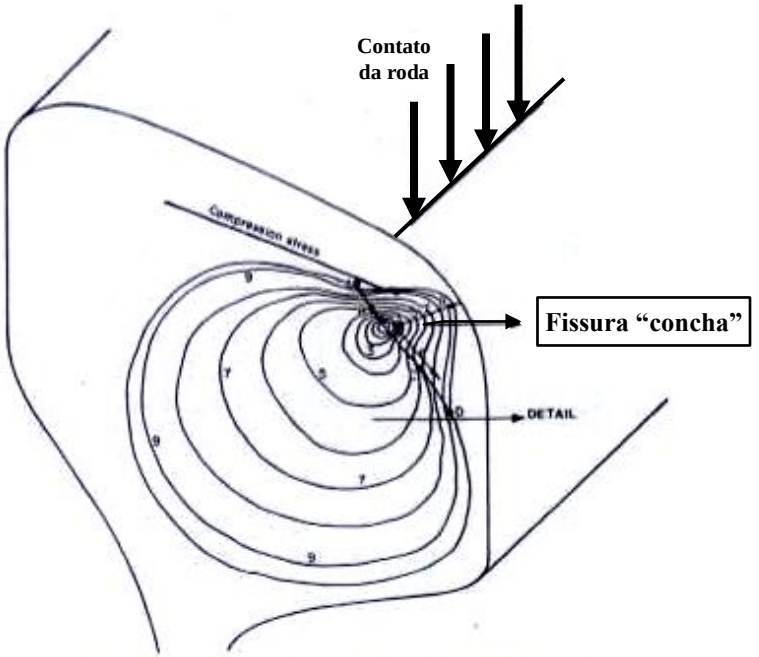
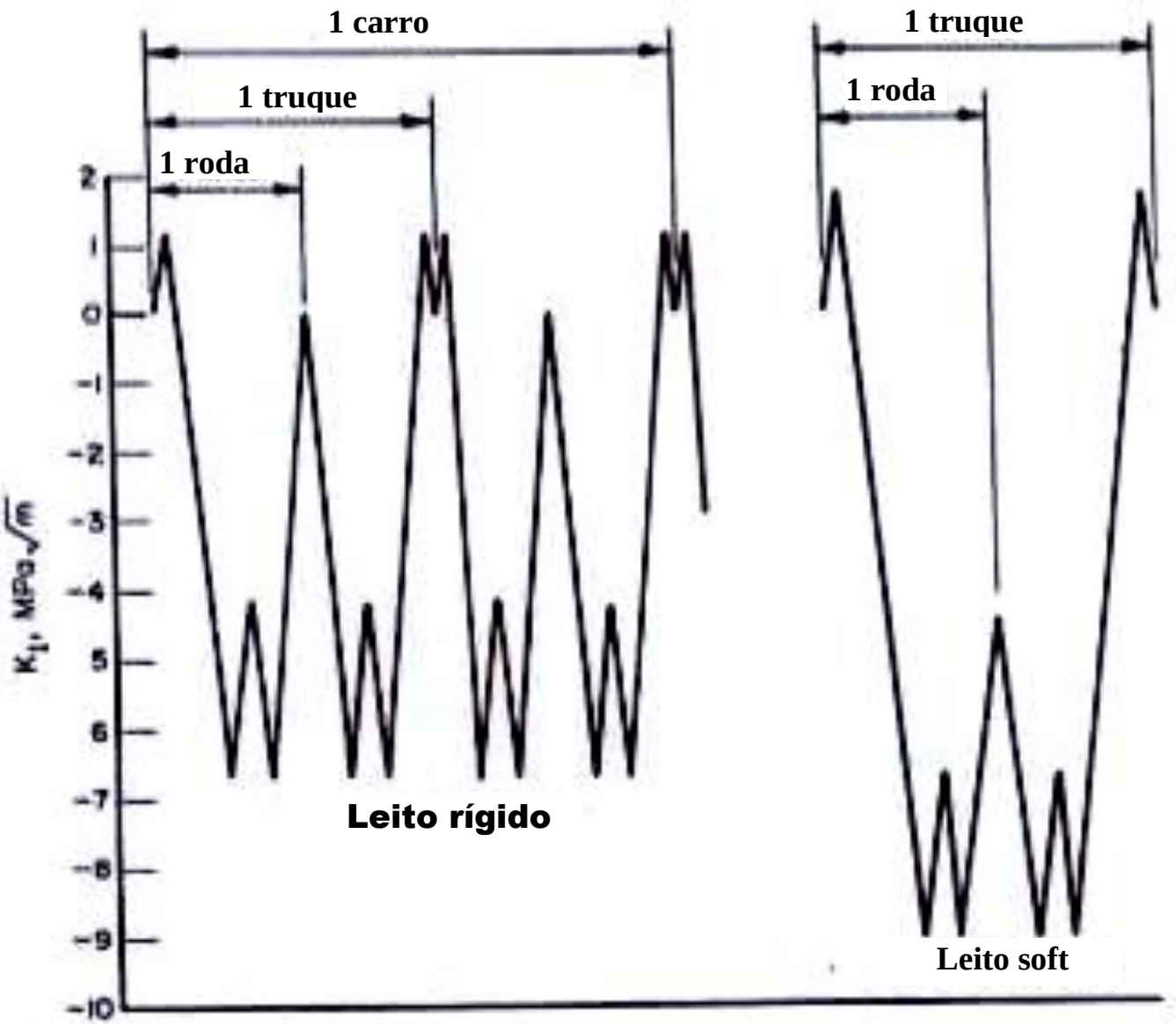


Figure 14.26. Schematic growth of shell and detail crack.

K1 $\left(\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}\right)$



Ciclos devidos à passagem de rodas , truques e carros

Previsão do Crescimento da Fissura em Trilhos

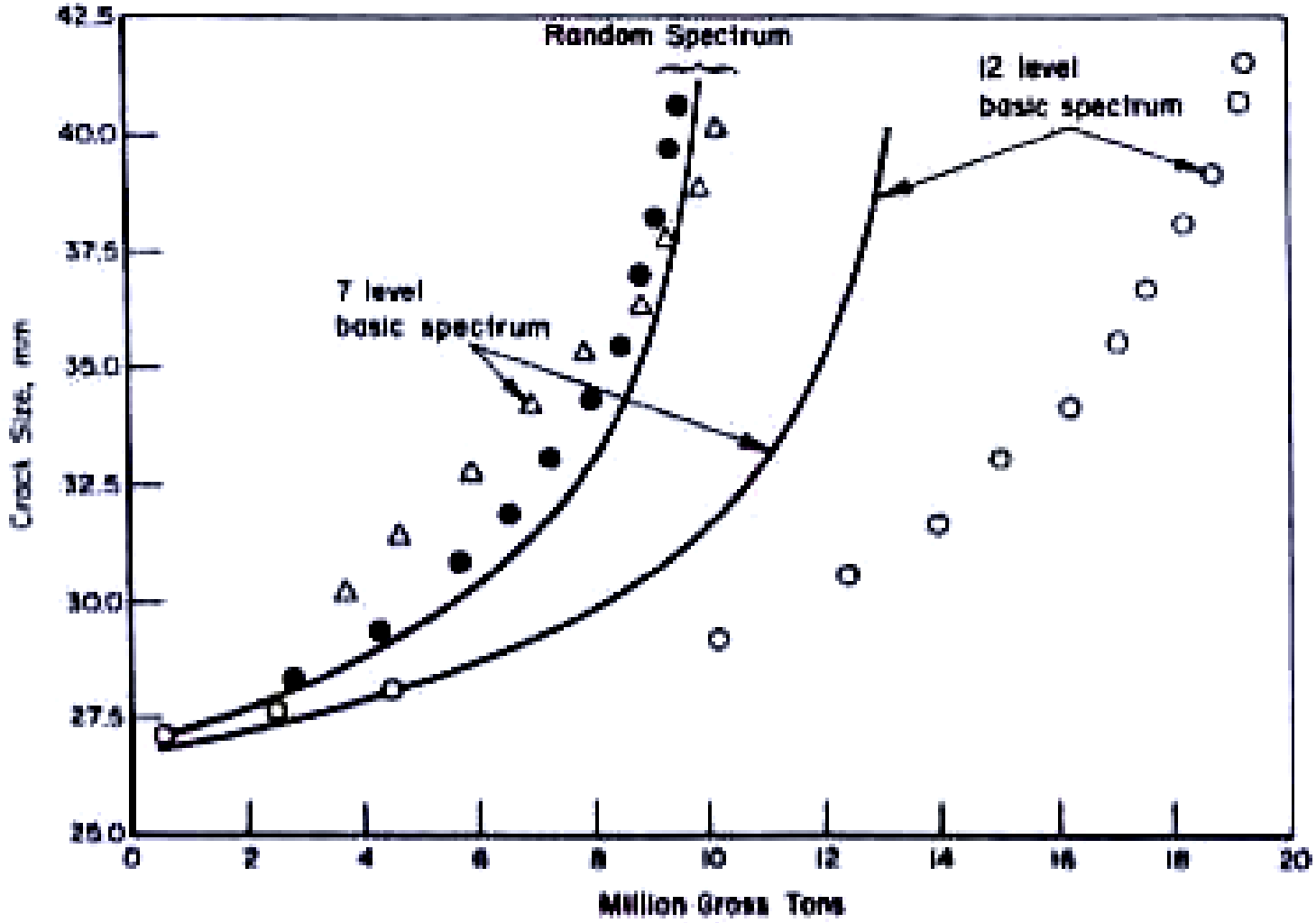
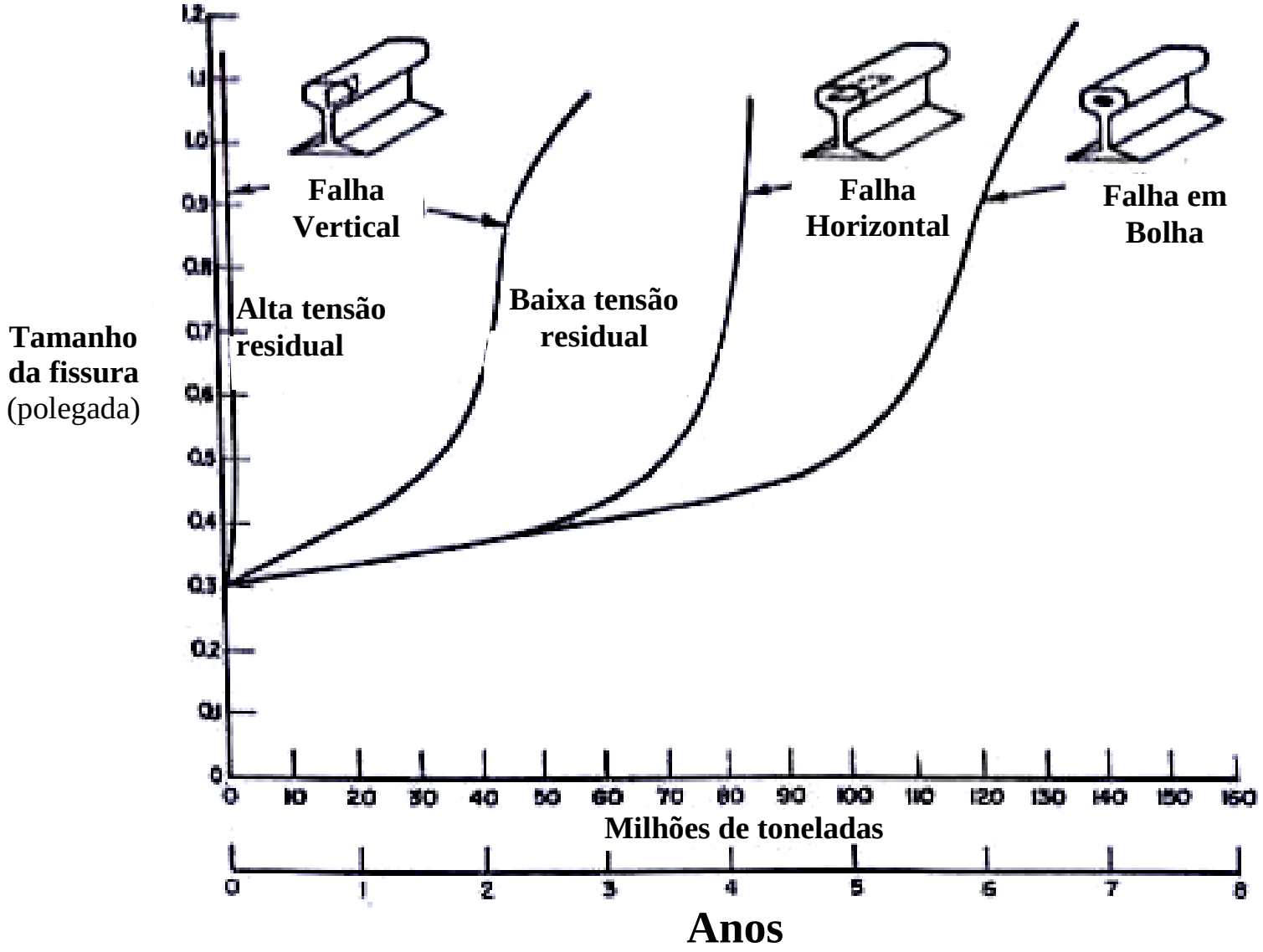
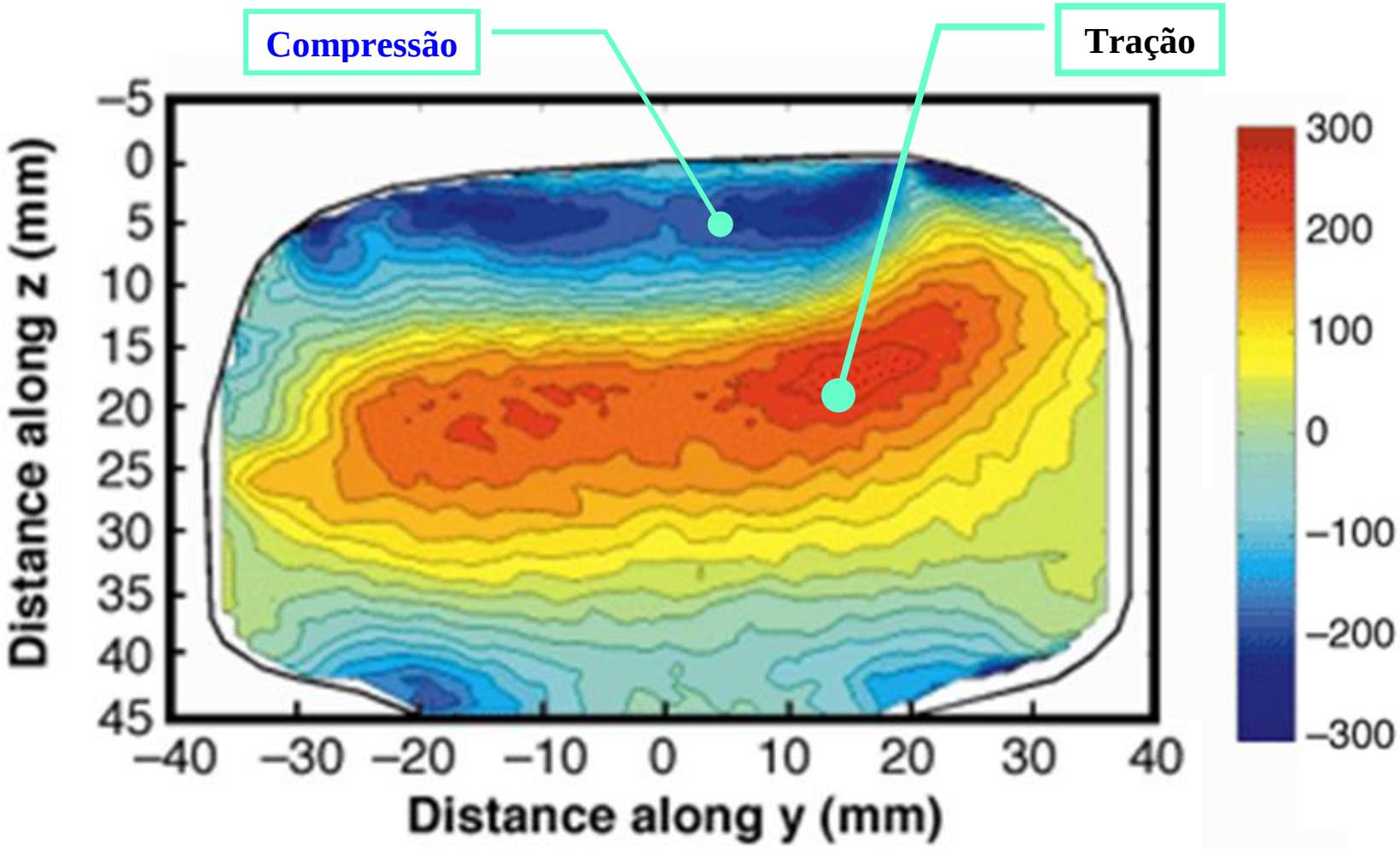


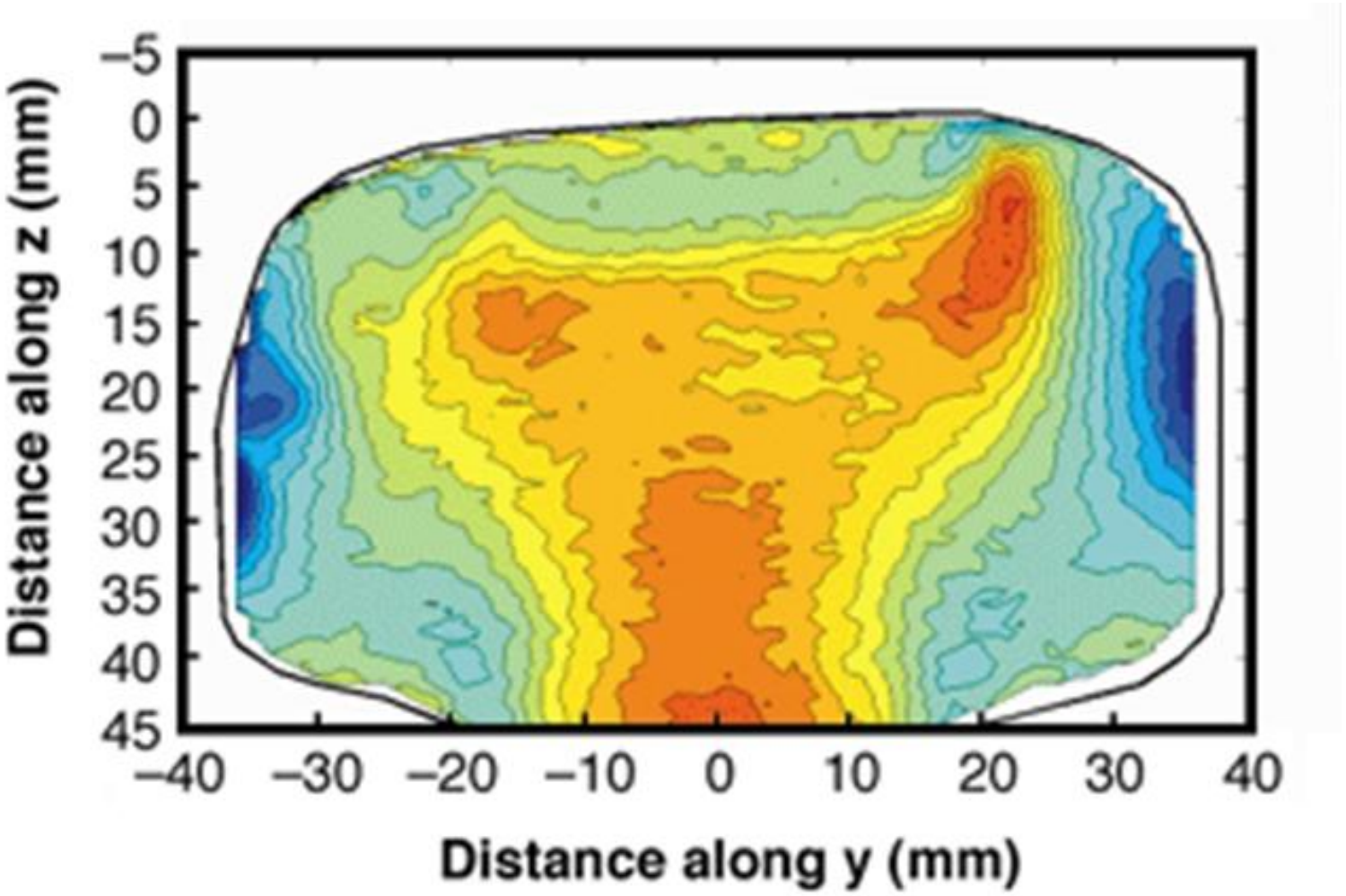
Figure 14.31. **Predictions of crack growth (solid lines) and test data under simulated train-by-train loading.**

Previsão do Crescimento da Fissura em Trilhos





Tensões residuais em MPa



Tensões residuais em MPa

FRATURAS EM TRILHOS, OBSERVADAS NO IPT / SP

por HUBERTUS COLPAERT

FRATURAS EM TRILHOS , OBSERVADAS NO IPT / SP

por Hubertus Colpaert

Livro " *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns* "

2ª edição - IPT / SP 1959

http://www.ipt.br/institucional/campanhas/27.htm

Hubertus Colpaert - IPT / SP

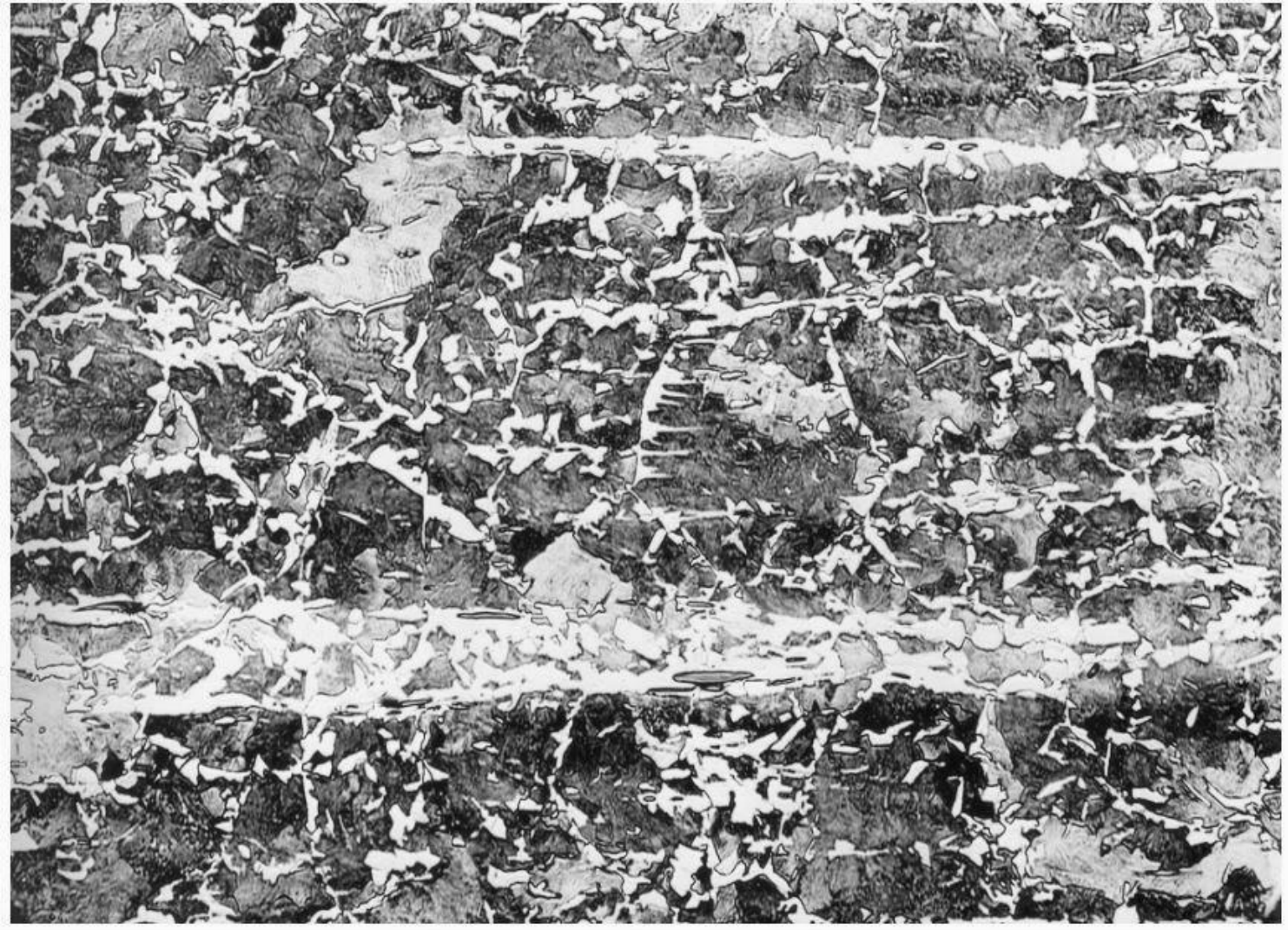
Seus trabalhos sobre metalografia, desenvolvidos em prol das ferrovias, da metalurgia e da siderurgia no País, fizeram de Colpaert uma referência na área.

Criou a Seção de Metalografia do IPT e dela fez um importante instrumento de ensino e de desenvolvimento industrial no País, consolidando o IPT nesse campo de atuação.

(☼ **01 // 04 // 1901 === ✝ 16 //01// 1957**)

Hubertus Colpaert

1942 - IPT -Exame Micrográfico de uma Fratura de Trilho



: Livro **“** ***Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*** **“** – 2ª edição - IPT / SP 1959

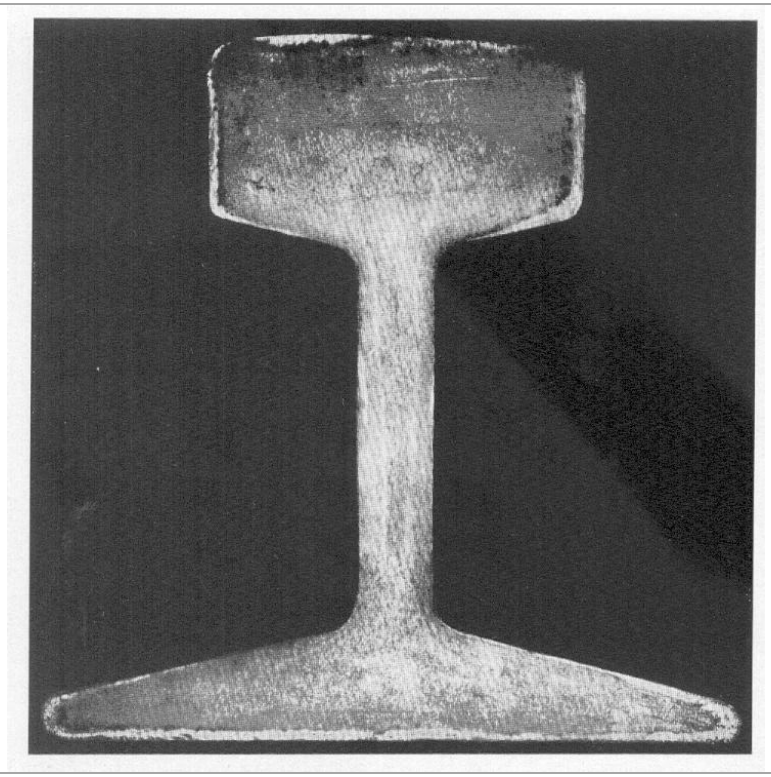


Fig. 98 – Seção transversal de trilho apresentando intensa descarbonatação junto à superfície.(faixas claras) .

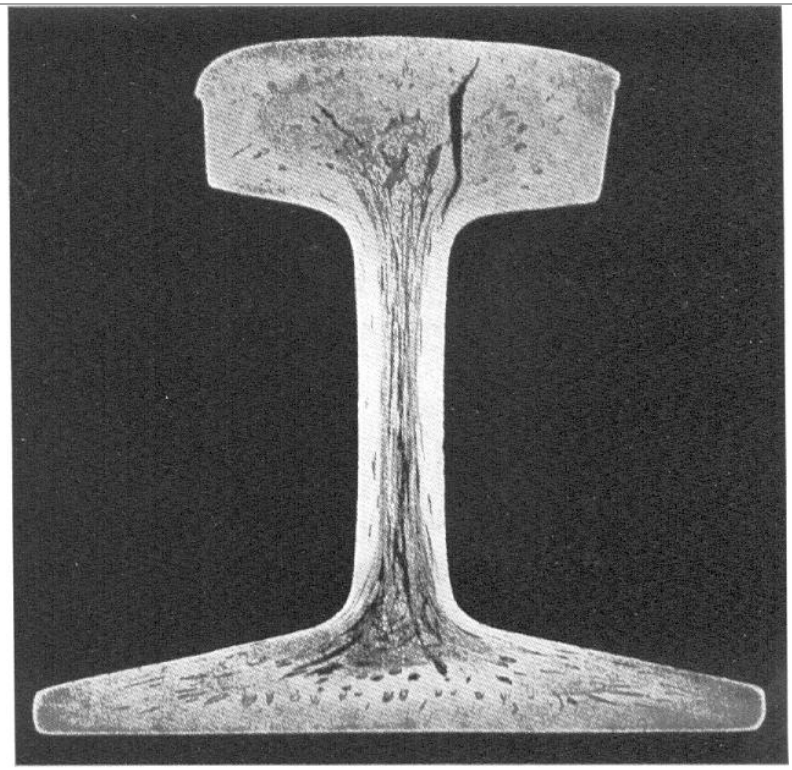


Fig. 103 – Exemplo da influência perniciosa de uma forte concentração de impurezas no boleto. O trilho rompeu em serviço. Nota-se como a fratura acompanhou o contorno da zona segregada

Hubertus Colpaert : Livro " ***Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*** "
2ª edição - IPT / SP 1959

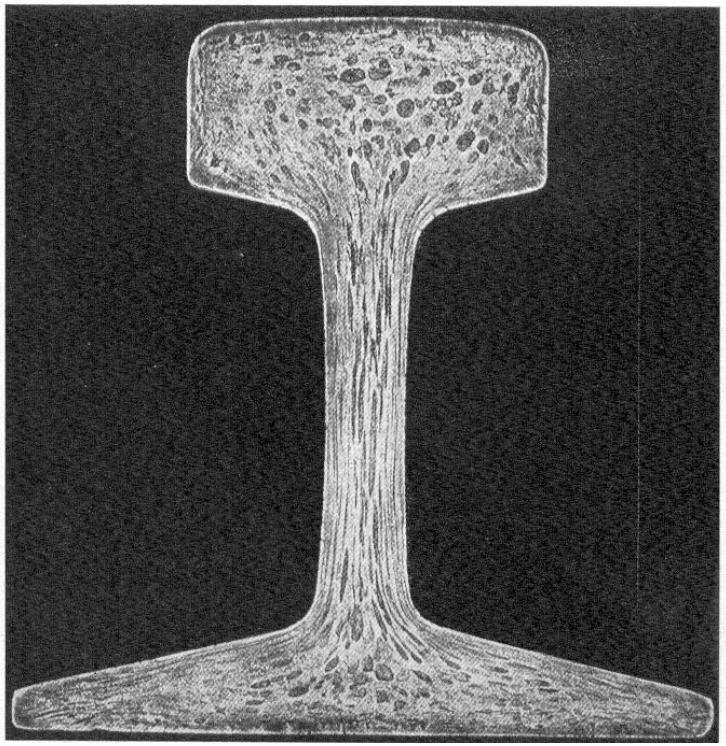


Fig. 105 – Trilho rico em bolhas preenchidas com material mais impuro

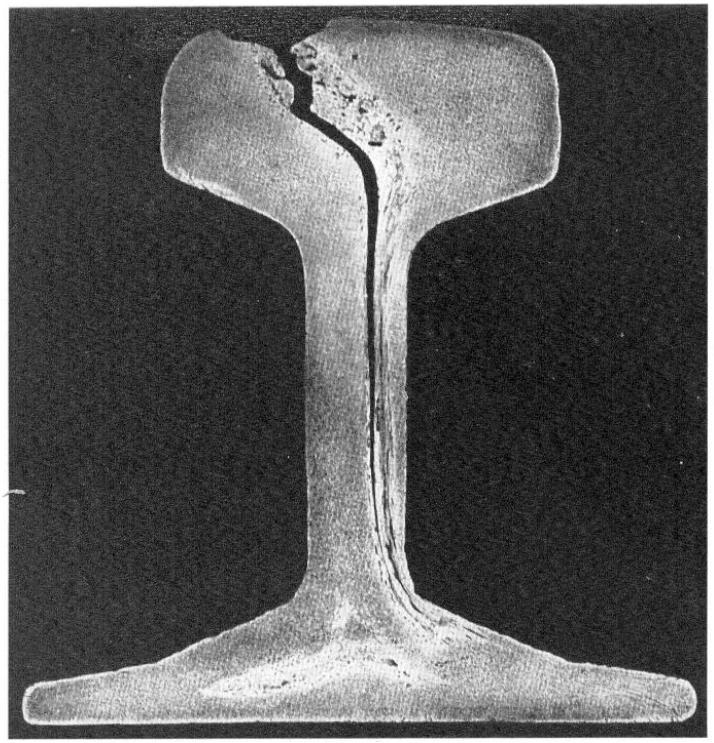


Fig. 107 – Exemplo da influência nefasta da segregação sobre a resistência de um trilho.
A fissura acompanha a região onde as impurezas se gruparam. Fora dessas zonas o material apresenta razoável homogeneidade.

Hubertus Colpaert : Livro " *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns* " – 2ª edição - IPT / SP 1959

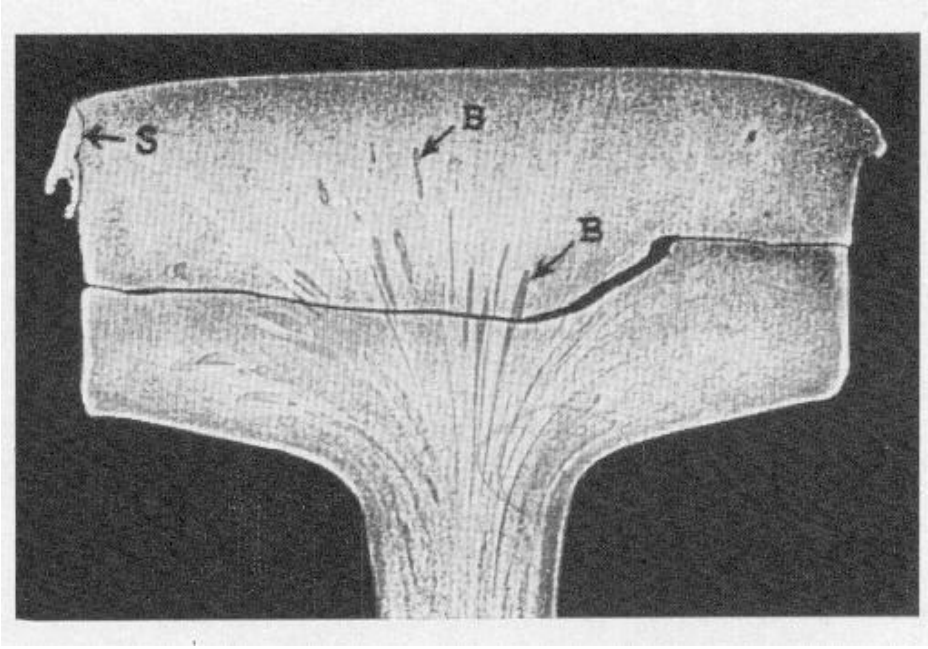


Fig. 125 – Seção transversal do boleto de um trilho rompido em serviço.
Ruptura desse gênero tem sido encontrada em trilhos aos quais se soldou uma ligação de cobre (para ligá-lo eletricamente ao trilho seguinte).
A flecha S assinala vestígios dessa solda. As flechas B apontam bolhas cheias de material impuro e alongadas durante a laminação.

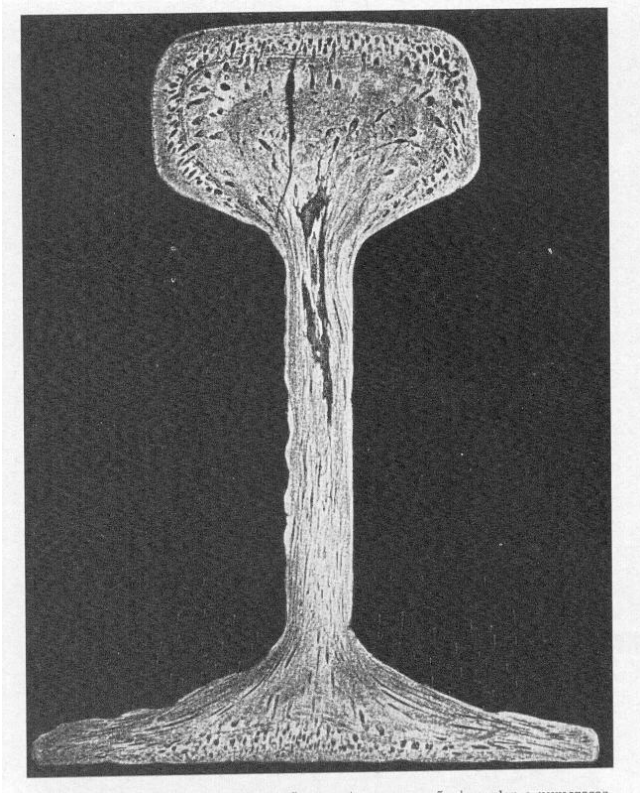


Fig. 126 – Trilho antigo em cuja seção se notam segregação irregular e numerosas bolhas cheias de material impuro.
Vê-se também uma fissura no boleto. As irregularidades de contorno do lado esquerdo da alma e do patim provem de corrosão.

Hubertus Colpaert : Livro " *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns* " – 2ª edição - IPT / SP 1959

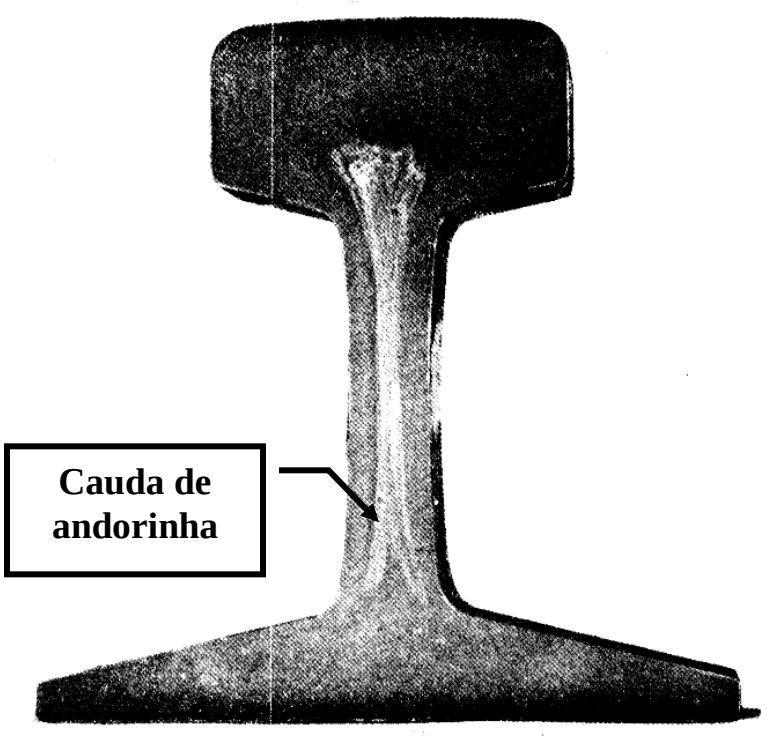


Fig 131 – Trilho com segregação terminada em "cauda de andorinha"

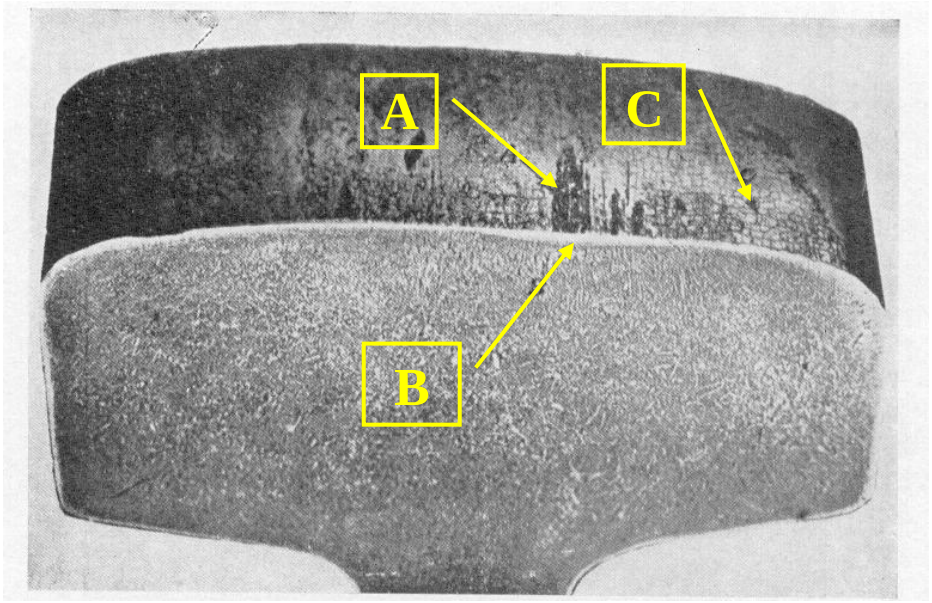


Fig.139 – Vista em perspectiva da superfície de rolamento e da seção transversal do boleto de um trilho.
No ponto A notam-se vestígios de uma rodada em falso, cujo aquecimento local foi suficiente para provocar a têmpera na camada subjacente, indicada em claro por B.
Na região C observam-se numerosas pequenas fissuras advindas do uso

Hubertus Colpaert : Livro " *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns* " – 2ª edição - IPT / SP 1959

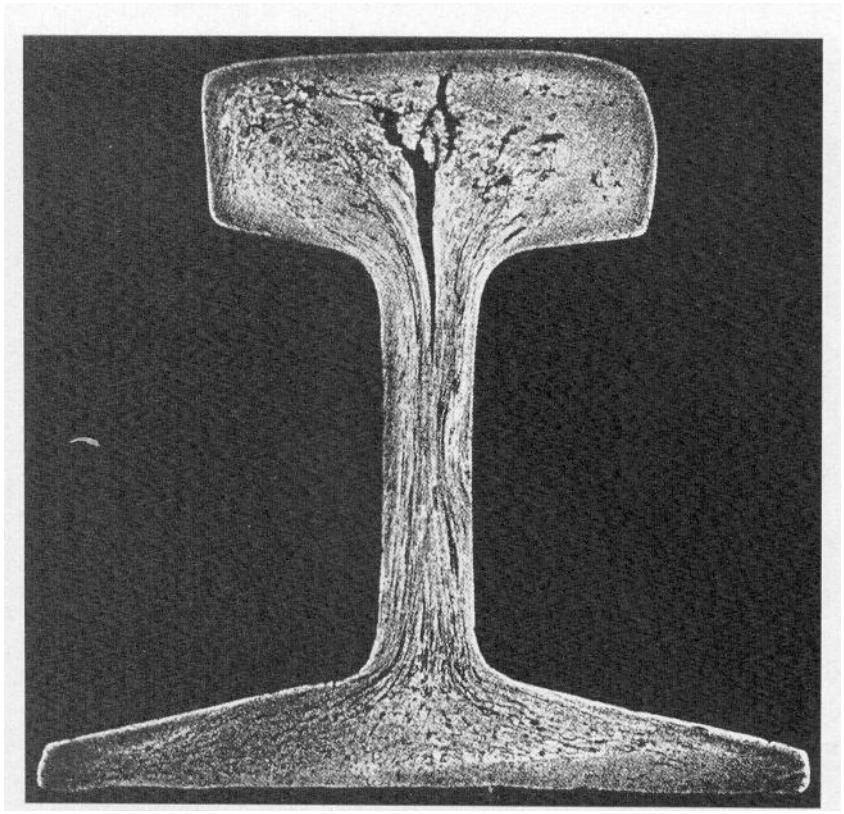


Fig. 142 – Aspecto da seção transversal de um trilho que fissurou paulatinamente em serviço, pelo aparecimento de trincas de fadiga, cujo desenvolvimento pode ser apreciado melhor na Fig. 144

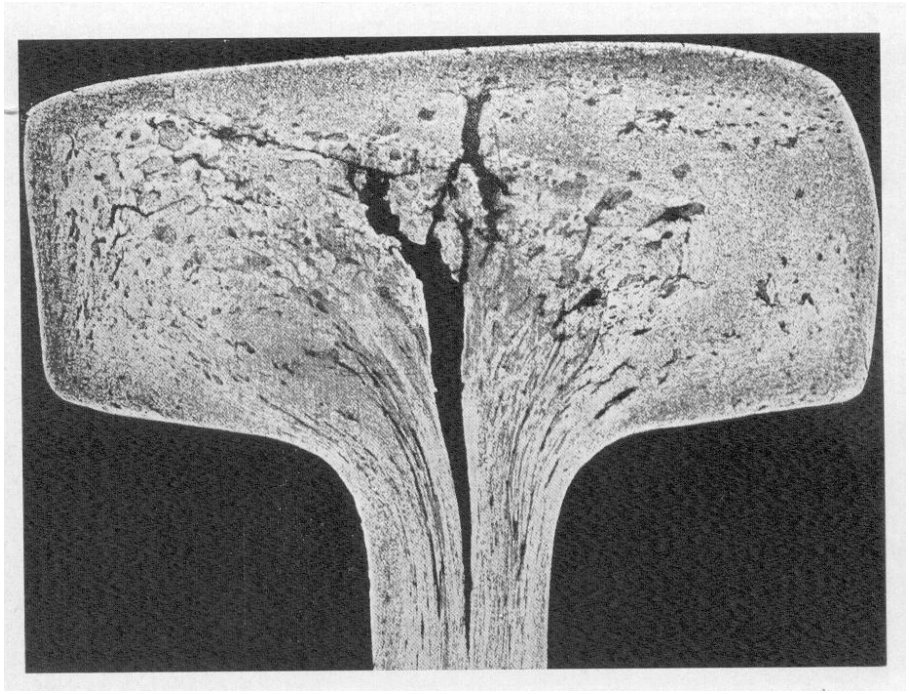


Fig. 144 – Detalhe do boleto do trilho, apresentado na Fig. 142 . Notam-se numerosas fissuras e também grande quantidade de concentrações de impurezas que favorecem a formação de trincas e facilitam seu desenvolvimento.

FERROESTE / PR

Ferrovia do Oeste - Trilhos soldados

Assentamento dos trilhos

Fotos cedidas pelo

Engº. Vicemar Sidnei Cirino (IME 1982) ,

engenheiro na obra

A **FERROESTE** foi construída entre 1991 e 1994 com apoio do Batalhão Ferroviário do Exército.

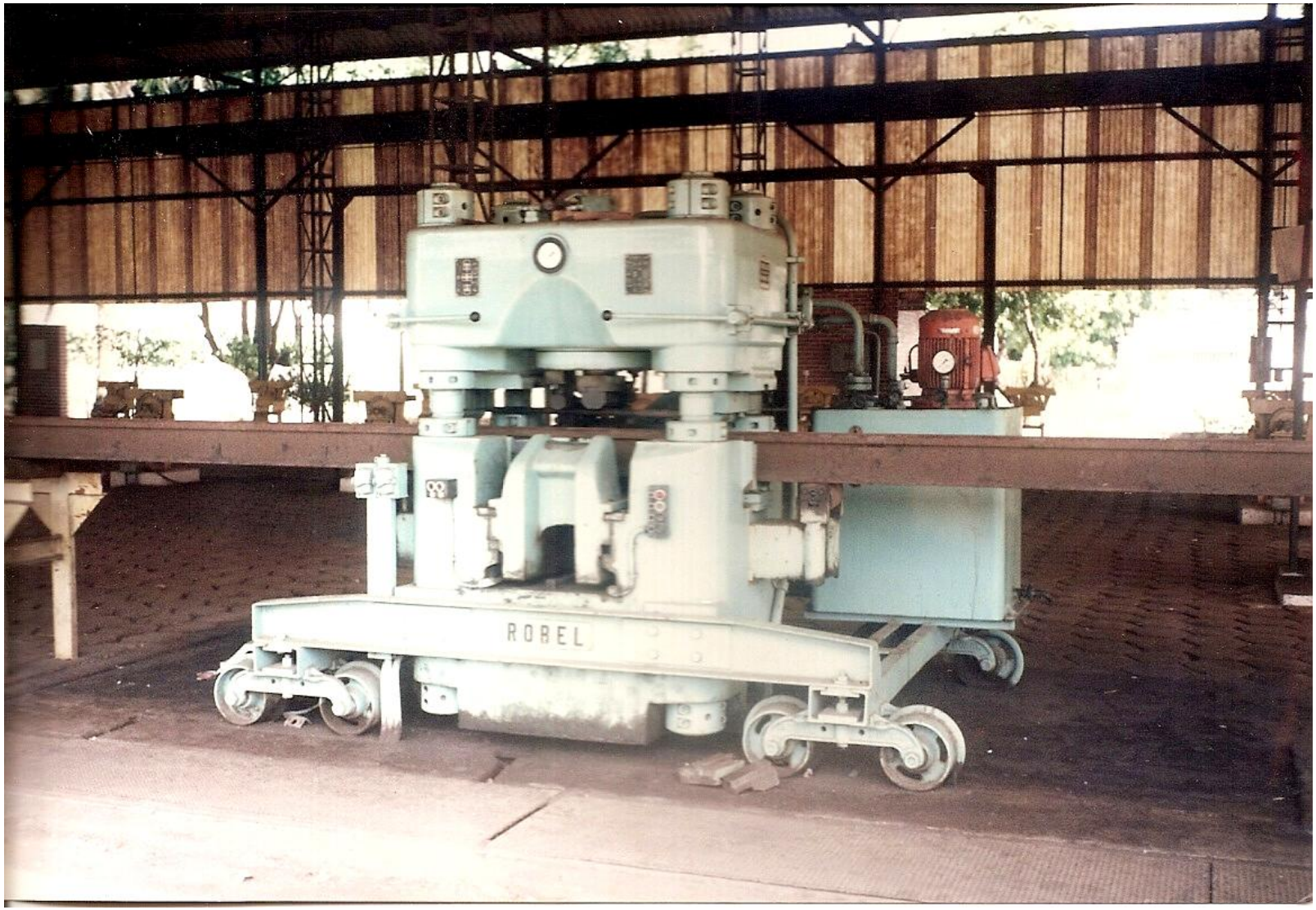
PARANÁ

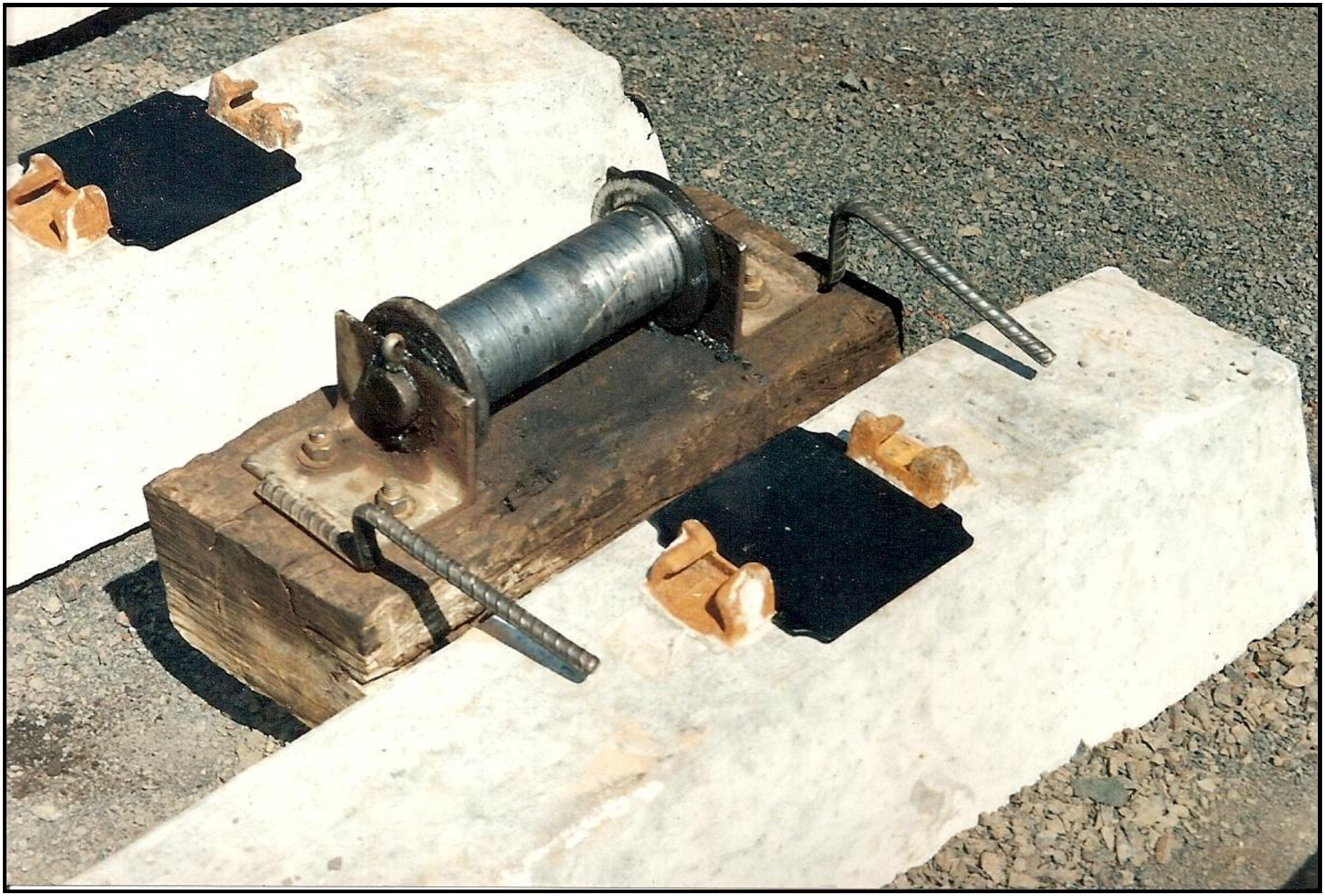
GUARAPUAVA ATÉ CASCAVEL

VIAJANDO NO TREM

https://www.youtube.com/watch?v=U4GECh5uh8M

Máquina de solda dos trilhos





S15
T-16

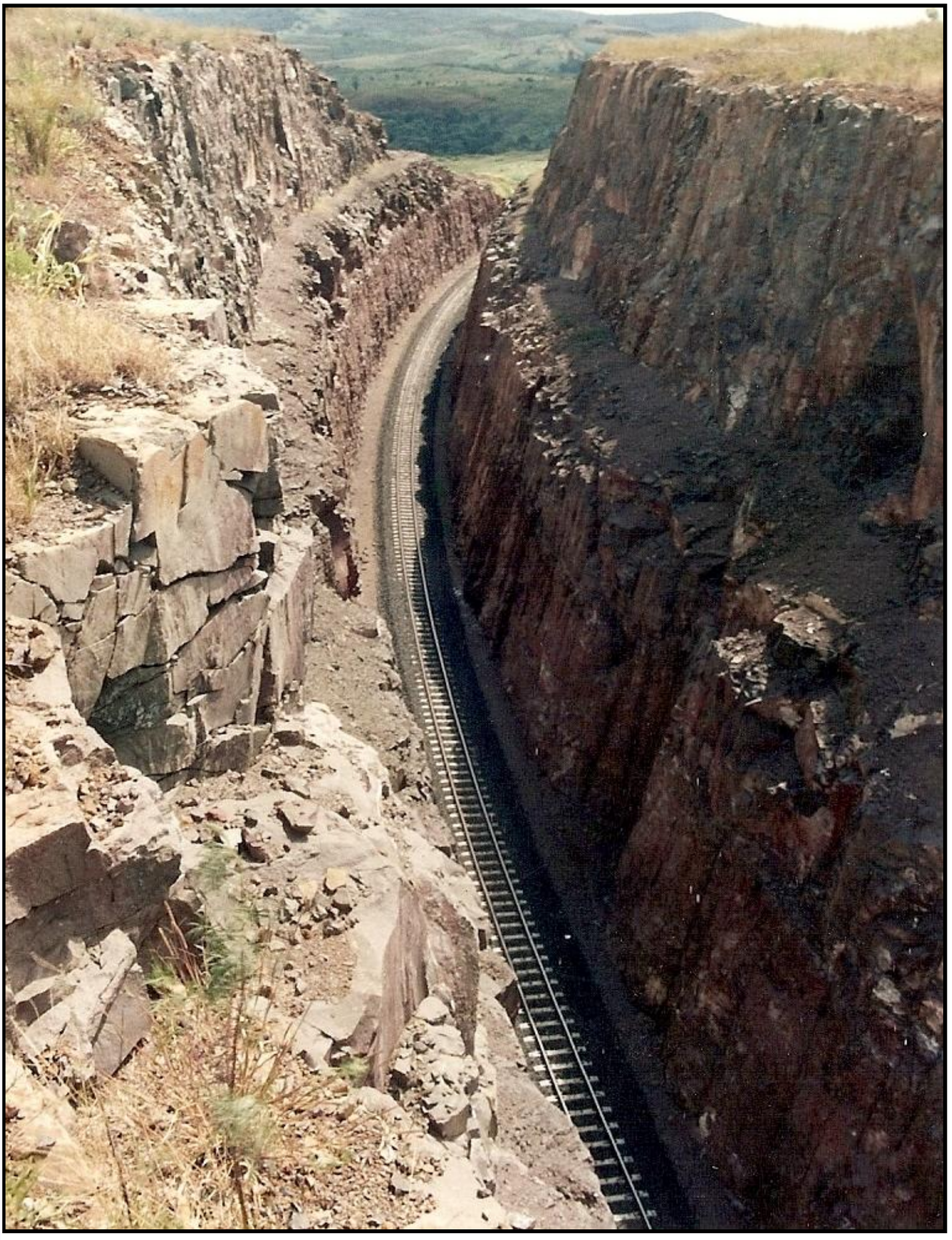
S-13
T/4

1994 - FERROESTE - Os trilhos encurvam durante transporte.

Fotos cedidas pelo Engº. Vicemar Sidnei Cirino , engenheiro na obra.

1994 - FERROVIA DO OESTE = FERROESTE

CORTE NA ROCHA

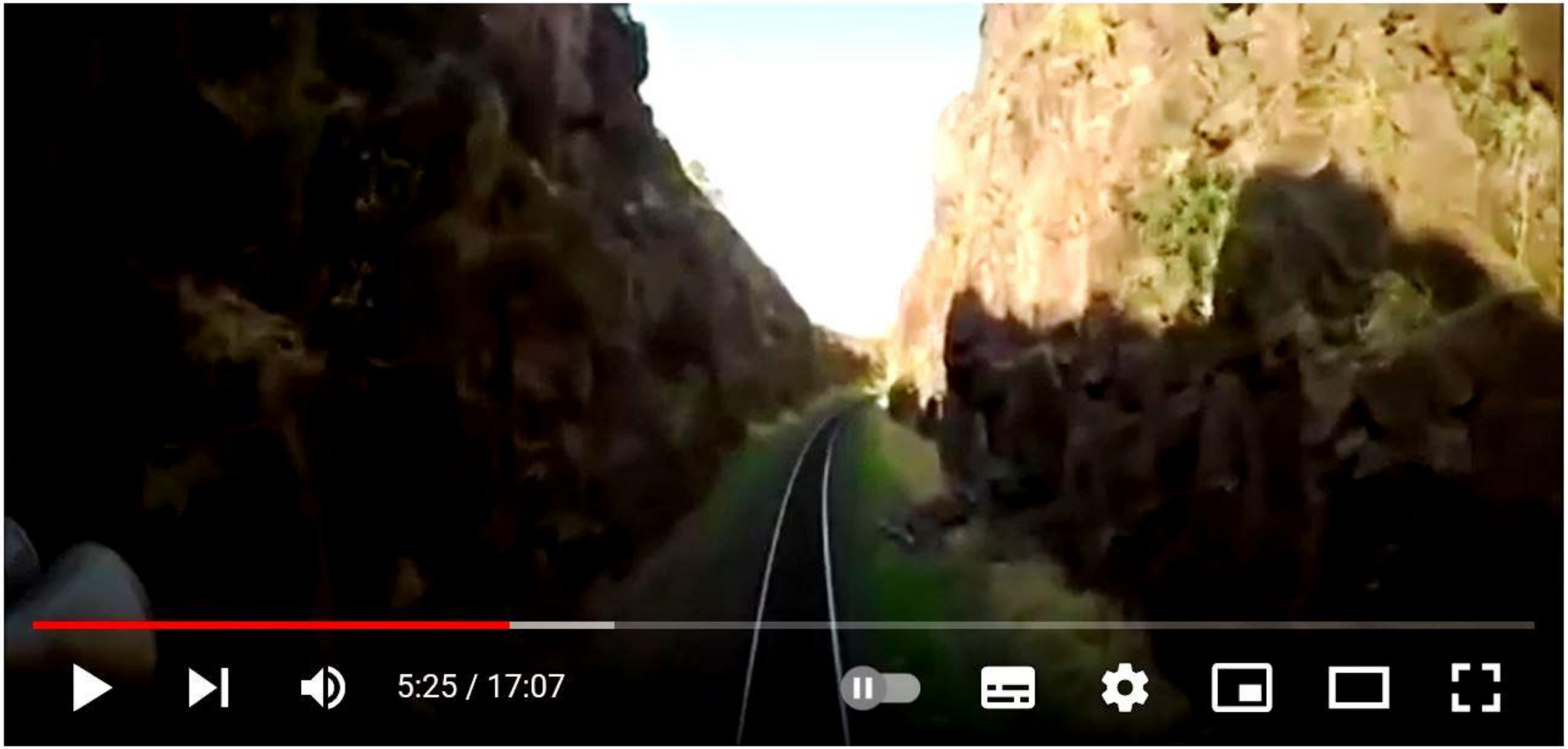


2016 - FERROESTE - MEU PARANÁ = Trilhos entre Cascavel e Guarapuava

https://www.youtube.com/watch?v=U4GECh5uh8M

2016 - FERROESTE - MEU PARANÁ = Trilhos entre Cascavel e Guarapuava

https://www.youtube.com/watch?v=U4GECh5uh8M

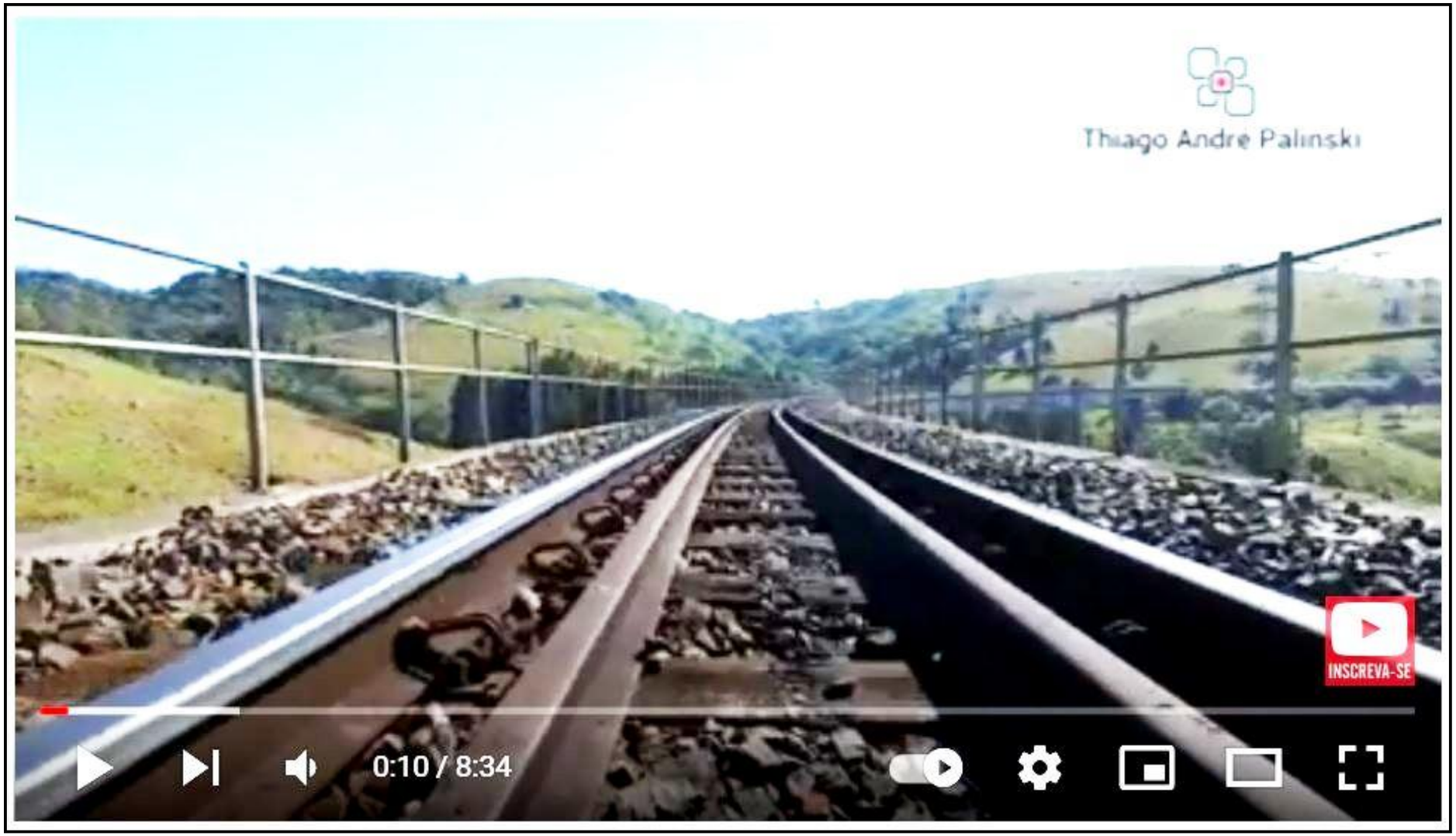


FERROESTE - Viaduto Laranjeiras do Sul no link

https://lh5.googleusercontent.com/p/AF1QipOkkjrRAI22a_lvGduhRg4RhVScJCmtbcMAI3xJ=h1440

FERROESTE - Viaduto Laranjeiras do Sul

https://www.youtube.com/watch?v=BI4RhBXb7vk



COMENTÁRIOS

Um grande desafio é a avaliação da durabilidade de trilhos ferroviarios.

Vários fatores influenciam a ruptura do trilho, em geral nos boletos

1 - Segregações durante a fabricação do trilho (página 80 - Hubertus Colpaert - IPT / SP)

2 - Composição química do aço, com inclusões não metálicas, componentes mais duros, causando pontos de concentração de tensão .
Trilhos antigos, já usados, por não terem inclusões , mostraram maior resistência à fadiga, do que trilhos novos. (página 52 - Inácio da Fontoura Limberger - UFRGS)

3 - Tensões residuais devidas a cargas acima do limite elástico dos aços.(página 67)

4 - Tensões de origem térmica em trilhos soldados contínuos. (página 86)

5 - Tensões elevadas no trilho devidas às rodas não perfeitamente circulares e ao desalinhamento dos eixos.
(Ver http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/pontes/ime_protendido_06_ponte_ferroviaria_forca_lateral.pdf)

6 - Grande Variação de Tensões devida à passagem freqüente dos trens, causando o bem conhecido Fenômeno da Fadiga em especial nos boletos dos trilhos. (página 21)

7 - Como diz bem claramente **DAVID BROEK** - FractuResearch Inc
Rails are inspected (*should be !*) for cracks by means of a car equipped with **ultrasonic and magnetic inspection** devices running along the rail.
Cracks in different directions may initiate at various locations in the rail head; these are internal flaws of quasi-elliptical shape.
Some are in a longitudinal plane, either vertical or horizontal, some in a transverse plane (commonly called detail cracks).
An example of the latter is shown in Figure 14.21 (página 59)

8 - Nas curvas , as tensões de contacto RODA x BOLETO são muito aumentadas (página 28)

9 - e por isso os acidentes, em geral , ocorrem nas curvas das ferrovias, pois aí a fadiga dos boletos é maior. *(* página 30*) " High-speed derailment at Hatfield on the main NE line in October 2000…*

https://www.railwaysarchive.co.uk/docsummary.php?docID=465

10 - A tensão limite admissível (E.L.S.), já considerando fadiga deveria ser 150 MPa (página 20)

11 - Evitar o aumento da carga nos vagões colocando alteamento das bordas dos vagões de carga para aumentar a capacidade de transporte dos mesmos. Isso sobrecarrega os boletos dos trilhos, aumentando o risco de uma ruptura por fadiga.

Eduardo Thomaz, Rio de Janeiro - 27/01/2022

+ + +