



# Dimensionamento de Armaduras Longitudinais sujeitas à Fadiga em Vigas de Pontes Ferroviárias de Concreto Armado

**Autores:**

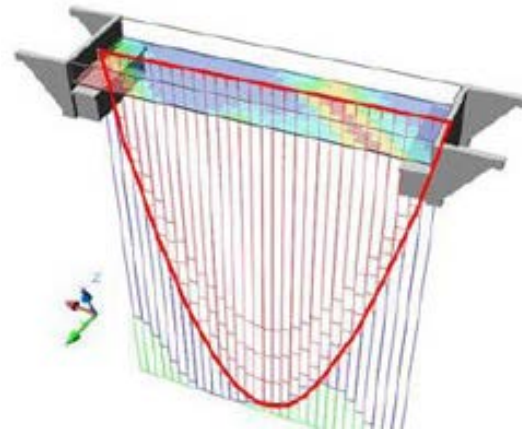
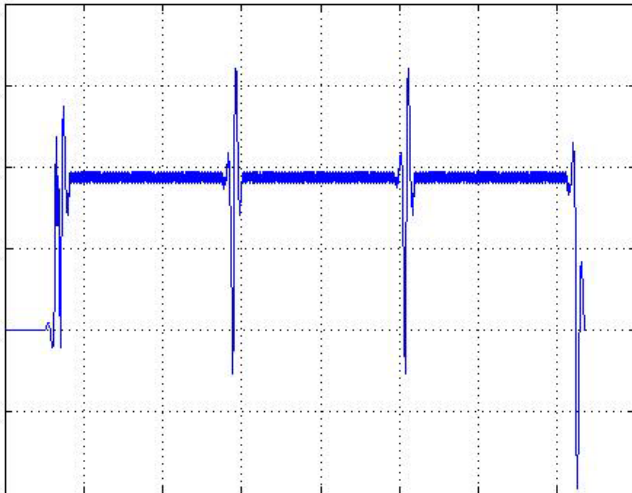
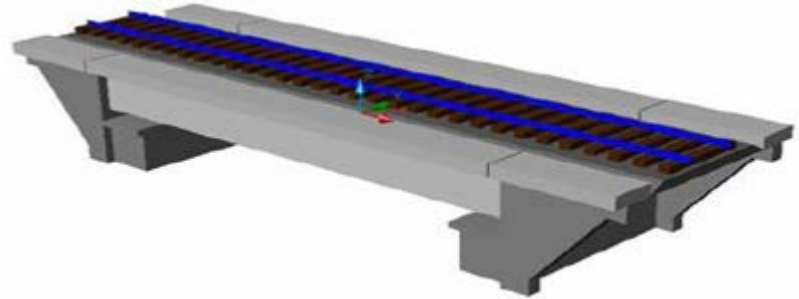
Anderson Couto Leal; Luis Augusto Conte Mendes Veloso;  
Sandoval José Rodrigues Júnior;

# APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

- Introdução;
- Fadiga nos Aços para CA;
- Solicitações de Fadiga;
- Método Simplificado;
- Verificações Normas Vigentes;
- Estudo de Caso e Metodologia;
- Resultados;
- Conclusões.

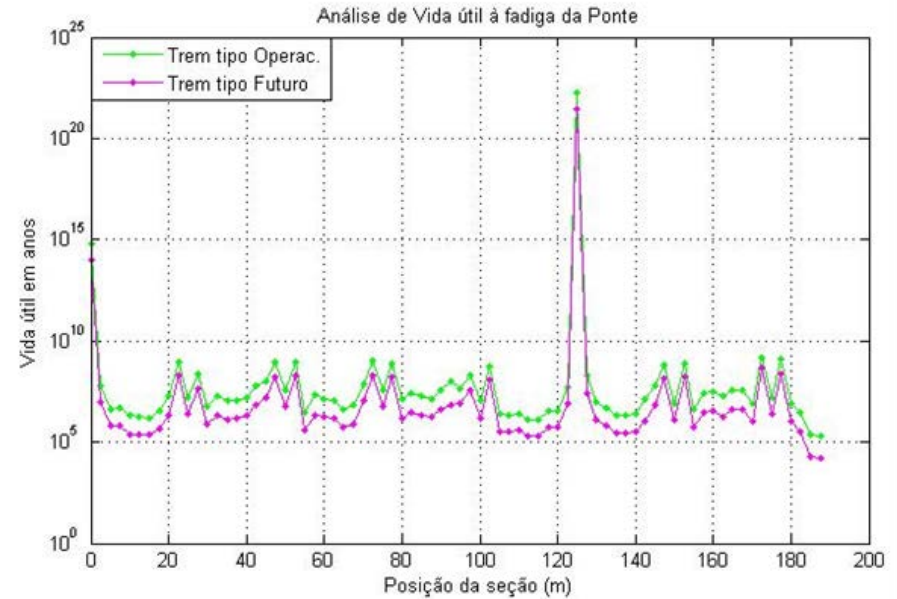
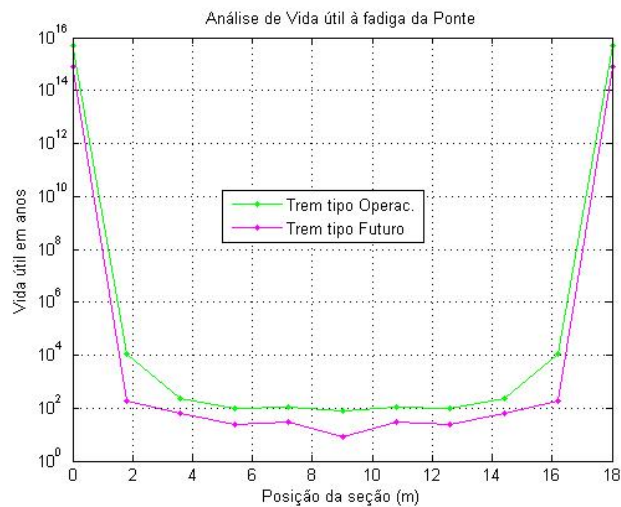
# Introdução

- Pontes Ferroviárias CA;
- Fenômeno da Fadiga do aço e concreto;
- Dimensionamento à Fadiga;
- Coeficiente  $K_f$ ;
- Limitar as Variações de Tensões;



# Justificativas

- Um convênio entre a VALE e a UFPa;
- Análise Estrutural das OAE's ao longo da EFC;
- Resultados de Fadiga;



# INTRODUÇÃO

# Objetivos

- **Principal:**

- Metodologia para dimensionamento de armaduras longitudinais sujeitas à fadiga, utilizando métodos simplificados e levando em conta a vida útil de interesse;

- **Específicos:**

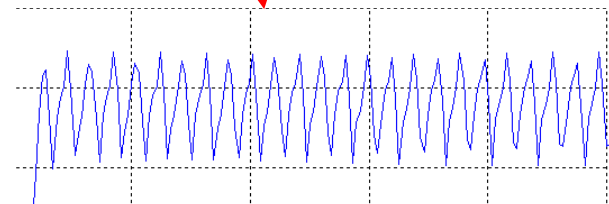
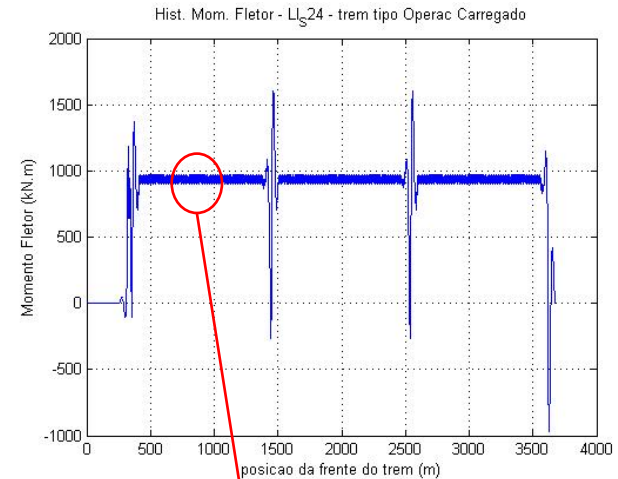
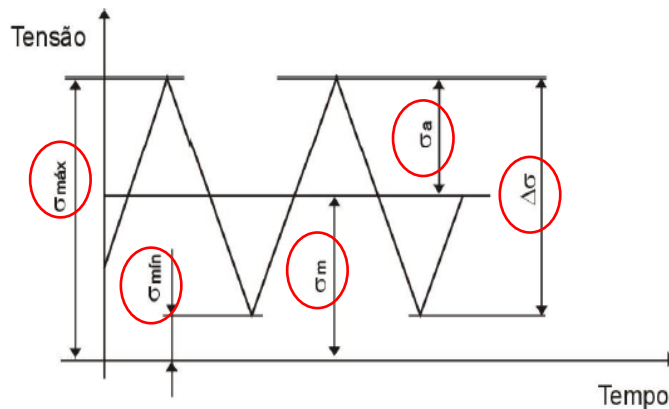
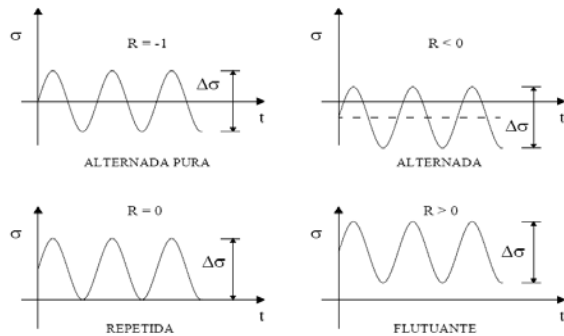
- Avaliar o coeficiente de fadiga ( $k_f$ ), que utiliza  $2 \times 10^6$  ciclos;

- Verificar uma relação entre os danos efetivos, à fadiga, produzidos pela passagem completa de um trem com os danos produzidos por um único ciclo;

# INTRODUÇÃO

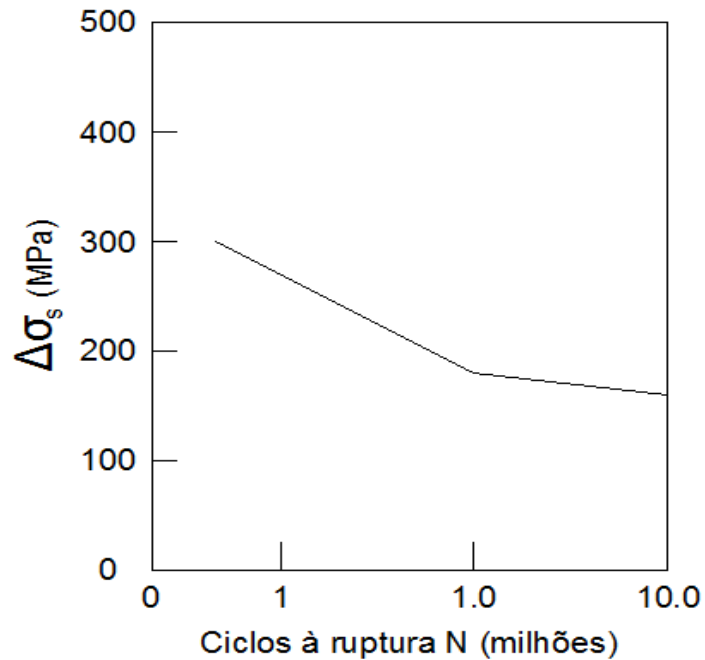
# Solicitações de Fadiga

- Carregamento Amplitude Constante;
- Carregamento Amplitude Variável;



# Revisão Bibliográfica

# Representação dos Resultados de Fadiga



Curva Típica S-N

## Revisão Bibliográfica

# Verificação à fadiga - NBR 6118:2003 e CEB-FIP 1990

Quadro comparativo para limites de Fadiga

Verificação	NBR 6118:2003	CEB-FIP Método Simplificado	CEB-FIP Por ação Equivalente
Aço	$\gamma_f \cdot \Delta\sigma_s \leq \Delta f_{sd,fad}$	$\gamma_{sd} \cdot \max \Delta\sigma_{St} \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{sfad}}$	$\gamma_{sd} \cdot \max \Delta\sigma_{St} \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(n)}{\gamma_{sfad}}$

$\gamma_{s,fad} = 1,15$

Revisão Bibliográfica

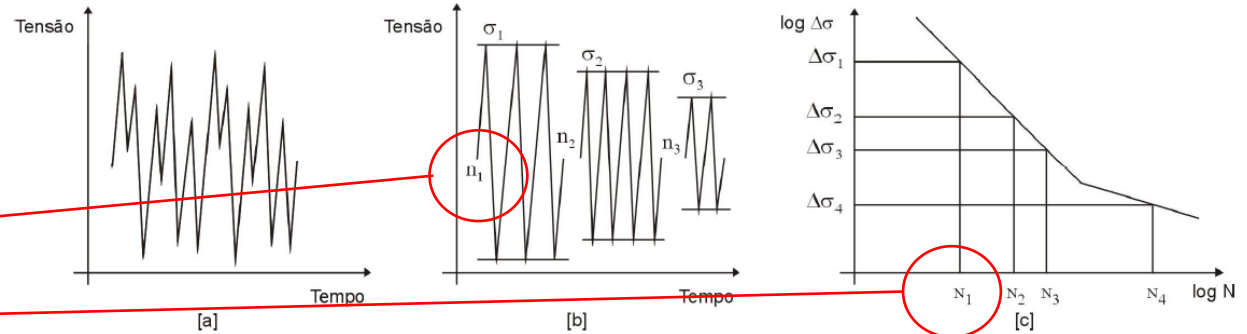


# Danos por Fadiga

Regra de Palmgren-Miner:

- Palmgren em 1924;
- Miner em 1945.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$



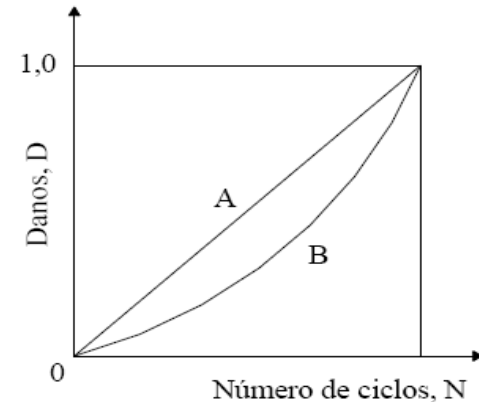
Onde:

D: taxa de dano acumulativo;

k: nº de diferentes níveis de tensão numa sequência específica de carregamento;

n: nº de repetições aplicadas sob condição particular de tensões;

N: nº de repetições que causaria a ruptura por fadiga para a mesma condição de tensões aplicadas



$$Vida = \frac{1}{D}$$

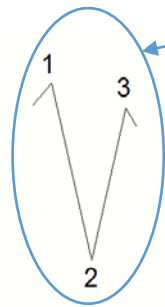
# Revisão Bibliográfica

# Método de Contagem de Ciclos - Rainflow

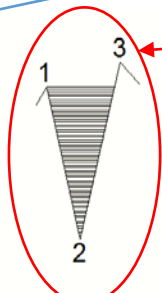
Origem Japão em 1968;  
Matsuishi e Tatsuo Endo;

Na Literatura:

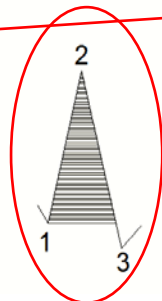
- 3 pontos e 4 pontos;
- Método domínio do Tempo;
- Método domínio da frequência;



$\Delta S_1 > \Delta S_2$   
Sem ciclo

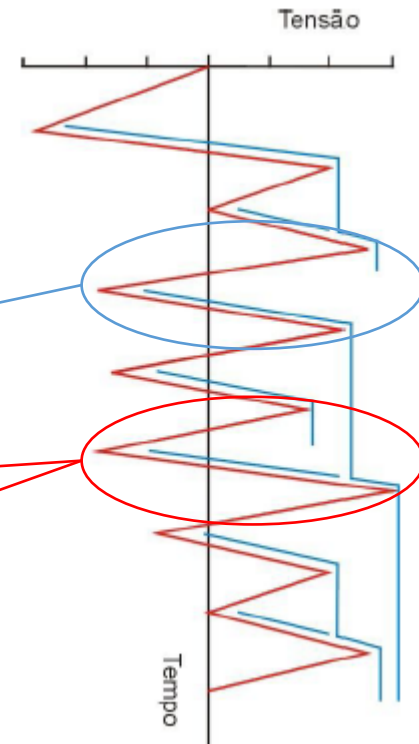


$\Delta S_1 \leq \Delta S_2$   
1 Ciclo 1-2



$\Delta S_1 \leq \Delta S_2$   
1 Ciclo 1-2

1 / 2  
0.5 Ciclo 1-2



Método Rainflow

## Revisão Bibliográfica

# Método Simplificado – Armaduras Longitudinais

$$\frac{\Delta M}{M_{\max}} \cong \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{\max}} \quad \longrightarrow \quad \Delta \sigma = \frac{\Delta M}{M_{\max}} \cdot \sigma_{\max} \quad \longrightarrow \quad K_f = \frac{\Delta M}{M_{\max}} \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\Delta \sigma_{\lim}}$$

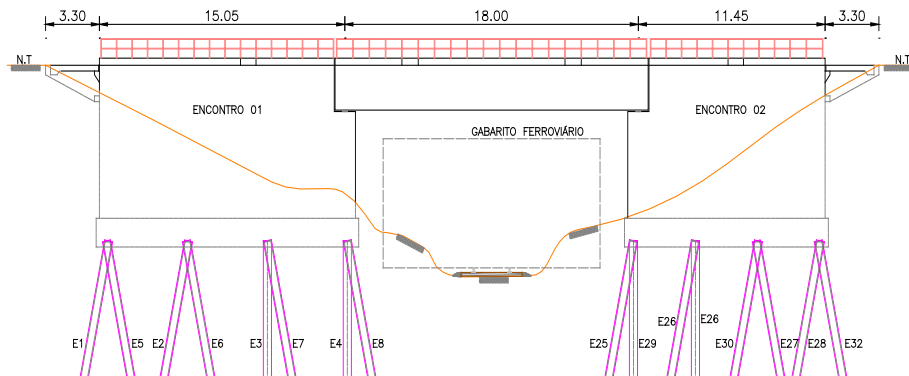
**175 MPa**

$$K_f = \left(1 - \frac{M_{\min}}{M_{\max}}\right) \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot \gamma_f \cdot \Delta \sigma_{\lim}} \quad \longrightarrow \quad M_{\max} \cdot M_{\min} > 0$$

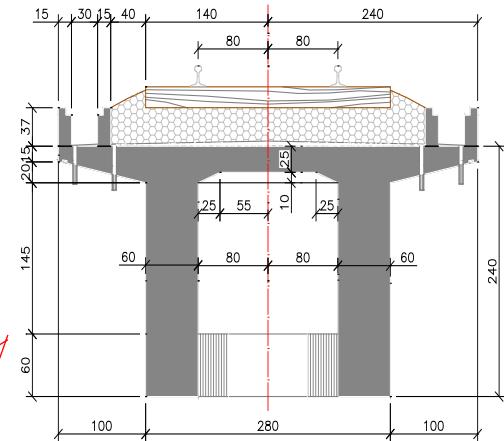
$$K_f = \left(1 + \frac{|M_{\min}|}{2 \cdot |M_{\max}|}\right) \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot \gamma_f \cdot \Delta \sigma_{\lim}} \quad \longrightarrow \quad M_{\max} \cdot M_{\min} < 0$$

**Revisão Bibliográfica**

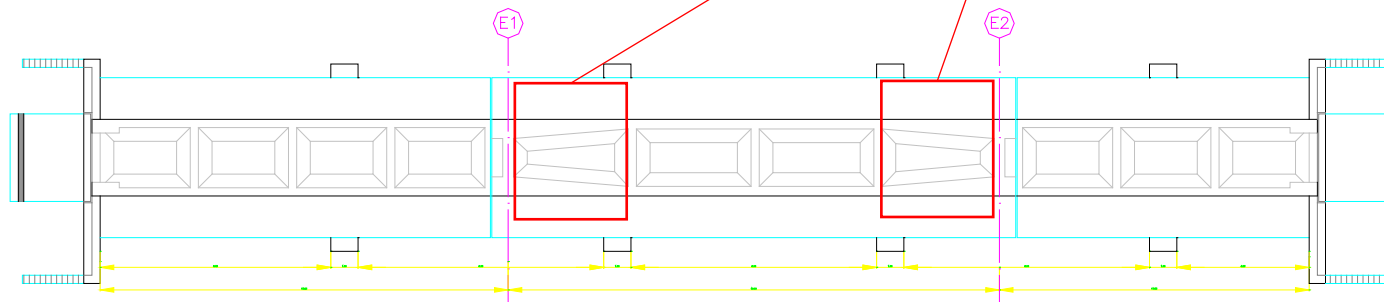
# Obra de Arte Especial – OAE 01



Vista Lateral da OAE 01



Seção Transversal

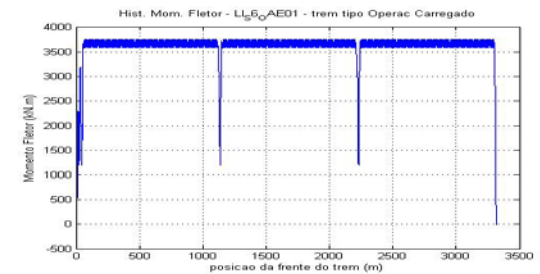
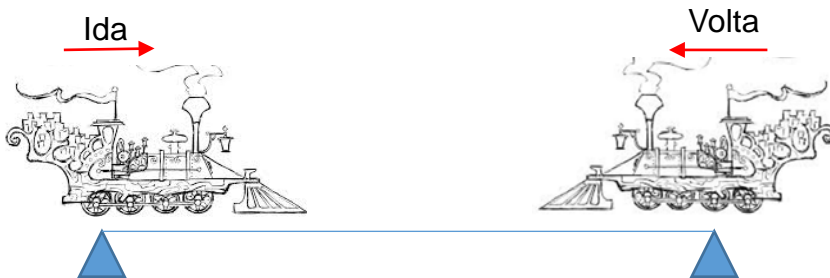


Vista Inferior do tabuleiro

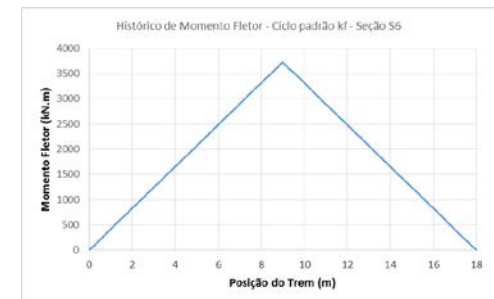
## Estudo de Caso

# Metodologia Empregada

- Baseada no método simplificado, coeficiente de fadiga  $k_f$ ;
- Análise das hipóteses simplificadoras o método simplificado  $k_f$ ;
- Relação entre os danos efetivos, relativos à fadiga, produzidos pela passagem completa de um trem e um único ciclo;
- Avaliação do dano correspondente a 1 ciclo operacional;



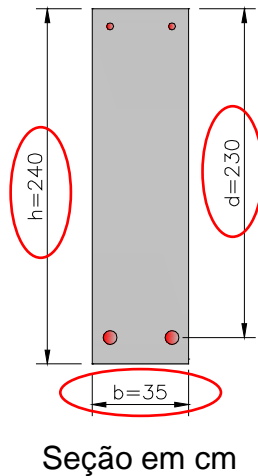
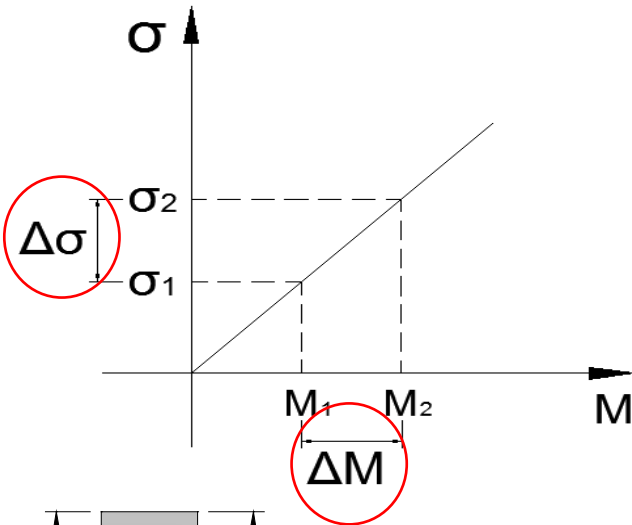
Passagem do Trem



Ciclo Padrão  $k_f$

# Metodologia

# 1ª Hipótese – Método Simplificado



$f_{ck} = 18\text{MPa}$   
Aço: CA-50

Dimensões semelhantes  
das vigas da OAE 01

Valores Iniciais dos momentos

	Domínios de Dimensionamento NBR 6118	Momento Fletor (kN.m)	As (cm <sup>2</sup> )
Exemplo I	2	1600	23.8
Exemplo II	2/3	2693.5	42.08
Exemplo III	3	3000	47.6
Exemplo IV	3/4	5437	101.41

- Cálculo dos Momentos Fletores para os domínios 2 e 3;
- Cálculo das Armaduras;
- Manteve-se armaduras constante;
- Incremento de 10% no momento inicial;

## Metodologia

# 1ª Hipótese – Resultados Exemplos

Exemplo I			Exemplo II			Exemplo III			Exemplo IV		
As (cm <sup>2</sup> )	Momento (kN.m)	Tensão (MPa)	As (cm <sup>2</sup> )	Momento (kN.m)	Tensão (MPa)	As (cm <sup>2</sup> )	Momento (kN.m)	Tensão (MPa)	As (cm <sup>2</sup> )	Momento (kN.m)	Tensão (MPa)
23.8	1049.76	212.67	42.08	1288.29	151.92	47.6	1968.30	207.42	101.41	2600.5	135.21
23.8	1166.40	236.45	42.08	1431.44	168.95	47.6	2187.00	230.80	101.41	2889.445	150.54
23.8	1296.00	262.91	42.08	1590.48	187.89	47.6	2430.00	256.88	101.41	3210.494	167.68
23.8	1440.00	292.38	42.08	1767.21	209.00	47.6	2700.00	286.00	101.41	3567.216	186.85
23.8	1600.00	325.2	42.08	1963.56	232.51	47.6	3000.00	318.56	101.41	3963.573	208.36
23.8	1760.00	358.09	42.08	2181.74	258.72	47.6	3300.00	351.35	101.41	4403.97	232.55
23.8	1936.00	394.37	42.08	2424.15	287.97	47.6	3630.00	387.75	101.41	4893.3	259.9
23.8	2129.60	434.4	42.08	2693.50	320.63	47.6	3993.00	428.27	101.41	5437	291.08

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta M} = 1.001367$$

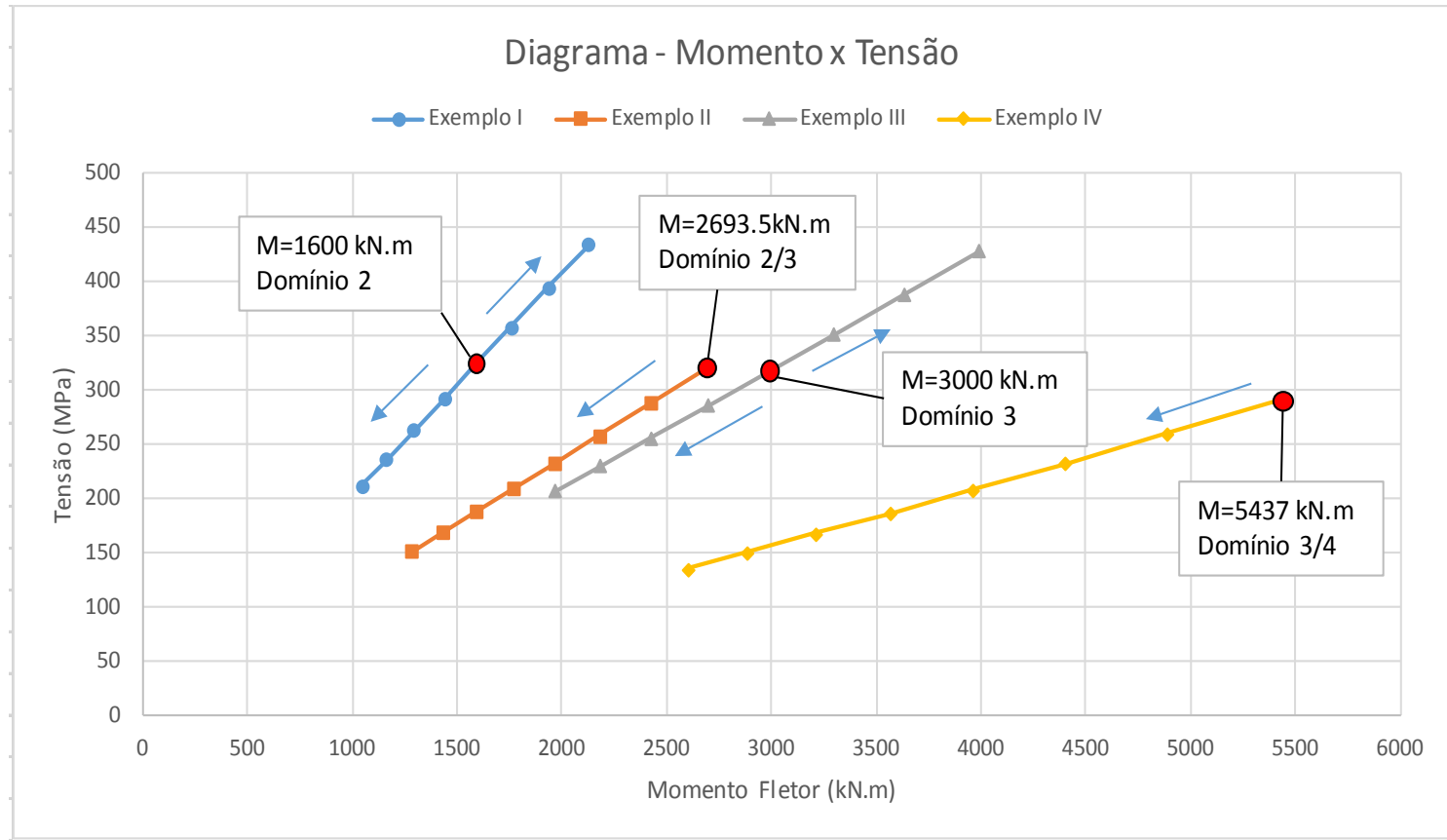
$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta M} = 1.002073$$

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta M} = 1.004091$$

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta M} = 1.007972$$

## Metodologia

# 1ª Hipótese – Resultados Graficamente

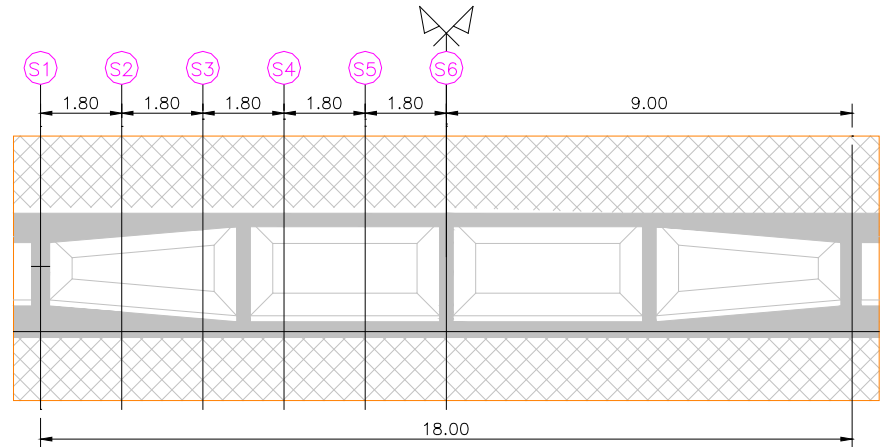


## Metodologia



# 1ª Hipótese – Comparação de Tensão

Seção	$\Delta\sigma_{apr} \text{ kf}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{ref}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{ref} / \Delta\sigma_{apr}$
1	-	-	-
2	174.06	181.05	1.0401
3	176.71	183.72	1.0397
4	187.52	194.55	1.0375
5	186.12	192.91	1.0365
6	182.99	189.60	1.0361



Posição das seções analisadas da OAE 01.

$$\Delta\sigma = 1,04 \cdot \Delta M$$

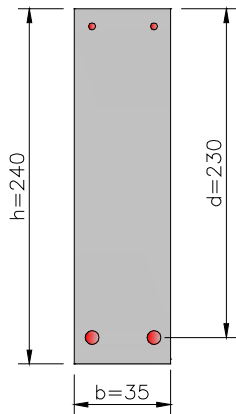
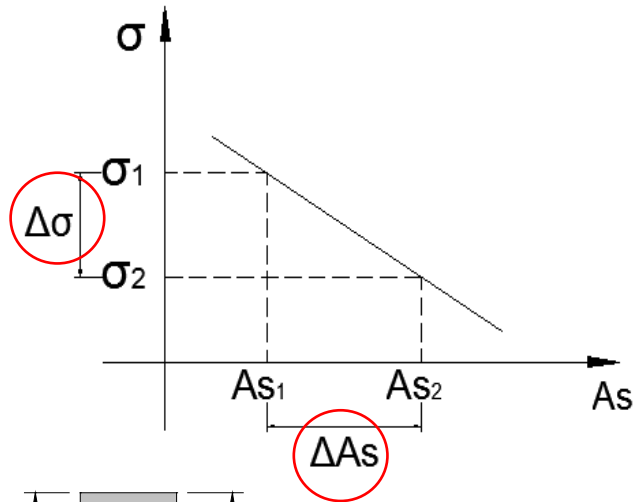
$$kf_{mod} = \left( \frac{1 - M_{mín}}{M_{máx.}} \right) \times \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot \gamma_f} \times \frac{FC_{kf}}{\Delta\sigma_{lim}}$$

## Metodologia

## 2ª Hipótese – Método Simplificado

Valores Iniciais

	Domínios de Dimensionamento NBR 6118	Momento Fletor (kN.m)	As (cm <sup>2</sup> )
Exemplo I	2	1686.35	25.18
Exemplo II	2	2133.09	32.47
Exemplo III	3	2813.98	44.23



$f_{ck} = 18 \text{ MPa}$   
Aço: CA-50

Dimensões semelhantes  
das vigas da OAE 01

Seção em cm

- Cálculo dos Momentos Fletores para os domínios 2 e 3;
- Cálculo das Armaduras;
- Manteve-se momentos fletores constante;
- Incremento de 10% na área de aço inicial;

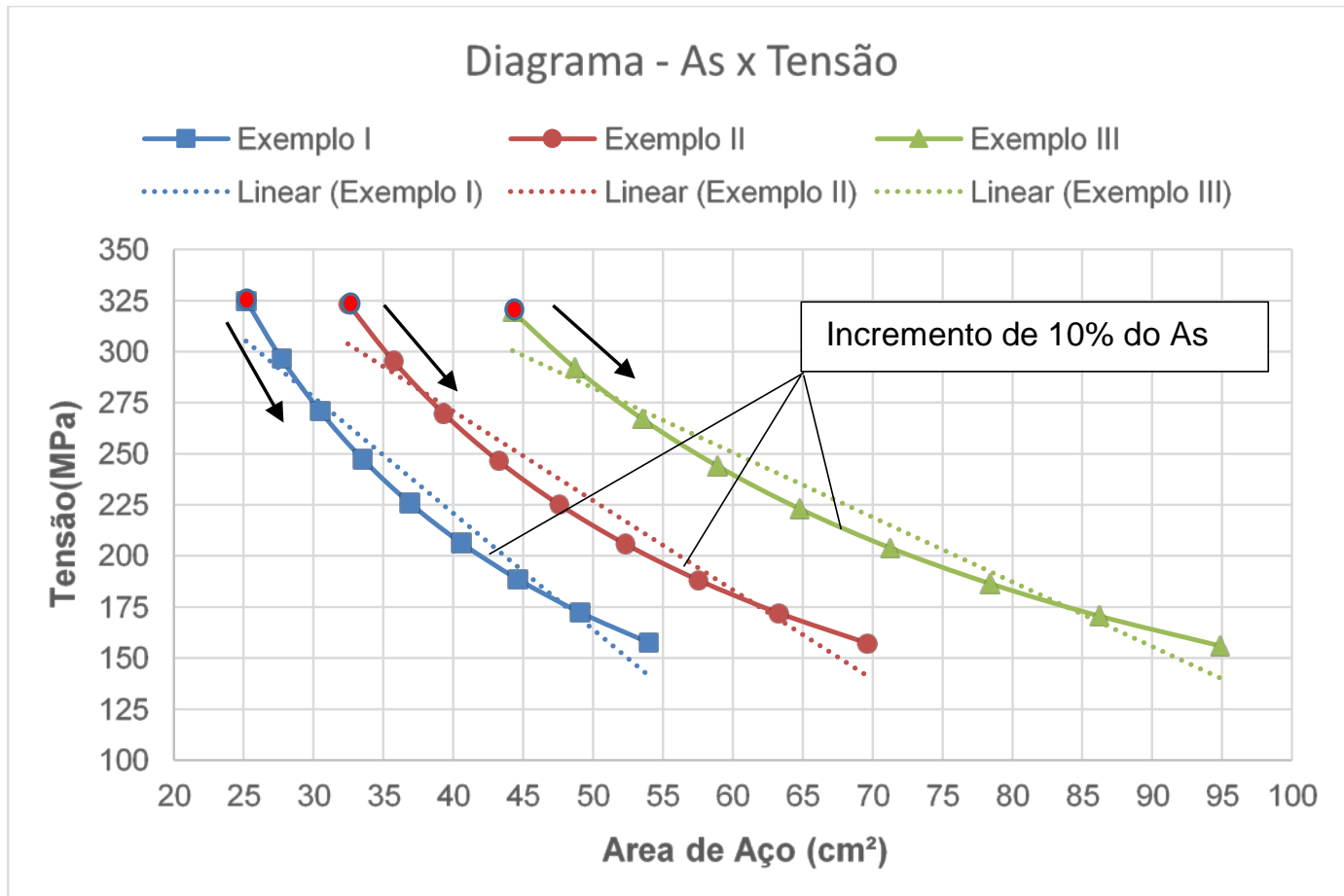
## Metodologia

## 2ª Hipótese – Resultados Exemplos

Exemplo I			Exemplo II			Exemplo III		
Momento (kN.m)	As (cm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	Momento (kN.m)	As (cm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	Momento (kN.m)	As (cm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
1686.35	25.18	324.92	2133.09	32.47	323.47	2813.98	44.23	319.82
1686.35	27.70	296.67	2133.09	35.72	295.44	2813.98	48.65	292.24
1686.35	30.47	270.90	2133.09	39.29	269.86	2813.98	53.52	267.06
1686.35	33.51	247.40	2133.09	43.22	246.56	2813.98	58.87	244.10
1686.35	36.87	225.98	2133.09	47.54	225.30	2813.98	64.76	223.14
1686.35	40.55	206.44	2133.09	52.29	205.89	2813.98	71.23	204.01
1686.35	44.61	188.63	2133.09	57.52	188.20	2813.98	78.36	186.55
1686.35	49.07	172.37	2133.09	63.27	172.05	2813.98	86.19	170.61
1686.35	53.98	157.54	2133.09	69.60	157.30	2813.98	94.81	156.05

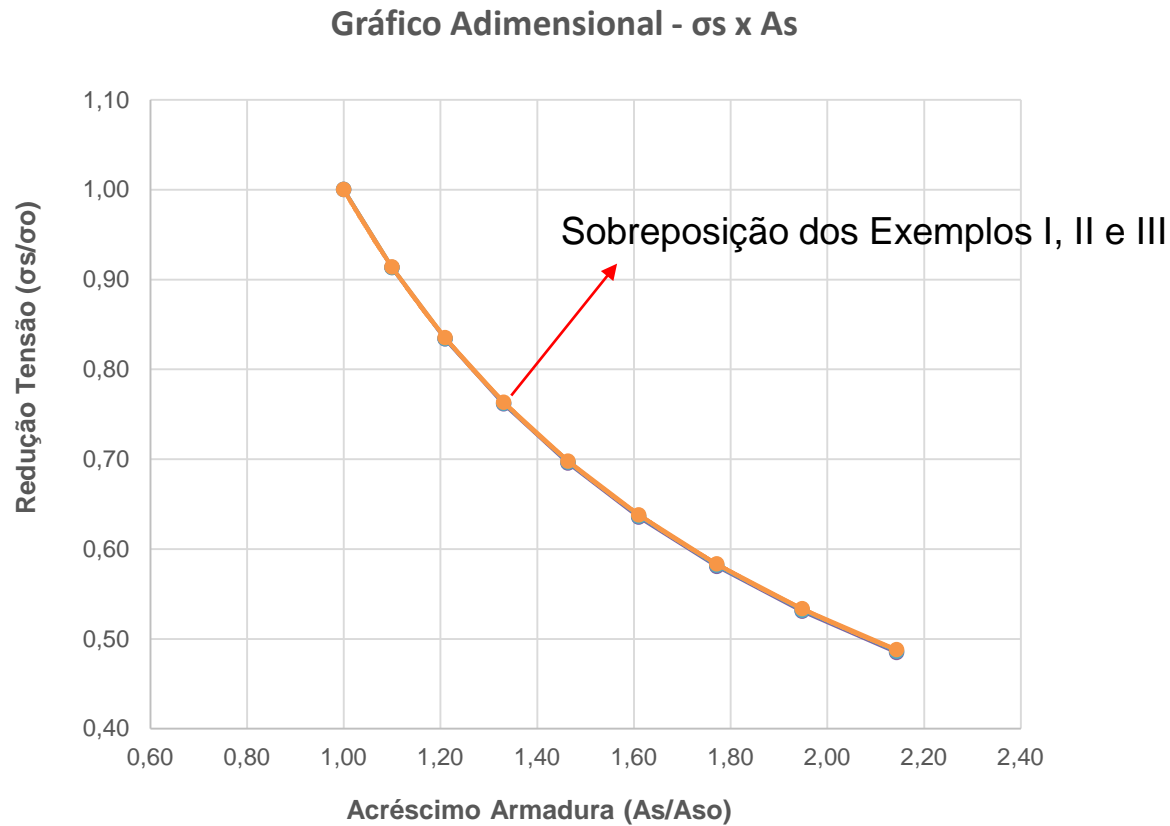
Metodologia

## 2ª Hipótese – Resultados Graficamente



# Metodologia

## 2ª Hipótese – Gráfico Adimensional



$$y = 0,9993x^{-0,941}$$

# Metodologia

## 2ª Hipótese – As corrigido

$$y = 0,9993x^{-0,941}$$

Onde:

$$y = \sigma/\sigma_o ;$$
$$x = As/As_o ;$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right) = 0,9993 \cdot \left(\frac{As}{As_o}\right)^{-0,941}$$

Admitindo-se:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right) = \left(\frac{\Delta\sigma_{lim}}{\Delta\sigma}\right)$$

$$\left(\frac{As}{As_o}\right) = \left(\frac{As_{corrigido}}{As_{proj.}}\right)$$

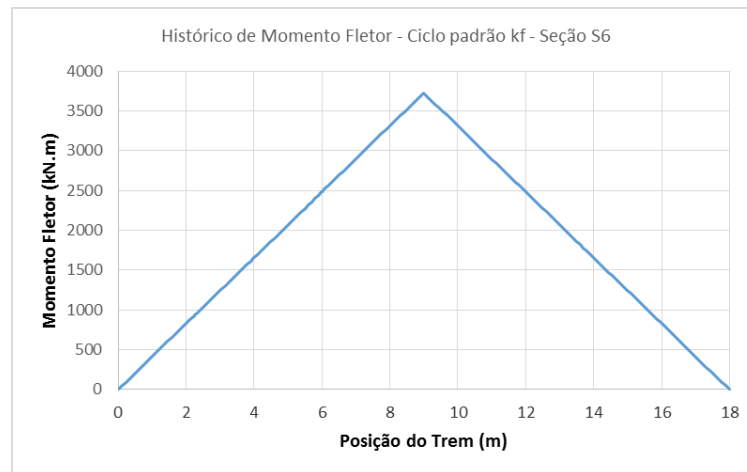
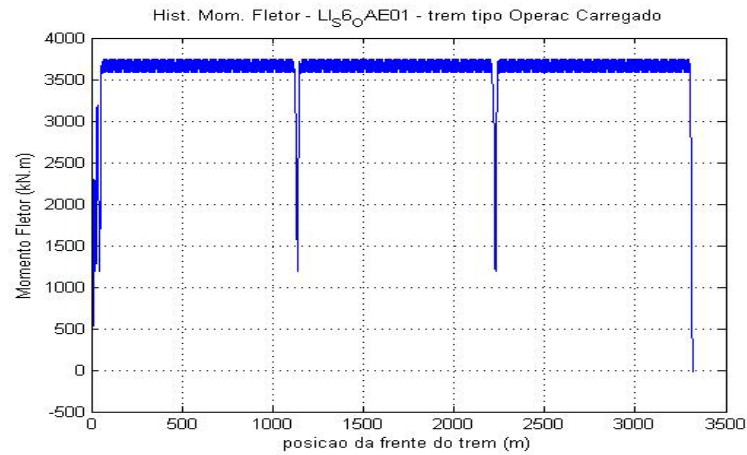
Sabendo-se:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{lim}}{\Delta\sigma}\right) = \left(\frac{1}{k_f}\right)$$

$$As_{corrigido} = As_{proj.} \cdot \left(\frac{1}{0,9993 \cdot k_{f\ mod}}\right)^{-\frac{1}{0,941}}$$

# Metodologia

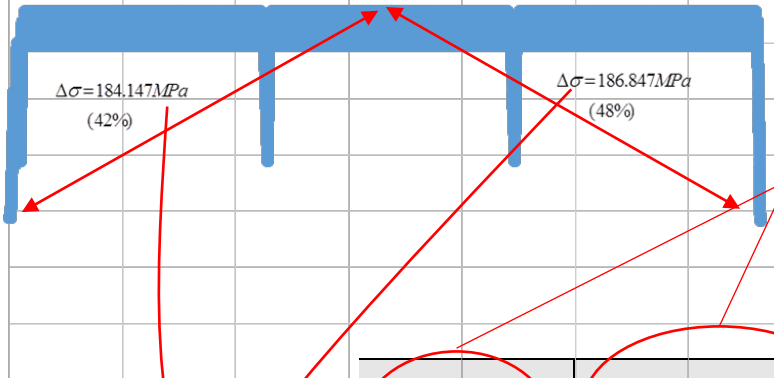
# Histórico de Carregamento: Trem x Ciclo Único



## Metodologia

# Consideração da Passagem do Trem com Ciclo Único

Tensões nas armaduras – Seção S2 OAE 01



Algoritmo Rainflow (MATLAB)  
ASTM E 1049-85

Curva S-N

$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}$ (MPa)	$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x.} + \sigma_{m\acute{i}n.}}{2}$ (MPa)	$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma$ (MPa)	$n_i$	$N_i$	$D_i = \frac{n_i}{N_i}$	$D_i / D_t$ (%)
3.021	224.881	6.043	1	2.9E+19	3.49E-20	0%
66.660	261.525	133.321	1	2.3E+07	4.32E-08	5%
<b>92.073</b>	<b>236.112</b>	<b>184.147</b>	<b>0.5</b>	<b>1.3E+06</b>	<b>3.95E-07</b>	<b>42%</b>
0.000	144.345	0.000	1	4.0E+145	2.49E-146	0%
0.000	144.345	0.000	1	4.0E+145	2.49E-146	0%
<b>93.424</b>	<b>234.762</b>	<b>186.847</b>	<b>0.5</b>	<b>1.1E+06</b>	<b>4.51E-07</b>	<b>48%</b>
1.504	142.842	3.007	0.5	1.5E+22	3.27E-23	0%
0.000	144.345	0.000	0.5	4.0E+145	1.25E-146	0%
<b>Dano Total ( <math>D_t</math> )</b>					<b>9.38E-07</b>	

## Metodologia

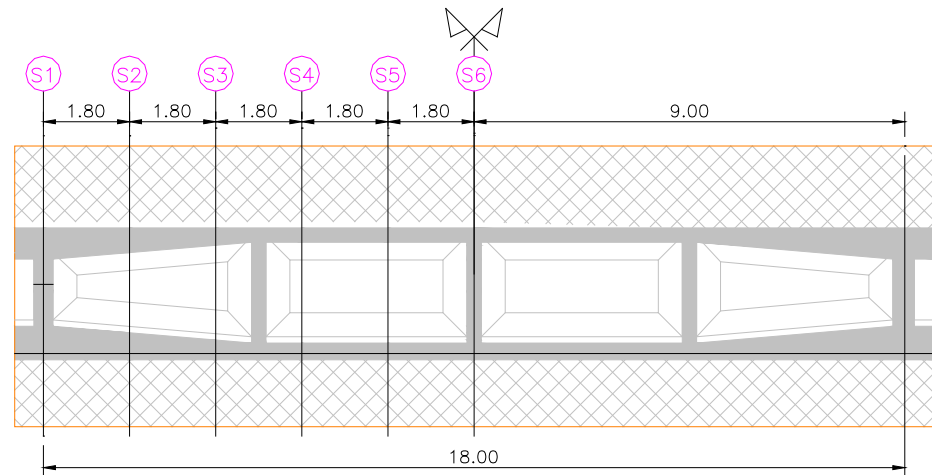


# Análise do Dano na OAE 01

Seção	Trens-tipo Operacional		$D_{1ciclo} / D_t$ (%)
	$D_t$	$D_{1ciclo}$	
1	-	-	-
2	9.38E-07	8.46E-07	90%
3	6.58E-07	6.15E-07	93%
4	1.25E-06	1.15E-06	92%
5	1.49E-06	1.37E-06	92%
6	1.26E-06	1.172E-06	93%

Fator adotado:

$$FC_{pas} = 0,9$$



Posição das seções analisadas

# Metodologia

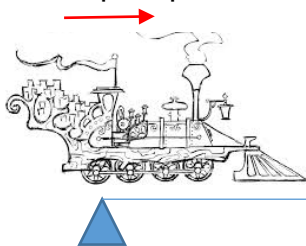
# Consideração de 1 ciclo Operacional

Seção	Danos Trens-tipo		$D_{des} / D_{carreg}$
	Operacional Carregado	Descarregado	
1	-	-	-
2	9.38.E-07	1.98.E-07	21%
3	6.58E-07	1.59E-07	24%
4	1.25E-06	3.25E-07	26%
5	1.49E-06	4.25E-07	29%
6	1.26E-06	3.00E-07	24%

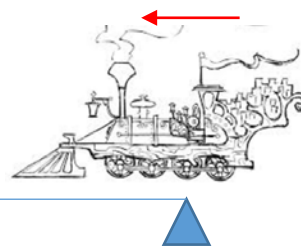
Fator adotado:

$$FC_t = 1,3$$

Trem Tipo Operacional



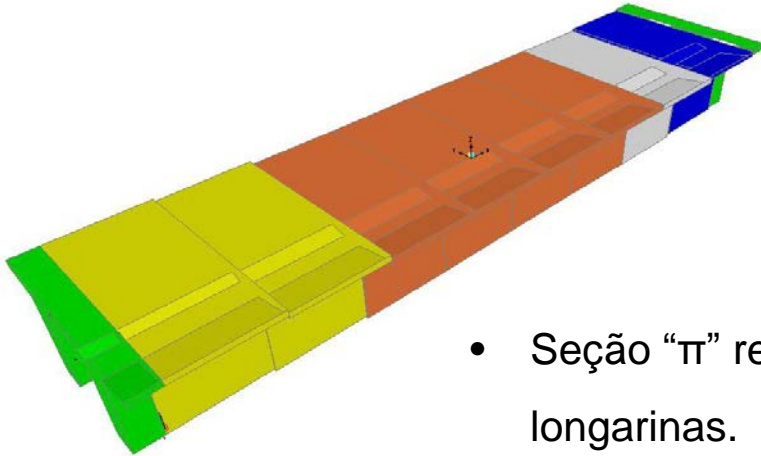
Trem Tipo Descarregado



## Metodologia

# Determinação dos Esforços Solicitantes

- Modelo Numérico SAP 2000

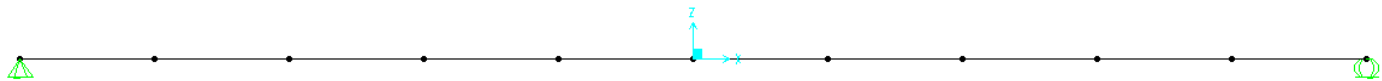


- Propriedade dos Materiais

$$E_{\text{sec}(\text{super})} = 0,9.66600\sqrt{fck + 3,5} = 27,5\text{GPa}$$

fck: 18 MPa

- Seção “π” representa o tabuleiro e as duas longarinas.



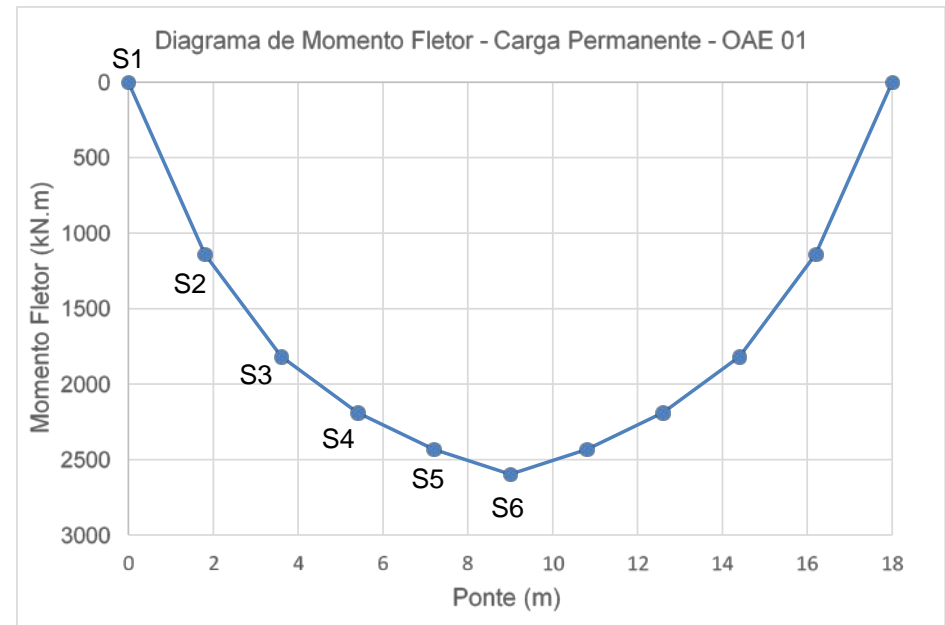
- Elementos de barras
- Discretizado em 10 elementos

## Metodologia

# Cargas Permanentes

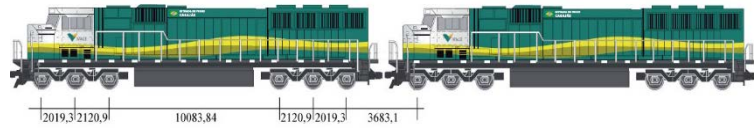
Elemento	Peso
Seção em viga duplo T <sup>1</sup>	25 kN/m <sup>3</sup>
Canaletas, argamassa, guarda-corpo, lastro, trilhos e acessórios	52,6 kN/m
Transversina no vão	244 kN
Transversina no apoio	344 kN
Refúgio, incluindo guarda-corpo	69,7 kN

1: peso distribuído calculado automaticamente no programa SAP2000.

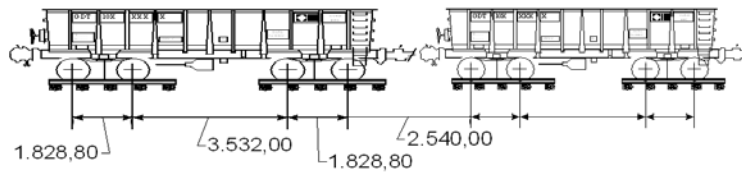


# Esforços Solicitantes

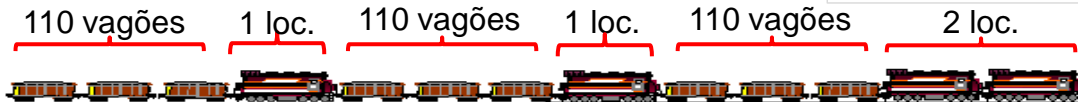
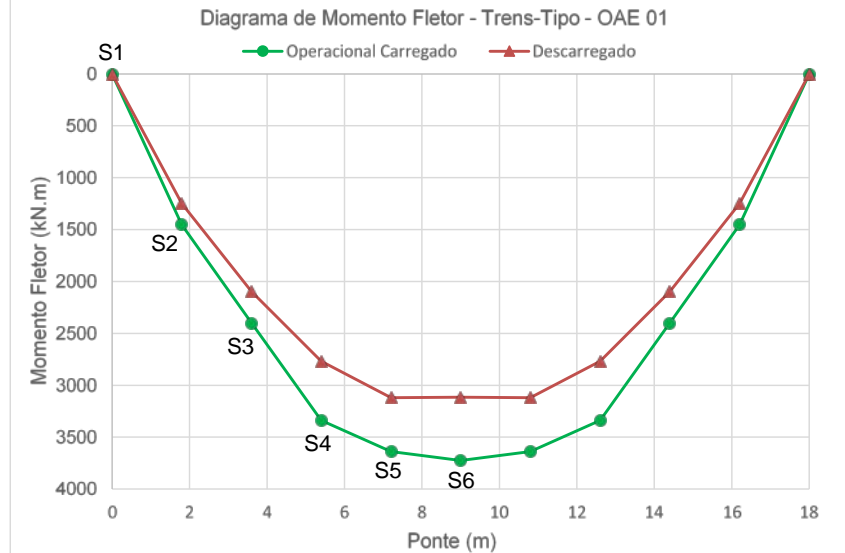
# Cargas Móveis



Locomotiva DASH-9



Vagão GDT



Composição das locomotivas e Vagões

Trem-tipo	Locomotiva DASH9	Vagão GDT
OPERACIONAL CARREGADO	30 t/eixo (180 t)	32,5 t/eixo (130 t)
DESCARREGADO	30 t/eixo (180 t)	5,25 t/eixo (21 t)

# Esforços Solicitantes

# Determinação do número de ciclos operacionais

$$N_{op} = \frac{FC_t \cdot N_t}{FC_{pas}} \times V_d$$

$FC_t$  - fator de correção que representa um trem de ida e volta;

$FC_{pas}$  - fator de correção que representa a passagem do trem para 1 ciclo monotônico;

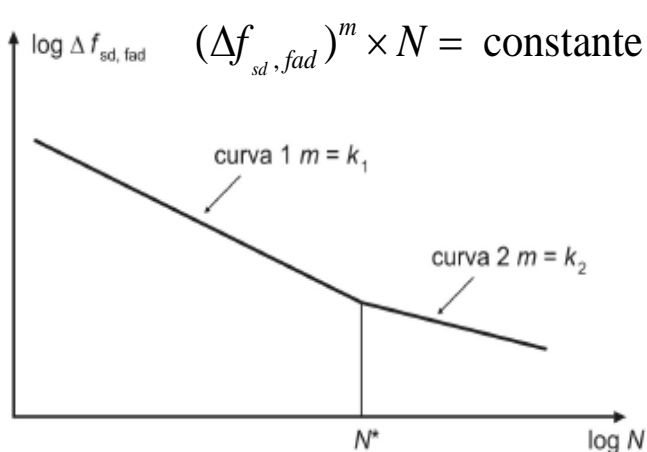
$N_t$  - Número de trens carregados que passam pela ponte durante 1 ano;

$V_d$  - Vida útil em anos do elemento estrutural; (Ex: 100, 200, etc.)

$FC_t$	$FC_{pas}$	$V_d$	$N_t$	$N_{op} = \frac{FC_t \cdot N_t}{FC_{pas}} \times V_d$
1,30	0,90	100	6570	949000
1,30	0,90	200	6570	1898000
1,30	0,90	250	6570	2372500
1,30	0,90	300	6570	2847000
1,30	0,90	400	6570	3796000

## DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA

# Determinação da $\Delta\sigma_{lim}$



Curva S-N da NBR 6118

$$\Delta\sigma_{lim} = \left( \frac{C_1}{N} \right)^{1/5}$$

$$\Delta\sigma_{lim} = \left( \frac{C_2}{N} \right)^{1/9}$$

$N_{op}$	$\Delta\sigma_{lim}$
949.000	191,00
1.898.000	176,02
2.372.500	171,71
2.847.000	168,27
3.796.000	162,97

$$C_1 = (\Delta f_{sd, fad})^5 \times N$$

$$C_2 = (\Delta f_{sd, fad})^9 \times N$$

$$\Delta f_{sd, fad} = 175 \text{ MPa}$$

D=25mm para  $2 \times 10^6$  ciclos

## DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA

# Cálculo do coeficiente Kf proposto

Coeficiente de fadiga ( $kf_{mod}$ ) - Vida útil = 100 anos

Seção	$M_{mín.}$ (kN.m)	$M_{máx.}$ (kN.m)	$f_{yk}$ (MPa)	$FC_{kf}$	$\gamma_s$	$\gamma_f$	$\Delta\sigma_{lim}$ (MPa)	$Kf_{mod}$
1	0.000	0.00	-	-	-	-	-	-
2	1139.359	2592.27	500.00	1.04	1.15	1.40	191.00	0.95
3	1817.690	4217.33	500.00	1.04	1.15	1.40	191.00	0.96
4	2189.801	5527.33	500.00	1.04	1.15	1.40	191.00	1.02
5	2433.077	6072.18	500.00	1.04	1.15	1.40	191.00	1.01
6	2597.306	6322.84	500.00	1.04	1.15	1.40	191.00	1.00

$$kf_{mod} = \left( \frac{1 - M_{mín.}}{M_{máx.}} \right) \times \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot \gamma_f} \times \frac{FC_{kf}}{\Delta\sigma_{lim}}$$

Vida útil = 200, 250, 300 e 400 anos

## DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA



# Cálculo das armaduras corrigidas

Seção	Vida 100 anos			Vida 200 anos			Vida 250 anos			Vida 300 anos			Vida 400 anos		
	$k_{f_{mod}}$	As proj (cm <sup>2</sup> )	As corrigido (cm <sup>2</sup> )	$k_{f_{mod}}$	As proj (cm <sup>2</sup> )	As corrigido (cm <sup>2</sup> )	$k_{f_{mod}}$	As proj (cm <sup>2</sup> )	As corrigido (cm <sup>2</sup> )	$k_{f_{mod}}$	As proj (cm <sup>2</sup> )	As corrigido (cm <sup>2</sup> )	$k_{f_{mod}}$	As proj (cm <sup>2</sup> )	As corrigido (cm <sup>2</sup> )
1	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00
2	0.95	36.78	34.71	1.03	36.78	37.87	1.05	36.78	38.88	1.08	36.78	39.72	1.11	36.78	41.10
3	0.96	60.35	57.88	1.04	60.35	63.14	1.07	60.35	64.82	1.09	60.35	66.23	1.13	60.35	68.53
4	1.02	79.67	81.40	1.11	79.67	88.78	1.14	79.67	91.16	1.16	79.67	93.14	1.20	79.67	96.37
5	1.01	87.79	88.98	1.10	87.79	97.06	1.13	87.79	99.65	1.15	87.79	101.82	1.19	87.79	105.34
6	1.00	91.54	91.12	1.08	91.54	99.39	1.11	91.54	102.04	1.13	91.54	104.27	1.17	91.54	107.88

$$As_{corrigido} = As_{proj} \cdot \left( \frac{1}{0,9993 \cdot k_{f_{mod}}} \right)^{-\frac{1}{0,941}}$$

$$K_{f_{mod}} > 1$$

$$K_{f_{mod}} \leq 1$$

## DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA

# Vida útil das armaduras – 100 anos

Vida Útil à fadiga - 100 anos - Trem Operacional Carregado

Seção	$\sigma_{min.}$ (MPa)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$n_i$	$N_i$	$D = \frac{n_i}{N_i}$	$V = \frac{1}{D}$ (pares de trens)	$N_{op}$ em 1 ano	$V$ (anos)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	150.06	341.70	191.64	1.00	9.33E+05	1.071E-06	9.33E+05	9490.0	98.35
3	144.71	336.14	191.43	1.00	9.38E+05	1.066E-06	9.38E+05	9490.0	98.88
4	124.62	315.11	190.49	1.00	9.62E+05	1.040E-06	9.62E+05	9490.0	101.35
5	126.87	317.25	190.38	1.00	9.65E+05	1.037E-06	9.65E+05	9490.0	101.63
6	132.32	322.77	190.45	1.00	9.63E+05	1.039E-06	9.63E+05	9490.0	101.45
<b>Vida útil média (anos)</b>									<b>100.33</b>

**DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA**

# Vida útil das armaduras – 200 anos

Vida Útil à fadiga - 200 anos - Trem Operacional Carregado									
Seção	$\sigma_{\min.}$ (MPa)	$\sigma_{\max.}$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$n_i$	$N_i$	$D = n_i / N_i$	$V = 1/D$ (pares de trens)	$N_{op}$ em 1 ano	$V$ (anos)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	137.78	313.71	175.93	1.00	1.91E+06	5.244E-07	1.91E+06	9490.0	200.95
3	132.84	308.57	175.73	1.00	1.93E+06	5.192E-07	1.93E+06	9490.0	202.95
4	114.42	289.32	174.90	1.00	2.01E+06	4.975E-07	2.01E+06	9490.0	211.80
5	116.49	291.31	174.82	1.00	2.02E+06	4.953E-07	2.02E+06	9490.0	212.75
6	121.49	296.39	174.90	1.00	2.01E+06	4.975E-07	2.01E+06	9490.0	211.80
<b>Vida útil média (anos)</b>									<b>208.05</b>

**DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA**

# Vida útil das armaduras – 250 anos

Vida Útil à fadiga - 250 anos - Trem Operacional Carregado

Seção	$\sigma_{min.}$ (MPa)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$n_i$	$N_i$	$D = n_i / N_i$	$V = 1/D$ (pares de trens)	$N_{op}$ em 1 ano	$V$ (anos)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	134.24	305.67	171.43	1.000	2.41E+06	4.153E-07	2.41E+06	9490.0	253.74
3	129.43	300.66	171.23	1.000	2.43E+06	4.110E-07	2.43E+06	9490.0	256.38
4	111.49	281.92	170.43	1.000	2.54E+06	3.940E-07	2.54E+06	9490.0	267.44
5	113.51	283.86	170.35	1.000	2.55E+06	3.923E-07	2.55E+06	9490.0	268.60
6	118.39	288.81	170.42	1.000	2.54E+06	3.939E-07	2.54E+06	9490.0	267.54
<b>Vida útil média (anos)</b>									<b>262.74</b>

**DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA**

## Vida útil das armaduras – 300 anos

Vida Útil à fadiga - 300 anos - Trem Operacional Carregado

Seção	$\sigma_{\min.}$ (MPa)	$\sigma_{\max.}$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$n_i$	$N_i$	$D = n_i / N_i$	$V = 1/D$ (pares de trens)	$N_{op}$ em 1 ano	$V$ (anos)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	131.43	299.26	167.83	1.000	2.91E+06	3.432E-07	2.91E+06	9490.0	307.06
3	126.72	294.35	167.63	1.000	2.95E+06	3.394E-07	2.95E+06	9490.0	310.43
4	109.15	276.01	166.86	1.000	3.07E+06	3.257E-07	3.07E+06	9490.0	323.50
5	111.13	277.92	166.79	1.000	3.08E+06	3.245E-07	3.08E+06	9490.0	324.76
6	115.91	282.77	166.86	1.000	3.07E+06	3.257E-07	3.07E+06	9490.0	323.50
<b>Vida útil média (anos)</b>									<b>317.85</b>

**DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA**

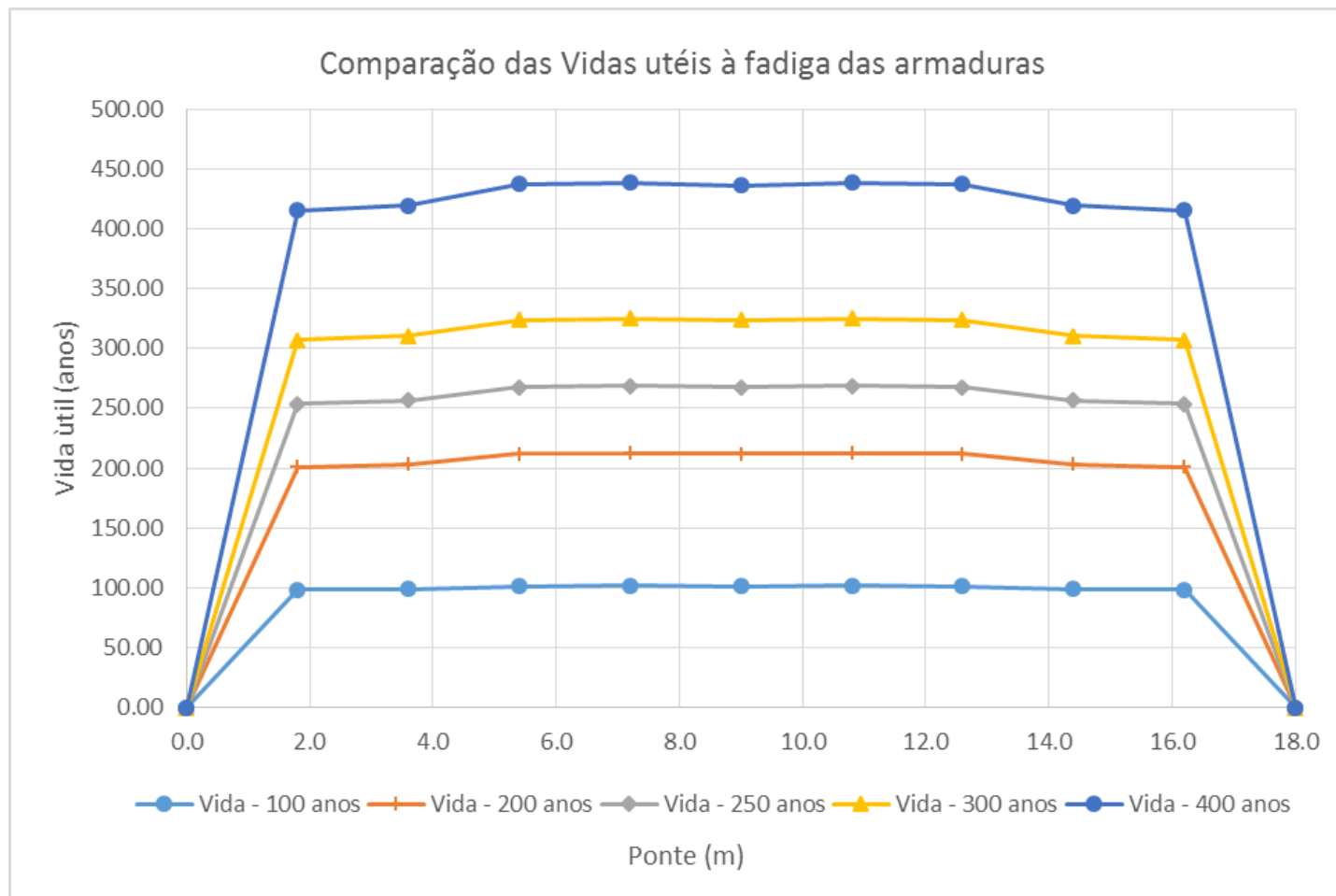
# Vida útil das armaduras – 400 anos

Vida Útil à fadiga - 400 anos - Trem Operacional Carregado

Seção	$\sigma_{min.}$ (MPa)	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$n_i$	$N_i$	$D = n_i / N_i$	$V = 1/D$ (pares de trens)	$N_{op}$ em 1 ano	$V$ (anos)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	127.11	289.41	162.30	1.000	3.94E+06	2.538E-07	3.94E+06	9490.0	415.17
3	122.54	284.65	162.11	1.000	3.98E+06	2.511E-07	3.98E+06	9490.0	419.60
4	105.57	266.94	161.37	1.000	4.15E+06	2.410E-07	4.15E+06	9490.0	437.20
5	107.48	268.8	161.32	1.000	4.16E+06	2.403E-07	4.16E+06	9490.0	438.46
6	112.10	273.5	161.40	1.000	4.14E+06	2.414E-07	4.14E+06	9490.0	436.46
<b>Vida útil média (anos)</b>									<b>429.38</b>

## DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA

# Comparação das Vidas úteis à fadiga



**DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA**

# Conclusões

- Recomenda-se corrigir a estimativa da variação de tensão por um fator de correção igual a 1,04;
- O decréscimo de tensão não acompanha proporcionalmente o acréscimo de armadura. Desta forma, recomenda-se corrigir a área de aço conforme demonstrado neste trabalho;
- O dano causado pela passagem do trem Operacional Descarregado equivale a 30% do dano causado pela passagem do trem Operacional Carregado.
- O dano causado por um único ciclo com variação máxima de tensão equivale a 90% do dano total produzido pela passagem do trem Operacional Carregado.

**DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA**



# Conclusões

- A metodologia proposta possibilita, utilizando um método simplificado, o dimensionamento das armaduras longitudinais à fadiga levando-se em consideração a vida útil de interesse;
- Resultados referentes a correlação de danos estão restritos a ponte e trem tipo estudados.

**DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS À FADIGA**

# Agradecimentos



**Obrigado à todos**