



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

Análise de Risco para Priorização de Pontes  
Ferroviárias e estimativa de vida útil  
focada em fadiga

Rodolfo Montoya MSc.



I-35W Mississippi River bridge Minneapolis, Estados Unidos - Agosto, 2007

**Causa Principal: Execução e falta de controle de qualidade.**



A ponte **I-35W Mississippi River**

A causa primária do colapso, foram as placas de reforço com dimensões menores de tamanho de espessura. Contribuindo para que o erro (projeto ou construção) foi o fato de que 2 polegadas (51 mm) de concreto foram adicionados à superfície da estrada ao longo dos anos, aumentando a carga morta em 20%.



O NTSB determinou que corrosão não foi um fator significativo, mas os inspetores não realizavam rotineiramente a verificação de segurança.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

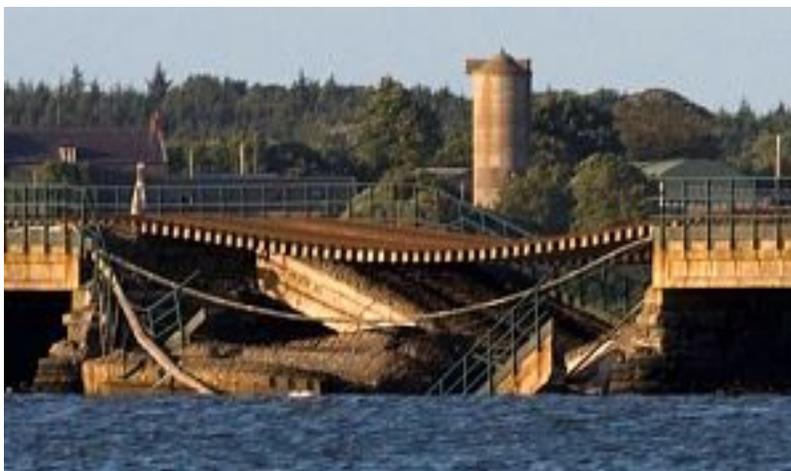
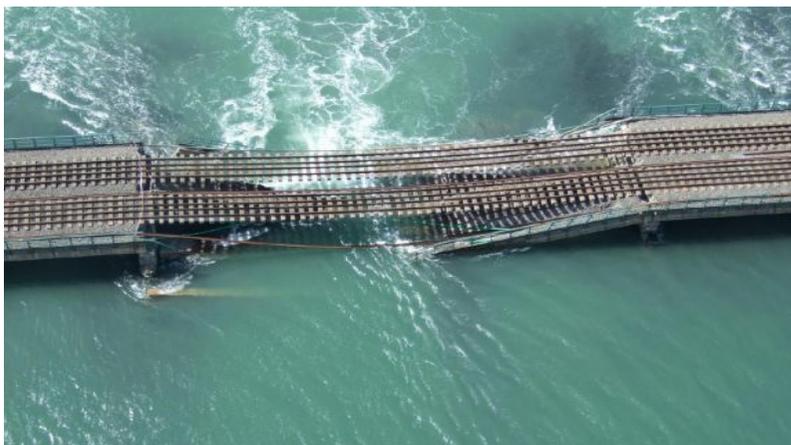
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

Dublin-Belfast, Irlanda - Agosto, 2009

**Causa Principal: Equipe de inspeção pouco treinada e pequena.**



De acordo com Iarnród Éireann todas as suas linhas ferroviárias são "inspecionados três vezes por semana por um técnico, e dado uma avaliação estrutural por um engenheiro a cada dois anos".

É muito difícil de acreditar que a estrutura estava em perfeita quando inspecionados na terça-feira, e depois desabou completamente na sexta-feira, apenas três dias depois.

Foi verificado posteriormente falta de treinamento dos inspetores, quantidade reduzida da equipe e danos visíveis de erosão e outros não detectados pelos mesmos.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Acidentes em Pontes



Ponto de Atenção  
casos similares na  
ferrovia



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

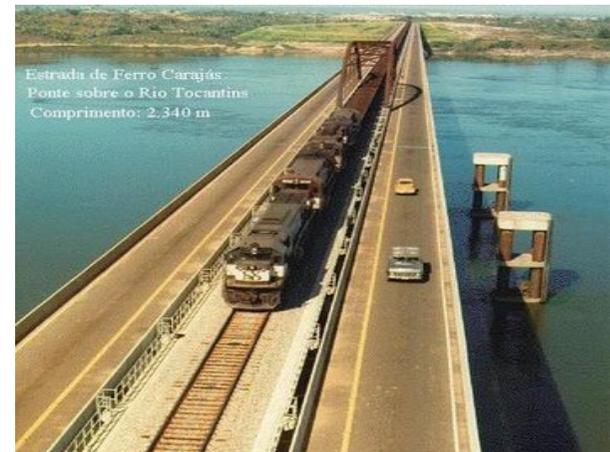
## Escolha para priorização



Orçamento Anual:  
R\$ MM

Quais Pontes?

Manutenção ou  
Substituição?



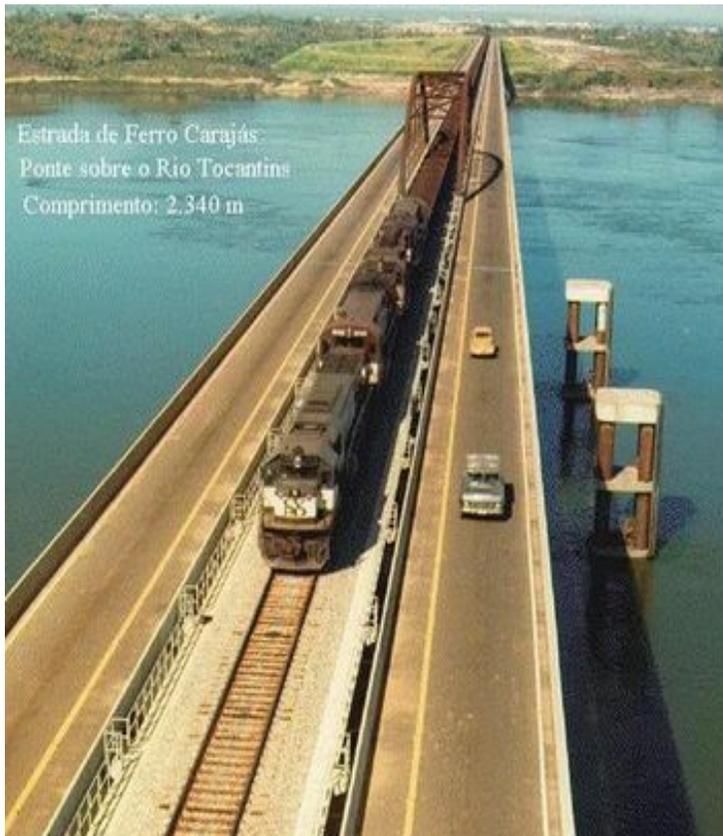
ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Escolha para priorização



Quantas e como  
escolher quais?



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Escolha para priorização



Patologias em diferentes estruturas.



Patologias na mesma estrutura.

Quais são mais importantes?



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Proposta de Análise de Risco para priorização

## Análise de Risco

A priorização será definida em função do risco que o equipamento causa quando para de funcionar na cadeia produtiva. Para isto será denominado como Risco para priorização, definido o mesmo da seguinte maneira:

$$\text{Risco} = \text{Consequência} \bullet \text{Probabilidade}$$

$$\text{Risco} = \text{Criticidade} \bullet \text{Dano Estrutural}$$



Probabilidade	Consequências				
	Insignificante	Menor	Moderado	Maior	Catastrófico
	1	2	3	4	5
A ( Quase certo)	H	H	E	E	E
B ( Provável)	M	H	H	E	E
C (Possível)	L	M	H	E	E
D ( Improvável)	L	L	M	H	E
E ( Raro)	L	L	M	H	H

E	risco extremo - ação devem ser implementadas imediatamente
H	risco elevado - é necessária atenção pela gerência sênior
M	risco moderado - responsabilidade pela gestão do risco deve ser especificada
L	risco baixo - gerenciamento por procedimentos de rotina



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Consequência - Criticidade

A criticidade é um atributo do equipamento associado à consequência de uma eventual falha, de forma que quanto maior a consequência da falha do equipamento maior a criticidade deste.

Assim, a criticidade é a consequência para nossa cadeia produtiva se o equipamento deixar de funcionar.

A criticidade será interpretada como o dano (consequência) que gera quando esse equipamento para de funcionar no sistema.

Sempre deve ser normalizada as informações e cada característica terá um peso.

$$C_n = (\sum N_n \times \text{Peso})$$

Os Pesos são valores de 0 até 1, e validados em função da importância de cada item para ferrovia.

**IMPORTANTE: Pesos devem ser calibrados para cada ferrovia ou sistema de transporte, em função da experiência técnica e/ou avaliações anteriores.**

Características
Comprimento Total
Altura máxima do pilar
Carregamento Maximo Informado
Comprimento menor de 15 metros (Sim = 1 Não = 0)
Trecho Carregado (Sim = 1 Não = 0)
Viga isostática (Sim = 1 Não = 0)
Traçado em Curva (Sim = 1 Não = 0)
Linha Singela (Sim = 1 Não = 0)
Curso d'água perene (Sim = 1 Não = 0)
Idade acima de 50 anos (Sim = 1 Não = 0)
Material da Ponte de Aço (Sim = 1 Não = 0)
Ponte rebitada (Sim = 1 Não = 0)

Outros: Transporte de material inflamável, trem de passageiros, neve, velocidade do trem, fauna, impacto ambiental, tipos de estruturas complexas, carregamentos especiais, terremotos, zona de guerra, vandalismo, encontros de alvenaria, aparelhos de apoios rígidos, ambiente corrosivo, treliça etc.



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Características dos Itens utilizados

	Maior	Menor	
<b>Comprimento Total</b>			Quanto maior o comprimento total da ponte, será mais complexa as soluções de reforço ou reparos das estruturas danificadas, assim como a logística em geral.
<b>Altura máxima do Pilar</b>			Quanto maior a altura do pilar, será mais complicado a logística da substituição da mesma, utilização de andaimes altos etc.
<b>Vão Menor de 15 metros</b>			Os impactos gerados pelos veículos (defeitos de via, mola, rodas, velocidades e outros) são mais importante para pontes menores que 15 metros, isto por ter mais ciclos de alívio entrando e saindo da estrutura a composição, aumentando os ciclos de fadiga.
<b>Maior de 50 anos de construção</b>			Quando ultrapassado 50 anos, consideramos que a estrutura esta próxima de alcançar vida útil a fadiga. Adicionalmente muitas vezes não possuem projetos ou não conhecemos os materiais e especificações utilizadas na execução.
<b>Rebitada ou soldada</b>			Rebites são mais solicitados que soldas. Consideramos que os rebites são elementos muito antigos isto leva a considerar que já ultrapassaram ou estão próximos de ultrapassar a vida útil.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



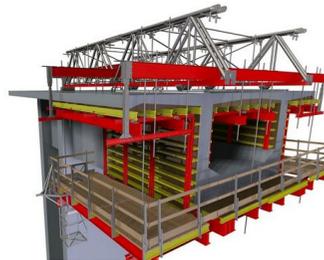
## Consequência - Criticidade

Outras características importantes como trecho carregado, desvios de carregamento, comprimento total, altura máxima do pilar, traçado em curva, linha singela, curso d'água perene, são relevantes para aspectos como:

- Logística e tempo de execução;
- Acessos;
- Desvios de carregamento e aumento no impacto;
- Estimativa de vida útil a fadiga;
- Possibilidade de degradação nas fundações;
- Riscos na operação;
- Interdição e parada na operação.

### IMPORTANTE:

A consequência são características e não dano ou degradação da estrutura



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

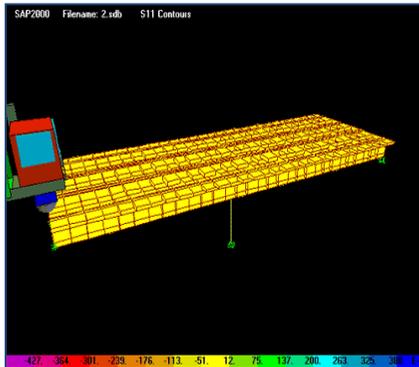
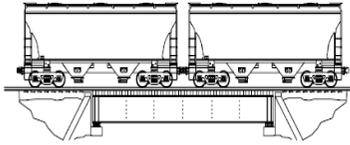


Logística S.A.

## Diferença no carregamento

### Carregamentos não distribuídos simetricamente

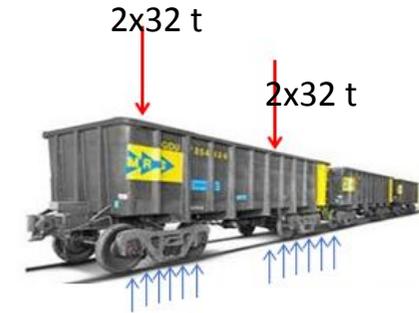
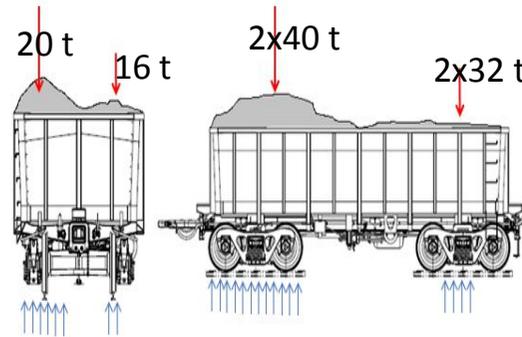
Carregamento sobre uma ponte



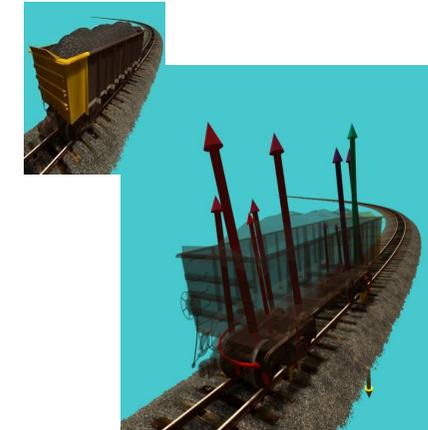
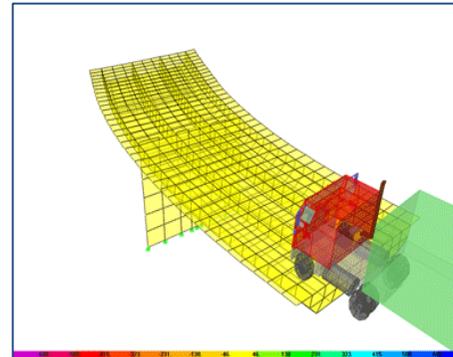
Modelo numérico de carregamento e resposta da ponte

ENCONTRO ANTF DE FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Os Desvios no Carregamento, produzem distribuições inadequadas de tensões no contato roda-trilho, acumulando dano localizadamente



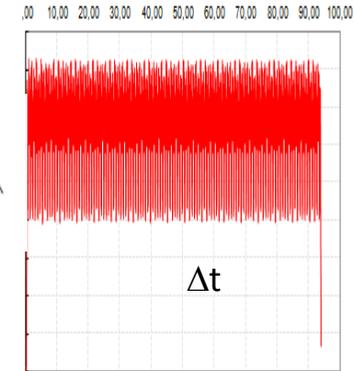
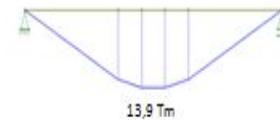
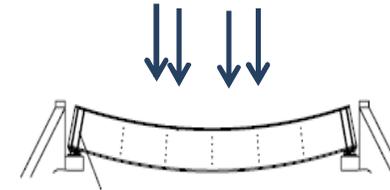
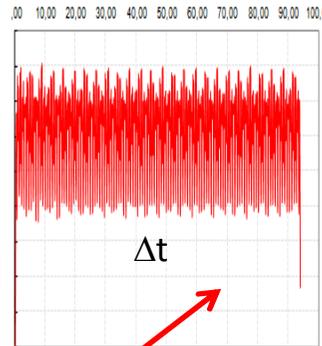
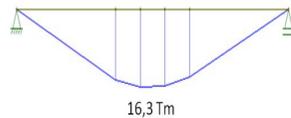
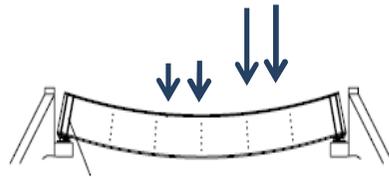
O Desvio do carregamento também contribuem com a instabilidade do vagão.



Logística S.A.

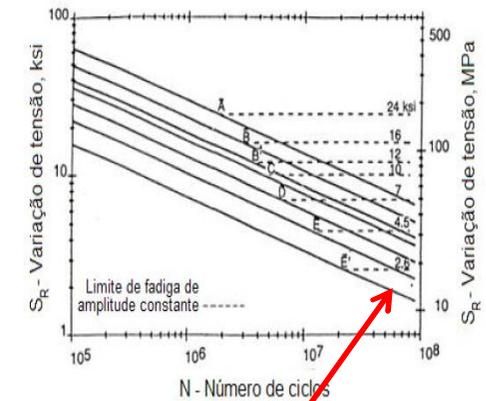
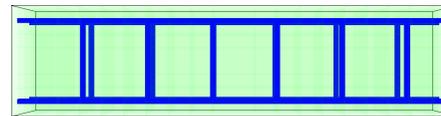
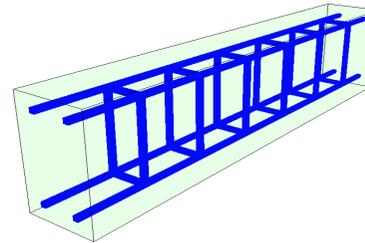
# Com a mudança dos carregamento mudam as resposta da estrutura

## Diferença no carregamento – Aumento a Fadiga na estrutura



Aumento do carregamento em eixos consecutivos leva a aumento de tensões concentradas

Com a variação de carregamentos, temos maiores  $\Delta$ Tensão (diferença entre tensões) e conseqüentemente maiores ciclos de fadiga.



Limite de  $\Delta$ Tensão para um numero de ciclos, quanto maior o valor da DTensão teremos menos possibilidade de ciclos.



## Dificuldades do modelo

- Modelo de criticidade não permite avaliar o dano, para grandes ferrovias, após a priorização temos muitas pontes como risco 1;
- Não temos informações básicas das estruturas, projetos falta de inspeções;
- Não temos informações de inspeções detalhadas;
- E quando temos, não são perfeitas ou algumas desnecessárias e incompletas;
- Defeitos de via, veículo e falta de controle de carregamento;
- Podemos ter muitas informações no final e como lidar com isto?
- Dano em fadigas?



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

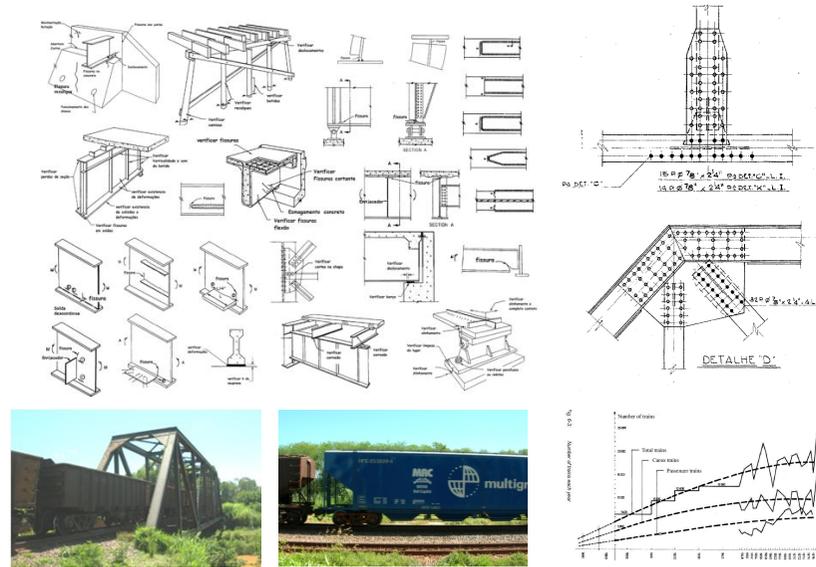
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Probabilidade – Dano Estrutural

Para avaliar o dano estrutural deve ser realizado um plano de inspeção detalhado focado em fadiga e tensão alcançada pela estrutura.



Como não possuímos atualmente todas as informações necessárias para realizarmos isto, será utilizado enquetes técnicas, para a equipe técnica, onde será avaliada utilizando técnicas introdutórias de lógica Difusa, realizando as seguintes perguntas qualitativas obtidas das inspeções visuais:

- Dano Via Permanente e superestrutura;
- Dano transições e encontros;
- Dano aparelhos de apoio;
- Danos nas estacas e blocos de fundação.

Serão utilizadas variáveis linguísticas obtidas da experiência pratica das inspeções visuais ao longo do tempo.

ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Conjuntos Fuzzy no dano estrutural

A Logica Difusa foi criada para emular a logica humana e tomar decisões certas embora da informação.

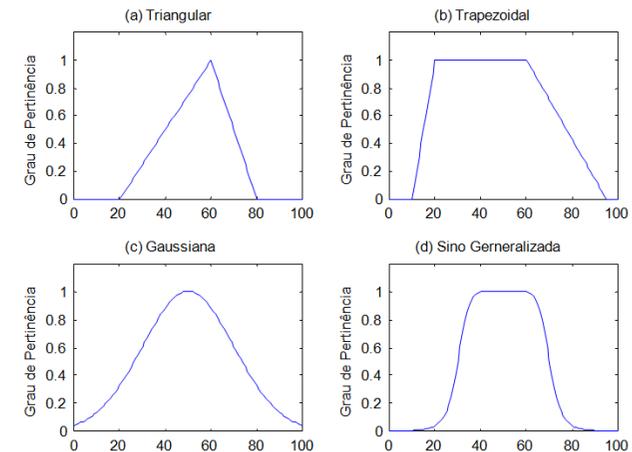
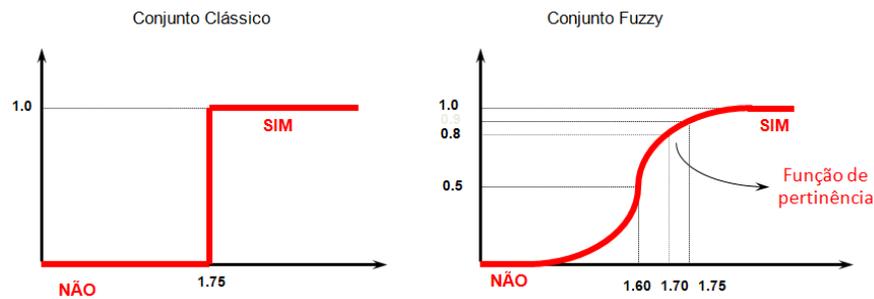


Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou é completamente verdadeiro ou é completamente falso.

Entretanto, na lógica Fuzzy, uma premissa varia em **grau de verdade** de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

**Lógica convencional:** sim/não, verdadeiro/falso

Tem dano nas conexões entre transversinas e longarinas?



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

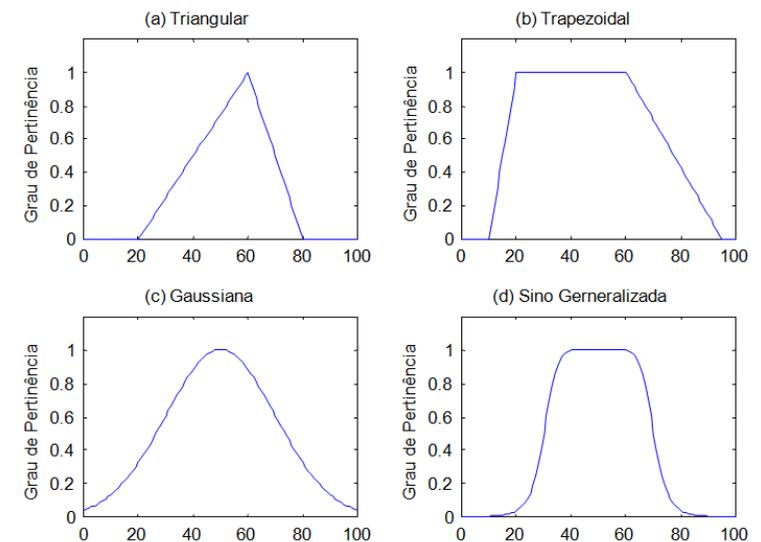
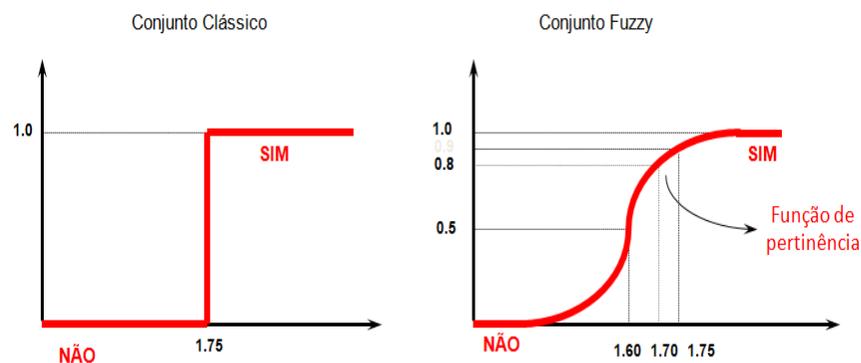


# Conjuntos Fuzzy na escolha de itens para avaliação



Conjuntos com limites imprecisos

O comprimento da ponte é importante ou não?



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



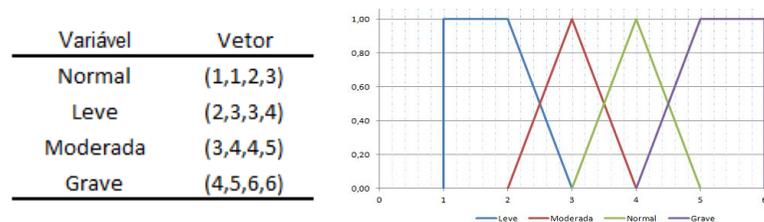
# Probabilidade Dano Estrutural Lógica Fuzzy

## Variáveis Linguísticas

O conhecimento humano é incerto, incompleto ou impreciso.

Quando a complexidade do problema cresce, nossa habilidade para tornar as proposições precisas diminui até um limiar que está fora do nosso alcance. Isto torna a precisão e a relevância duas características excelentes.

Muitas das frases e estimativas humanas não são facilmente definidas através de formalismos matemáticos.



Dano	Transições e encontros	Via Permanente e Vigas	Aparelho de apoio	Estacas e Blocos
Variável	Normal	Leve	Moderada	Grave
Vetor	(1,1,2,3) <sup>T</sup>	(2,3,3,4) <sup>T</sup>	(3,4,4,5) <sup>T</sup>	(4,5,6,6) <sup>T</sup>

## Cálculo da Probabilidade

Sempre deve ser normalizada as informações.

Igual que a consequência a probabilidade terá um valor que neste caso será um vetor de opinião “Av” e um peso que será um vetor de importância para cada elemento estrutural “Cag”.

$$Pr = [Av] \otimes [Cag]$$



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

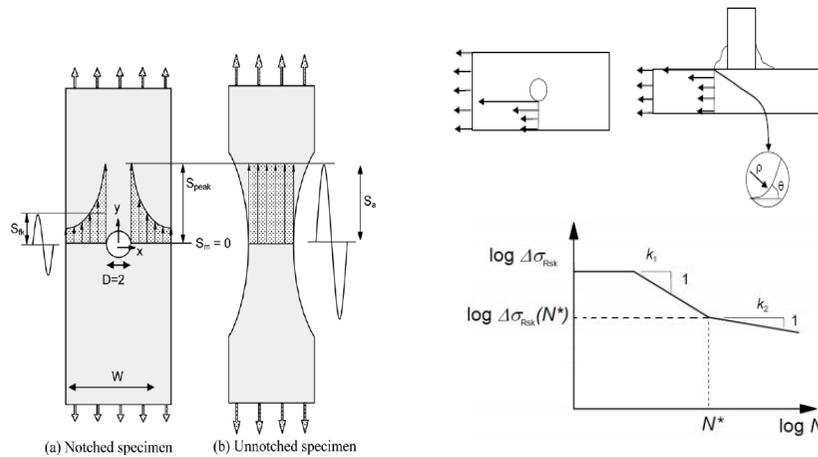
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Fadiga

- A concentração de tensões é definida como um aumento das tensões devido a uma mudança na geometria ou descontinuidades
- Fissuras por fadiga iniciam-se nesses locais
- A fadiga em pontes de aço inicia-se em detalhes mal projetados e/ou executados
- Métodos de reforço para aumentar a capacidade de carga podem ter consequências desastrosas se a fadiga não é corretamente analisada



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

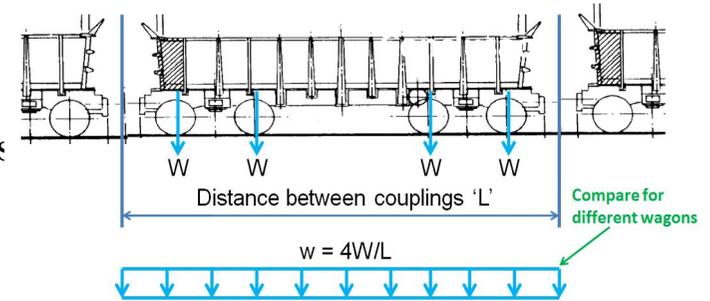
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



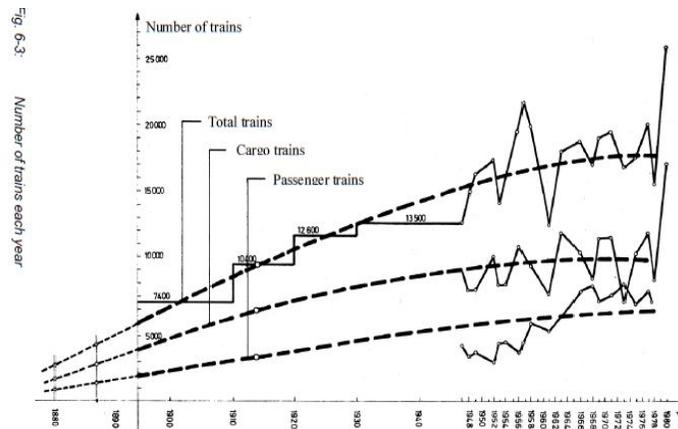
Logística S.A.

## Necessárias a uma análise de fadiga mais detalhada

- Deve ser analisado a distância entre os eixos e as cargas em cada eixo
- Deve ser avaliado o caso mais desfavorável de cada vagão
- A comparação das cargas uniformemente distribuídas 'w', fornecerá o caso mais desfavorável de carga para pontes de vão médio
- Histórico do carregamento (número e tipo de locomotivas/vagões por dia desde o início da operação)



- Carga atual (vagões vazios e carregados)
- Estimativa da carga no futuro



Years	Cargo wagons mass [tons/m]		Passenger wagons mass [tons/m]
	Empty	Loaded	
1895 - 1913	1.6	2.8	2.0
1914 - 1959	1.6	4.6	2.0
1960 - 1980	1.6	6.4	2.0

Exemplo de histórico das cargas de tráfego

Years	Locomotive type
1895 - 1913	S 123
1914 - 1946	S 32
1947 - 1959	S 38
1960 - 1980	E 362, 2E 362, E 320

ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

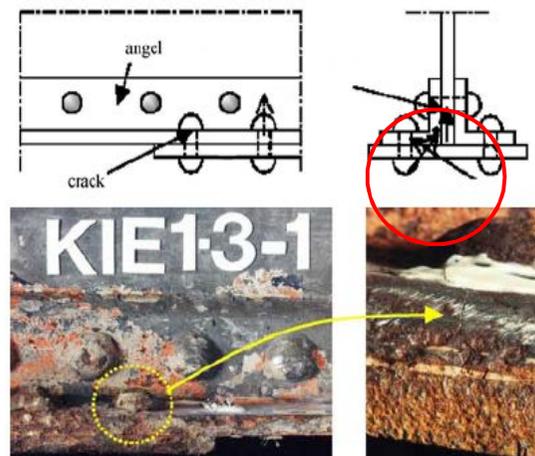


Logística S.A.

## Detalhes de falha típica por fadiga

### Detalhes de rebites

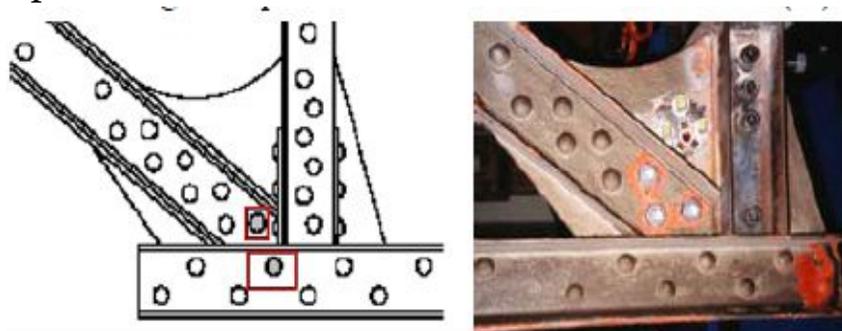
Fissuras iniciando nos furos na seção transversal líquida ao final da chapa da conexão devido a alterações da geometria



Dano nos rebites e entorno da chapa deles pela corrosão excessiva



Fissuras em placa de reforço devido a insuficiente espessura



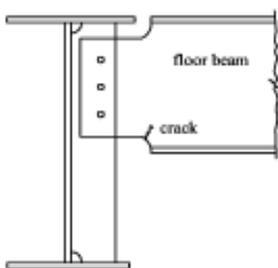
ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



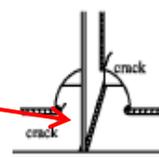
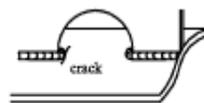
## Detalhes de falha típica por fadiga

Detalhes soldados

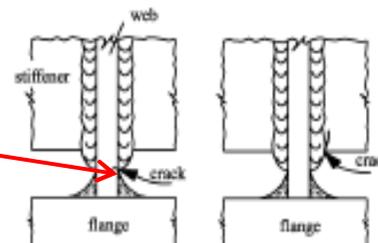


Fissura de fadiga na alma ou mesa, iniciada devido ao cordão de solda do apoio

Falha de fadiga na mesa, devida a um detalhe de solda



Vazios na solda transversal:  
Fissuras perto do final da alma vertical



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Aumentando ciclos de fadiga obtemos....

Aumentando fadiga, obtemos maiores danos na estrutura e uma diminuição da vida remanescente



Desvio no carregamento

Desvios no Carregamento, produzem má distribuição de tensões no contato roda-trilho, acumulando dano localizadamente.

Elementos flexíveis e rigidez sofrem maiores danos.

Desvio de carregamento, comprime a mola dos sistemas de amortecimentos e danifica os mesmos piorando a situação do impacto nas pontes



Existência de trinca no bloco no apoio da viga do pontilhão. Deverá ser realizado acompanhamento constante da patologia para posteriores definições.

Existência de trinca nos encontros pela fadiga.



ENCONTRO ANTI DE  
**FERROVIAS**

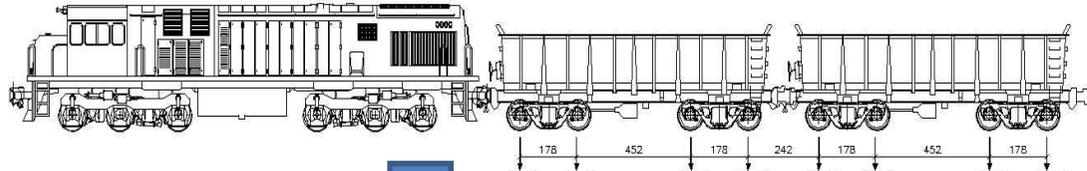
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Modelo numérico dos veículos

Distancias entre eixos das locomotivas e vagões e carga por eixo, cuidado pela distribuição das cargas nas vigas.



### Análise Fadiga Informações do Veículo e Geometria da Estrutura

As unidades da gravidade estão em SI, podendo modificá-las utilizando o FMU (Fator de modificação de Unidades)

Características do veículo			
Nome do veículo	Móvel		Eixos
	P	mv	
DASH	-18,00	-1,84	LOCO
VAGÃO	-16,00	-1,63	GDT
DASH	-18,00	-1,84	LOCO

Disposição dos Vagões					
Tipo	Quantid.	Distancia entre eixos			
		Eixo01	Eixo02	Eixo03	Eixo04
GDT	100,00	2,54	1,83	3,53	1,83

Velocidade (kmh)	=	45,00
Taxa de amortecimento	=	1%
FMU		1,00

Disposição das Locomotivas							
Tipo	Quantid.	Distancia entre eixos					
		Eixo01	Eixo02	Eixo03	Eixo04	Eixo05	Eixo06
LOCO	1,00	3,68	2,02	2,12	10,08	2,02	2,12



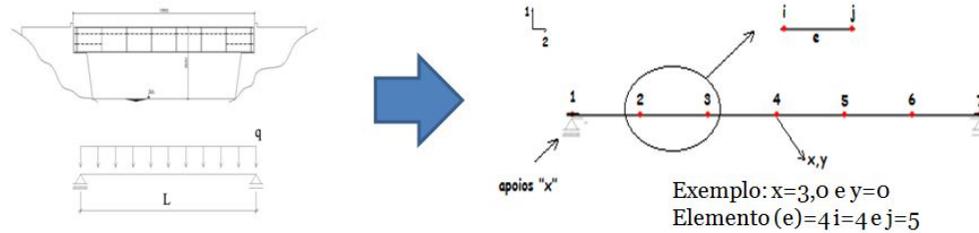
ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



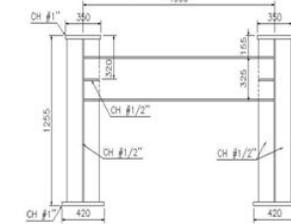
Logística S.A.

# Informações da estrutura



Dados relativos aos nós											
nós	Coordenadas		Apoios			Forças Concentradas			Deslocamentos nos nós		
	X	Y	1	2	3	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	u	v	θ
1	0,000	0,000	x	x							
2	1,000	0,000									
3	2,000	0,000									
4	3,000	0,000									
5	4,000	0,000									
6	5,000	0,000									
7	6,000	0,000		x							
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											

Conectividades dos elementos						
e	Nós		Seção tipo	Aplicação de carga móvel	Forças distribuídas	
	i	j			w <sub>x</sub>	w <sub>y</sub>
1	1	2	A	x		-7,20
2	2	3	A			
3	3	4	B			
4	4	5	B			
5	5	6	A			
6	6	7	A			
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						



Definição das propriedades das seções

Características das seções														
Etiquetas	E	Massa	Tipo	Material	A	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	J(Polar)	X <sub>cg</sub>	Y <sub>cg</sub>	V <sub>pD</sub>	V <sub>pE</sub>	W <sub>xS</sub>	W <sub>yS</sub>
Apq	2,00E+07	13000	A	Apq	0,07	3,52E-02	1,44E-04	3,54E-02	1,44E-01	3,75E-01	3,22E-04	3,74E-04	3,28E-02	3,67E-02
			B	Apq	0,06	2,20E-02	1,0E-04	2,22E-02	1,50E-01	1,03E+00	1,69E-04	1,68E-04	3,13E-02	3,13E-02

Geometria das seções utilizadas

Coordenadas	
x	y
0,000	0,000
0,000	0,000
0,000	0,025
0,163	0,025
0,163	2,025
0,000	2,025
0,000	2,050
0,000	2,050
0,000	2,025
0,158	2,025
0,158	0,025
0,000	0,025
0,000	0,000

## Modelo Estrutural

### Modelo utilizando Análise Matricial e/ou Elementos Finitos

Foram desenvolvidos programas capazes de calcular elementos barras, pórticos e área, para avaliar as diferentes configurações estruturais dos elementos e conexões. Esse módulo do programa **CarTool** permite avaliação dinâmico e registro de tempo historias, obtendo deformações e tensões para qualquer tipo de seção em qualquer ponto.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Acumulo de Dano nas estruturas

## Espectro de tensões

A passagem dos comboios sobre uma determinada ponte provoca variações de tensão nos diversos elementos estruturais que podem ser representadas através de diagramas tensão em função do tempo ( $\sigma-t$ ). Com base nestes diagramas é possível, através de métodos de contagem adequados, obter o número de ciclos de tensões a que o elemento é submetido em correspondência com determinadas classes de amplitude de tensão.

Como resultado desta contagem, é possível obter um histograma de frequências da amplitude de tensão também designado por espectro de tensões ou de amplitudes de tensão, e que constituem a base para a análise da fadiga.

As amplitudes de tensão são definidas como a diferença entre um máximo local e um mínimo local da tensão,

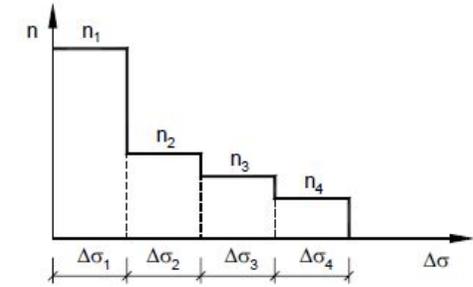
## Critério cumulativo de Palmgren-Miner

Palmgren e Miner assumiram a possibilidade de acumulação linear do dano relativo a cada uma das classes de amplitude de tensão. O comportamento não-linear na acumulação do dano relaciona-se com o fato de classes de amplitude de tensão distintas apresentarem pesos distintos na avaliação do dano. Por conseguinte, o dano referente a ciclos de pequena amplitude de tensão é distinto do dano associado a ciclos de grande amplitude de tensão, em virtude das primeiras serem responsáveis pela iniciação das fendas, enquanto as segundas estarem ligadas ao seu desenvolvimento.

No entanto, a facilidade de aplicação da regra de Miner, e os bons resultados por ela obtidos quando comparados com resultados de ensaios experimentais, levaram a que a hipótese de acumulação linear do dano seja aceite.

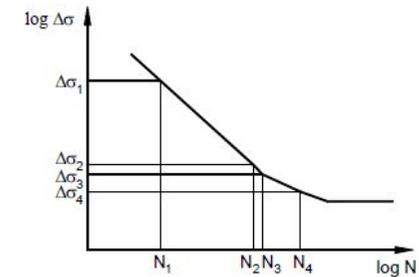
## Critério de rotura

O critério de rotura quando se recorre ao método de acumulação de danos quando D é superior de 1,0 existe fissura, quando inferior pode ser calculado quantos anos faltam para existir.



$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$



$$VR = \frac{\sum_i n_i}{\sum_i \frac{n_i}{N_i}} - \sum_i n_i$$



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

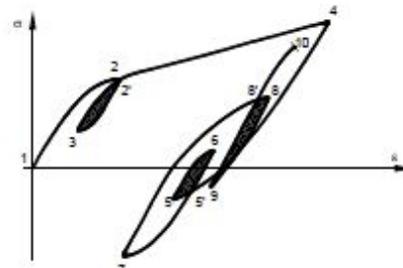
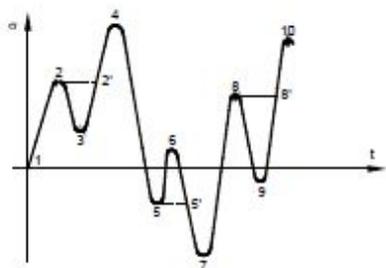
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Contagem de ciclos de fadiga – Utilizando RainFlow

Estes espectros de tensão são construídos a partir de registros  $\sigma - t$  do tipo do ilustrado na seguinte figura. A este diagrama pode estar associado o diagrama  $\sigma - \epsilon$ , em que se apresentam os ciclos de histerese a que o elemento é submetido.

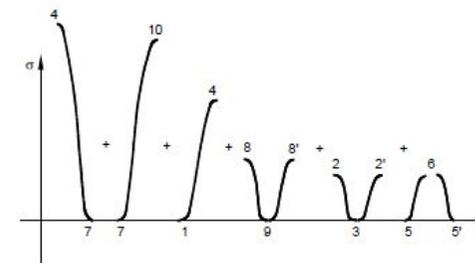
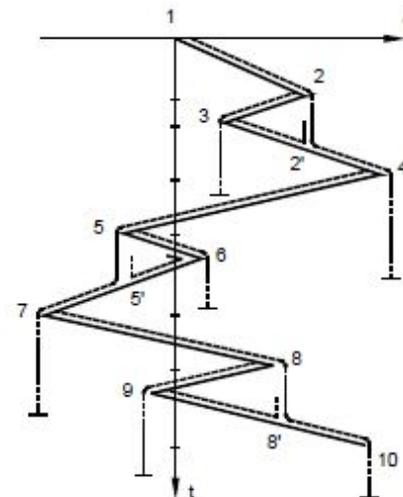


O movimento da água pode efetuar-se tanto da esquerda para a direita como da direita para a esquerda iniciando-se sempre a partir de cada pico ou vale.

A gota inicia o seu movimento no ponto 1, percorrendo o primeiro telhado até atingir um pico ou vale; nesse momento a gota cai verticalmente até atingir outro telhado sendo o percurso da gota apenas interrompido quando:

1. Se cruzar com uma gota que esteja a precipitar-se de um telhado superior. Como exemplo temos o trajeto 3-2' que intersecta o percurso da gota que precipita verticalmente de 2;
2. Passa por um ponto cuja tensão é maior ou igual (em módulo e da mesma natureza, pico ou vale) à tensão do ponto onde ele iniciou o seu percurso. Como exemplos temos as gotas que precipitam do pico 6 e do vale 3. Assim, o trajeto 5-6 termina após 6 porque o vale 7 é mais negativo do que 5; do mesmo modo, o percurso termina em 3 porque o pico 4 é mais positivo que o pico 2.

Um novo percurso não é iniciado enquanto o anterior não estiver concluído. Por conseguinte, cada percurso completo (1-2-2'-4; 2-3-5-7; 7-8-8'-10) é contabilizado como meio ciclo, sendo que a junção de dois meios ciclos de igual amplitude de tensão formam um ciclo completo. As interrupções do percurso, tais como 2-3-2', 5-6-5' e 8-9-8', constituem ciclos completos.



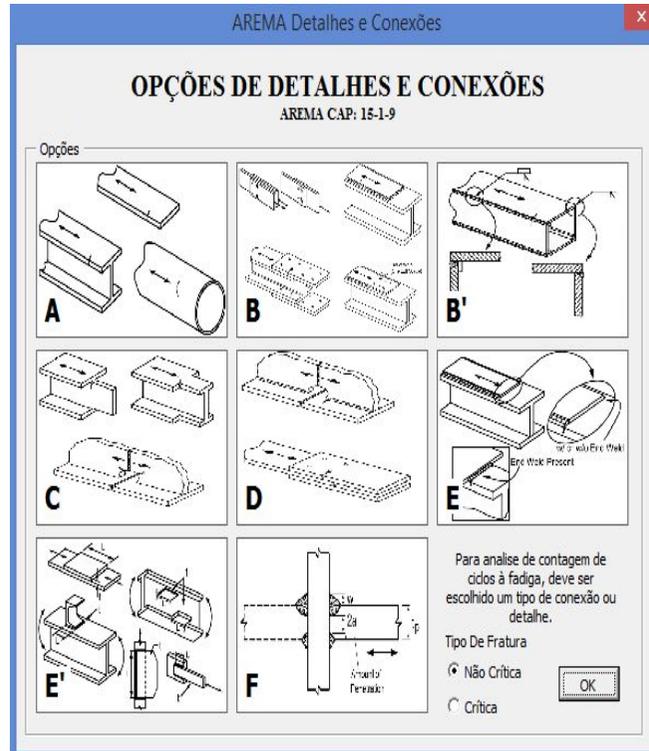
ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## Análise com AREMA



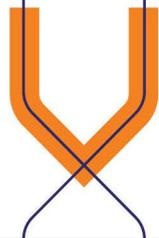
$S_{RFRAT}$

Categoria de tensão	Número de ciclos de tensão constante, $N$	
	2.000.000	> 2.000.000
A	24 (165,6)	24 (165,6)
B	18 (124,2)	16 (110,4)
B'	14,5 (100)	12 (82,8)
C	13 (89,7)	10 ou 12 (69 ou 82,8) *
D	10 (69)	7 (48,3) **
E	8 (55,2)	4,5 (31)
E'	5,8 (40)	2,6 (17,9)
F	9 (62,1)	8 (55,2)

**Tabela com informações da AREMA para detalhes com fraturas não críticas**

Categoria de tensão	Número de ciclos de tensão constante, $N$	
	2.000.000	> 2.000.000
A	24 (165,6)	24 (165,6)
B	16 (110,4)	16 (110,4)
B'	11 (75,9)	11 (75,9)
C	10 (69)	9 (62,1)
D	8 (55,2)	5 (34,5)
E	6 (41,4)	2,3 (15,9)
E'	4 (27,6)	1,3 (9)
F	7 (48,3)	6 (41,4)

**Tabela com informações da AREMA para detalhes com fraturas críticas**



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

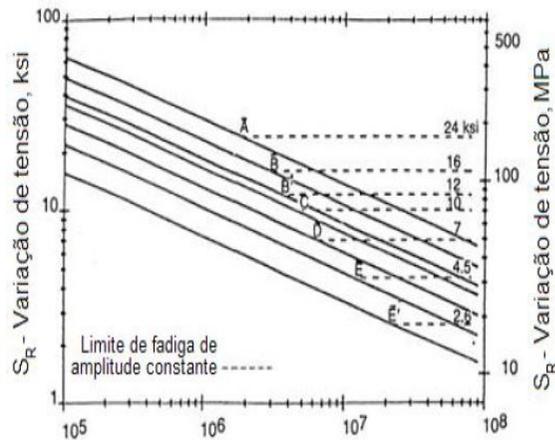


Logística S.A.

Categoria	Constante A
A	$2,5 \times 10^{10}$
B	$1,2 \times 10^{10}$
B'	$6,1 \times 10^9$
C	$4,4 \times 10^9$
D	$2,2 \times 10^9$
E	$1,1 \times 10^9$
E'	$3,9 \times 10^8$

A

**Tabela com constante A da AREMA**



N - Número de ciclos

ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

**Tensão-Ciclo AREMA**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

## Resultados

### Contagem de ciclos de fadiga com Rainflow

	$\Delta\sigma$ (Mpa)	$\sigma$ Total (Mpa)	Ano	1950,00	Est. Vida Projeto AREMA	15,00	
Máximo	5,01	7,81	Trens dia	24,00	Est. Vida AREMA Montoya	727,62	
Mínimo	0,05	0,00					
Grupos Mpa	Frequência	Por Ano	$N_i$ (ciclos)	$S_{RE}$ $\alpha=1$ (Ksi)	$S_{RFRAT}$ (Ksi)	$N_R$ AREMA 2013	Dano AREMA Montoya
0 - 0,05	0,50	4.380,00	284.700,00	0,01	6,00	5.092.592,59	0,0001
0,05 - 0,54	10,00	87.600,00	5.694.000,00	0,02	2,30	90.408.481,96	0,0003
0,54 - 1,04	6,50	56.940,00	3.701.100,00	0,06	2,30	90.408.481,96	0,0004
1,04 - 1,53	7,50	65.700,00	4.270.500,00	0,08	2,30	90.408.481,96	0,0006
1,53 - 2,03	2,50	21.900,00	1.423.500,00	0,16	6,00	5.092.592,59	0,0076
2,03 - 2,53	2,00	17.520,00	1.138.800,00	0,20	6,00	5.092.592,59	0,0075
2,53 - 3,02	3,00	26.280,00	1.708.200,00	0,21	6,00	5.092.592,59	0,0119
3,02 - 3,52	1,50	13.140,00	854.100,00	0,31	6,00	5.092.592,59	0,0086
3,52 - 4,01	1,50	13.140,00	854.100,00	0,36	6,00	5.092.592,59	0,0100
4,01 - 4,51	3,00	26.280,00	1.708.200,00	0,34	6,00	5.092.592,59	0,0192
4,51 - 5,01	2,00	17.520,00	1.138.800,00	0,43	6,00	5.092.592,59	0,0159
$\Sigma$ ciclos	40,00	Num de Eixos	410,00			Dano $\Sigma(N_i/N_R)$	0,0820
Ciclos/Eixo	0,10	TBAño	0,00			$\Phi$ (Dim/Est)	0,81



Logística S.A.

## Modelo AREMA

Avaliação pelo Método da Arema utilizando algumas variações propostas.

1. Avaliação Dinâmica do local onde existe a possibilidade de ruptura a fadiga, utilizamos as dimensões reais dos veículos, carregamentos reais e quantidades de trens em operação desde a construção da ponte;
2. É avaliado para diferentes tempos a passagem de cada eixo e guardado um registro de tensões ao longo do tempo;
3. É avaliado as diferenças de tensões no registro e utilizado a contagem de ciclos rainflow, podendo parametrizar em frequências de tensões;
4. Escolhemos o tipo de detalhe segundo AREMA para obter o coeficiente A e Sr, o mesmo permite calcular o numero de ciclos para esse nível de tensão;
5. Calculamos o  $S_{RE}$ , que é a faixa de tensão aplicada melhor correlacionada com a regra de Miner, onde  $n_i$  é o numero de ciclos para uma faixa de tensões  $S_{ri}$ , atuante do meu registro de tensões;
6. Calculamos o dano acumulado utilizando o critério cumulativo de Palmgren-Miner multiplicando pelo coeficiente;
7. Finalmente calculamos a esperança de vida de projeto e da análise.

$$D_d = \sum \frac{N_{rainflow}}{A} \cdot \frac{S_{RE}}{S_{RFRAT}}$$

$$D_d \leq 1, \text{ onde } D_d = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

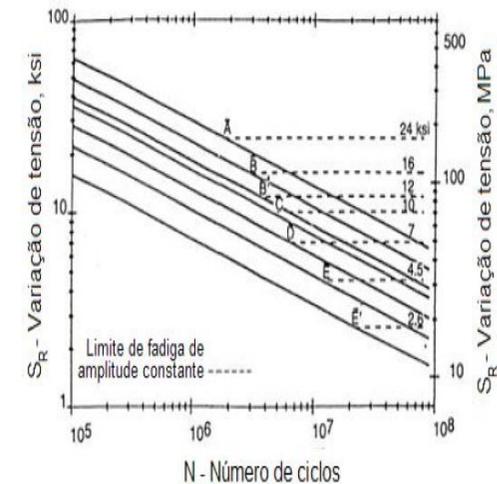
Estimativa de vida de projeto= Ano de construção – 80 anos

Anos serviços= Ano Atual – Ano construção

Estimativa de vida à Fadiga =  $\frac{1 - D_d}{D_d} \cdot \text{Anos de serviços}$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$S_{RE} = \alpha \left( \frac{\sum n_i S_{Ri}^3}{\sum n_i} \right)^{1/3}, \alpha=1$$



$$A = \frac{N}{S_R^{-3}} \text{ Numero de ciclos da AREMA em função do detalhe etc}$$

$$N = AxS_R^{-3}$$



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Resultados

$\Delta t$  1,0  
segundo

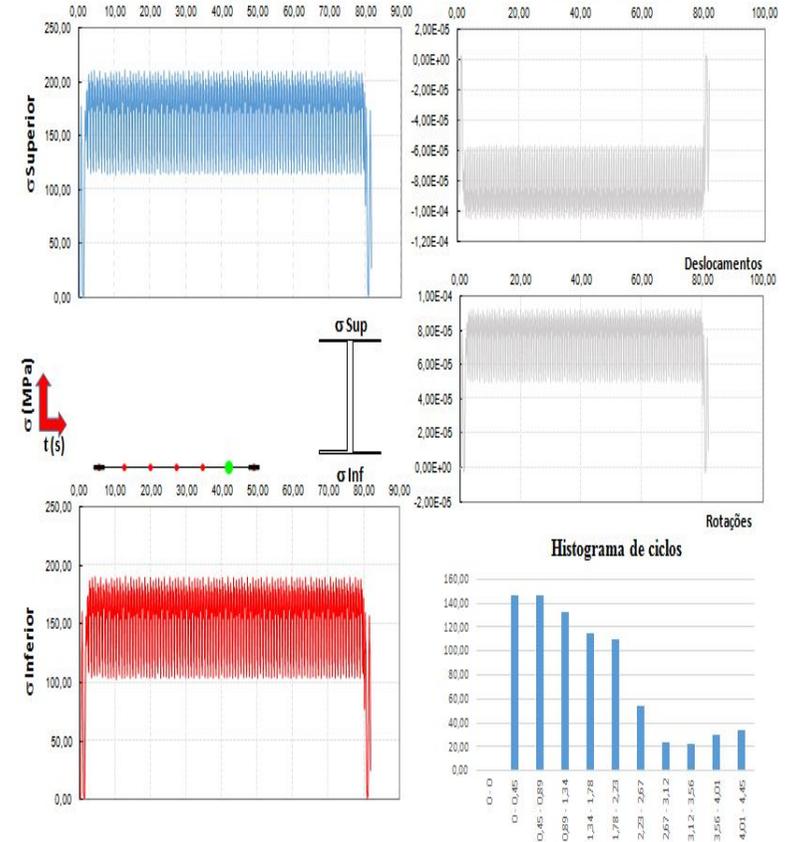
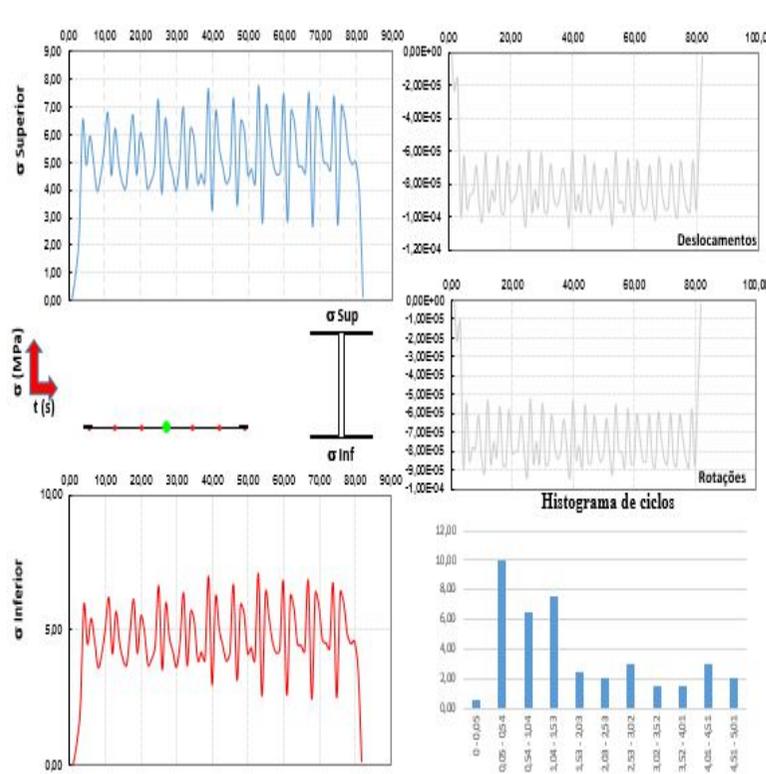
$\Delta t$  0,1  
segundo

Tempo Historia  
Tensões

Tempo Historia  
Deslocamentos

Tempo Historia  
Tensões

Tempo Historia  
Deslocamentos



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Proposta de Análise de Risco para priorização

A priorização será definida em função do risco que o equipamento causa quando para de funcionar na cadeia produtiva. Para isto será denominado como Risco para priorização, definido o mesmo da seguinte maneira:

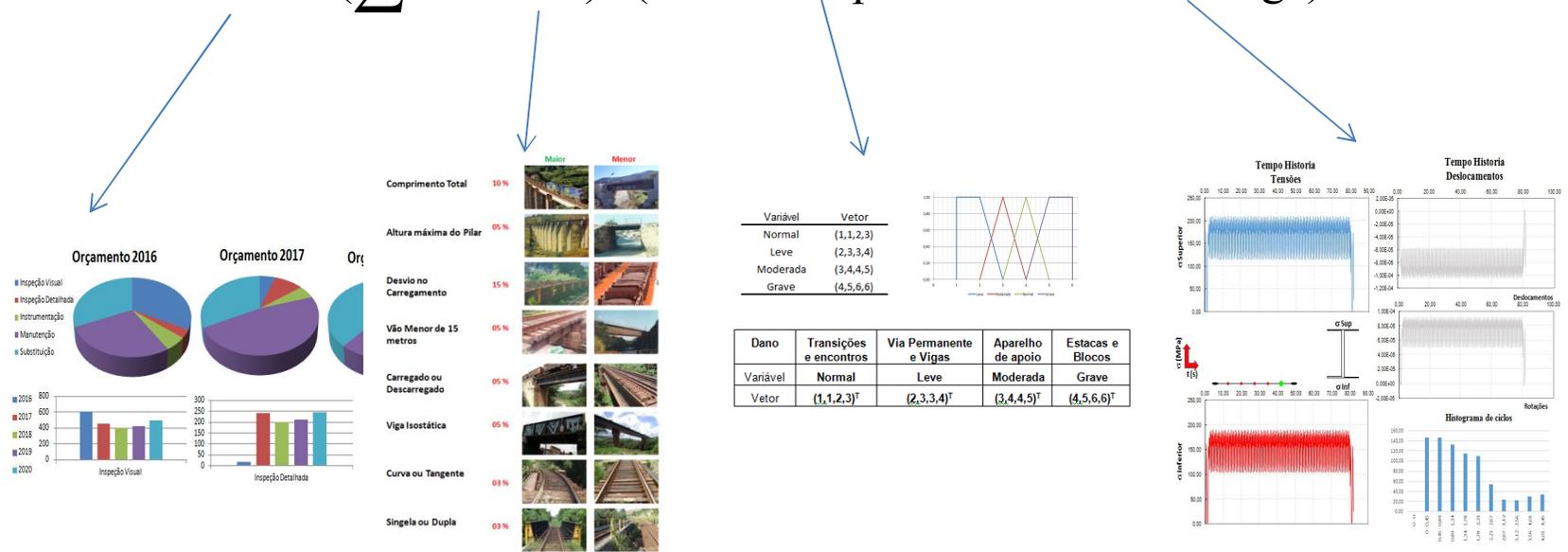
A = %Importância

B = %Importância

$$\text{Críticidade} = (\sum N_n \times \text{Peso})$$

Consideramos como esta sendo implantada a ferramenta que a opinião técnica é mais importante que a numérica ou seja o percentual A é maior que o B.

$$\text{Risco} = (\sum N_n \cdot \text{Peso}) \cdot (A \cdot \text{Dano Opinião} + B \cdot \text{Dano Fadiga})$$



ENCONTRO ANTF DE FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/ NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Proposta de Análise de Risco para priorização

- **Risco 01:** Risco  $\geq$  L1, quando Risco  $\geq$  LSUP, priorizar troca.
- **Risco 02:** Risco  $\geq$  L2 e Risco  $<$  L1.
- **Risco 03:** Risco  $\geq$  LSUP e Risco  $<$  L2.

Os valores limites, são parametrizados em função da experiência de utilização da ferramenta.

## Frequências de Inspeções e Manutenções

- Para normas americanas ARMY TM 5-600 e AIR FORCE AFJPAM 32-1088, as pontes deverão ser inspecionadas visual cada 2 (dois) anos e detalhada cada 3 (três) anos;
- Para a Norma DNIT é recomendada uma frequência para as inspeções visuais de cada 2 (dois) anos e Inspeção Detalhada cada 5 (cinco) anos;
- Para o EUROCODE é recomendada uma frequência de inspeção detalhada de cada 6 (seis) meses para pontes que ultrapassaram a vida útil a fadiga;
- Para a Norma AREMA é recomendada uma frequência para as inspeções visuais de cada 1 (um) ano para estruturas metálicas e as demais estruturas serão definidas pelo especialista da ferrovia;
- Para a NBR 9452 é recomendada uma frequência de inspeção Visual não superior de 1 (um) ano e Inspeção detalhada depende da avaliação visual.

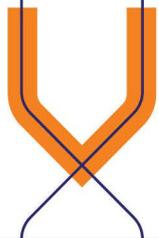
## Plano de Trabalho

- **Risco 01:** ID – Instrumentação e acompanhamento frequente ou em tempo real.

Projeto de reforço emergencial ou substituição emergencial, limitar carregamento, velocidade ou a passagem de trem na ponte

- **Risco 02 e 03:** IVS e ID definidas seguindo as frequências.

Pintura, reparos no concreto, tratamento de corrosão, alívio de tensão, agulhamento, esmerilhamento de soldas para eliminação de arestas vivas, substituição de parafusos e rebites, substituição de aparelhos de apoio, limpeza e recuperação da drenagem, tratamento de fissuras, etc.



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Caso Prático, mudança de dano de um ativo, como impacta na matriz?

**Problema: Ponte sem problemas graves**

Analisando na matriz, a ponte, esta na aba de risco 3 na posição numero 12 com um índice de Risco de 0,44.

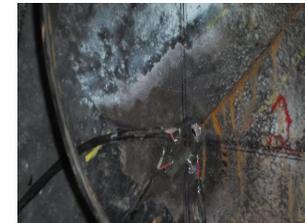
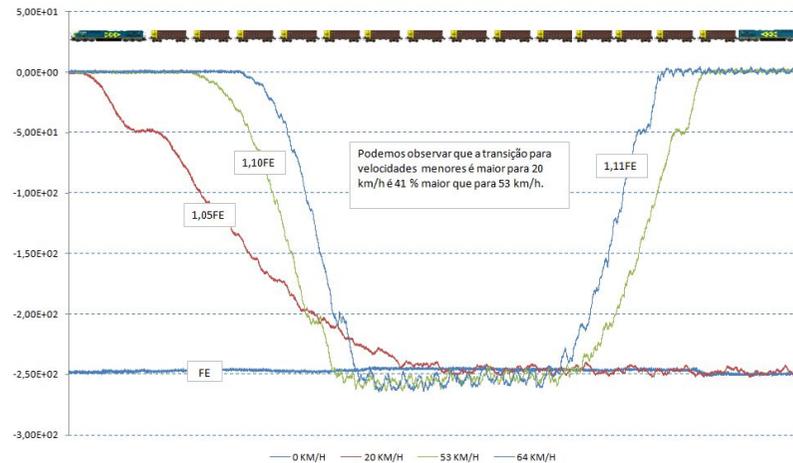
Após inspeção detalhada foi encontrada algumas anomalias e foi atualizada a matriz de risco, assim a ponte em estudo foi para aba do risco 1 na posição numero 3 com um índice de Risco de 0,95.

**Matriz é aderente com a situação da Ponte, e deve ser atualizada e alimentada constantemente com as informações da inspeção detalhada.**

Risco 3 - 139 Pontes		
Numero	Pontes	Risco
1,00	005-A-BJ	0,46
2,00	001-A-BJ	0,46
3,00	007-SP	0,46
4,00	019-SP	0,45
5,00	147-LC	0,45
6,00	006-LC	0,45
7,00	006-A-LC	0,45
8,00	007-LC	0,45
9,00	007-A-LC	0,45
10,00	008-A-LC	0,45
11,00	005-LC	0,44
12,00	Estudo	0,44

Risco 1 - 23 Pontes		
Numero	Pontes	Risco
1,00	001-SRG	1,00
2,00	005-MB	0,96
3,00	Estudo	0,95
4,00	061-LC	0,93
5,00	026-SP	0,92
6,00	002-RI	0,91
7,00	011-RI	0,91
8,00	010-RI	0,91
9,00	036-PB	0,90
10,00	039-PB	0,89

## E quando encontramos trincas de fadiga o que fazer?



ENCONTRO ANTF DE FERROVIAS

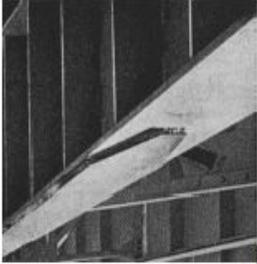
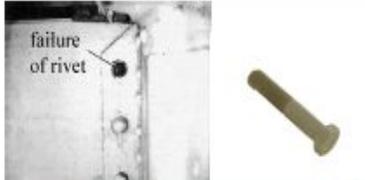
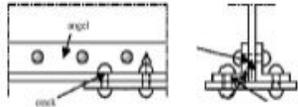
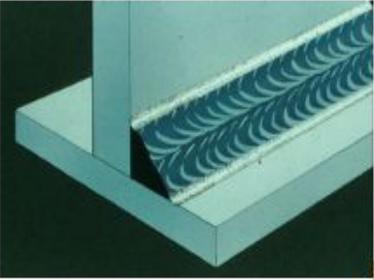
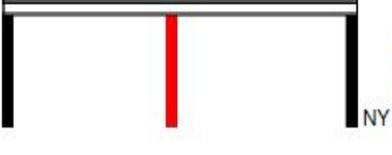
NOVAS IDEIAS P/ NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

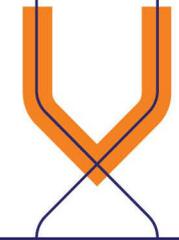
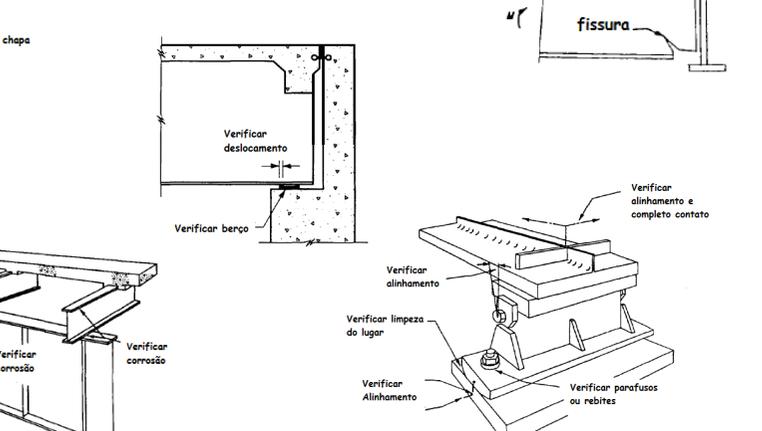
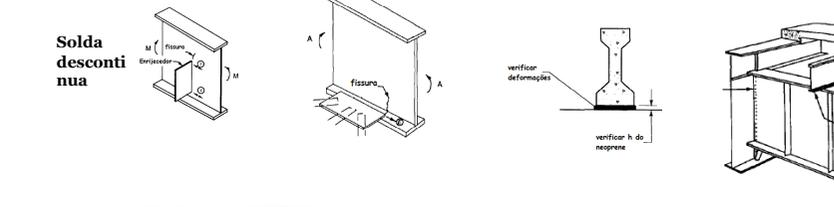
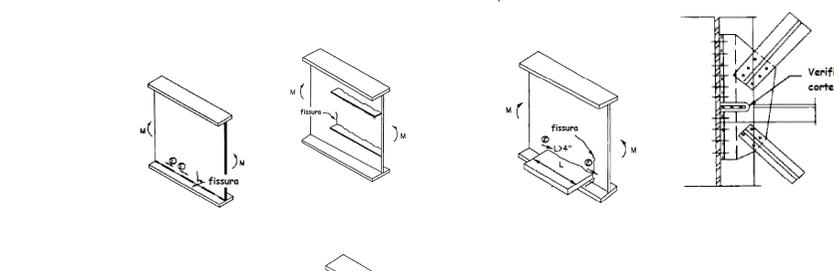
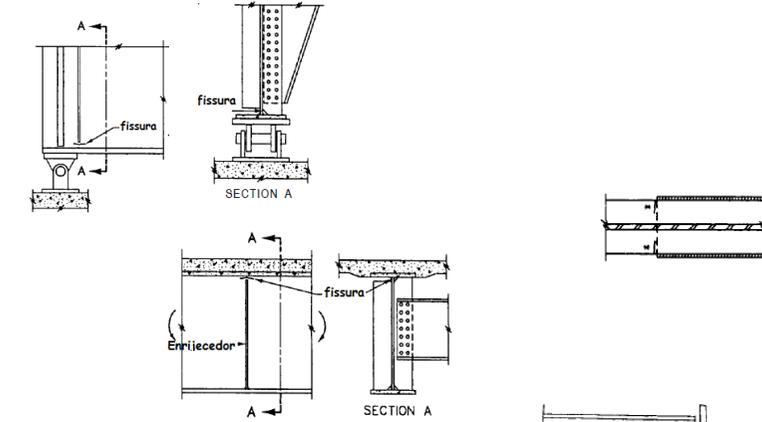
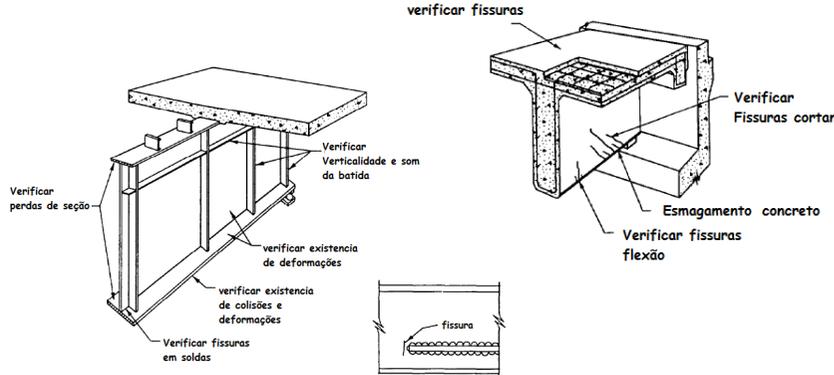
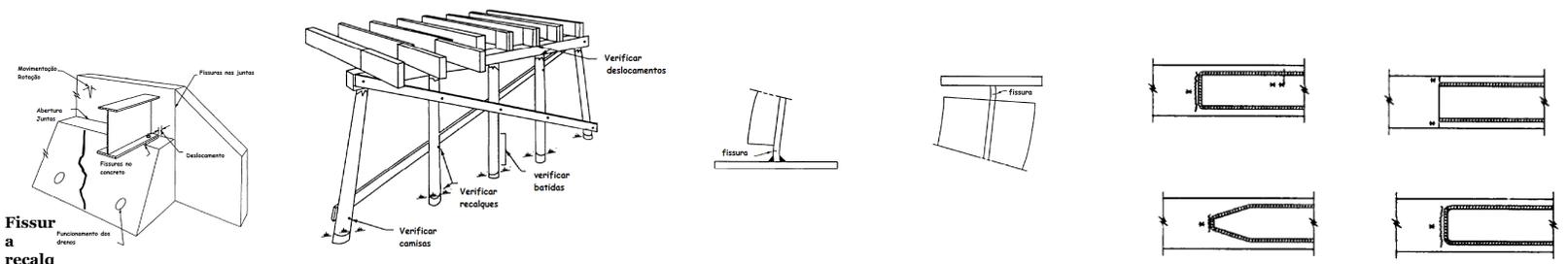
# Medidas de melhoria

## Recomendações

	<p>Hole drilling</p>	<p>Stops cracks by decreasing stress intensity factor. Method is almost only applicable at large visible cracks. Many cracks will relatively fast reinitiate crack growth.</p>		<p>Cover plates Welded steel plates</p>	<p>Cover plates in steel are welded to flanges or web</p>
	<p>Exchange of fastener to HS-prestressed bolt</p>	<p>Removes high bearing stresses and introduces triaxial stress state, beneficial for reducing risk of crack initiation</p>		<p>Cover plates Bolt-on steel plates</p>	<p>Cover plates in steel are bolted to flanges</p>
	<p>Burr grinding and polishing</p>	<p>Burr grinding grinds away / reshapes the critical part of most welds, the weld toe. Quality control is well developed.</p>		<p>Addition of new members</p>	<p>New members are added to the construction to insure carrying capacity for a part of the structure, e-g- span shortening. (Outcome of the method is dependable on the exchanged member). A column is shown here.</p>
				<p>Disc grinding</p>	<p>Weld is smoothed to reduce and remove stress raisers. Bad grinding may introduce new defects.</p>



**Fissura a recalque**



ENCONTRO ANTF DE FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/ NOVOS DESAFIOS



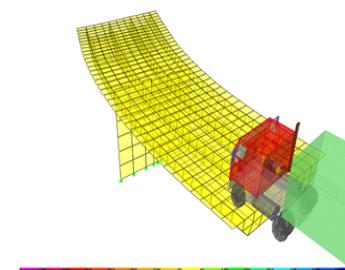
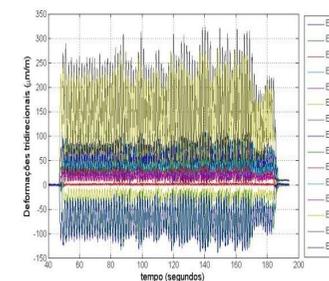
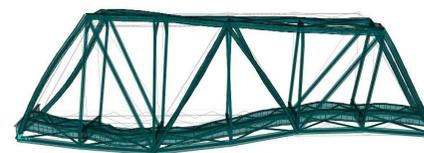
Logística S.A.

# Instrumentação



## PRINCIPAIS RESULTADOS ESPERADOS:

- ✓ Inspeção detalhada dos ativos
- ✓ Análise dinâmica das pontes com a real interação trem x estrutura
- ✓ Avaliação da resposta da estrutura para diferentes velocidades
- ✓ Avaliação da capacidade de carga e deformações excessivas da estrutura para o carregamento atual
- ✓ Estimativa da vida útil à fadiga dos ativos
- ✓ Utilização dos dados para determinar ações de reforço ou recuperação estrutural, bem como validação de possível necessidade de substituição
- ✓ Validação dos modelos numéricos com os resultados experimentais obtidos



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

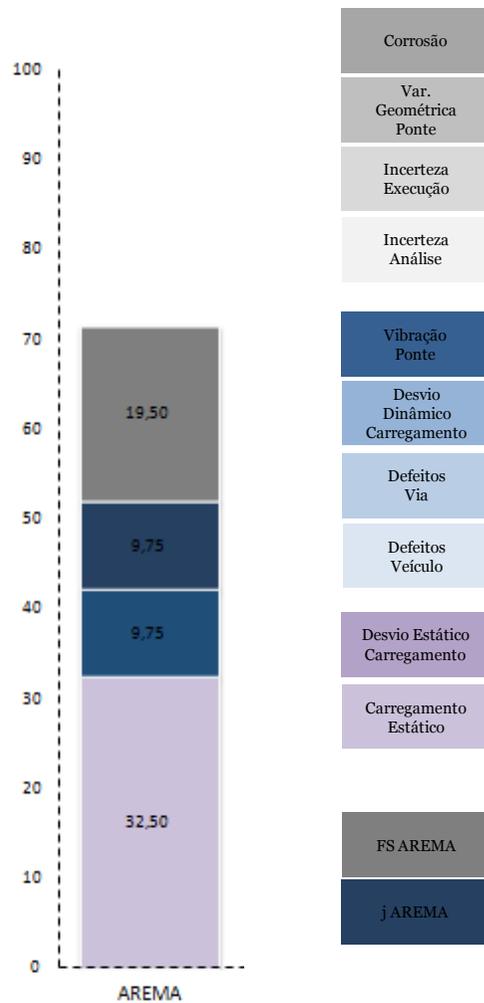
NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS

CSI



Logística S.A.

## Instrumentação para determinar importância de cada parâmetro do FS



Fatores como: corrosão, Var. geométrica e incertezas, estão sendo absorvidos pelo FS projetado.

### Vibração da Ponte:

Maior degradação (menor rigidez), maior vibração natural da ponte.

**Obs.: Não podemos diminuir vibração natural da ponte.**

### Desvio Dinâmico no Carregamento:

Má distribuição de carregamentos gera concentração de cargas, gerando pontos de acúmulo de energia ao longo de todo o movimento.

### Defeitos de Via:

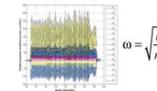
Maior degradação na via gera aumento de impactos no contato roda-trilho.

### Defeitos no Veículo:

Maior degradação no veículo gera aumento de impactos no contato roda-trilho.

### Desvio Estático no Carregamento:

Má distribuição de carregamentos gera concentração de cargas, gerando sobrecargas não projetadas.



Manutenção na ponte seguindo padrões da empresa.



Substituição de equipamentos nos terminais de carregamento.  
**Investimento**



Melhoria da via permanente nas pontes.  
**Investimento + manutenção. Custo.**



Melhoria da frota de veículos.  
**Investimento + manutenção. Custo.**



Reforço nas pontes.  
**Investimento**



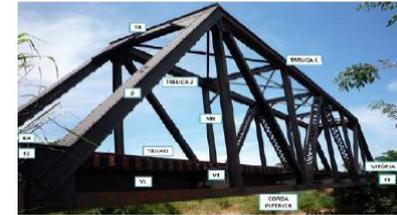
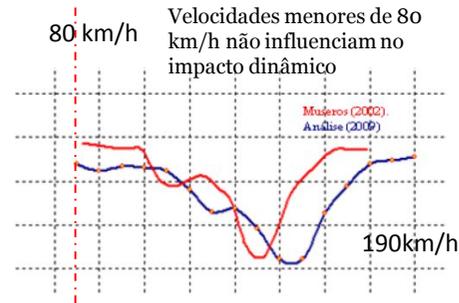
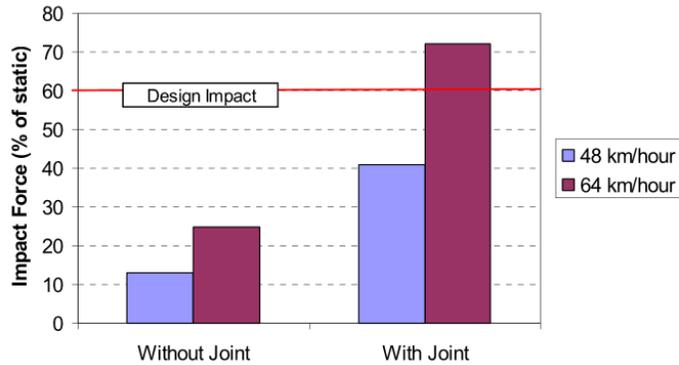
ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Importância dos impactos



$$\begin{bmatrix} M+I_2(x)^T M_r I_2(x) & 0 \\ 0 & M_w \end{bmatrix} \ddot{D} + \begin{bmatrix} C+I_2(x)^T C_n I_2(x) & I_2(x)^T C_n \\ I_2(x) C_w & C_w \end{bmatrix} \dot{D} + \begin{bmatrix} K+I_2(x)^T K_n I_2(x) & I_2(x)^T K_n \\ I_2(x) K_w & K_w \end{bmatrix} D = \begin{bmatrix} I_2(x)^T F_p \\ F_p \end{bmatrix}$$

Inferindo: Se a **rigidez** é maior (falta de manutenção) os deslocamentos serão maiores. Se o **amortecimento** é cada vez menor, a velocidade de resposta cada vez é menor

Efeito da má manutenção nas molas equivale a 1,3 de nosso fator de segurança

**Manutenção na Via e nos veículos:** permitem diminuir o impacto. Os efeitos normais de uma mola geram impactos de **1,30**, quando minimizados, o efeito de **1,12** do aumento de velocidade será absorvido.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

# Registro de carga real ao longo do tempo de operação

			ORE PER YEAR/PER TERMINAL, REAL TU (ORE + GENERAL FREIGHT + INTERNAL SERVICE) AND MAXIMUM WEIGHT OF LOCOMOTIVES										
	Station	Load Terminal	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	AGUAS CLARAS		2.488.326	1.495.018	222.117	-	-	-	-	-	-	-	-
	ALBERTO FLORES	ALBERTO FLORES	0	0	372.890	783.412	1.415.414	1.578.682	726.235	78.596	0	0	0
	ALBERTO FLORES	CÓRREGO DO FEIJÃO - ALBERTO FL	5.063.530	5.902.597	7.187.836	7.562.271	8.290.017	5.981.127	2.416.939	95.130	0	0	0
	ALBERTO FLORES		279.807										
	BARBARA	CIA SAINT GOBAIN BARBARA	1.076	3.626									
	CARLOS NEWLANDS	CÓRREGO DO FEIJÃO - ALBERTO FL	0	0	-	-	75	-	-				0
	CARLOS NEWLANDS	MINASSUL - FSN	0	71.952	384.102	334.540	434.856	970.863	371.865	1.568.706	2.894.174	4.442.302	5.214.686
	CASA DE PEDRA	CSN 4 / CSN - CASA DE PEDRA	9.152.958	12.404.217	14.296.372	12.968.794	11.371.663	7.378.019	13.928.843	16.837.555	18.362.182	20.664.836	22.591.356
	CASA DE PEDRA	MINASSUL - FSN	920.115	0									
	CEL. GUEDES - P1-07	VSB-FJC	0	0	-	-	-	-	-				
	CORREGO DO FEJAO	CORREGO FEIJÃO - FCF	0	0	-	736.522	2.251.507	2.610.326	7.236.118	8.454.471	6.127.226	8.822.673	10.401.478
	CORREGO DO FEJAO	CSN 4 / CSN - CASA DE PEDRA	0	0	-	951.550	-	-	-				
	DIAS TAVARES	MENDES JUNIOR - BELGO - DIAS T	0	0	-	-	-	-	117.969	179.517	158.107	111.251	94.901
	ENG. O DAPIEVE-P1-03	ANDAIME - OTAVIO DAPIEVE	14.174.934	17.559.847	21.041.467	27.224.771	31.204.739	36.260.521	36.322.801	31.544.422	29.065.510	34.860.827	36.813.426
	ENG. O DAPIEVE-P1-03	CORREGO FEIJÃO - FCF	191.300	0									
	ESTACAO DO PIRES	CSN - TERMINAL PIRES	0	0	-	-	-	-	-				
	ESTACAO DO PIRES	ITACOLOMI-CFM	0	0	-	21.337	172.413	479.667	-	3.730.952	6.214.977	6.380.306	6.949.099
	ESTACAO DO PIRES	TERMINAL PIRES	5.927.522	4.493.448	5.707.977	7.681.075	8.623.046	8.354.552	10.610.161	8.320.170	7.436.492	4.746.134	3.890.194
	ITUTINGA	TCI CARGA DESCARGA DE ITUTINGA	0	0	-	-	-	-	-				
	JOAQUIM MURTINHO	TERMINAL J. MURTINHO	0	0	-	-	1.999	22.265	-				102.231
	OLHOS D AGUA	TOD	8.198.263	7.848.094	9.212.452	7.198.361	10.105.340	13.890.751	14.330.144	13.539.875	11.952.462	11.853.920	12.377.252
	OURO BRANCO	ACOMINAS - OURO BRANCO	0	0	-	-	-	-	-			22.601	
	OURO BRANCO	PATRAG - OURO PRETO	0	0	-	-	-	-	-	29.415			
	OURO BRANCO	TOD	0	13.011									
	SAO BENTO	TINAG - SAO BENTO	0	0	-	-	-	-	-		22.464		
	SARZEDO	ITAMINAS - SARZEDO	886.636	1.590.824	3.042.389	5.329.291	6.050.846	6.456.617	5.314.489	4.430.367	3.250.529	2.894.933	3.364.627
	SARZEDO	TOD	391.331	0	-	-	-	-	-				
	SARZEDO NOVO	T MINERIO FZN	0	0	-	-	-	-	1.113.093	2.913.387	6.931.575	7.726.942	7.792.467

ORE PER  
YEAR/PER  
TERMINAL



ENCONTRO ANTF DE  
FERROVIAS

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.

## RESUMO FINAL E PROXIMOS PASSOS

- ✓ Levantamento de todas as informações das pontes da ferrovia, projeto, inspeções anteriores, etc.;
- ✓ Levantamento de toda a experiência dos técnicos e histórico das pontes para cálculo do dano qualitativo (opinião técnica);
- ✓ Criação de manuais, procedimentos etc. de inspeção visual, detalhada e manutenção;
- ✓ Cadastro: Levantamento de todas as características geométricas, pesos e relevância para cálculo da criticidade;
- ✓ Cálculo da matriz de riscos e criação de planos de manutenção;
- ✓ Avaliação numérica e experimental de todas as pontes utilizando métodos numéricos ou experimentais, determinando os parâmetros de vibração (frequências e acelerações). Criando faixas de aceleração e frequências como gatilhos de manutenção;
- ✓ Avaliação dos níveis de fadiga e determinação dos níveis de utilização;
- ✓ Levantamento dos pontos principais onde existem acúmulo de tensões e ciclos à fadiga, criando um manual de inspeção para os técnicos possam verificar os principais problemas;
- ✓ Determinar os percentuais de utilização de cada item no FS e definir importância de cada patologia;
- ✓ Realizar inspeção visual e detalhada de todas as pontes e retroalimentar a matriz de criticidade;
- ✓ Dar manutenção corretiva em pontos com fadiga visível;
- ✓ Criação de base de dados com principais reparos e custos para os mesmos. Atualizar os planos de manutenção;
- ✓ Retroalimentar a matriz. Criação de programa de gestão de ativos em tempo real.



ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS



Logística S.A.



<https://www.mrs.com.br/>



<http://www.montoyaalveseng.com/>



57 Congresso Brasileiro do Concreto em Bonito - MS, de 27 a 30 de outubro de 2015

<http://ibracon.org.br/eventos/57cbc/>



RISK-COM Evento Online de PSM, HSE e ORM do Brasil!, de 23 a 29 de novembro de 2015

<http://risk-con.org/index>



Brazil Road Expo em São Paulo, de 29 a 31 de março de 2016

<http://www.brazilroadexpo.com.br/>

ENCONTRO ANTF DE  
**FERROVIAS**

NOVAS IDEIAS P/  
NOVOS DESAFIOS





**ANTF**

Associação Nacional dos  
Transportadores Ferroviários



Logística S.A.

[WWW.ANTF.ORG.BR](http://WWW.ANTF.ORG.BR)