

## **Análise de Fadiga em Juntas Soldadas de uma Ponte submetida ao Tráfego de Trens de Alta Velocidade através da Abordagem “*Hot Spot Stress*”**

**Cristiane Viana<sup>1</sup>, Hermes Carvalho<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais/ Departamento Engenharia de Estruturas/  
crisoviana94@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais/ Departamento Engenharia de Estruturas/  
hermes@dees.ufmg.br

### **Resumo**

Fadiga é um dos estados limites preponderantes no dimensionamento de estruturas de aço e mistas, tais como pontes ferroviárias. A fadiga ocorre, preferencialmente, em regiões com alterações geométricas e concentrações de tensão, como juntas soldadas. Para a avaliação da resistência à fadiga, a abordagem mais comum empregada é baseada na variação máxima da tensão nominal. Porém, esta metodologia possui um número limitado de detalhes geométricos, relacionados em normas específicas para o dimensionamento de estruturas. Estudos recentes apresentam a abordagem de tensão estrutural – “*Hot Spot stress*”, na qual a vida em fadiga de conexões soldadas é estimada com base em análises numéricas via método dos elementos finitos, ampliando a abrangência dos detalhes construtivos avaliados. Para aplicação dessa abordagem, deve-se adotar critérios para utilização dos parâmetros de malha e modelagem/discretização da geometria. O presente trabalho tem por objetivo o estudo da vida em fadiga em componentes de uma ponte submetida ao tráfego de trens de alta velocidade, como exemplificado na Figura 1. Neste caso, fenômenos dinâmicos como ressonância podem influenciar significativamente os esforços solicitantes e, conseqüentemente, sua vida em fadiga. Para que possíveis efeitos sejam levados em consideração, os esforços solicitantes utilizados foram obtidos através de análise dinâmica realizada em estudos anteriores. A abordagem “*Hot Spot stress*” foi avaliada em uma das principais juntas soldadas, através de modelos numéricos desenvolvidos no programa computacional ANSYS<sup>®</sup>, sendo os resultados obtidos comparados com os valores calculados pela Eurocode (EN 1993-1-9, 2005).



**Figura 1 – Ponte de alta velocidade.**

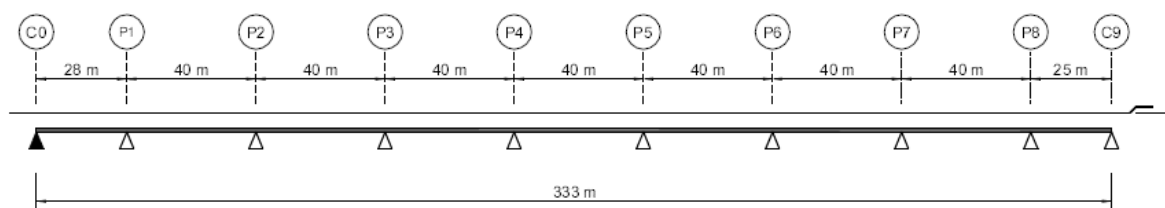
### **Palavras-chave**

Fadiga; *Hot Spot Stress*; Pontes Mistas, Pontes submetidas ao tráfego de Trens de Alta Velocidade.

## Introdução

A fadiga, juntamente com a corrosão e o desgaste, é uma das principais causas de danos em componentes metálicos. O processo de fadiga está relacionado ao crescimento de trincas em pontos específicos da estrutura que, devido ao carregamento variável que o componente sofre, causa um dano progressivo e consequente perda de resistência da estrutura com o tempo. Geralmente, a trinca de fadiga se inicia em conexões, soldas e concentradores de tensão presentes em estruturas como pontes e viadutos. (Nussbaumer *et al.*, 2011)

No presente trabalho, será estudado um detalhe típico de ligação soldada, presente na ponte *La Scarpe*. A ponte está presente na linha francesa de alta velocidade, *TGV Nord*, que interliga as cidades de Paris e Lille, sendo constituída de uma viga contínua com vãos de 28m+7x40m+25m, contabilizando 333m de extensão, conforme mostra a Figura 2. (Peixer *et al.*, 2017)



**Figura 2 – Esquema longitudinal do tabuleiro. Fonte: Figueiredo, 2007 apud Hoorpah, 1997**

Dentro da avaliação de fadiga em ligações soldadas existem diversas abordagens para previsão de sua vida útil. A abordagem mais usual de fadiga, que utiliza a tensão nominal e a classificação de detalhes geométricos para previsão da vida em fadiga, não abrange conexões mais complexas e é limitada às geometrias previamente ensaiadas, presentes nas normas de dimensionamento. Tendo isso em vista, a abordagem da tensão estrutural apresenta a abrangência de ampla gama de ligações soldadas não contempladas nos códigos, através de simulações numéricas em elementos finitos. Desta forma, a avaliação de fadiga através da abordagem estrutural – *Hot Spot stress* foi desenvolvida, possibilitando a avaliação de um número maior de detalhes geométricos, comparativamente procedimento baseado na tensão nominal. (Heshmati, 2012)

O detalhe selecionado para estudo é a conexão entre a chapa *Gusset* e o flange inferior da viga I que compõe a longarina da ponte *La Scarpe*. Este detalhe foi escolhido devido à relevância do estudo de fadiga, uma vez que se localiza em uma região com altas variações de tensões de tração. A categoria de fadiga deste detalhe estrutural varia bruscamente com o raio da chapa *Gusset*. De acordo com a EN 1993-1-9 (2005), o valor da categoria de fadiga, representada pelo FAT, pode variar entre 90 e 50MPa, conforme tabela 1. Quanto menor o valor da categoria do detalhe, mais crítica a conexão do ponto de vista de fadiga.

**Tabela 1 – Categoria de detalhe FAT conforme raio da chapa *Gusset*. Adaptado de: EN 1993-1-9, 2005**

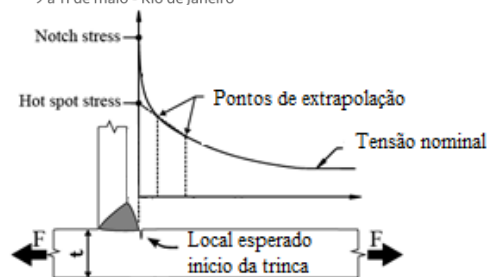
Raio (mm)	FAT (MPa)
$r \geq \frac{l}{3}$ ou $r > 150\text{mm}$	90
$\frac{l}{3} \geq r \geq \frac{l}{6}$	71
$\frac{l}{6} \geq r$	50

A EN 1993-1-9 (2005) considera de maneira discreta a variação do FAT com o valor do raio da chapa, além de não levar em conta a razão entre a espessura do flange inferior e da chapa *Gusset*. Desta forma, é proposto calcular a vida em fadiga deste tipo de conexão soldada para diferentes raios, utilizando a abordagem de tensão estrutural – *Hot spot stress*, com a qual é possível avaliar o efeito concentrador de tensões decorrente da diferença entre as espessuras das chapas.

### Revisão bibliográfica

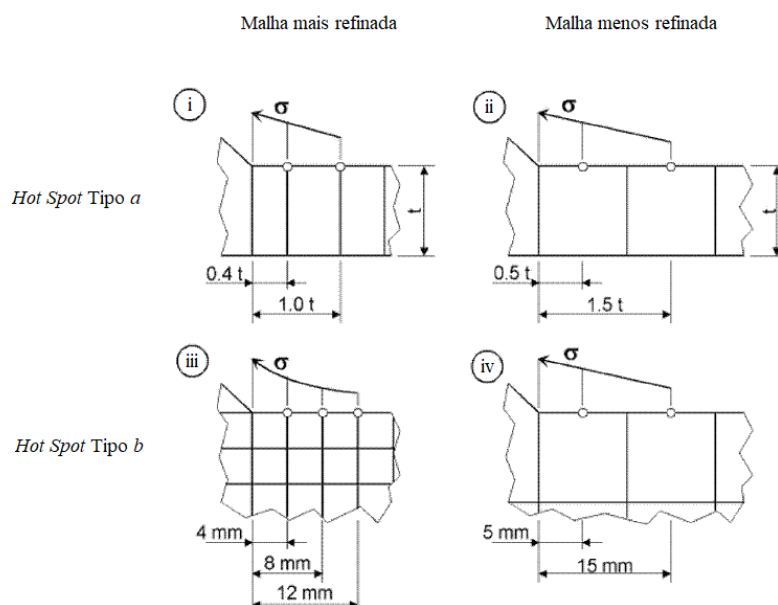
Dentre as avaliações de vida em fadiga presentes na literatura, inclusive as apresentadas por Fricke (2003) apud Heshmati (2012), há diversas abordagens, dentre elas, a de tensão nominal e a de tensão estrutural (*Hot-spot stress*). A abordagem de tensão nominal utiliza a variação de tensão calculada por esforços internos na seção transversal, obtidos através da análise estrutural. Já a abordagem de tensão estrutural utiliza a variação de tensão estrutural nas proximidades do cordão de solda, considerando o aumento de tensão devido às mudanças de geometria da estrutura.

A abordagem baseada na tensão nominal é utilizada por diversas normas e códigos, e comumente possui uma classe de fadiga associada a cada tipo de conexão soldada. Apesar de prática, essa técnica possui como limitação o número de detalhes presentes nas normas e manuais, e avaliar uma maior quantidade de detalhes requer ensaios e validações, acarretando em tempo e custos elevados. Além disso, se a geometria for muito complexa, é difícil definir a tensão nominal. Com o aumento da utilização de análises numéricas baseadas no método dos elementos finitos, uma questão é a de que, por definição, se obtém em tais análises a tensão considerando toda a geometria, e não somente a tensão nominal, dificultando ou inviabilizando utilizar diretamente a abordagem de tensão nominal. A abordagem de tensão estrutural propicia a utilização de softwares de simulação numérica como ferramentas práticas para abrangência de detalhes não relacionados em normas e recomendações. Para melhor compreensão, a figura 3 apresenta o perfil de tensão próximo à região da solda e a indicação dos diferentes tipos de tensão presentes no detalhe (Heshmati, 2012). De acordo com Santos (2017), pesquisas por métodos com a abordagem da tensão de *Hot Spot* podem aumentar a capacidade de se avaliar fadiga em estruturas sob esforços cíclicos.



**Figura 3 - Distribuição de tensão próximo à solda. Adaptado de: Heshmati (2012)**

De acordo com Heshmati (2012), a análise utilizada pode ser de natureza linear elástica, e as propriedades do cordão de solda podem ser iguais às do metal de base. Deve ser desabilitada a opção de média das tensões nos elementos, para que a análise seja adequada. Além disso, a razão entre os tamanhos dos elementos não deve ser maior que três, e a malha deve ser gradualmente refinada até a região da solda. As normas recomendam que a tensão principal máxima seja utilizada como componente de tensão apropriada se a mesma estiver dentro da abrangência de um ângulo de  $60^\circ$  em relação à direção perpendicular ao local esperado para o início da trinca. Conforme a norma IIWS (2008), a extrapolação da tensão de *Hot Spot* deve ser feita como exemplificado na figura 4, e variam conforme: (i) o tipo, *a* ou *b*, que depende da localização da superfície na qual o *Hot Spot* se encontra; (ii) o tipo de aproximação – linear ou quadrática; e (iii) o refino da malha.



**Figura 4 - Pontos de referência e extrapolação para diferentes tipos de malha. Adaptado de: IIWS (2008)**

## Metodologia

A metodologia empregada é baseada nas recomendações para o projeto de fadiga de componentes e conexões soldadas presentes na IIWS (2008). A conexão estudada corresponde à ligação entre a chapa *Gusset* e o flange inferior de uma viga I (figura 5).



**Figura 5 – Exemplo da ligação soldada entre flange inferior e chapa *Gusset*. Fonte: Figueiredo (2007).**

Na metodologia utilizada, a geometria de referência é aquela equivalente ao detalhe tabelado por norma, e conseqüentemente, para esta geometria, é considerada a categoria de detalhe prescrito na própria norma ( $FAT_{Ref}$ ). Já a geometria a ser avaliada é aquela que se quer saber o valor da categoria de detalhe. Para tanto, são simuladas no programa computacional ANSYS® ambas as geometrias, e assim, calcula-se as tensões de *Hot Spot* nos dois casos ( $\sigma_{HS,Ref}$  e  $\sigma_{HS,Av}$ ), para assim estimar a categoria de detalhe correspondente à geometria a ser avaliada ( $FAT_{Av}$ ), conforme apresenta a equação 1 (IIWS, 2008):

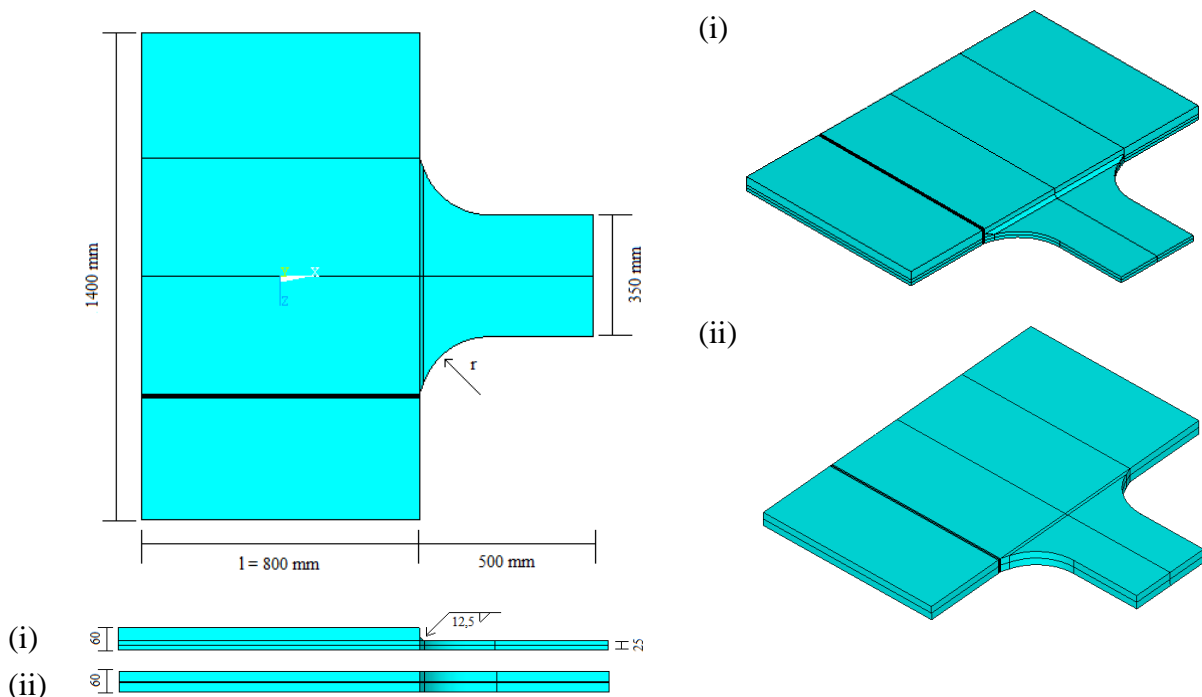
$$FAT_{Av} = \frac{\sigma_{HS,Ref}}{\sigma_{HS,Av}} * FAT_{Ref} \quad (1)$$

Foram desenvolvidos oito modelos numéricos no total, considerando 4 raios de curvatura distintos. Para cada valor de raio, foram desenvolvidos dois modelos numéricos, a saber: um modelo contendo a geometria a ser avaliada, com espessuras diferentes para a chapa do flange inferior do perfil e a chapa de ligação (*Gusset*); e o outro modelo contendo a geometria de referência, considerando espessuras iguais para ambas as chapas, com o FAT correspondente ao apresentado na EN 1993-1-9 (2005) (tabela 2).

**Tabela 2 – Dados dos modelos estudados**

Modelo	Raio (mm)	Espessura do flange inferior (mm)	Espessura da chapa <i>Gusset</i> (mm)	Categoria de detalhe: FAT
GoussetR50Av	50	60	25	-
GoussetR50Ref	50	60	60	50
GoussetR100Av	100	60	25	-
GoussetR100Ref	100	60	60	50
GoussetR150Av	150	60	25	-
GoussetR150Ref	150	60	60	71
GoussetR200Av	200	60	25	-
GoussetR200Ref	200	60	60	90

Com relação às propriedades dos materiais, foi utilizado o coeficiente de Poisson igual a 0,3 e o módulo de elasticidade igual a 200 GPa. As dimensões da ligação foram extraídas de Figueiredo (2007) e encontram-se expostas em detalhes na Figura 6.



**Figura 6 – Modelos numéricos: (i) geometria a ser avaliada; (ii) geometria de referência.**

Após a definição dos detalhes a serem avaliados, é importante classificar o detalhe como tipo *a* ou *b* (IIWS, 2008). O detalhe tipo *b* é aquele cuja a avaliação do *Hot Spot* é realizada ao longo da espessura, e o detalhe tipo *a* se refere à geometria na qual a avaliação é realizada nas demais superfícies da chapa. Em todos os casos acima representados, o detalhe é do tipo *b*, devida à avaliação da tensão de *Hot Spot* ser ao longo da espessura do flange.

Nesse trabalho, foram utilizados elementos sólidos, para melhor aproximação do modelo com a realidade, apesar do maior esforço computacional requerido. Foi utilizado o elemento sólido *Solid 186*, com 20 nós. Optou-se também por uma malha mais refinada, com elementos de 4x4mm na região do *Hot Spot*, e extrapolação quadrática para avaliação do detalhe, conforme indicado pela IIWS (2008) e apresentado no item (iii) da figura 4. Para tal configuração, a equação de extrapolação da tensão de *Hot Spot* pode ser apresentada pela equação a seguir (IIWS, 2008).

$$\sigma_{HS} = 3 * \sigma_{4mm} - 3 * \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_{HS}$  é a tensão no *Hot Spot*;

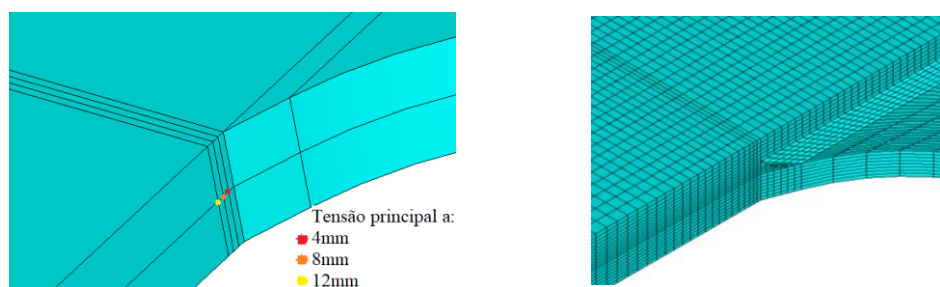
$\sigma_{4mm}$ ,  $\sigma_{8mm}$  e  $\sigma_{12mm}$  são as tensões principais distantes de 4, 8 e 12mm do início do cordão de solda, respectivamente (figura 7-i).

Conforme IIWS (2008), a malha mais refinada aplicada ao detalhe tipo *b* deve possuir elementos com dimensão máxima de 4x4mm, conforme exemplificado na figura

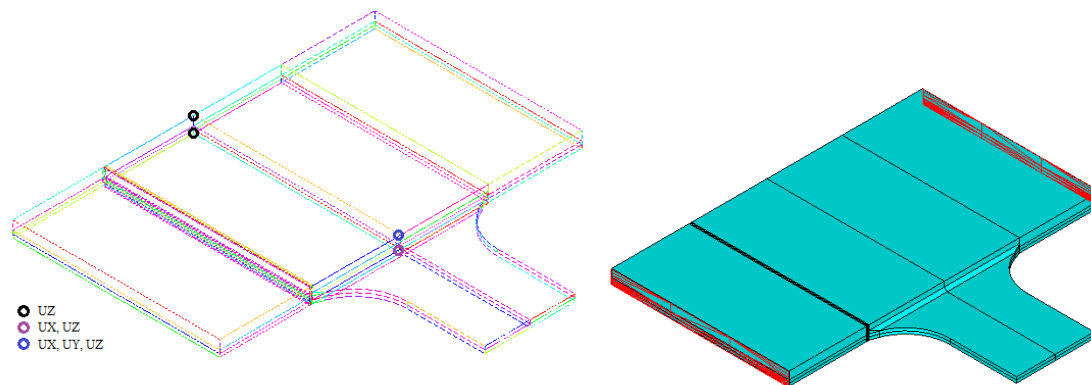


7-ii. Além disso, para que o método do *Hot Spot* seja válido, é necessário considerar que a trinca será formada no início do cordão de solda, e, caso o estado de tensões seja multiaxial, devem ser atendidos outros requisitos presentes na norma. Nos casos em estudo, a tensão crítica é próxima ao início da solda, e o estado de tensões pode ser considerado uniaxial, pois a diferença entre a tensão principal e a tensão no eixo longitudinal não superou 2% para os casos avaliados, o que valida o emprego da metodologia.

Para todos os modelos foram consideradas as mesmas condições de contorno, conforme figura 8-i. A tensão aplicada nas laterais é uniforme, com magnitude constante e equivalente ao FAT do detalhe de referência, conforme recomendação da IIWS (2008) (Figura 8-ii).



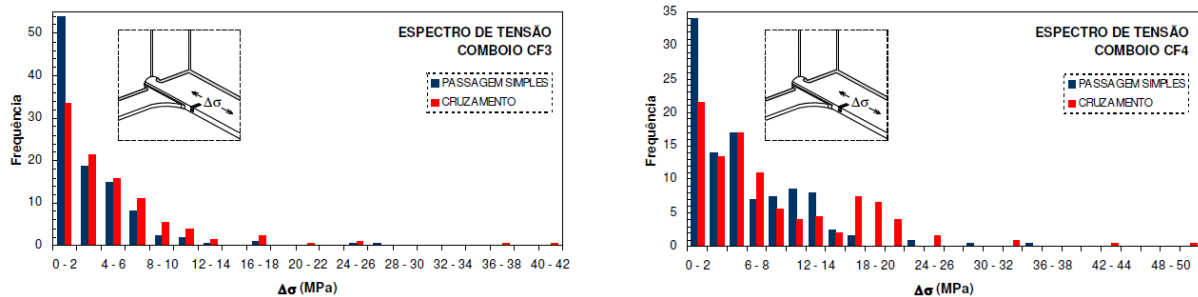
**Figura 7 – (i) Pontos para obter tensões principais e calcular a tensão de *Hot Spot* da geometria; (ii) Malha na proximidade do *Hot Spot*.**



**Figura 8 – (i) Condições de contorno – restrições - no modelo; (ii) áreas de aplicação da tensão trativa**

Com base nos valores das tensões é possível determinar a categoria de detalhe de cada geometria avaliada. Dessa forma, é possível consultar a curva de fadiga do detalhe de referência na EN 1993-1-9 (2005), e através dos espectros de tensões presentes em Figueiredo (2007), calcular a vida em fadiga. Os espectros de tensões obtidos por Figueiredo (2007) são apresentados na figura 9, na qual existem 4 casos de carga correspondentes à dois tipos de trens - CF3 e CF4, e com passagem simples ou cruzada, representado por PS ou CR. Conforme a EN 1993-1-9 (2005), não é preciso considerar as variações de tensão que representam menos de 1% do total, nem aquelas abaixo do limite *cut off*, limite de tensão da curva S-N abaixo do qual a vida em fadiga do componente é considerada infinita. Para determinar a vida em fadiga, foram calculados:

a variação de tensão correspondente ao intervalo de  $5 \times 10^6$  ciclos,  $\Delta\sigma_D$ ; o limite *cut off*,  $\Delta\sigma_L$ ; a vida em fadiga considerando amplitude de tensão constante para cada valor de tensão que faz parte da análise,  $N_{xx}$ ; e o dano acumulado.



**Figura 9 – Espectro de tensões obtidas a partir da análise dinâmica da ponte em estudo. Fonte: Figueiredo (2007)**

Foram utilizadas as seguintes considerações: (i) o detalhe geométrico só está submetido a tensões de tração; (ii) a trinca se inicia no início do cordão de solda; (iii) a geometria de referência é aquela com mesmo valor de raio, porém com espessura de chapa *Gusset* diferente da geometria avaliada, ou seja, avalia-se a variação do FAT proveniente apenas da variação da espessura do *Gusset*; (iv) o acabamento do raio do *Gusset* é feito com uma reta tangente à curva, na discretização da geometria.

## Resultados e Discussão

Os valores de tensão principal obtidos através das simulações numéricas a 4, 8 e 12mm do início do cordão de solda e o valor calculado de tensão de *Hot Spot* ( $\sigma_{HS}$ ) para cada modelo é apresentado na tabela 3:

**Tabela 3 – Tensões principais obtidas e tensão de *Hot Spot* para cada modelo**

Modelo	$\sigma_{4mm}$ (MPa)	$\sigma_{8mm}$ (MPa)	$\sigma_{12mm}$ (MPa)	$\sigma_{HS}$ (MPa)
GoussetR050Av	102,42	84,06	74,31	129,39
GoussetR050Ref	110,38	90,01	80,06	141,17
GoussetR100Av	93,89	79,97	72,27	114,03
GoussetR100Ref	102,08	86,16	77,99	125,75
GoussetR150Av	126,63	109,01	99,84	152,7
GoussetR150Ref	137,03	118,14	108,17	164,84
GoussetR200Av	152,74	134,9	124,66	178,18
GoussetR200Ref	166,02	145,25	134,08	196,39

Observa-se que em todos os casos a tensão de *Hot Spot* de referência é superior à tensão de *Hot Spot* avaliada, o que indica para a menor resistência à fadiga da geometria de referência, comparativamente à geometria com menor espessura da chapa *Gusset*. A tabela 4 apresenta a categoria de detalhe e a diferença percentual obtida, tendo como base a categoria de detalhe de referência:



**Tabela 4 – Comparação da categoria de detalhe de cada referência com o respectivo modelo avaliado**

Modelo	FAT Referência (MPa)	FAT Calculado (MPa)	Diferença Percentual (%)
GoussetR050Av	50	54,55	9,10
GoussetR100Av	50	55,14	10,28
GoussetR150Av	71	76,64	7,95
GoussetR200Av	90	99,20	10,22

A tabela 4 mostra o aumento do FAT calculado relativo à diminuição da espessura do *Gusset*, com valores entre 8 e 10%, comparativamente ao FAT de referência. Esse resultado indica uma maior resistência a fadiga para espessuras de chapa *Gusset inferiores às espessuras do flange*.

Para o cálculo da vida em fadiga conforme a EN 1993-1-9 (2005), foram obtidos os valores característicos da curva S-N,  $\Delta\sigma_D$ , e  $\Delta\sigma_L$ , para as categorias de detalhe (FAT) dos modelos estudados. Considerando os dados obtidos por Figueiredo (2007), se enquadraram na análise apenas os intervalos de tensão entre 22-24, 24-26 e 34-36 MPa, sendo considerados como representativos seus valores médios – 23, 25 e 33 MPa, respectivamente. Os demais intervalos não foram considerados, ou por representarem menos de 1% do total, ou por serem menores que o limite *cut-off* ( $\Delta\sigma_L$ ). Os valores característicos das curvas S-N e os valores da vida em fadiga a 23, 25 e 33MPa associados a cada categoria de detalhe são apresentados na tabela 5. Os valores de vida em fadiga para cada variação de tensão e para cada geometria avaliada estão presentes na tabela 6.

**Tabela 5 – Valores característicos das curvas S-N de detalhes avaliados**

FAT calculado (MPa)	$\Delta\sigma_L$ (MPa)	<i>Cut off</i> $\Delta\sigma_L$ (MPa)	$N_{23}$	$N_{25}$	$N_{33}$
54,55	40,19	22,07	8,1E+07	5,4E+07	1,3E+07
55,14	40,63	22,30	8,6E+07	5,7E+07	1,4E+07
76,64	56,47	31,00	4,5E+08	2,9E+08	7,3E+07
99,2	73,09	40,13	1,6E+09	1,1E+09	2,7E+08

**Tabela 6 – Vida em fadiga em ciclos dos detalhes avaliados para cada caso de carga – CF3PS, CF3CR, CF4PS e CF4CR**

FAT (MPa)	CF3PS	CF3Cr	CF4PS	CF4Cr
54,55	Infinita	5,37E+9	8,1E+9	8,9E+8
55,14	Infinita	5,67E+9	8,6E+9	9,4E+8
76,64	Infinita	Infinita	Infinita	4,9E+9
99,2	Infinita	Infinita	Infinita	Infinita

A vida em fadiga, para todos os casos calculados, foi superior a  $10^8$  ciclos, o que é satisfatório para o dimensionamento de pontes sujeitas ao tráfego de trens de alta velocidade, conforme limites estabelecidos pela norma EN 1993-1-9 (2005). Observa-se



também que tanto o detalhe que apresentou FAT igual a 99,2MPa quanto o carregamento CF3PS são os mais favoráveis à vida em fadiga.

## Conclusão

Os resultados do presente trabalho indicaram o aumento da vida em fadiga com a diminuição da espessura da chapa *Gusset* soldada ao flange inferior de uma longarina de uma ponte sujeita ao tráfego de trens de alta velocidade. Para a avaliação da vida em fadiga foi aplicada uma abordagem utilizando a tensão de *Hot Spot*, que possibilita analisar uma maior quantidade de detalhes geométricos, não se limitando aos detalhes presentes nas prescrições normativas. Para os detalhes avaliados, a vida em fadiga apresentou valores satisfatórios, ou seja, acima de  $2 \times 10^6$  ciclos, para todas as combinações de carregamento analisadas. Foi constatado que a utilização das chapas *Gusset* com espessuras inferiores à espessura do flange da longarina e o aumento do raio de curvatura dessas chapas aumenta a vida em fadiga do detalhe analisado.

## Referências Bibliográficas

- ANSYS-18. Release 1.0 Documentation for Ansys. Canonsburg, United States.
- EN 1993-1-9: Eurocode 3. Design of Steel Structures. European Committee for Standardisation. Bruxelas, 2005.
- FIGUEIREDO, H. M. S. Dinâmica de pontes mistas aço-betão em linhas de alta velocidade. Dissertação. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, 2007.
- FRICKE, H. Fatigue analysis of welded joints: state of development. *Marine structures*, (16):185–200, 2003.
- HESHMATI, M. Fatigue Life Assessment of Bridge Details Using Finite Element Method. Mestrado. Programme Structural Engineering and Building Performance Design. Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.
- HOORPAH, W. Contribution à l'approche numérique du comportement dynamique des ponts-rails. Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur de l'UTC, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, 1997.
- IIWS: HOBACHER A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. International Institute of Welding, doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. Paris, França, 2008.
- NUSSBAUMER, A. *et al.* Fatigue Design of Steel and Composite Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-9 – Fatigue Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. ECCS Eurocode Design Manuals, 2011. 311 p.
- SANTOS, K. R. F. Análise de Fadiga em Estruturas Metálicas Soldadas Utilizando o Método dos Elementos Finitos. Monografia. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.
- PEIXER M. A. M. *et al.* Avaliação do Comportamento de Pontes com Tabuleiros de Dupla Ação Mista Submetida ao Tráfego de Trens de Alta Velocidade. CILAMCE. Florianópolis, Santa Catarina. Novembro, 2017.