

# Previsões de Vida Fadiga Segundo Normas Técnicas: uma Revisão Crítica

Ronaldo Cesar Tremarin<sup>1</sup>, Zacarias Martin Chamberlain Pravia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal do Rio Grande do Sul – IFRS, *Campus* Erechim, Erechim, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade de Passo Fundo – UPF, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Passo Fundo, RS, Brasil.

Recebido: 27 Jun., 2017

Aceito: 03 Out., 2017

E-mails: ronaldo.tremarin@erechim.  
ifrs.edu.br (RCT), zacarias@upf.br  
(ZMCP)

**Resumo:** O principal objetivo deste trabalho é mostrar aos especialistas envolvidos com estruturas soldadas submetidas a esforços cíclicos uniaxiais e multiaxiais, proporcionais ou não proporcionais, as opções existentes para previsão de vida em fadiga para juntas soldadas. Apresentam-se as normas, Eurocode 3 - IIW- AASHTO e BS 5400, com suas características específicas e uma revisão das metodologias computacionais desenvolvidas nos últimos anos. Para avaliar as normas apresentadas, analisa-se dois casos de previsão de vida em fadiga, uma chapa e uma viga I, nas diferentes normas. Identificou-se as similaridades e discrepâncias entre as normas, acerca dos principais parâmetros constitutivos, a previsível semelhança entre as previsões de vida em fadiga obtidas via IIW e Eurocode 3 e as significativas diferenças entre AASHTO e BS 5400 em decorrência da filosofia de cada norma.

**Palavras-chave:** Fadiga; Solda; Prescrição de normas.

## Life Predictions Fatigue According to Technical Norms: a Critical Review

**Abstract:** The main objective of this work is to show to the specialists involved welded structures subjected to cyclic uniaxial and multiaxial stresses proportional or non-proportional to the existing options for fatigue life prediction for welded joints that deals with the subject. Each of the standards (Eurocode 3 - IIW-AASHTO and BS 5400) has specific characteristics, some of them very distinct as well as a review of the computational methodologies developed in recent years. To evaluate the standards presented a case of fatigue life prediction of a plate top in I-beam I in the different standards. The similarities and discrepancies between the standards, the main constitutive parameters, the predicted similarity between fatigue life forecasts obtained through IIW and Eurocode 3, and the significant differences between AASHTO and BS 5400 were identified as a result of the philosophy of each standard.

**Key-words:** Fatigue; Weld; Standards.

## 1. Introdução

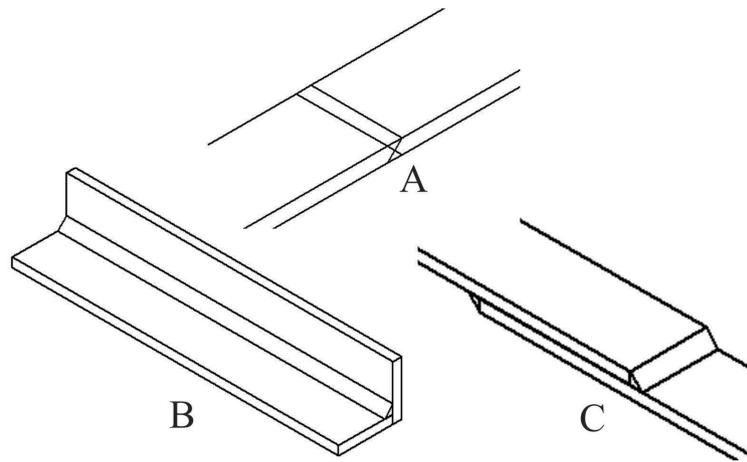
Ao projetar juntas metálicas soldadas, visando à resistência à fadiga, é possível reduzir a ocorrência de falhas catastróficas e aumentar a vida útil do produto, proporcionando a produção de estruturas de aço, pontes, máquinas e outros equipamentos, com adequada segurança operacional e vida útil.

O processo de soldagem implica na elevada taxa de transferência de calor, para formação das soldas e, por consequência, das conexões estruturais. Tal situação resulta na formação da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), inserção de tensões residuais e outras alterações termo-metalúrgicas, ocorrendo a deterioração das propriedades mecânicas: ductilidade, tenacidade e outras no metal base - MB [1,2]. A relação dos temas-solda, projeto e fadiga não recebe um número de publicações necessárias para a importância do tema na literatura científica/técnica de circulação internacional/nacional, de modo que as abordagens em livros especializados são insuficientes. Os projetistas reduzem a estimativa de resistência das juntas soldadas à fadiga, a fim de manter a segurança operacional, o que ocorre em função dos danos metalúrgicos causados no MB e da ausência de pesquisas aplicadas. Esse estudo permite a revisão e a comparação dos conceitos disponíveis para projeto de juntas soldadas visando a avaliação da resistência à fadiga.

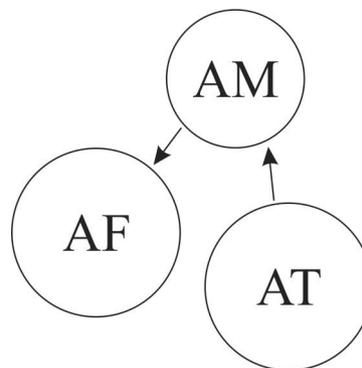
Juntas soldadas são empregadas para unir elementos estruturais sejam na posição plana a), filete b) ou sobreposta c), conforme ilustrado na Figura 1, como vigas, longarinas, travessas ou conterias. Todas as possibilidades têm em comum a função de transmitir cargas estáticas ou dinâmicas.

A análise de fadiga é realizada em três temas, a saber: a análise de tensão (AT), a análise do material (AM) e a análise de fadiga (AF), conforme fluxo demonstrado na Figura 2.





**Figura 1.** Juntas (A) plana, (B) filete e (C) sobreposta. Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 2.** Três círculos, representando o fluxo de análise das informações. Fonte: Elaborada pelo autor.

No tema AT, são analisados a oscilação das tensões -uniaxiais ou multiaxiais-, proporcionalidade entre tensões multiaxiais entre outros tópicos. No tema AM, as características dos materiais, por exemplo tensão de escoamento, tensão máxima, acabamento ou endurecimento superficial, encruamento e resistência à fadiga obtida em corpos de prova representativos do material, no tema AF, a resistência a fadiga uniaxial ou multiaxial, teorias de falhas, Von Mises, Findley, Fatemi e Socie entre outros. O presente estudo irá focar nos itens AT e AF sob o aspecto das normas técnicas.

Diversas recomendações e normas apresentadas neste trabalho são baseadas em simplificações, contendo diferentes filosofias de projeto em função da complexidade do tema. Até o presente momento, não há consenso entre normas e metodologias propostas.

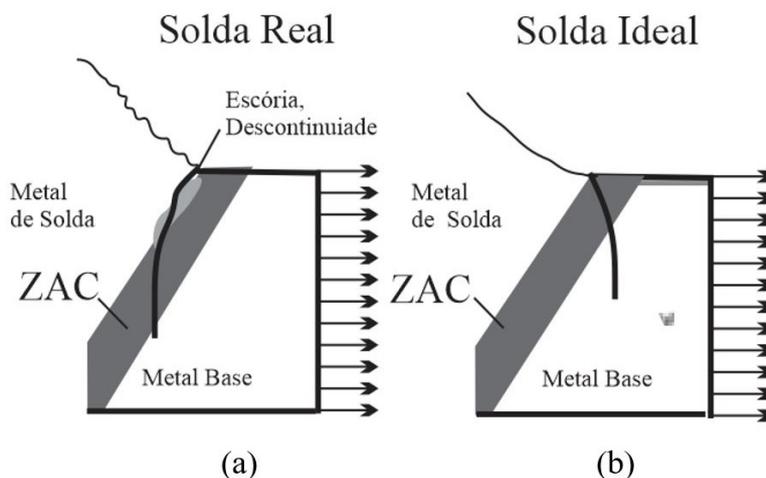
Com respeito as metodologias relatadas nas publicações nacionais e internacionais, observa-se, claramente, a execução de ensaios em corpos de prova representativos e não se observa uma abordagem com todos os fenômenos atuando simultaneamente, ou com corpos de prova em tamanho real, com rara exceção, a qual pode ser observada em [3].

Segundo Castro e Meggiolaro [4], não é recomendado o estudo da fadiga de juntas soldadas em corpos de prova representativos, pois, as extrações resultariam no alívio das tensões residuais, que são causadas pela soldagem, as quais apresentam ordem de grandeza similar a tensões de escoamento, que, por sua vez, têm importante influência na propagação das trincas [5,6], mascarando os resultados.

De modo geral, todas as normas seguem a metodologia de estimativa de vida em fadiga, usando curvas de S-N (Wöhler) [7] em função do somatório dos danos calculados via método de Palmgren-Miner [8]. Contudo, todas as normas apresentam algumas premissas básicas em comum:

- ausência de tensões residuais de processos anteriores ao processo de soldagem;
- solda com penetração completa, sem mordeduras e trincas visíveis ou invisíveis a olho nu, semelhante à Figura 3b);
- excelente qualidade metalúrgica da solda, sem escórias incorporadas ao metal de solda - MS e ausência de descontinuidades, semelhante à Figura 3a);
- ausência de desalinhamentos;
- todas as transformações metalúrgicas que ocorrem na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) estão de acordo com os processos físico-químicos adequados;
- acabamento superficial dentro de parâmetros estabelecidos e ausência de tratamentos superficial;
- as previsões da vida em fadiga não dependem das propriedades mecânicas do MB ou do MS.

Algumas dessas premissas podem ser verificadas na Figura 3a), a qual representa imperfeições inaceitáveis ao estudo da fadiga (escória e descontinuidades) inseridas no seio do sólido. A Figura 3b) representa o estado ideal do processo de soldagem, demonstrando em ambas a propagação da trinca.



**Figura 3.** Imagem comparada à evolução da trinca numa solda real (a) e ideal (b). Fonte: Elaborada pelo autor.

Tais premissas permeiam as normas técnicas, e outras, por exemplo: principais aplicações estruturais, possibilidade de emprego de elementos estruturais redundantes, possibilidade de alocar juntas soldadas, não previstas na norma, na classificação extra -doravante denominada de classe extra- e ausência ou presença de limite de fadiga, são apresentadas sem prejuízo às citadas pontualmente em cada escopo.

Ao conduzir as análises de resistência à fadiga, há uma incerteza relacionada à variabilidade dos esforços, por exemplo: velocidade do vento [9]; cargas cíclicas causadas por ações ambientais ou as condições de tráfego, por exemplo, em pontes metálicas (aço) [3]; no movimento das ondas em navios, todos estão expostos a cargas ambientais e cíclicas ou não cíclicas, durante toda a vida [10]. Situações que, invariavelmente, são aleatórias, necessitando, dessa forma, a adoção de ferramentas estatísticas de previsão dos esforços, para fins de projeto.

Nas atuais normas para estruturas de aço, como a EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3: *Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue* [11], BS 5400. *Code of practice for design of composite bridges* [12] AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2014 - *American Association of State Highway and Transportation Official* [13] e IIW - *International Institute of Welding* [14], o projeto de fadiga empregado é baseado na avaliação da categoria de detalhe especificado na curva SN (Wöhler) [7] e na regra de danos cumulativos Palmgren-Miner [8], as quais estão disponíveis apenas para um limitado número de

detalhes estruturais (classes/croquis) e são apresentadas em tabelas de classificação das normas, excluindo-se detalhes estruturais complexos e cargas multiaxiais, conforme citado em [15,16].

Fato que obrigou a adoção de maiores coeficientes de segurança, a fim de absorver as possíveis, variações: por exemplo, uma ponte metálica com elementos estruturais submetidos a tensões multiaxiais, não proporcionais apresenta uma considerável redução de vida em fadiga do elemento. As normas não preveem tais possibilidades, justificando, assim, a adoção de maiores coeficientes de segurança.

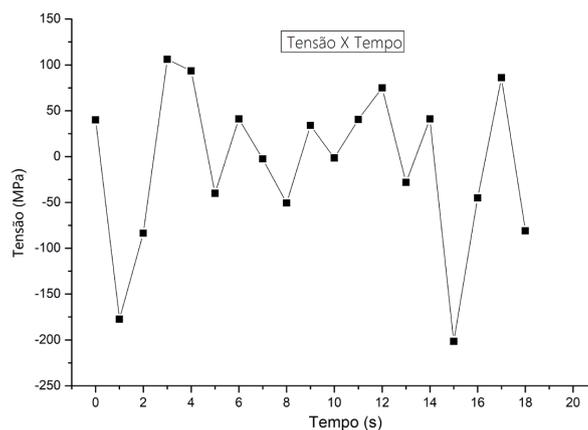
O principal objetivo deste artigo é comparar, criticamente, os resultados obtidos na estimativa da vida útil das atuais normas técnicas existentes Eurocode 3/IIW, BS 5400 e AASHTO nas geometrias viga I e chapa via método *rainflow* uniaxial segundo ASTM E 1049-85 [17], submetidas a um ciclo de tensões.

## 2. Metodologia

### 2.1. Análise de tensão

Em função do detalhamento estrutural, da geometria, ou de defeitos de montagem, como desalinhamentos, as cargas são transformadas em tensões nos elementos estruturais, pois a mesma carga pode ser verificada na forma de tensões de tração, torção e flexão, para as quais há diferentes métodos de análise, o que resulta na escolha de diferentes classes em cada norma [14].

Além do exposto, há a necessidade de emprego de metodologias de contagem dos ciclos, que, segundo Belyaev et al. [18], em função das tensões, geralmente, observadas em estudos estruturais de fadiga, apresentam valores positivos e negativos, gerando (ciclos) para posterior emprego do método de Palmgren-Miner [8]. Para resolver esse desafio, é empregado o método *rainflow* uniaxial, reduzindo um espectro de tensões uniaxiais variáveis, apresentado na Figura 4, a um simples conjunto de inversões de tensão.



**Figura 4.** Ilustração da variação da tensão x tempo. Fonte: Elaborada pelo autor.

Downing e Socie [19] desenvolveram um algoritmo para automatizar a aplicação do método de *rainflow* uniaxial muito usado desde 1982, o qual foi incluído como parte da ASTM E 1049-85 [17]. Embora existam vários algoritmos de contagem de ciclos para tais aplicações, o *rainflow* uniaxial é o mais popular desde 2008.

Tais métodos baseiam-se na contagem dos ciclos e respectivas amplitudes dos picos e vales, resultando numa tabela de fácil aplicação do método de Palmgren-Miner [8], permitindo a extrapolação.

Importante salientar que, embora seja muito usado, o método de *rainflow* uniaxial apresenta uma perda inerente muito comum em ferramentas estatísticas, por tratar-se, de uma ferramenta matemática de agrupamento de oscilações de tensões semelhantes, não permite eventual análise da influência de uma eventual sobrecarga, que possivelmente ocorra no início, meio ou no final do ciclo, fato que possivelmente, poderia encruar o material ou inserir tensões residuais, as quais, certamente alterariam o resultado final.

Além do exposto acerca da contagem dos ciclos, é necessário enfatizar, ainda, que os resultados apresentados nas normas foram obtidos via testes, os quais, predominantemente, apresentavam dimensões de 25 mm das secções resistentes aos esforços.

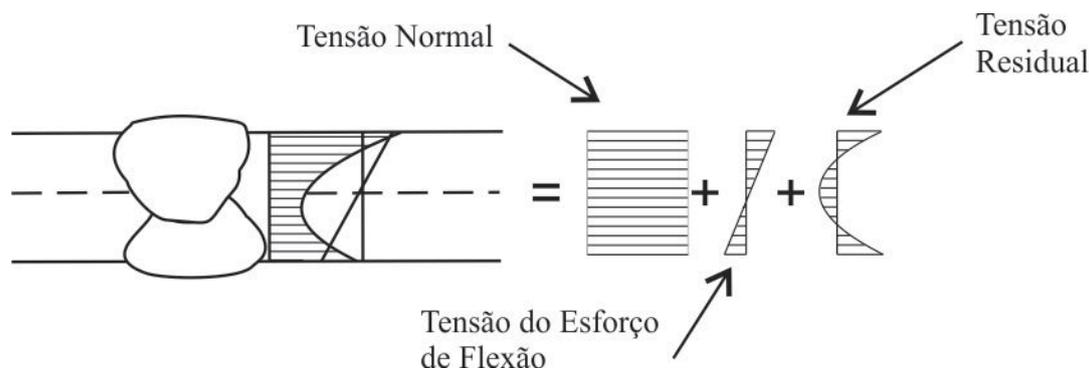
Para secções com dimensões menores ou maiores de 25 mm, é necessário um ajuste, via Equação 1, na qual  $t$ , corresponde a espessura do elemento em análise,  $t_0$ , segundo norma 25 mm,  $\Delta\sigma$ , variação da tensão originalmente testada na elaboração da referida norma,  $\Delta\sigma_t$  variação de tensão ajustada em função da espessura em análise e  $q$ , constante de ajuste, variando entre (1 a 3), conforme especificação de cada norma em função das especificidades de aplicação, permitindo, dessa forma, a previsão de vida em fadiga em secções resistentes com dimensões maiores ou menores a 25 mm [4].

$$\Delta\sigma_t = \Delta\sigma \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \quad (1)$$

Em função das simplificações inerentes à confecção das normas, é importante citar, novamente, que os métodos de previsão aqui apresentados são aplicáveis, exclusivamente, a tensões uniaxiais, sendo que as dimensões das secções resistentes, obrigatoriamente, devem ser maiores que a Zona Plástica (ZP) – de influência da propagação da trinca na ZAC.

## 2.2. Principais métodos para dimensionamento

O método estabelecido pela IIW [14] e adotado pela EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 [11] aborda as tensões, numa junta soldada plana sob tração, em três direções, conforme ilustrado na Figura 5, quais sejam: tensões lineares, normal e esforço de flexão; e tensão não linear, tensão residual.



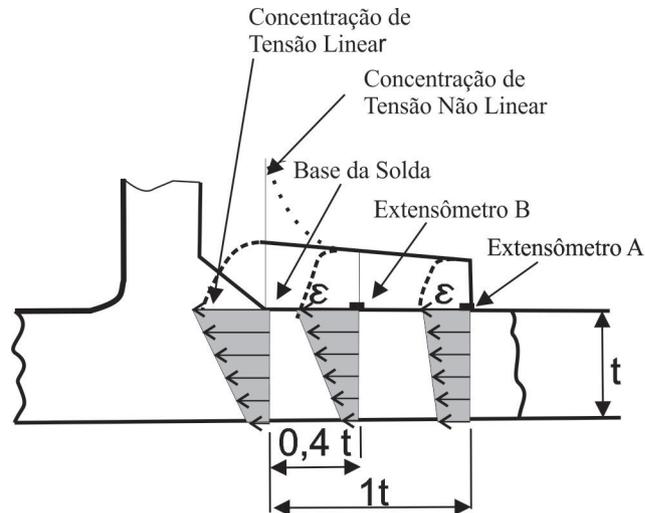
**Figura 5.** Ilustração da segmentação das três principais tensões atuando na solda plana. Fonte: International Institute of Welding [14].

A tensão de tração é obtida desprezando a existência da solda, considerando os conceitos fundamentais da mecânica estrutural, de modo que a tensão de flexão, somente é observada em casos de desalinhamento estrutural e a tensão residual é oriunda do processo de formação da junta, propriamente dita.

Várias abordagens foram desenvolvidas para a avaliação da tensão residual em estruturas soldadas, conforme [20,21]. Entre os diferentes métodos, a determinação das tensões residuais pode ser realizada pelo emprego de extensômetro em pontos de referência ao lado da junta, conforme ilustrado na Figura 6.

Aplicando-se uma variação de tensão no componente pelo princípio da variação da resistência elétrica dos extensômetros em função da deformação do objeto, é possível determinar as diferentes deformações pontuais e, por consequência, as tensões residuais nos pontos previamente determinados.

Geralmente, o tamanho do extensômetro a ser empregado deve ser menor que  $2t$ , sendo  $t$ , espessura da chapa, o primeiro extensômetro a ser fixado é posicionado a  $0,4t$  de distância do MS, o segundo a  $1t$  de distância do MS.

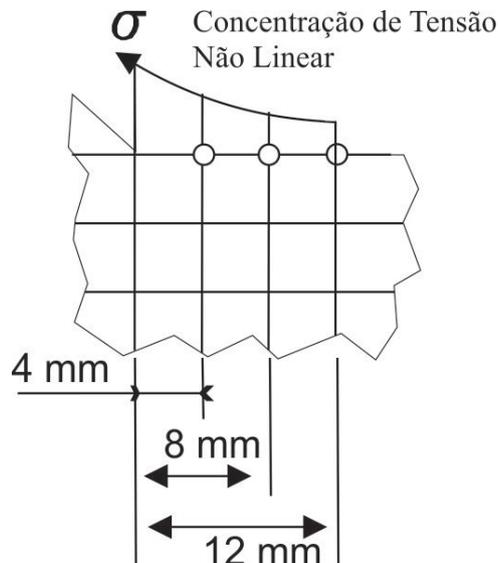


**Figura 6.** Demonstração do método de verificação das tensões residuais. Fonte: Fischer et al. [20].

Dessa forma, obtém-se os coeficientes da Equação 2 [20],  $\varepsilon_{1t}$  e  $\varepsilon_{0,4t}$  correspondendo respectivamente a deformação no extensômetro posicionados nos pontos a  $1t$  e  $0,4t$  de distância do MS e  $\hat{a}_{hs}$  a projeção da deformação na base da solda, e, posteriormente efetua-se a extrapolação matemática dos valores de deformação para outros pontos.

$$\varepsilon_{hs} = 1\varepsilon_{0,4t} - 0,4\varepsilon_{1t} \quad (2)$$

Outra possibilidade é via construção do modelo de elementos finitos, sendo que pode ser utilizado o modelo de placas finas, cascas ou, alternativamente, modelos de elementos sólidos, os quais permitem a formação de gradientes de tensão lineares ou exponenciais, conforme Figura 7.

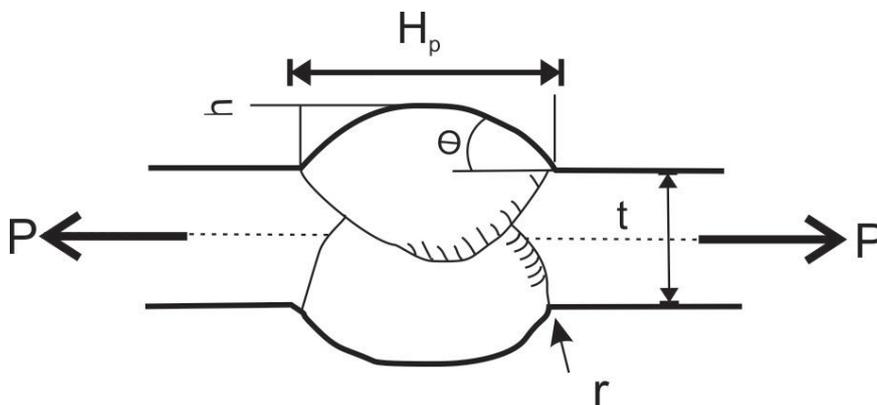


**Figura 7.** Ilustração da concentração de tensão não linear obtida via simulação computacional. Fonte: Fricke et al. [22].

A determinação da tensão nos pontos de concentração de tensão denominados de *hot spot*, conforme citado [20,21], é um procedimento que exige muito conhecimento, devido à possibilidade do aumento ou da redução virtual da rigidez do sólido, ambos atuando de forma negativa na análise nos pontos de referência. Normalmente,

as tensões residuais estruturais são avaliadas na superfície do sólido e, em alguns casos, é aceitável o modelamento computacional sem a solda.

Em outra metodologia, abordam-se os efeitos dos entalhes -descontinuidade geométrica que causam aumento local das tensões nominais, que atuariam, se o componente fosse isento de entalhe- no aumento da concentração de tensão, os quais podem ser calculados por equações paramétricas ou elementos finitos ou, ainda, elementos de contorno, conforme apontado nas Figura 8, Equação 3 [23] e Equação 4 [23], nas quais  $t$ , espessura do componente,  $r$ , raio de curvatura entre MS e MB,  $\theta$ , ângulo entre MB e reforço do MS,  $H_p$ , largura do MS,  $h$ , altura do reforço do MS e  $K$ , coeficiente de concentração de tensão.



**Figura 8.** Detalhamento descritivo da descontinuidade para posterior parametrização. Fonte: Hobbacher [23].

Nesse método um entalhe idealizado, é introduzido de tal modo, que a ponta da trinca parte do entalhe real, por exemplo, o fim de uma abertura de raiz não soldada ou outros pontos, por exemplo, descontinuidade geométrica entre o MB e o reforço da solda que, invariavelmente, representa uma abrupta mudança no perfil das tensões.

$$W = t + 2 * h + 0,6 * H_p \quad (3)$$

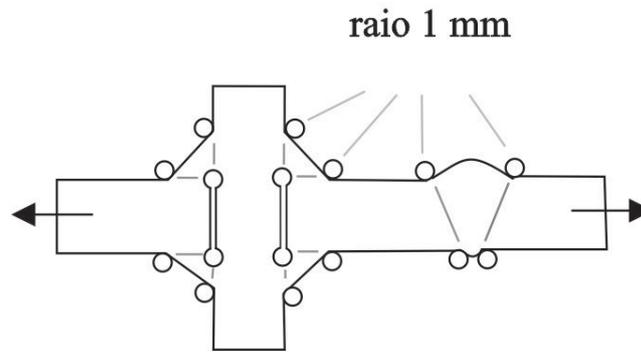
$$K = 1 + \frac{1 - \exp\left(0,9\theta\sqrt{\frac{w}{2h}}\right)}{1 - \exp\left(0,45\pi\sqrt{\frac{w}{2h}}\right)} \times 2 \left[ \frac{1}{2,8\left(\frac{W}{t}\right) - 2} \times \frac{h}{r} \right]^{0,65} \quad (4)$$

Até 2010, os métodos de estimativa de vida em fadiga eram baseados nas premissas:

- Ausência de informações sobre a geometria do cordão de solda, admissão que a trinca [23], sempre irá ocorrer na ZAC - próximo à solda; o material é elástico sem defeitos macro e microestruturais; e o raio de curvatura entre o MS e reforço e MB é desconsiderado.

As recentes pesquisas [22] têm demonstrado que o entalhe irregular na junta soldada pode ser substituído por um raio de 1 mm, conforme Figura 9, apresentando resultados plausível de estimativas estatísticas confiáveis. Com o desempenho crescente do potencial computacional é esperado um aumento da aplicação desses métodos, uma vez que as incertezas da determinação das tensões residuais ainda são existentes.

Por conta das limitações apresentadas em função das premissas até então assumidas, na revisão de 2010 das recomendações da IIW [23], foi apresentado, por Hobbacher, um novo método de abordagem do estudo da fadiga em juntas soldadas. A abordagem proposta na revisão mostrou-se como uma alternativa, considerando a propagação elasto-plástica da trinca no componente, e, também, as deformações plásticas promovidas.



**Figura 9.** Ilustração da inserção de raios de 1 mm. Fonte: Fricke et al. [22].

A abordagem proposta compreende o modelamento numérico computacional com elementos finitos de cada detalhe geométrico e os entalhes, por exemplo: falta de penetração, raio de concordância e reforço da solda são aproximados, por via computacional, o máximo possível da realidade e, após, um fator de concentração de tensão em cada detalhe é atribuído a cada defeito, realizar a somatória dos efeitos deste na vida à fadiga do componente [24].

Em comparação com as outras abordagens, a abordagem de concentração de tensão por entalhe permite que o efeito da geometria do cordão solda seja diretamente incluído na análise. Além disso o efeito da espessura está implícito no método. Tal como acontece com todas as demais, nessa, também, a experiência do analista é necessária para correta execução do método, considerando-se seus limites.

### 2.2.1. Eurocode 3/IIW

Historicamente, a EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 [11] e a IIW [14] são muito similares no que diz respeito à metodologia de dimensionamento das juntas soldadas, conforme Machad [25]. Tal similaridade é propagada na filosofia de projeto de determinação de vida em fadiga de juntas soldadas, contudo, é importante salientar que a referida similaridade de metodologias não é absoluta.

Em todas as situações, as informações acerca da geometria do cordão de solda, método de fabricação, acabamento superficial e tensões residuais estão implícitas na categoria obtida a partir da execução de uma expressiva quantidade de ensaios, permitindo que as possíveis influências deletérias sejam diluídas nas análises estatísticas, estando, portanto, implícitas nos resultados apresentados como fatores de segurança.

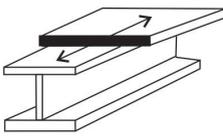
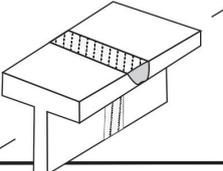
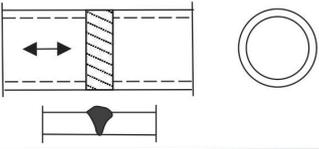
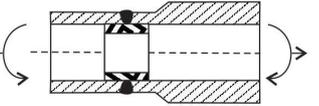
A previsão de resistência à fadiga da junta soldada pressupõe que as juntas foram executadas de acordo com as melhores práticas de fabricação, conforme normas cabíveis e com a realização de operações de inspeção visual ou de ensaios não destrutivos que visam avaliar a presença de defeitos, e garantir que os defeitos presentes nas estruturas estejam dentro dos limites aceitáveis para cada norma específica de produto.

Tal metodologia de previsão de vida em fadiga é apropriada para médios e altos ciclos, sendo inadequada para baixos ciclos e altas tensões, recomendando-se, dessa forma, a abordagem via análise de deformações  $\epsilon_N$  [26].

Segundo as normas EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 [11] / IIW, o projeto de juntas soldadas visando à resistência à fadiga considera os seguintes aspectos:

- Para cada geometria (classe) de junta soldada, fornece uma resistência à fadiga FAT – classe de resistência à fadiga;
- Cada referência, vide Figura 10, apresenta uma resistência à fadiga para uma gama de tensão que leva o detalhe à falha por fadiga após  $2 \times 10^6$  ciclos;
- A confiabilidade dos dados de resistência é 97,7%.

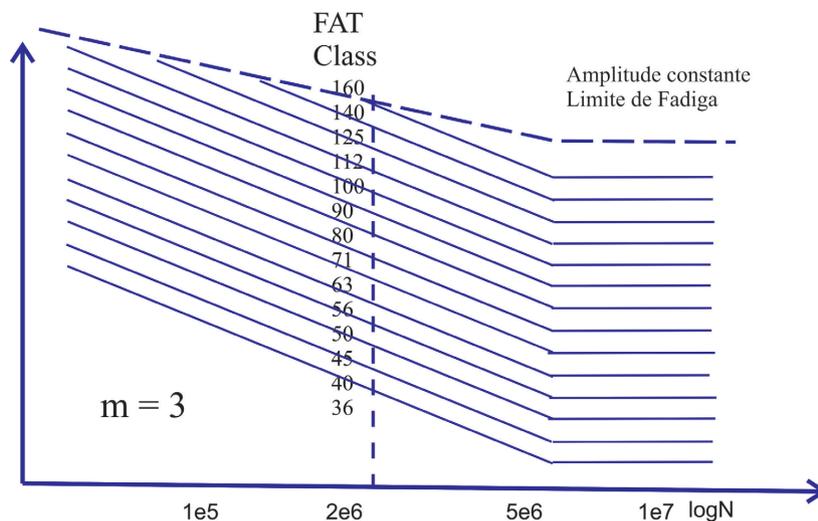
Na Figura 10, são apresentadas apenas quatro possibilidades das 79 classes da EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 [11] / IIW para escolha, conforme projeto construtivo, geralmente, tornando-se necessária a consulta

Ref	Detalhe estrutural	FAT
226		112
231		80
232		45
233		71

**Figura 10.** Apresentação de uma pequena parte das classes apresentadas nas normas. Fonte: International Institute of Welding [14].

em bibliografias adicionais ou realocação da junta em classe inferior ou superior, em função da espessura dos elementos de estrutura ou de outros detalhes.

A resistência à fadiga das juntas soldadas é apresentada na forma de diagramas S-N (Wöhler), correlacionando a variação de tensão  $\Delta\sigma$  e o número de ciclos para a falha ocorrer, conforme Figura 11.



**Figura 11.** Curvas S-N Wöhler para cada FAT (Eurocode/IIW). Fonte: International Institute of Welding [14] e Hobbacher [23].

Na Figura 11, percebe-se a existência do limite de fadiga, com ciclos acima de  $5 \times 10^6$ , bem como, nas linhas, o valor de FAT – resistência à fadiga. As curvas SN (Wöhler) na norma EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 /IIW são apresentadas duas possibilidades de inclinações 3 ou 5. Na forma simplificada, a inclinação 3 é empregada até o limite de fadiga, conforme apresentado na Figura 11, ou em outra possibilidade, a inclinação 5 é inserida entre  $5 \times 10^5$  e  $1 \times 10^8$  ciclos, reduzindo o valor de limite de fadiga permitido a execução de previsão de vida em fadiga mais conservadora.

Conhecida a geometria da junta soldada, essa é comparada às possíveis escolhas da norma, remetendo-se a um FAT -3ª coluna da Figura 10, empregando-se o mesmo FAT nas curvas S-N (Wöhler) da Figura 11. Se a oscilação da tensão apresentar a mesma amplitude, a leitura da vida em fadiga é direta no eixo das coordenadas da Figura 11. A Equação 5 possibilita o somatório dos danos causados por amplitudes maiores ou menores que o apresentado pelo FAT da geometria em estudo. Para obter a contribuição de cada frequência de amplitudes observadas, efetua-se a aplicação do algoritmo de *rainflow* uniaxial e subsequente método de Palmgren-Miner.

Na Tabela 1, são indicados valores de C, empregados referida Equação 5, -exclusivo para inclinação 3-em todas as classes e as curvas SN (Wöhler) podem ser extrapoladas para vida em fadiga com valores inferiores ou superiores a ciclos, desde que não seja ultrapassada a tensão de escoamento do material.

**Tabela 1.** Valores de C para cada classe (FAT).

Classe (FAT)	C
125	$3,91 \times 10^{12}$
112	$2,81 \times 10^{12}$
100	$2,00 \times 10^{12}$
90	$1,46 \times 10^{12}$
80	$1,02 \times 10^{12}$
71	$7,16 \times 10^{11}$
63	$5,00 \times 10^{11}$
56	$3,51 \times 10^{11}$
50	$2,50 \times 10^{11}$

Fonte: International Institute of Welding [14].

Para execução dessas operações, aplica-se a Equação 5 [8] na qual C, corresponde a constante obtida na Tabela 1 atrelada a cada classe,  $\Delta\sigma$ , amplitude da tensão, para cada em conjuntos de agrupamento de eventos no período, obtendo-se  $n_i$ , quantidade de dano causado pela referida amplitude de tensão.

Na Equação 6 [27] efetua-se o cálculo do dano causado pelos conjuntos de eventos, obtido pelo algoritmo de *rainflow*, empregando-se os valores  $N_i$ , que correspondem quantidade de vezes que a  $\Delta\sigma$  ocorreu no determinado conjunto no período, somando-se os danos de cada conjunto e eventos.

Após o somatório das contribuições, considerando o valor  $n_i$  da Equação 6 e a frequência anual das oscilações de cada conjunto e posterior determinação da vida útil via Equação 7.

$$n_i = \frac{C}{(\Delta\sigma)^m} \quad (5)$$

$$D = \sum d_i = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

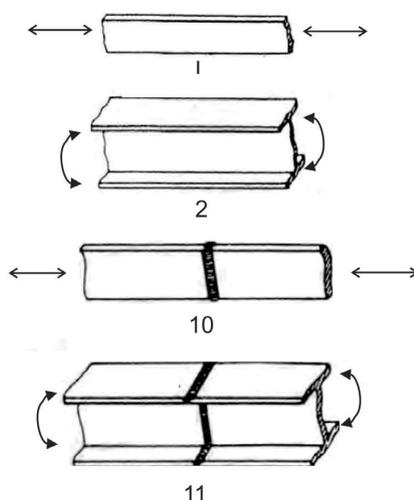
$$vida\ útil = 1 / D \quad (7)$$

### 2.2.2. BS 5400 Code of practice for design of composite bridges

A norma BS 5400 (1980) *Part 10* [12] apresenta a metodologia de cálculo de fadiga especialmente desenvolvida para a estimativa de cálculo de vida à fadiga em pontes metálicas (aço) sujeitas oscilações de carga.

A filosofia de cálculo segue os mesmos princípios da deterioração do componente do IIV -/EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3, apresentando diferenças significativas acerca da vida útil prevista do componente, nesse caso, por se tratar de pontes rodoferroviárias, 120 anos. Da mesma forma, que as normas IIV, EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 e BS 5400 desconsideram tensões residuais, excentricidades dentro de limites de fabricação, concentração de tensões devido à formação de junta e a curvaturas em função da elevada quantidade de ensaios realizados.

A sistemática de determinação da vida em fadiga consiste em comparar a junta soldada em análise, com as possibilidades da norma. Na Figura 12, são apresentadas quatro possibilidades de croquis de juntas soldadas previstas em norma, a qual tem 27 possibilidades.



**Figura 12.** Detalhes estruturais segundo BS 5400 (1980). Fonte: British Standards Institution [12].

O croqui é alocado na 5ª coluna da Tabela 2, sendo atribuída uma classe na 4ª coluna e os tipos de tensões na 3ª. Por conseguinte, na 2ª coluna, é possível verificar uma descrição detalhada, em que são exemplificadas as aplicações e os detalhes estruturais.

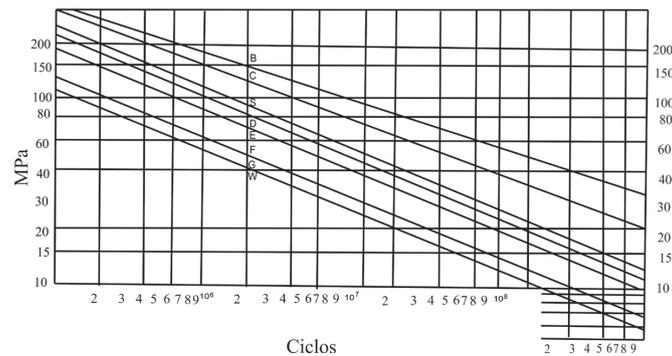
**Tabela 2.** Detalhamento da classe em função dos esforços, detalhes a junta.

Tipo Pormenor	Localização	Tipo/Tensão	Classe	Exemplo Croqui
<b>Material Base</b>	Material base com superfície de usinagem ou limpa	T ou Alt	A	1, 2
	Material base e metal depositado em membros sem reforço, fabricada com chapas ou perfis ligados por juntas de topo com penetração total ou parcial	T ou Alt.	B	3,4,5 e 6
<b>Membros soldados</b>	Tensão de flexão no metal base no pé da solda	T ou Alt.	C	7
	Metal Base na extremidade de cobre junta com ou sem cordões nos extremos	T ou Alt.	E	5

Fonte: British Standards Institution [12].

Nos casos em que não é possível classificar a junta de acordo com os critérios definidos na norma, essa é incluída na classe G -classe extra-, ou, nos casos de juntas que transmitam diretamente esforço, devem ser classificadas na classe W.

A norma BS 5400 (1980) apresenta características curvas de SN (Wöhler) para cada classe de junta soldada. Na Figura 13, são demonstradas as curvas SN (Wöhler) da norma BS 5400 (1980), sendo importante enfatizar que, ao contrário das definições de IIW, não há limite de fadiga, nem a possibilidade de mudança de inclinação da curva.



**Figura 13.** Curva S-N Wöhler para cada FAT BS 5400. Fonte: British Standards Institution [12].

A partir da classe determinada na Tabela 2, obtém-se os valores de  $K_0$ ,  $\Delta$  e  $m$ , respectivamente, na 2ª, 3ª e 4ª coluna na Tabela 3.

**Tabela 3.** Classes e as respectivas constantes BS 5400.

Classe	$K_0$	$\Delta$	$m$
W	$0,37 \times 10^{12}$	0,654	3
G	$0,57 \times 10^{12}$	0,662	3
F2	$1,23 \times 10^{12}$	0,592	3
F	$1,73 \times 10^{12}$	0,605	3
E	$3,29 \times 10^{12}$	0,561	3
D	$3,99 \times 10^{12}$	0,617	3
C	$1,08 \times 10^{14}$	0,625	3,5
B	$2,34 \times 10^{15}$	0,657	4
S	$2,13 \times 10^{23}$	0,313	8

Fonte: Saracoglu e Yapici [28].

Em função da probabilidade de colapso, conforme a Tabela 4, é plausível a escolha do expoente da Equação 8 [12].

**Tabela 4.** Probabilidade de colapso.

Probabilidade de Colapso (%)	$d$
50	0
31	0,5
16	1
2,30	2
0,14	3

Fonte: British Standards Institution [12].

Com a Equação 8, na qual,  $K_0$ ,  $\Delta$  e  $m$  são constantes, Tabela 3, correlacionadas com a classe do elemento, e  $d$  uma constante da Tabela 4 definido em função da probabilidade colapso/fratura total do elemento, por fim  $\sigma_f^m$  expressa a amplitude de tensão do conjunto agrupado.

Com os valores das Tabelas 3 e Tabela 4, determinam-se os valores de  $n_i$ , - para cada conjunto de amplitude de tensão-, e posteriormente novamente empregando, a somatória da Equação 6 e Equação 7 a determinação da vida útil.

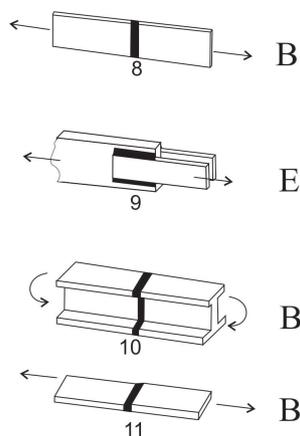
$$n_i = \frac{K_0 \Delta^d}{\sigma_f^m} \tag{8}$$

### 2.2.3. AASHTO (2014)

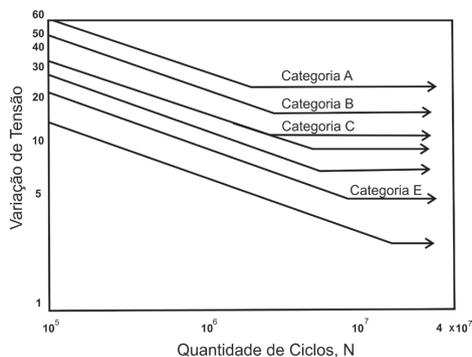
Similarmente aos métodos de IIW, EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 e BS 5400 (1980), as juntas metálicas são classificadas conforme norma, recebendo uma categorização segundo metodologia de cálculo de fadiga, especialmente desenvolvida para estimativa de cálculo de vida à fadiga de estruturas metálicas (aço) sujeitas a oscilações de carga. Contudo, nesse caso, diferentemente da BS 5400, a estimativa padrão é de 75 anos.

Verificando a Figura 14, é possível identificar alguns desenhos dos croquis de classificação do elementos e posterior alocação na respectiva curva da Figura 15. Subsequentemente, com a Equação 9 [13], na qual, A é uma constante obtida da Tabela 5,  $\Delta\sigma_i$ , oscilação de tensão agrupada em conjuntos e  $n_i$  dano causado pelo referido conjunto, posteriormente e novamente com a somatória da Equação 6 e Equação 7 obtém-se a vida em fadiga.

$$n_i = \frac{A}{\Delta\sigma_i}^{\frac{1}{3}} \tag{9}$$



**Figura 14.** Detalhes estruturais segundo AASHTO (2014). Fonte: American Association of State Highway and Transportation Officials [13].



**Figura 15.** Curva S-N Wöhler norma ASTHOO. Fonte: American Association of State Highway and Transportation Officials [13].

**Tabela 5.** Classes e as respectivas constantes AASHTO (2014).

Categoria	Constante A x 10 <sup>8</sup>
A	250
B'	120
C	61
C'	44
D	44
E	22
E'	3,9

Fonte: Caglayan et al. [29].

### 3. Comparação das Previsões entre Normas

Efetuando-se a comparação entre as normas apresentadas neste estudo, é evidente que há muitas similaridades, mas, há algumas diferenças, por exemplo: acerca da projeção de vida em fadiga de juntas soldadas que não têm previsão nas atuais normas, tanto IIW e EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3 não prevêem a possibilidade de alocação em classe extra, ficando a cargo do projetista a alocação de uma referida junta soldada numa classe similar, diferentemente das normas BS 5400 (1980) e AASHTO (2014).

Outro fator oriundo do foco de emprego das referidas especificações diz respeito à ausência de metodologias padronizadas para definição de vida em fadiga em espessura dissimilar aos experimentos executados na AASHTO (2014), problemática, em que as normas BS 5400 (1980) e IIW/Eurocode (1993) solucionaram via Equação 1.

No que tange à flexibilidade de projeto com variação da inclinação das retas nas curvas SN (Wöhler) tanto AASHTO (2014) e BS 5400 (1980) não prevê tal possibilidade, mas, IIW/Eurocode permitem, inclusive com definição de constantes para referida faixa de tensões.

Por conseguinte, o único conjunto de especificações que não prevê vida infinita está na BS 5400 (1980), a qual não definiu um valor abaixo, considerando haver fratura por fadiga, destoando das outras normas, fato, que certamente torna o projeto de elementos estruturais mais complexo, pois assume a inexistência de limite de fadiga no material aço, talvez como um coeficiente de segurança extra.

Na mesma linha e análise somente a norma BS 5400 (1980) deixou a cargo do projetista a escolha de coeficiente, valor de  $d$ , Tabela 4, que expressa a probabilidade de colapso da estrutura, variando entre 0.14% a 50% de chance da referida junta soldada fraturar.

Por fim, a norma AASHTO (2014), permite a consideração na previsão de limite a fadiga a existência de elementos estruturais redundantes, técnica amplamente empregada em sistemas de segurança, por exemplo: freios automotivos, elevadores ou aviação civil/militar, fato que não foi considerado na análise subsequente.

Grande parte das diferenças apresentadas certamente são fruto da filosofia de projeto de cada grupo de engenheiros/pesquisadores que desenvolveram as normas e principalmente correlacionaras as típicas aplicações da referidas.

Para melhor compreensão, apresenta-se, na Tabela 6, um exemplo comparativo entre as diferentes normas empregados nesse estudo.

#### 3.1. Dois exemplos ilustrativos resolvidos via normas

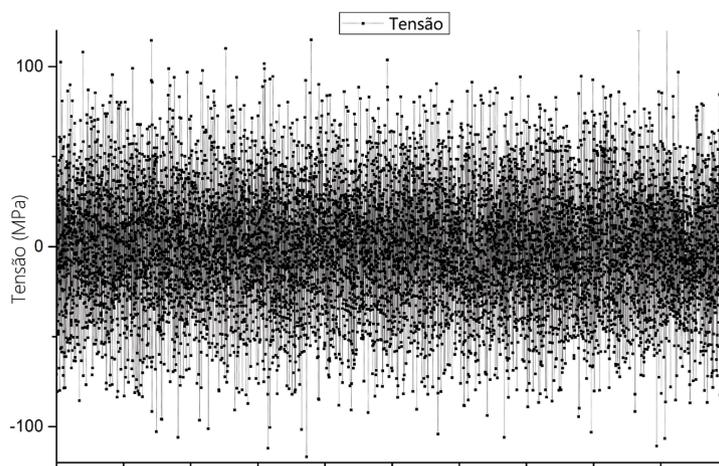
Para comparação das estimativas de vida em fadiga das normas, tomou-se como exemplo 10000 valores de tensão (MPa) x tempo (s) apresentados na Figura 16, representando um ano de medições realizadas.

Os dados foram submetidos ao algoritmo *rainflow* uniaxial segundo ASTM E 1049-85, extraíndo-se os conjuntos de variação de tensão, agrupando-os em conjuntos de ciclos de variação de tensão (MPa) x percentual ocorrência, conforme Figura 17.

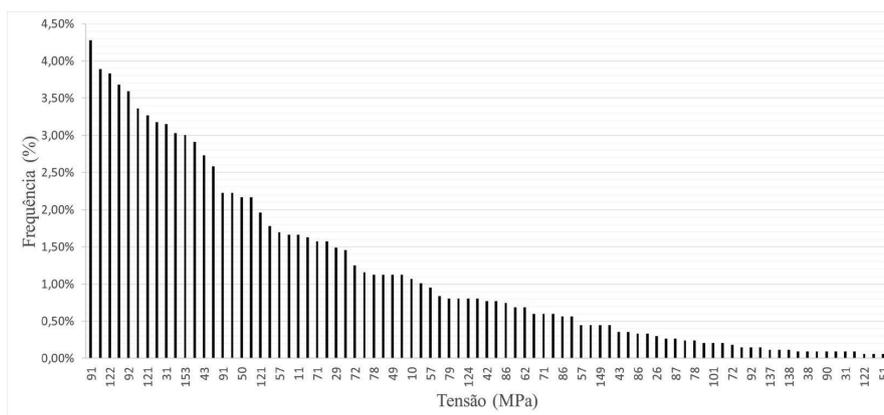
**Tabela 6.** Comparativo entre as normas.

	BS 5400 (1980)	IIV/Eurocode (1993)	AASHTO (2014)
Classe extra	sim	não	sim
Palmgren-Miner	sim	sim	sim
Regra de <i>rainflow</i>	sim	sim	sim
Fator de ajuste das espessuras	sim	sim	não
Principais aplicações	pontes de aço	gerais	pontes de aço
Permite mudança de inclinação	não	sim	não
Permite projeto com elementos redundantes	não	não	Sim (*)
Tem limite de fadiga	não	sim	sim

(\*) sem elementos redundantes. Fonte: Elaborada pelo autor.



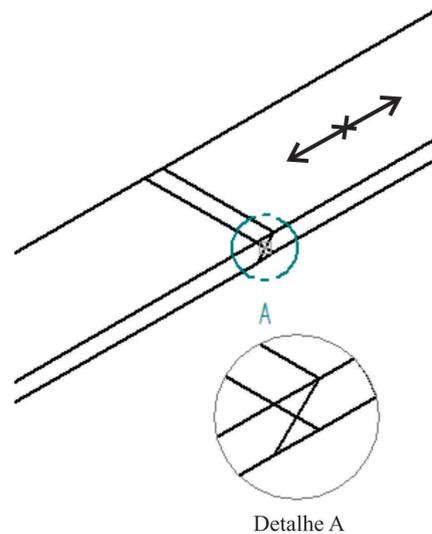
**Figura 16.** Gráfico demonstrando a variação da tensão (espessura 25 mm). Fonte: Elaborada pelo autor.



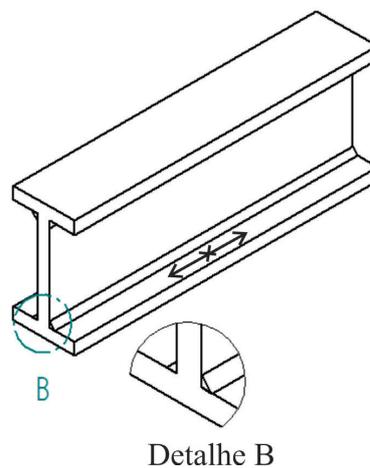
**Figura 17.** Gráfico apresentando os conjuntos das oscilações de tensão por percentual de ocorrência (espessura 25 mm). Fonte: Elaborada pelo autor.

Para melhor abordagem do tema, pretende-se comparar as estimativas de vida em fadiga de duas geometrias de juntas soldadas chapa e viga I, respectivamente, Figura 18 e Figura 19, ambas amplamente empregadas em inúmeras construções.

A Figura 18 representa a solda em topo em ambos os lados, de uma chapa espessura 25 mm, solda com penetração total sem reforço, submetida somente a tensão longitudinal, sem restrição de deformação em todas



**Figura 18.** Ilustração de solda topo em ambos os lados com penetração completa sem reforço, detalhe A ilustra penetração completa em aumento e seta dupla indica o local, direção e sentidos da tensão. Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 19.** Ilustração de solda filete em ambos os lados com penetração completa, entre a alma e as duas mesas, detalhe B ilustra penetração completa em aumento e seta dupla indica o local, direção e sentidos da tensão. Fonte: Elaborada pelo autor.

as direções, ausência de desalinhamentos, solda submetida exclusivamente ao esforço de tração perpendicular, na qual simula-se a mensuração da tensão, em região sem influência da ZAC, conforme seta Figura 18.

A Figura 19 representa 4 soldas contínuas executadas via processo automático, tipo T – filete, com penetração total entre a alma e duas abas -ambos de espessura de 25 mm- de uma viga I, submetida ao momento fletor, na qual simula-se a mensuração da tensão na aba inferior adjacente ao cordão, conforme seta Figura 19.

Em ambos os casos, optou-se por geometrias, simulações de aplicação de tensão -valores da Figura 16- probabilidade de colapso, inclinações das curvas SN (Wöhler) aplicáveis em todas as normas do presente estudo, para manter isonomia de eventuais comparações.

As classificações das juntas soldadas em classes segundos IIW, AASHTO (2014) e BS 5400 (1980) são apresentadas na Tabela 7.

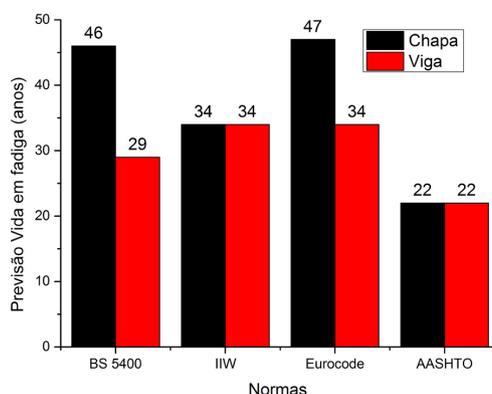
**Tabela 7.** Classificação das juntas e inclinações segundo normas.

Figuras /classes	Figura 18	m	d	Figura 19	m	d
Eurocode	112	3		125	3	
IIW	125	3		125	3	
BS 5400	C		3	D		3
ASTHO	B	3		B	3	

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4. Conclusões

A Figura 20 demonstra os resultados de previsão de vida em fadiga das estruturas chapa e viga I segundo das normas IIW [14], Eurocode [11] AASHTO [13] e BS 5400 [12].



**Figura 20.** Resultado de previsão de vida em fadiga. Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando-se os resultados obtidos via BS 5400, Eurocode, IIW e AASHTO na situação de Viga I, percebe-se que as normas IIW e Eurocode apresentam valores idênticos, colaborando com a premissa de similaridade entre as metodologias. As normas BS 5400 e AASHTO apresentaram valores menores, respectivamente, 14% e 35,2% em relação à IIW/ Eurocode.

No que tange às previsões de vida em fadiga da Chapa, segundo IIW e Eurocode são diferentes Eurocode 38% maior que IIW, pois as classificações (FAT) não são as mesmas. Os valores obtidos nas normas AASHTO e BS 5400 são, respectivamente, 53% e 61% menores em relação à Eurocode e 35% e 47% em relação à IIW.

Tais fatos colaboram para situação de ausência de similaridade entre as metodologias, inclusive entre as duas normas, IIW e Eurocode, que mantém expressiva similaridade, mas que, nesse caso, em função das discrepâncias do FAT da referida geometria expôs a diferença. É notável que, analisando a previsão da vida em fadiga da chapa, foram obtidos os maiores percentuais de discrepância entre as previsões, principalmente em função da discrepância quanto à classificação da referida geometria.

Convém salientar que somente classes ou croquis submetidos a esforços uniaxiais (chapa sob tração e viga I sob flexão) foram analisados. Caso se efetuasse a análise em elementos sob esforços multiaxiais, certamente, haveria novas fontes de discrepâncias, por exemplo, esforços proporcionais e não proporcionais seriam uma importante fonte de novos resultados.

Outro ponto que chama a atenção é a indiferença das análises quanto aos materiais empregados na construção. Há uma constante evolução no desenvolvimento de novos materiais com avanços significativos na

obtenção de ótimas propriedades mecânicas, seja simplesmente resistência mecânica ou resistência à propagação de trincas. Nos últimos anos, por exemplo, autores como Machad [25] consideram integralmente a influência das propriedades mecânicas do material tanto de (MB e MS), de tratamentos térmicos, ou numa abordagem mais detalhada correlacionada aos itens anteriores, observa-se a ausência da observação de alguns conceitos mais simples, por exemplo tamanho da garganta na junta soldada, soldas excêntricas eventual contribuição do fenômeno da fricção, espessuras dissimilares e eventuais ajustes da previsão de vida em fadiga mediante realização de ensaio não destrutivos.

Conforme Gouveia [30], no processo de dimensionamento, por continuidade, há desconsideração por todas as normas no que diz respeito ao dimensionamento das juntas soldadas, pois, há outros conceitos de suma importância, que, acredita-se, não poderiam ser negligenciados, por exemplo, segundo Machad [25] todas as normas citadas concordam que soldas longas possuem menores resistências por unidade de comprimento quando comparadas com soldas relativamente curtas, sendo que as maiores tensões de cisalhamento ocorrem nas suas extremidades, fato que não é considerado no escopo da fadiga ou ângulo entre MB e MS influência decisivamente.

Não menos importante, observa-se total desconsideração da influência de esforços multiaxiais que reconhecidamente, quando se apresentam na condição de não proporcionalidade influenciam expressivamente a vida em fadiga.

Não obstante, percebe-se que em todas as normas há um número limitado de classe/croqui os para os quais há uma definição acerca da resistência fadiga, permanecendo a cargo do projetista a alocação de eventuais tipos de juntas –não listadas nas normas- em classes inferiores, superiores ou classe extra quando possível.

Por fim, o emprego da metodologia *rainflow* uniaxial desconsidera o sequenciamento das tensões aplicadas, fato que poderia ser resolvido mediante a aplicação *rainflow uniaxial* sequencial.

Observa-se nitidamente que as recomendações técnicas emitidas pelas normas são fruto de análise de expressiva quantidade de ensaios- sem o controle absoluto de todas as variáveis- os quais certamente apresentaram elevado discrepância, fato que foi resolvido pela adoção de maiores coeficientes de segurança.

No entanto, acredita-se que são notáveis os esforços no desenvolvimento de novas tecnologias (principalmente) computacionais com o intuito de modelar as influências dos defeitos da junta soldada, concentrações de tensão bem como deformações plásticas que possam interferir, positiva ou negativamente, nas previsões de vida em fadiga. Contudo, por enquanto, as normas técnicas que regulamentam tal aplicação, apenas efetuam recomendações, como as emitidas pelo IIW.

## 5. Referências

- [1] Gan J, Sun D, Wang Z, Luo P, Wu W. The effect of shot peening on fatigue life of Q345D T-welded joint. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016;126:74-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.010>.
- [2] Zhao MS, Chiew SP, Lee CK. Post weld heat treatment for high strength steel welded connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016;122:167-177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.015>.
- [3] Xudong Q, Jitpaired K, Marshall P, Swaddiwudhipong S, Ou Z, Zhang Y, et al. Fatigue and residual strength of concrete-filled tubular X-joints with full capacity welds. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016;110:70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.021>.
- [4] Castro JTP, Meggiolaro MA. Fadiga: técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço. Rio de Janeiro: CreateSpace Independent Publishing Platform; 2009.
- [5] Acevedo C, Nussbaumer A. Residual stress estimation of welded tubular k-joints under fatigue loads. Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology.
- [6] Silva, Ribeiro VS, Scaldaferrri DHB, Rabello EG, Campos WRC, Mansur TR. Development and Test of an Equipment to Measure Residual Strain Inside Pipes Using the Hole-Drilling Method. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2016;13(13):2439-2450. <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253126>.
- [7] Whöhler A. Bericht über die Versuche, welche auf der Königl. Niederschlesisch. Zeitschrift für Bauwesen. 1858;7:641-652.
- [8] Miner MA. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*. 1945;12(3):159-164.
- [9] Kyle T, Wieghaus JBM, Hurlbauss S. Fragility analysis of wind-excited traffic signal structures. *Engineering Structures*. 2015;101:652-661. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.044>.
- [10] Nasiłowska B, Bogdanowicz Z, Wojucki M. Shot peening effect on 904 L welds corrosion. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015;115:276-282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.041>.
- [11] European Committee for Standardization. EN 1993-1-9 (2005): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9 : Fatigue. Brussels: CEN; 2005.
- [12] British Standards Institution. BS 5400 (1980): Steel, concrete and composite bridges – Part 5: Code of practice for design of composite bridges. London: BSI; 2005.

- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials. Design specifications: AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2014. Washington: AASHTO; 2014.
- [14] International Institute of Welding. Recommendations for fatigue design of weld joints and component. New York: IIW; 2008.
- [15] Pedersen MM. Multiaxial fatigue assessment of welded joints using the notch stress approach. *International Journal of Fatigue*. 2016;83(part 2):269-279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.021>.
- [16] Zhou, Shi G, Wang Y, Chen H, De Roeck G. Fatigue evaluation of a composite railway bridge based on fracture mechanics through global–local dynamic analysis. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016;122:1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.01.014>.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM E1049-85(2011): standard practices for cycle counting in fatigue. West Conshohocken: ASTM; 2011 [acesso em 9 jun. 2017]. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/E1049.htm>
- [18] Belyaev A, Maag V, Speckert M, Obermayr M, Küfer K-H. Multi-criteria optimization of test rig loading programs in fatigue life determination. *Engineering Structures*. 2015;101:16-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.055>.
- [19] Downing SD, Socie DF. Simple rainflow counting algorithms. *International Journal of Fatigue*. 1982;4(1):31-40. [http://dx.doi.org/10.1016/0142-1123\(82\)90018-4](http://dx.doi.org/10.1016/0142-1123(82)90018-4).
- [20] Fischer C, Rizzo W, Fricke CM. Review of the fatigue strength of welded joints based on the notch stress intensity factor and SED approaches. *International Journal of Fatigue*. 2016;84:59-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.015>.
- [21] Niemi E, editor. Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components. Cambridge: Abington Publ.
- [22] Fricke W, Bollero A, Chirica I, Garbatov Y, Jancart F, Kahl A, et al. Round robin study on structural hot-spot and effective notch stress analysis. *Ships and Offshore Structures*. 2008;3(4):335-345. <http://dx.doi.org/10.1080/17445300802371261>.
- [23] Hobbacher FA. New developments at the recent update of the IIW recommendations for fatigue of welded joints and components. *Steel Construction*. 2010;3(4):231-242. <http://dx.doi.org/10.1002/stco.201010030>.
- [24] Dongpo W, Hai Z, Baoming G, Caiyan D. Residual stress effects on fatigue behaviour of welded T-joint: a finite fracture mechanics approach. *Materials & Design*. 2016;5:211-217.
- [25] Machad IG. Dimensionamento de juntas soldadas de filete: uma revisão crítica. *Revista Soldagem & Inspeção*. 2011;16(2):189-201.
- [26] Haddad M. Concentric tubular steel braces subjected to seismic loading: finite element modeling. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015;104:155-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.10.013>.
- [27] Hobbacher A, Hicks SJ, Karpenko M, Thole F, Uy B. Transfer of Australasian bridge design to fatigue verification system of Eurocode. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016;122:532-542. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.023>.
- [28] Saracoglu G, Yapici A. Fatigue analysis of girth gear of a rotary dryer. *Engineering Failure Analysis*. 2016;68:187-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.024>.
- [29] Caglayan O, Ozakgul K, Tezer O, Uzgider E. Fatigue life prediction of existing crane runway girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010;66(10):1164-1173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.009>.
- [30] Gouveia RR. Efeito da temperatura interpasse na microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga de uniões soldadas por GTAW do aço ASTM A743-CA6NM. *Revista Soldagem & Inspeção*. 2013;8(2):127-137.