

CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE JUNTAS SOLDADAS POR ANÁLISE DE FADIGA: APLICAÇÃO DAS NORMAS EUROCODE 3, DNV E IIW

Structural reliability of welded joints through fatigue analysis: Adhibition of EUROCODE 3, DNV and IIW standards

Pablo M. M. Pires ^{1*} e Maurício M. Nilton ¹

¹ Universidade Federal de São João del Rei

*Autor correspondente: pabllomiguel_26@hotmail.com

RESUMO

Na atualidade, uma enorme parte dos componentes projetados necessitam de algum tipo de união para comporem montagens de projetos mais ou menos complexos. Nessa ótica, o processo de soldagem se destaca por ser bastante confiável e difundido, além de possuir alta aplicabilidade. Junto disso, muitas vezes tais conjuntos mecânicos estão expostos a carregamentos dinâmicos em função de seu funcionamento e aplicação, a exemplo de suspensões, chassis, e outras partes que compõem veículos, e assim, é eminente a necessidade de confiabilidade estrutural dessas junções soldadas, haja vista a preocupação com falhas envolvendo tais produtos. Nesse viés, visando ampliar ainda mais o nível de acuracidade nas análises realizadas pelo setor de cálculo estrutural, esse trabalho busca explicitar a aplicação de uma metodologia de análise de fadiga em juntas soldadas aplicadas em um chassi tubular de uma equipe de competição BAJA, Equipe KomiKeto Baja UFSJ, utilizando das normas EUROCODE 3, DNV e IIW; estas que são amplamente utilizadas por inúmeras áreas de diferentes tipos de indústrias devido a sua robustez e confiabilidade.

Palavras-chave: Juntas Tubulares Soldadas, Fadiga em Soldas, Análise Estrutural.

ABSTRACT

Nowadays, a significant portion of designed components require some type of joint to form assemblies of more or less complex projects. In this context, welding stands out for being highly reliable and widely used, with broad applicability. Additionally, many of these mechanical assemblies are often exposed to dynamic loads due to their operation and application, such as in suspensions, chassis, and other parts that make up vehicles. Therefore, the need for structural reliability of these welded joints is evident, given the concerns about failures involving such products. From this perspective, aiming to further enhance the accuracy level of the analyses performed by the structural calculation sector, this work seeks to clarify the application of a fatigue analysis methodology in welded joints applied to a tubular chassis of a Baja competition team, the KomiKeto Baja UFSJ Team, using EUROCODE 3, DNV, and IIW standards, which are widely used across various industries due to their robustness and reliability.

Keywords: Welded Tubular Joints, Weld Fatigue, Structural Analysis.

1. Introdução

Diante da expansão da indústria automotiva, é eminente a crescente necessidade de confiabilidade estrutural juntamente da evolução de projetos desenvolvidos, haja vista o aumento da exigência contínua de segurança, confiabilidade e processos de fabricação por parte de órgãos normativos como Euro NCAP (European New Car Assessment Programme), e Latin NCAP.

Em conjunto, estima-se que o custo das falhas estruturais mecânicas seja maior que 4% do PIB, tanto nos EUA quanto em países europeus (Dowling, 2007), sendo que 90% dessas estão ligadas ao fenômeno de fadiga [3], este que é caracterizado por tensões trativas ou deformações cíclicas as quais culminam em micro trincas que acarretam uma ruptura repentina do componente. O fenômeno da fadiga é particularmente preocupante em regiões soldadas devido a uma série de fatores indesejados, como: concentração de tensões, intrusões metálicas, descontinuidades, trincas, porosidade gasosa, modificação das propriedades mecânicas, entre outros [14].

Diante de tal, buscando melhorias de confiabilidade e segurança do protótipo de competição BAJA SAE Brasil, KB09, da equipe universitária KomiKeto Baja – UFSJ, por meio do setor de cálculo estrutural, o presente estudo visa apresentar uma técnica de análise de fadiga em juntas soldadas de diferentes componentes do veículo utilizando de conceitos e restrições apresentadas pelas normas EUROCODE 3, DNV (Det Norske Veritas) e IIW-2259-15 (International Institute of Welding), normas essas consagradas na indústria de engenharia

2. Metodologia

2.1. EUROCODE 3

Através de parâmetros classificativos, pela norma EUROCODE 3, mais especificamente na seção EN 1993-1-9 (2005), usou-se de tabelas (Figura 2 e 3) que, de acordo com o tipo de junção soldada, extrai-se as informações necessárias para utilizar com as equações disponibilizadas pela norma (Equação 1).

A resistência à fadiga para faixas de tensão nominal é representada por uma série de curvas ($\log \Delta \sigma_R$) - ($\log N$) e curvas ($\log \Delta \tau_R$) - ($\log N$) (curvas S-N - Figura 1), que correspondem a diferentes categorias de detalhes típicos. Cada categoria é designada por um número que indica, em MPa, o valor de referência $\Delta \sigma_C$

e $\Delta \tau_C$ para a resistência à fadiga em 2 milhões de ciclos.

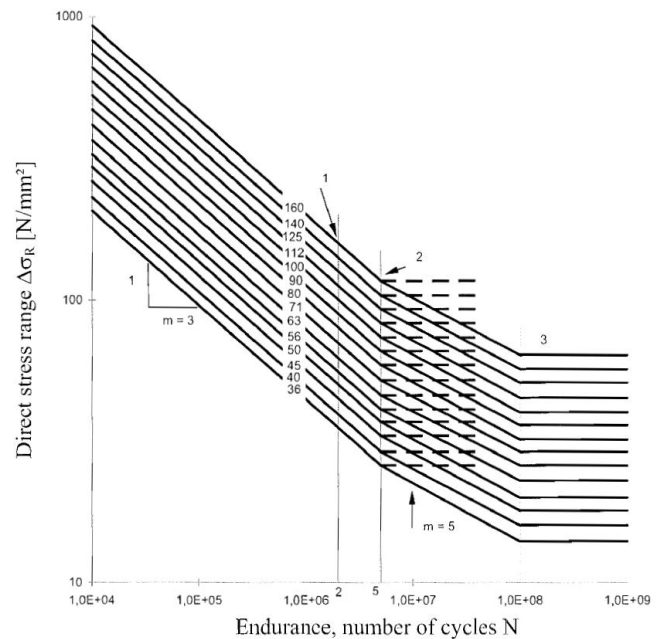


Figura 1. Curvas S-n para diferentes classes de juntas.

Fonte: AUTOR.

Para níveis de tensões nominais com amplitude variáveis (carregamentos aleatórios), como é o caso do qual o protótipo em análise está exposto, o limite de fadiga segue as equações 1 e 2, a depender do nível de tensão que, consequentemente, classifica o número N de ciclos conforme a curva característica.

$$\Delta \sigma_R^m N_R = \Delta \sigma_C^m 2E6 ; m = 3 \text{ e } N \leq 5E6 \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_R^m N_R = \Delta \sigma_D^m 5E6 ; m = 5 \text{ e } 5E6 \leq N \leq E8 \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \Delta \sigma_C = 0.737 \Delta \sigma_C \quad (3)$$

$$\Delta \sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} \Delta \sigma_D = 0.549 \Delta \sigma_D \quad (4)$$

Tal que;

- Equação 1: Usada para níveis de tensões menores que $\Delta \sigma_D$ ou $N \leq 5E6$
- Equação 2: Usada para níveis de tensões entre $\Delta \sigma_D$ e $\Delta \sigma_L$ ou $5E6 \leq N \leq E8$
- Equação 3: Limite de fadiga para tensões de amplitude constante
- Equação 4: Limite de fadiga para tensões de amplitude variáveis (carregamento aleatório)

Detail category	Constructional detail	Requirements
90 $m=5$	Gap joints: Detail 1: K and N joints, circular structural hollow sections: 	Details 1 and 2: - Separate assessments needed for the chords and the braces. - For intermediate values of the ratio t_a/t_b , interpolate linearly between detail categories. - Fillet welds permitted for braces with wall thickness $t \leq 8 \text{ mm}$. - t_a and $t_b \leq 8 \text{ mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_a/b_b \leq 25$ - $d_a/b_a \leq 25$ - $0.4 \leq b_b/b_a \leq 1.0$ - $0.25 \leq d_b/d_a \leq 1.0$ - $b_b \leq 200 \text{ mm}$ - $d_b \leq 200 \text{ mm}$ - $-0.5b_b \leq e_{ap} \leq 0.25b_b$ - $-0.5d_b \leq e_{ap} \leq 0.25d_b$ - $e_{ap} \leq 0.02b_b$ or $\leq 0.02d_b$ [e_{ap} is out-of-plane eccentricity]
45 $m=5$	Gap joints: Detail 2: K and N joints, rectangular structural hollow sections: 	Detail 2: - $0.5(b_b - b_a) \leq g \leq 1.4(b_b - b_a)$ - $g \geq 2t_a$
71 $m=5$	Overlap joints: Detail 3: K joints, circular or rectangular structural hollow sections: 	Details 3 and 4: - $30\% \leq \text{overlap} \leq 100\%$ - $\text{overlap} = t_a(p) = 100\%$ - Separate assessments needed for the chords and the braces. - For intermediate values of the ratio t_a/t_b , interpolate linearly between detail categories. - Fillet welds permitted for braces with wall thickness $t \leq 8 \text{ mm}$. - t_a and $t_b \leq 8 \text{ mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_a/b_b \leq 25$ - $d_a/b_a \leq 25$ - $0.4 \leq b_b/b_a \leq 1.0$ - $0.25 \leq d_b/d_a \leq 1.0$ - $b_b \leq 200 \text{ mm}$ - $d_b \leq 200 \text{ mm}$ - $-0.5b_b \leq e_{ap} \leq 0.25b_b$ - $-0.5d_b \leq e_{ap} \leq 0.25d_b$ - $e_{ap} \leq 0.02b_b$ or $\leq 0.02d_b$ [e_{ap} is out-of-plane eccentricity]
36 $m=5$	Overlap joints: Detail 4: N joints, circular or rectangular structural hollow sections: 	Definition of p and q:

Figura 2. Características de Juntas tipo K e N com espaçamento. Fonte: EUROCODE 3.

71 $m=5$	Overlap joints: Detail 3: K joints, circular or rectangular structural hollow sections: 	Details 3 and 4: - $30\% \leq \text{overlap} \leq 100\%$ - $\text{overlap} = t_a(p) = 100\%$ - Separate assessments needed for the chords and the braces. - For intermediate values of the ratio t_a/t_b , interpolate linearly between detail categories. - Fillet welds permitted for braces with wall thickness $t \leq 8 \text{ mm}$. - t_a and $t_b \leq 8 \text{ mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_a/b_b \leq 25$ - $d_a/b_a \leq 25$ - $0.4 \leq b_b/b_a \leq 1.0$ - $0.25 \leq d_b/d_a \leq 1.0$ - $b_b \leq 200 \text{ mm}$ - $d_b \leq 200 \text{ mm}$ - $-0.5b_b \leq e_{ap} \leq 0.25b_b$ - $-0.5d_b \leq e_{ap} \leq 0.25d_b$ - $e_{ap} \leq 0.02b_b$ or $\leq 0.02d_b$ [e_{ap} is out-of-plane eccentricity]
56 $m=5$	Overlap joints: Detail 4: N joints, circular or rectangular structural hollow sections: 	Definition of p and q:
71 $m=5$	Overlap joints: Detail 3: K joints, circular or rectangular structural hollow sections: 	Details 3 and 4: - $30\% \leq \text{overlap} \leq 100\%$ - $\text{overlap} = t_a(p) = 100\%$ - Separate assessments needed for the chords and the braces. - For intermediate values of the ratio t_a/t_b , interpolate linearly between detail categories. - Fillet welds permitted for braces with wall thickness $t \leq 8 \text{ mm}$. - t_a and $t_b \leq 8 \text{ mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_a/b_b \leq 25$ - $d_a/b_a \leq 25$ - $0.4 \leq b_b/b_a \leq 1.0$ - $0.25 \leq d_b/d_a \leq 1.0$ - $b_b \leq 200 \text{ mm}$ - $d_b \leq 200 \text{ mm}$ - $-0.5b_b \leq e_{ap} \leq 0.25b_b$ - $-0.5d_b \leq e_{ap} \leq 0.25d_b$ - $e_{ap} \leq 0.02b_b$ or $\leq 0.02d_b$ [e_{ap} is out-of-plane eccentricity]
50 $m=5$	Overlap joints: Detail 4: N joints, circular or rectangular structural hollow sections: 	Definition of p and q:

Figura 3. Características de Juntas tipo K e N sem espaçamento. Fonte: EUROCODE 3.

A exemplo de aplicação em uma região do chassis, com seção tubular de $D = 25,4 \text{ mm}$ (diâmetro externo) e $d = 23,6 \text{ mm}$ (diâmetro interno), onde existe uma junta overlap do tipo K (Figura 3), com a relação $\frac{t_o}{t_i} = 1$, isto é, os tubos da junção possuem os mesmos diâmetros internos e externos; logo usaremos os valores referentes a primeira linha da figura citada, isto é, $\Delta\sigma_c = 56 \text{ MPa}$ e $m = 5$.

Para a distinção de aplicação das equações 1 e 2, observando a Figura 1, sabemos que a primeira inclinação ($N \leq 5E6$; região A) tem como valor de tensão limite $\Delta\sigma_D = 0.737\Delta\sigma_c = 41.27 \text{ MPa}$, logo, para valores de tensão a cima deste, deve se utilizar a Equação 1; já para a segunda inclinação (limite de fadiga para $5E6 \leq N \leq E8$), valores de tensões entre $\Delta\sigma_D = 41.27 \text{ MPa}$ e $\Delta\sigma_L = 22.66 \text{ MPa}$, utiliza-se a Equação 2.

Ressalta-se que, o gráfico possui dois limites de fadiga justamente para diferenciar o caso de tensão com

amplitude constante e tensão com amplitude aleatória. Caso o problema fosse tratado com amplitude constante, o limite de fadiga seria dado por $\Delta\sigma_D$; mas como a abordagem é com carregamento aleatório, de dados captados em pista [17] o limite de fadiga muda para $\Delta\sigma_L$.

Assim, a depender do input da tensão ($\Delta\sigma_R$) obtida por análises numéricas (simulação por método de elementos finitos - MEF), devemos utilizar cuidadosamente a referente equação, 1 ou 2, para calcular o respectivo dano ou vida de acordo com a faixa referenciada.

2.2. DNV

Similar a EUROCODE 3, utilizou-se a norma norueguesa DNV a fim de efeitos comparativos. A DNV aborda de maneira mais detalhada o caso de juntas soldadas em seções circulares, como pode ser exemplificado pela Figura 4 e 5 um caso específico.

Load type and fixity conditions	SCF equation	Eqn. no.	Short chord correction
Balanced axial load 	Chord: $\tau^{0.9} \gamma^{0.5} (0.67 - \beta^2 + 1.16\beta) \sin\theta \left(\frac{\sin\theta_{\max}}{\sin\theta_{\min}} \right)^{0.30}$ Brace: $1 + (1.97 - 1.57\beta^{0.25}) \tau^{-0.14} (\sin\theta)^{0.7} \cdot (\text{Eqn. (20)}) +$ $\frac{\sin^{1.8}(\theta_{\max} + \theta_{\min})}{C\beta^{1.5} \gamma^{0.5} \tau^{-1.22}} \cdot (0.131 - 0.084 \text{ATAN}(14\zeta + 4.2\beta))$ Where: C = 0 for gap joints C = 1 for the through brace C = 0.5 for the overlapping brace Note that τ , β , θ and the nominal stress relate to the brace under consideration ATAN is arctangent evaluated in radians	(20)	None
		(21)	None

Figura 4. Exemplo com características de um tipo de junta abordada pela norma DNV. Fonte: DNV Standard.

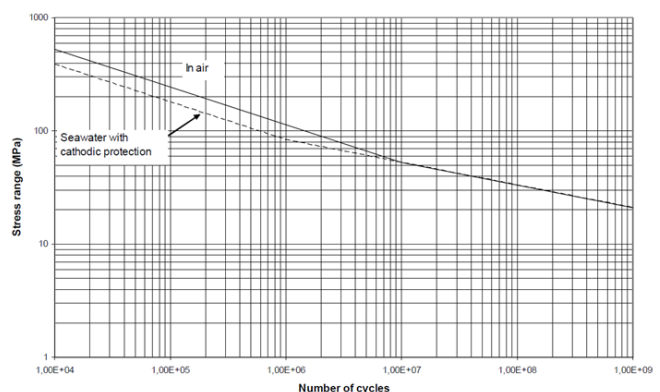


Figura 5. Curva S-n para juntas tubulares soldadas. Fonte: DNV Standard.

A norma usa de fatores concentradores de tensão (SCF) para melhor interagir com a equação principal (Equação 5) através do fator K.

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \left(\Delta \sigma_R \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right) \quad (5)$$

Outro fato é que, conforme a própria norma aborda, para espessuras menores que a espessura de referência, $t_{ref} = 32 \text{ mm}$, é aplicado a seguinte igualdade $t_{ref} = t$. Assim, como os tubos do presente estudo possuem espessura de 0.9 mm , logo:

$$\frac{t}{t_{ref}} = 1 \quad (6)$$

E conseqüentemente:

$$\left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k = 1 \quad \forall k \quad (7)$$

Além disso, conforme mostrado na Figura 5, é utilizado uma única curva de fadiga para seções tubulares, podendo variar a depender do ambiente onde está inserido o metal, em ar ou em ambiente marítimo. Para o presente estudo, usou-se a curva em ar.

Por fim, por meio da tabela exposta na Figura 6, foi possível obter os parâmetros necessários (destacados na última linha) para usar a equação principal e estimar o dano e a vida com base nos valores de tensão obtidos de simulação por elementos finitos ($\Delta \sigma_R$) usados como input.

Tabela 1. Dados informativos sobre os diferentes tipos de juntas abordadas pela norma DNV. Fonte: DNV Standard.

S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles $\log \bar{a}_2$	Fatigue limit at 10^7 cycles *)	Thickness exponent k
	m_1	$\log \bar{a}_1$			
B1	4.0	15.117	$m_2 = 5.0$ 17.146	106.97	0
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.05
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.10
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0

2.3. IIW-2259-15

Conforme retratado por [7, 11], a análise de tensões em juntas soldadas é algo minucioso e muitas pesquisas buscam compreender como estimar a máxima tensão na proximidade do cordão de solda, e uma das mais utilizadas é apresentada pela norma IIW-2259-15.

Através de uma metodologia embasada e validada, a norma aborda, conforme ilustrado pela Figura 7 e 8, uma maneira de extrapolar a tensão obtida variando a distância de medição da ponta do cordão de solda dependendo da espessura (t) do material, seja por simulações ou extensômetros, região criticamente propensa a falhas por fadiga [13, 19]. A espessura dos tubos utilizados no presente trabalho é de 1.6 mm .

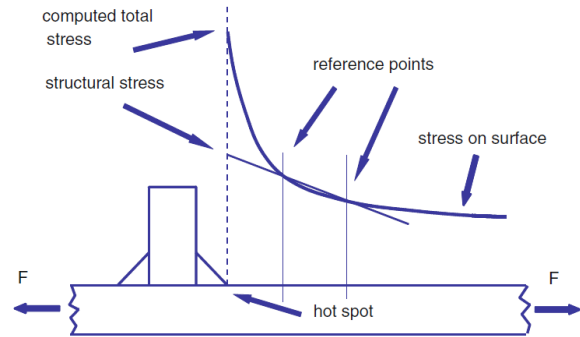


Figura 6. Caracterização do método utilizado para extrapolação de tensões em cordões de solda. Fonte: IIW-2259-15.

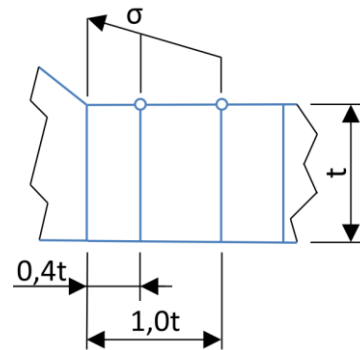


Figura 7. Metodologia especificada pela norma IIW para extrapolação em malhas refinadas. Fonte: IIW-2259-15.

Assim, conforme indicado pela norma, no presente estudo, usou-se da Equação 8 para extrapolar a tensão obtida em software de análise de elementos finitos e ter o máximo valor para utilizá-lo nas equações de dano e vida das normas EUROCODE e DNV.

$$\sigma_{HotSpot} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad (8)$$

2.4 Carregamento Dinâmico

Por meio de acelerômetros triaxiais e estudos desenvolvidos pelo próprio autor [17], foi possível utilizar de tais dados de carregamentos dinâmicos obtidos em pista para extrair os ciclos de fadiga do qual os componentes estão expostos. [4, 5, 6, 8].

O conceito central foi, através desses dados (Figura 9), realizar o procedimento de RainFlow nesses e extrair os ciclos e as referentes amplitudes (Figura 10), e, assim, relaciona-los diretamente com os resultados de tensão obtidos com o valor unitário de 1G no software HyperWorks [1,2].

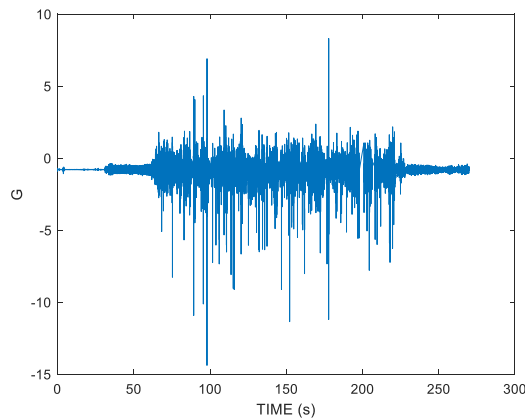


Figura 8. Carregamento dinâmico geral obtido em condição de uso severo. Fonte: Autor.

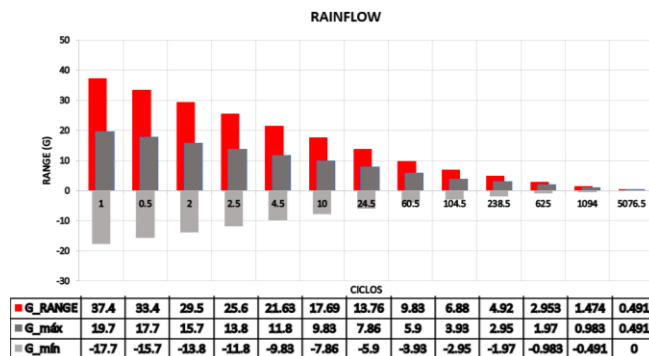


Figura 9. RainFlow realizado sobre o carregamento dinâmico geral a fim de utilizá-lo para cálculo de dano e vida pelas normas EUROCODE e DNV. Fonte: Autor.

Enfatiza-se que, conforme retratado pela Figura 10, apenas os valores de aceleração alternada ($G_{máx} - G_{mín}$) obtidos pelo RainFlow foram utilizados nesse presente estudo, haja vista a consideração de não

utilização de tensões médias para fadiga em juntas soldadas em função de sua característica de análise de falha e a caracterização das curvas pelas normas retratadas no presente estudo. [9, 10].

3. Resultados

Todos os resultados apresentados são embasados nas regiões com os maiores valores de tensões obtidos após a realização de uma simulação por elementos finitos com input de 1G.

Assumiu-se a linearidade e não plasticidade do material utilizado, haja vista o não desejo de escoamento, e assim, resultado de tensão obtido com o input de 1G é multiplicado pelo carregamento adquirido com o RainFlow, conforme ilustra as imagens abaixo.

Aplicação em Junta Crítica do Chassis:

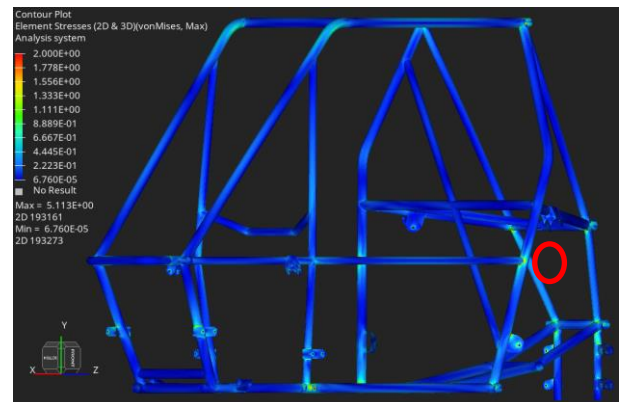


Figura 10. Simulação de tensão por elementos finitos explicitando o local crítico (círculo vermelho). Fonte: Autor.

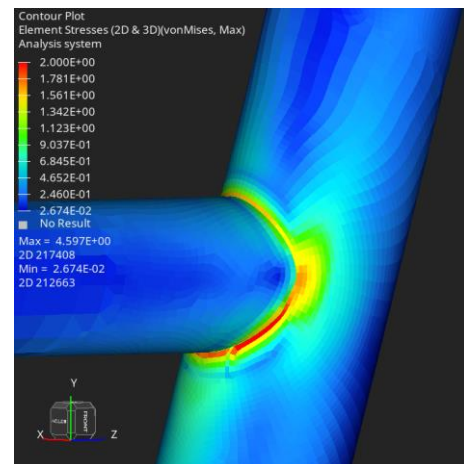


Figura 11. Valor de máxima tensão (4.597 MPa) na ponta da região soldada (utilizado para extrapolação conforme a norma IIW). Fonte: Autor.

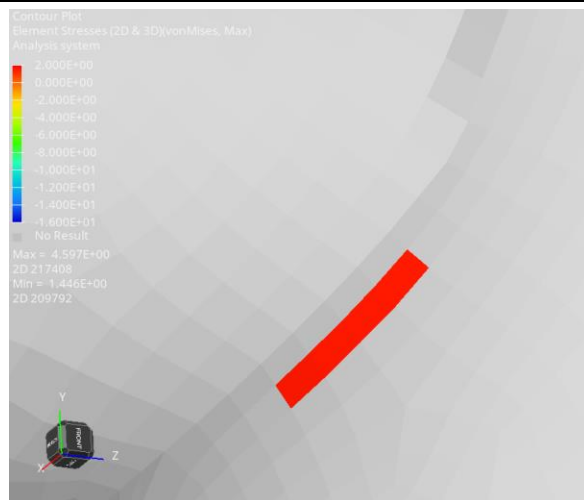


Figura 12. Valor de máxima tensão $\sigma_{0.4t}$ a distância de 0.4t (4.597 MPa) na ponta da região soldada (utilizada para extrapolação conforme a norma IIW). Fonte: Autor.



Figura 13. Valor de máxima tensão $\sigma_{1.0t}$ a distância de 1.0t (2.082 MPa) na ponta da região soldada (utilizada para extrapolação conforme a norma IIW). Fonte: Autor.

Assim, pode-se realizar os cálculos de tensão hotspot e posteriormente aplica-la nas equações para obtenção dos valores de dano e vida dessa junta especificamente, tal que:

$$\sigma_{HotSpot} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} = 6.2821 \text{ MPa}$$

A planilha de cálculos e dados não será inclusa no presente estudo em função de sua extensão, entretanto a mesma pode ser requerida ao autor caso haja interesse por parte do leitor.

A seguir, tem-se uma tabela com os valores finais de dano e vida da junta avaliada. O dado de vida foi avaliado em cima do carregamento dinâmico geral, com duração de ~3min.

Tabela 2. Tabela com valores informativos sobre dano e vida calculados pelas normas EUROCODE 3 e DNV.

Fonte: Autor.

TEMPO DE VIDA (quantas voltas aguentaria dar sem falhar) [DNV]		TEMPO DE VIDA (quantas voltas aguentaria dar sem falhar) [EUROCODE]	
14036.78993	VOLTAS	3246.622299	VOLTAS
701.8394963	TEMPO (horas)	162.3311149	TEMPO (horas)

4. Conclusões

- O foco da aplicação desse estudo foi em uma única junta de um chassis sofrendo carregamento de pista a fim de demonstrar a metodologia promissora que, junto de outros métodos de análise de integridade estrutural, como ensaio de líquido penetrante, pode-se garantir um ótimo controle de qualidade das junções soldadas, além de ser possível melhorar a confiabilidade do processo realizado.
- Comparando os valores de dano e vida obtidos através das duas normas, EUROCODE e DNV, pode-se perceber uma certa discrepância de valores; isso deve-se ao fato de que a norma norueguesa ser menos específica quando comparado a EUROCODE 3, utilizando somente uma curva S-n e fatores concentradores de tensão (SCF), os quais segundo

esta, não se aplica ao caso do presente trabalho, conforme demonstrado na seção 2.2.

- Os valores finais obtidos estão coerentes com a proposta do protótipo analisado, haja vista que veículos baixos são expostos a condições de extrema carga e, devido ao regulamento exigido pela SAE Brasil, é obrigatório a troca de chassi a cada 2 anos de uso e, conforme históricos de dados da equipe onde esse trabalho foi realizado, nenhum protótipo, dentre os mais de 10 projetados até o presente momento, nunca ultrapassou 160 horas de rodagem durante o período de 2 anos.

5. Agradecimentos

Discorre-se por meio deste trabalho os mais sinceros agradecimentos à empresa brasileira LYNX TECNOLOGIA, a qual apoia continuamente o setor de cálculo estrutural da equipe apresentada por meio do fornecimento de equipamentos de altíssima qualidade e suporte técnico.

À Equipe KomiKeto Baja que motivou tal estudo.

À todas pessoas e parentes que inspiraram o desenvolvimento desse trabalho por meio de apoio financeiro, físico e/ou emocional.

À Universidade Federal de São João del Rei.

Referências

- [1] ALTAIR. Learn Fatigue Analysis with Altair OptiStruct. [s.l.: s.n.].
- [2] ALTAIR. Practical Aspects of Finite Element Simulation - EBOOK. [s.l.: s.n.].
- [3] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. ASM handbook / 11, Failure analysis and prevention. Materials Park, Ohio: Asm International, 2008.
- [4] Batista, Marco Túlio B. (2019). Criação de um Bloco Virtual Padrão de Cargas para Avaliação de Fadiga do Veículo, Isodano com Provas Exeperimentais de Durabilidade para Chassis e Carroceria. *Repositorio.ufmg.br*. <http://hdl.handle.net/1843/32630>
- [5] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., & Lienhard, J. H. (1993). *Mechanical Measurements*. Prentice Hall.
- [6] Carneiro, G. C. (2019). Desenvolvimento de metodologia para otimização dinâmica e estrutural de suspensão veicular traseira do tipo eixo de torção. *Repositorio.ufmg.br*. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/34906>
- [7] CHANG, K.-H. et al. Fatigue finite element analysis on the effect of welding joint type on fatigue life and crack location of a tubular member. *Archive of Applied Mechanics*, v. 89, n. 5, p. 927–937, 21 jan. 2019.
- [8] Cunningham, M. (2019). Finite Element Model Validation and Testing of an Off-Road Vehicle under Dynamic Loading Conditions. *Doctoral Dissertations and Master's Theses*. <https://commons.erau.edu/edt/444/>
- [9] Det Norske Veritas (DNV): "Fatigue Design of Offshore of Steel Structures". Recommended Practice DET Norske Veritas DNV-RP-C203, April (2010)
- [10] European Committee For Standardization. (2005). Eurocode 3: design of steel structures. European Committee For Standardization.
- [11] GKATZOGIANNIS, S. Finite Element Simulation of Residual Stresses from Welding and High Frequency Hammer Peening. [s.l.] KIT Scientific Publishing, 2022.
- [12] HOBACHER, A - International Institute of Welding (IIW). IIW document IIW-2259-15 - XIII-2460-13/XV-1440-13. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Springer International Publishing, 2016.
- [13] LARA, R. S. Análise de concentração de tensões em juntas soldadas. 2016. 100p. Dissertação (Mestrado COPPE) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [14] LEE, Y.-L., Barkey, M. E., & Kang, H.-T. (2011). Metal Fatigue Analysis Handbook. Elsevier.
- [15] Lynx Tecnologia. (n.d.). [Www.lynxtec.com.br](https://www.lynxtec.com.br/). <https://www.lynxtec.com.br/>
- [16] Norton, R. L. (2011). Machine design: an integrated approach. Prentice Hall.
- [17] Pires, P. M. M., Silva, J. A. da, Campos, J. C. C., & Siqueira, A. M. de O. (2024). Structural appraisal of baja prototype using resistive strain gauges and linear potentiometer. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 10(2), 18172. <https://doi.org/10.18540/jcecol10iss2pp18172>
- [18] Technical Papers | Euro NCAP. Disponível em: <<https://www.euroncap.com/en/for-engineers/technical-papers/>>.
- [19] THÉVENET, D., GHANAMEH, M. F., ZEGHLOUL, A. Fatigue strength assessment of tubular welded joints by an alternative structural stress approach. *International Journal of Fatigue*, v. 51, p. 74-82, 2013.