

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

PNV5101 - FADIGA DE MATERIAIS ESTRUTURAIS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

PROJETO FINAL – AMPLITUDE E CARREGAMENTO VARIÁVEIS

Caroline Correa de Faria

SÃO PAULO – SP

31 DE MAIO DE 2024



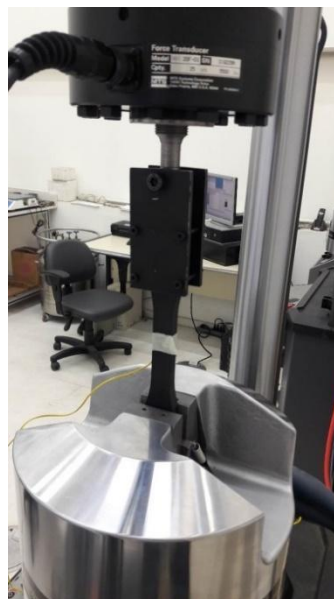
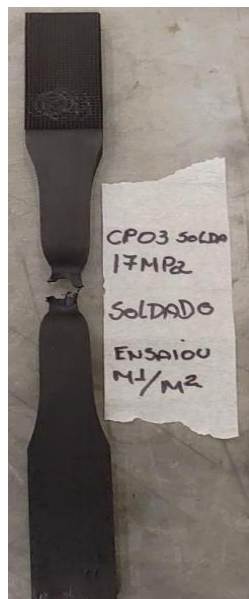
Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	2/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

Description

High-density polyethylene (HDPE) has become an excellent material option for industrial applications, such as the transportation and distribution of natural gas and water, and storage of corrosive/flammable liquids. HDPE material is characterized by a high strength-to-density ratio, good resistance to wear and chemical products, and high vibration damping as well.



Fatigue resistance curve S-N has been obtained from standard specimens following ASTM D638-14, ASTM D5592, and ASTM D7791-17 recommendations. The specimens were machined having a thickness equal to 12,7 mm, a gage length section of 57 mm, and a width, in the gage section, equal to 19 mm. The average minimum cross-sectional area is 241,3 mm². The fatigue results are reported in Table 1. Mechanical properties are shown in Table 2.





Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	3/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

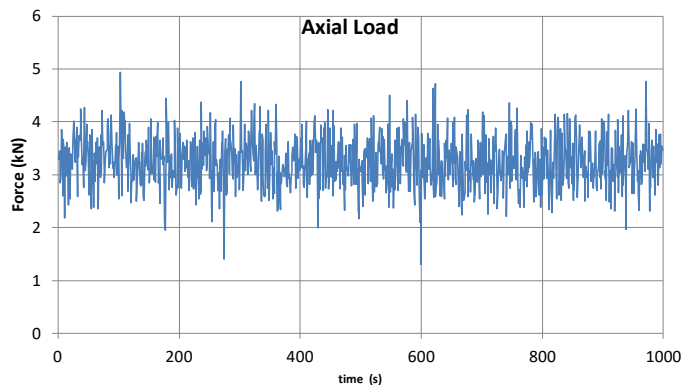
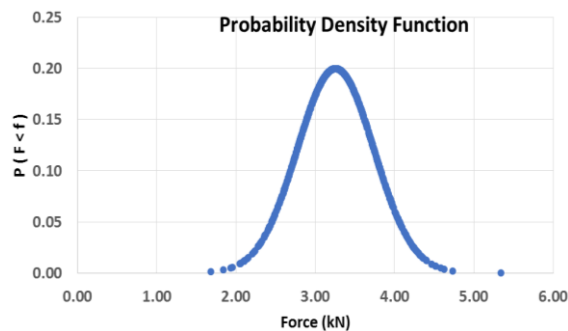
Table 1. Numerical values of N_f and σ_a for the tested specimens.

#	Max. Stress MPa	Amplitude (σ_a) MPa	Cycles
1	19,50	4,88	7,43E+03
2	19,50	4,88	6,55E+03
3	19,50	4,88	6,13E+03
4	18,25	4,56	2,73E+04
5	18,25	4,56	1,56E+04
6	18,25	4,56	1,72E+04
7	17,00	4,25	1,05E+05
8	17,00	4,25	8,78E+04
9	17,00	4,25	1,22E+05
10	14,60	3,65	1,55E+06
11	14,60	3,65	1,00E+06
12	14,60	3,65	1,04E+06

Table 2. Tensile properties of HDPE under nominal strain rate of 50 mm/min.

#	Young's Modulus MPa	Yield Stress MPa	UTS Stress MPa	Total Strain %
1	1249,8	23,2	26,8	642
2	1348,4	23,9	23,9	501,2
3	1376,6	25,3	25,2	283,3
4	1504,0	25,9	25,9	502,3
5	1284,0	23,4	23,3	465,4
Mean	1352,6	24,3	25,0	478,8

Random loads were applied to the specimen till failure. The next figures show the distribution of applied loads. The applied mean stress was 13,5 MPa and the standard deviation was 2,0 MPa following a normal distribution.





Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	4/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

Answer the following questions:

1. Obtain the fatigue S-N curve using the experimental results shown in Table 1.
2. Apply the rain-flow counting technique to obtain the mean stresses and amplitude stresses histogram with the corresponding number of cycles.
3. Estimate the number of repetitions of the block (random loads) to fail the specimen.
4. Use the Fe-Safe software to calculate the fatigue life based on the time domain.



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	5/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

1. Introdução

O polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE – *High-density polyethylene*) tem se destacado em diversas aplicações industriais, devido à sua resistência ao desgaste e produtos químicos, além de apresentar uma boa relação entre resistência e densidade.

Neste trabalho, o comportamento à fadiga desse material é investigado utilizando resultados experimentais disponibilizados. O objetivo principal é obter as vidas à fadiga por meio de métodos analíticos (utilizando a contagem *Rainflow*, o critério de Goodman e a regra de Miner) e métodos numéricos, com o uso do programa de elementos finitos ABAQUS 2020 e do *software* FE-Safe 2020.

2. Cálculo da vida à fadiga usando o método *rainflow*

2.1. Curva S-N

Neste trabalho, as amplitudes de tensão equivalentes a um carregamento com tensão média nula, σ_{ar} , foram obtidas com o Critério de Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (1)$$

em que σ_a e σ_m são a amplitude de tensão e a tensão média do carregamento (onde $R \neq 0$), em que R representa a relação entre a tensão mínima e a tensão máxima, e σ_u é a resistência última do HDPE, igual a 25,02 MPa.

Em seguida, os parâmetros de Basquin, A e B , foram calculados fazendo a regressão dos logaritmos dos pontos (amplitude de tensão equivalente, número de ciclos) – ver Tabela 1. Conforme recomendado por Dowling (2013), a regressão foi feita considerando-se a tensão como a variável independente e a vida como a variável dependente. Utilizando a ferramenta PROJ.LIN do MS Excel, foram encontrados $A = 31,2851$ MPa e $B = -0,1124$.

As tensões equivalentes, logaritmos das tensões e dos números de ciclos, e a curva S-N determinada são mostrados a seguir. Conforme pode observado na Figura 1, os pontos têm boa concordância com a curva encontrada.

Tabela 1. Amplitudes de tensão obtidas para os carregamentos com $R \neq 0$.

#	$\sigma_{m\acute{a}x}$ MPa	σ_a MPa	N Ciclos	σ_m MPa	σ_{ar} MPa	$\log N$	$\log \sigma_{ar}$
1	19,50	4,88	7,43E+03	14,62	11,74	3,87	1,07
2	19,50	4,88	6,55E+03	14,62	11,74	3,82	1,07
3	19,50	4,88	6,13E+03	14,62	11,74	3,79	1,07
4	18,25	4,56	2,73E+04	13,69	10,07	4,44	1,00
5	18,25	4,56	1,56E+04	13,69	10,07	4,19	1,00
6	18,25	4,56	1,72E+04	13,69	10,07	4,24	1,00
7	17,00	4,25	1,05E+05	12,75	8,67	5,02	0,94
8	17,00	4,25	8,78E+04	12,75	8,67	4,94	0,94
9	17,00	4,25	1,22E+05	12,75	8,67	5,09	0,94
10	14,60	3,65	1,55E+06	10,95	6,49	6,19	0,81
11	14,60	3,65	1,00E+06	10,95	6,49	6,00	0,81
12	14,60	3,65	1,04E+06	10,95	6,49	6,02	0,81

Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	6/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

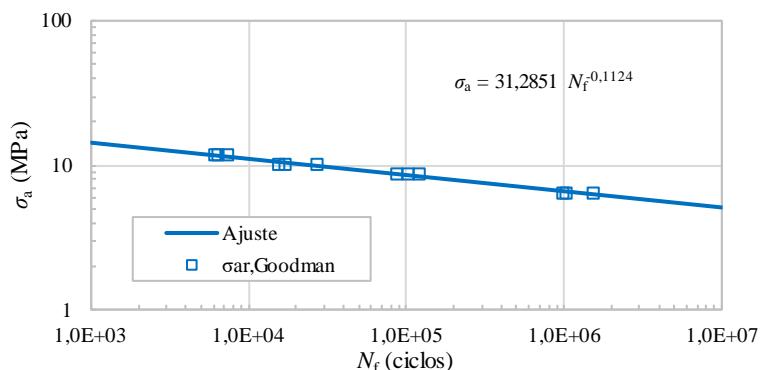


Figura 1. Curva S-N obtida para o corpo de prova fabricado com o material HDPE.

2.2. Método Rainflow

O método *Rainflow* transforma um histórico de carregamento altamente irregular em uma série de carregamentos regulares, como o ilustrado na Figura 2(a) (Dowling, 2013).

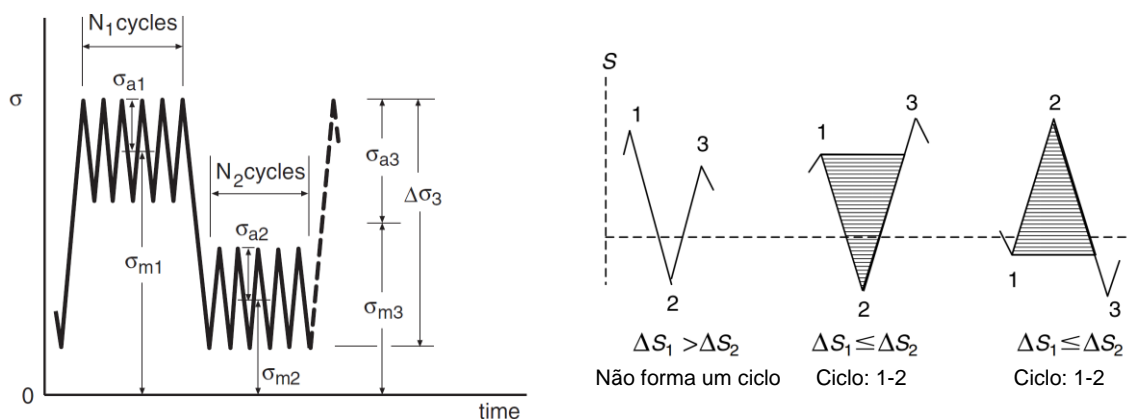


Figura 2. (a) Histórico de carregamento formado por diferentes séries regulares (Dowling, 2013). (b) Critério para a contagem de um ciclo pelo método *Rainflow* (Traduzido de Lee *et al*, 2005).

Para utilizar o método de contagem de ciclos *Rainflow*, deve-se organizar os dados do histórico de carregamento para que comecem com o maior pico ou o menor vale (o que possuir o maior valor absoluto) e de forma que se obtenham apenas picos e vales (Lee *et al*, 2005). Nesse método, três pontos consecutivos (S_1 , S_2 e S_3) são utilizados, conforme ilustrado na Figura 2(b), e um ciclo é contado apenas se o módulo do intervalo final, ΔS_2 , for maior que o módulo do intervalo inicial, ΔS_1 , em que $\Delta S_1 = |S_1 - S_2|$ e $\Delta S_2 = |S_2 - S_3|$. Caso o ciclo seja contado, os dois pontos iniciais que o formam são descartados e o processo é repetido até que todos os dados sejam analisados (Lee *et al*, 2005).

Neste trabalho, a ferramenta *Fatigue Damage Tool* (FDT, 2023), desenvolvida por Souto *et al* (2019) e que emprega o método de contagem *Rainflow*, foi utilizada para a obtenção do número de ciclos. Além da contagem dos ciclos, essa ferramenta também estima o dano utilizando as curvas S-N da norma EN1993-1-9 (Souto *et al*, 2019).

O histograma das tensões médias e amplitude de tensões com os números de ciclos correspondentes é mostrado na Figura 3. Como pode ser observado, a maioria dos ciclos possui tensão média entre 12 MPa e 15 MPa, e amplitude de tensão entre 0 e 4 MPa.



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	7/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

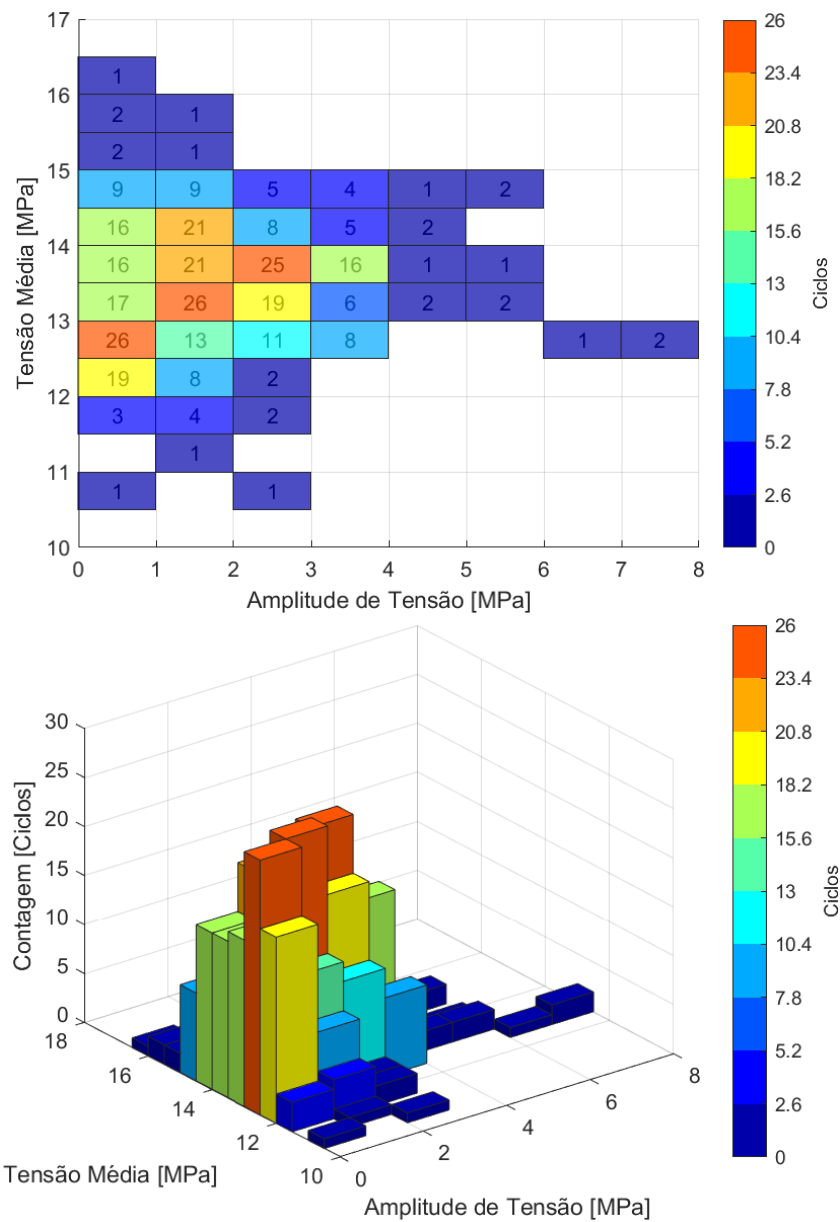


Figura 3. Histograma obtido com a ferramenta FDT de Souto *et al* (2023).

2.3. Cálculo do número de repetições utilizando a regra de Palmgren–Miner

O número de repetições de um histórico de carregamentos pode ser obtido calculando o inverso do dano, que geralmente é obtido utilizando a regra de Palmgren–Miner:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (2)$$

em que o dano acumulado D é a soma linear dos danos parciais $\frac{n_i}{N_{f,i}}$, expressos como um percentual entre o número de ciclos realizado (n_i) e o número de ciclos até a falha ($N_{f,i}$), ambos referentes à i -ésima amplitude de tensão. Conforme pode ser observado, a regra Palmgren–Miner possui algumas limitações, pois não considera a sequência de aplicação dos carregamentos. Apesar disso, a metodologia é muito utilizada em normas de projeto, devido à sua



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	8/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

simplicidade e por apresentar previsões a favor da segurança para a maioria das amplitudes de tensões e boa correlação para carregamentos aleatórios (MORSCH, 2001).

Uma ilustração da regra de Palmgren-Miner para carregamentos com $R \neq -1$ é ilustrada na Figura 4, em que B_f é o número de repetições e σ_{ar} são as amplitudes de tensão equivalentes ao carregamento com $R = -1$.

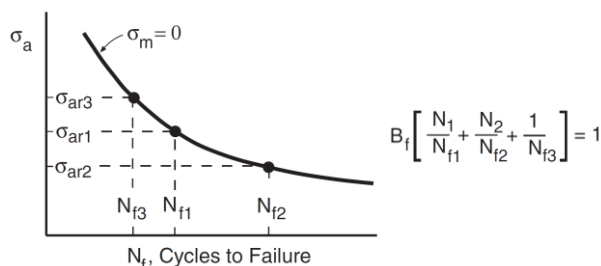


Figura 4. Acúmulo de dano conforme a regra de Palmgren-Miner (Dowling, 2013).

Conforme descrito anteriormente, a ferramenta FDT (Souto *et al*, 2023) foi utilizada para obter os números de ciclos associados aos diferentes pares de tensão média e amplitude de tensão. Utilizando essa contagem, foi feito o cálculo das amplitudes de tensão equivalentes à tensão média igual a zero utilizando o critério de Goodman. Em seguida, as vidas e os danos correspondentes foram calculados usando a curva S-N mostrada na Figura 1, e a Eq. (2), respectivamente. Os três pares mais críticos de amplitude de tensão e tensão média foram (6,98; 12,78) MPa, (7,54; 12,93) MPa e (7,17; 12,56) MPa, que somam um dano de 0,0025, conforme mostrado na Figura 5.

O dano total do histórico de carregamento foi de 0,00385. Portanto, estima-se que o número de repetições do histórico de carregamento seja $1/0,00385 = 259,83$.

Contagem	Amplitude de Tensão MPa	Tensão Média MPa	$\sigma_{ar, Goodman}$ MPa	N_i	n_i/N_i
...
1	6,98	12,78	14,28	1,07E+03	0,0009
0,5	7,54	12,93	15,61	4,85E+02	0,0010
0,5	7,17	12,56	14,39	9,98E+02	0,0005

Figura 5. Trecho da tabela desenvolvida para o cálculo do dano (as três primeiras colunas foram obtidas com a ferramenta FDT de Souto *et al*, 2023).

3. Previsão da vida à fadiga usando o ABAQUS e FE-Safe

3.1. Modelo em elementos finitos

O modelo foi desenvolvido usando o *software* ABAQUS 2020, considerando-se o Sistema de Unidades Internacional (dimensões em m, forças em N, e módulo de elasticidade em N/m², isto é, Pascal). O corpo de prova foi representado por elementos sólidos do tipo C3D8 (*8-node linear brick*), sem integração reduzida. Após um estudo de sensibilidade da malha, adotou-se uma dimensão média de malha igual a 2 mm.

O material foi definido como perfeitamente elástico, com o módulo de elasticidade igual ao valor médio experimental (1352,56 MPa) e o coeficiente de *Poisson* igual a 0,42, conforme descrito em Dowling (2013).

Para a avaliação da fadiga no regime do tempo, criou-se um passo estático.

As condições de contorno foram aplicadas na extremidade esquerda do corpo de prova. Para isso, foi feito um acoplamento entre os deslocamentos longitudinais dos nós da face e o nó central (*Coupling/UI*), sendo os



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	9/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

deslocamentos $U1$, $U2$ e $U3$ restritos nesse nó central. Adicionalmente, uma força unitária (1 N) foi aplicada na extremidade direita do corpo de prova.

A seguir é mostrado o passo a passo realizado para a construção do modelo.

a) Geometria

O desenho e a geometria de referência são mostrados nas Figuras 6 e 7, em que $W = W_c = 19$ mm, $W0 = 29$ mm, $T = 12,7$ mm, $G = 50$ mm, $L = 57$ mm, $D = 115$ mm, $LO = 246$ mm e $R = 76$ mm.

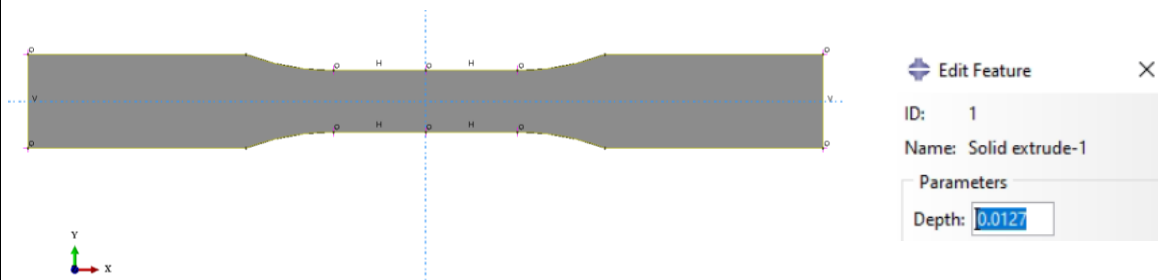


Figura 6. (a) Desenho do corpo de prova (*Part/3D/Deformable Solid*) e (b) extrusão de 0,0127 m.

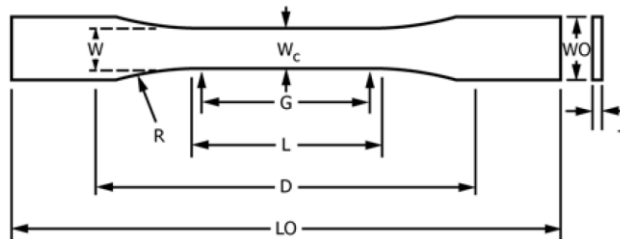


Figura 7. Geometria de referência do Tipo 3, conforme a norma ASTM D638.

b) Material e seção

A seção atribuída ao corpo de prova possui um material conforme definido na Figura 8.

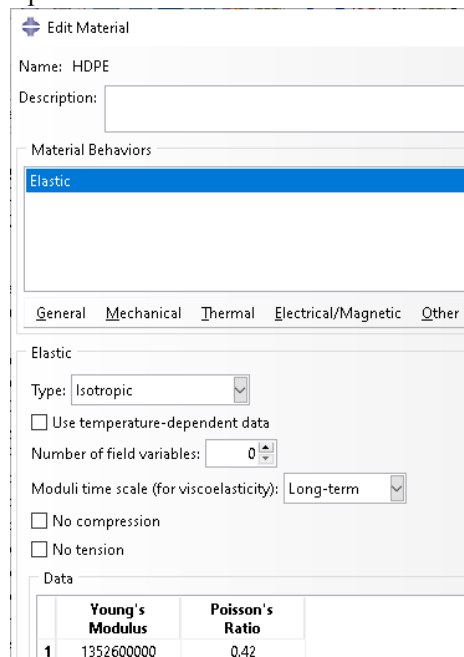


Figura 8. Definição das propriedades elásticas do material.



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	10/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

c) Malha

Para melhorar a qualidade da malha, dividiu-se o corpo de prova empregando os três planos auxiliares mostrados na Figura 9. Conforme descrito anteriormente, foram utilizados elementos sólidos C3D8 com dimensão média de 2 mm. O formato dos elementos *hex-dominated*, a técnica *Sweep* e o algoritmo *Advancing front* foram utilizados. Para validar essa malha, foi conduzido um estudo de sensibilidade variando as dimensões médias dos elementos. Esse estudo conduziu a valores de tensão praticamente iguais para as malhas investigadas (1 mm, 2 mm e 3 mm).

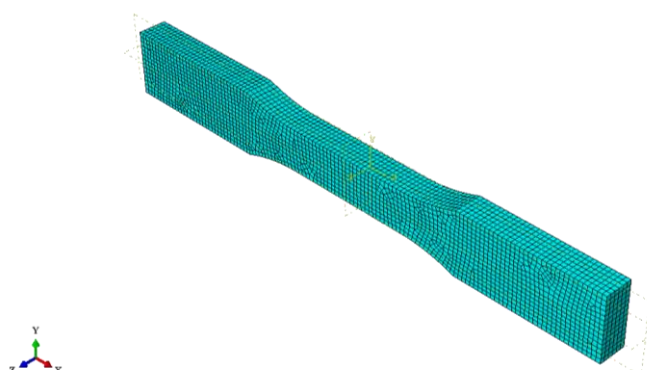


Figura 9. Malha de 2 mm.

d) Passo de carregamento e históricos solicitados

Um passo de carregamento estático foi criado e foram solicitados os resultados de força, deformação, reações, tensões e deslocamentos (Figura 10). As não linearidades geométricas não foram consideradas.

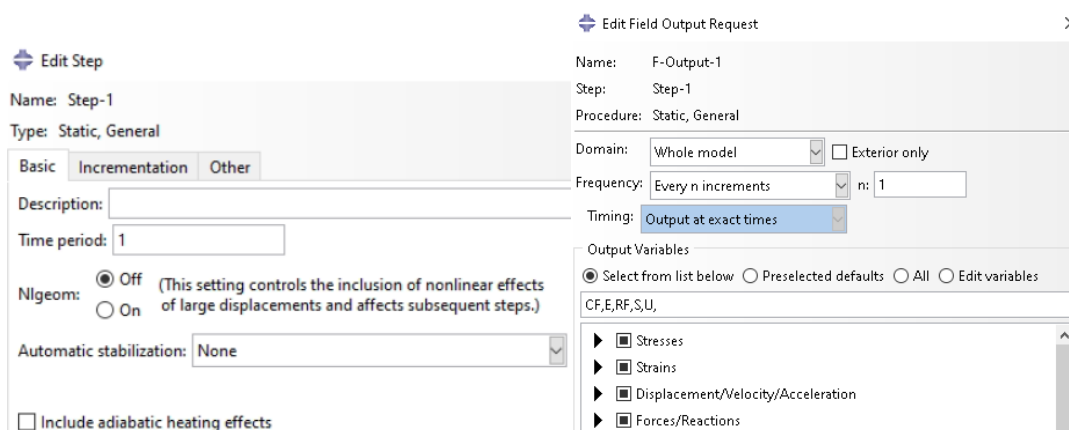




Figura 10. Definição do passo de carregamento estático e o histórico solicitado.

e) Condições de contorno e carregamentos

Para evitar a concentração de tensões, os deslocamentos longitudinais da face esquerda foram compatibilizados com o deslocamento longitudinal do nó central (Figura 11). Para isso, foi utilizada a ferramenta de *Coupling*. Em seguida, os deslocamentos do nó central foram fixados.

	Universidade de São Paulo Escola Politécnica		
Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	11/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

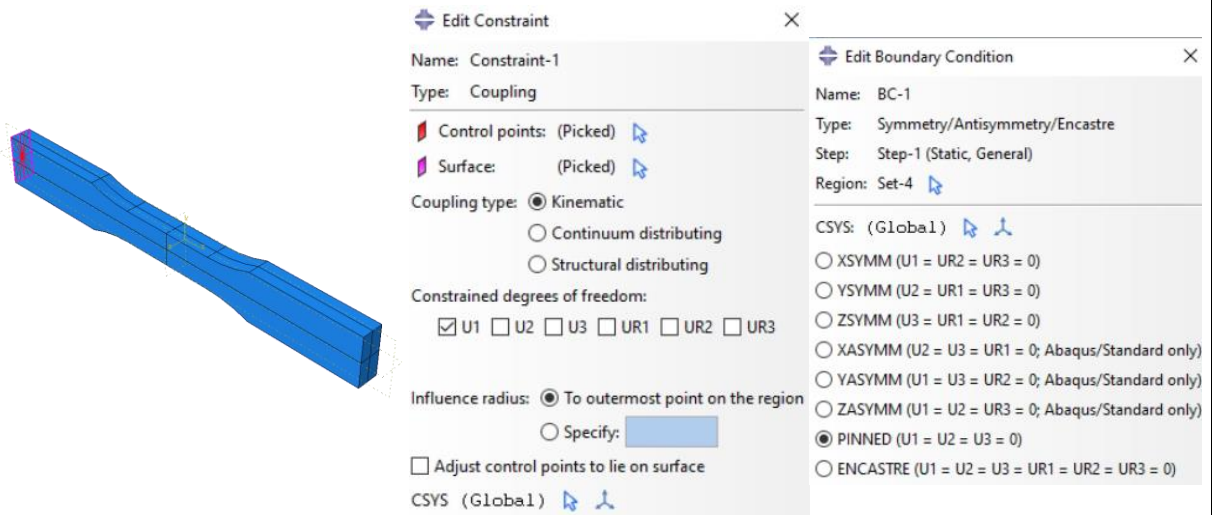


Figura 11. Acoplamento dos deslocamentos longitudinais da face esquerda e restrição dos deslocamentos do nó central.

O carregamento de tração foi aplicado na face direita do corpo de prova (Figura 12). A força resultante à pressão aplicada é igual a 1 N.

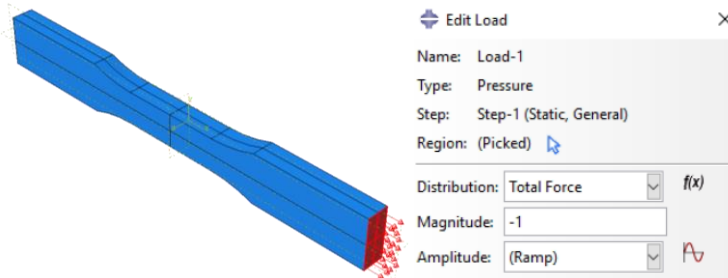




Figura 12. Aplicação do carregamento.

3.2. Avaliação dos resultados do modelo de elementos finitos

As tensões de Von Mises obtidas são mostradas na Figura 13. Os valores máximo e mínimo foram 1772 Pa e 4401 Pa, respectivamente.

	Universidade de São Paulo Escola Politécnica		
Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	12/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

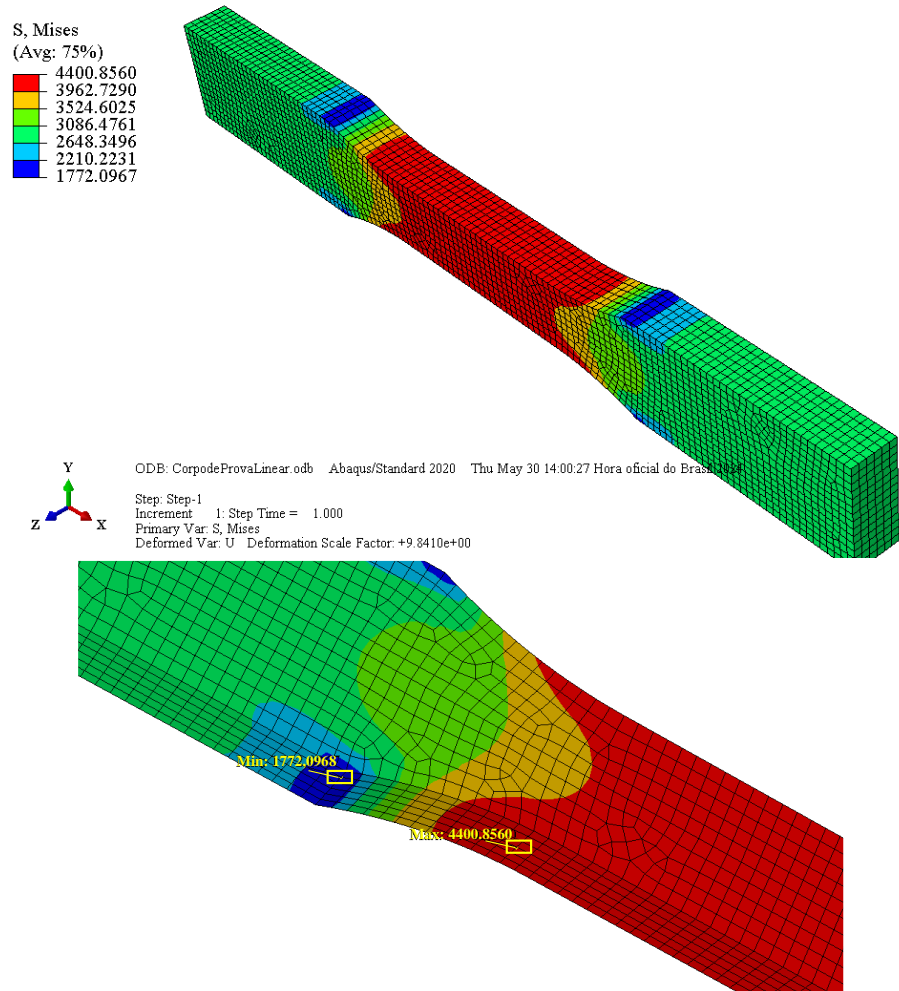


Figura 13. Tensões de Von Mises obtidas com a força unitária.

Na região central do corpo de prova, a tensão de Von Mises foi aproximadamente igual ao valor esperado, isto é, $1 \text{ N}/(0,019 \cdot 0,0127) \text{ m}^2 = 4144 \text{ N/m}^2$ (Figura 14).

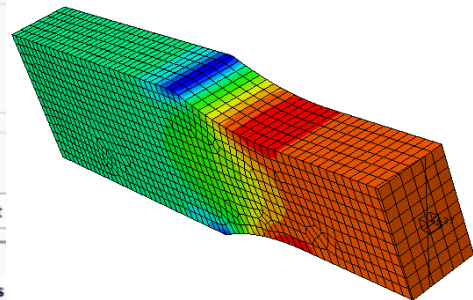
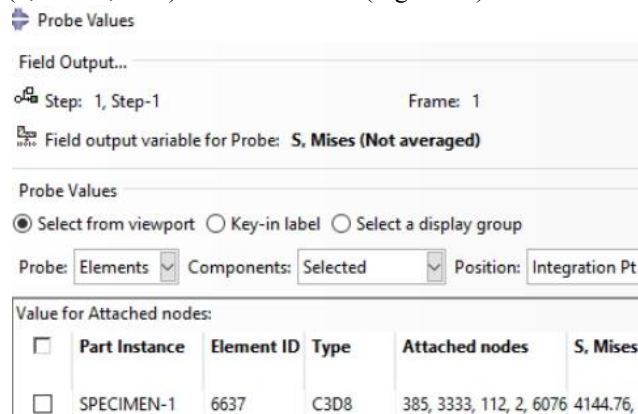


Figura 14. Tensão de Von Mises no centro do corpo de prova.

As tensões na direção da força aplicada (S11) e as tensões principais máximas foram muito próximas às tensões de Von Mises, devido ao fato de apenas um carregamento uniaxial ter sido aplicado (Figura 15).



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	13/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

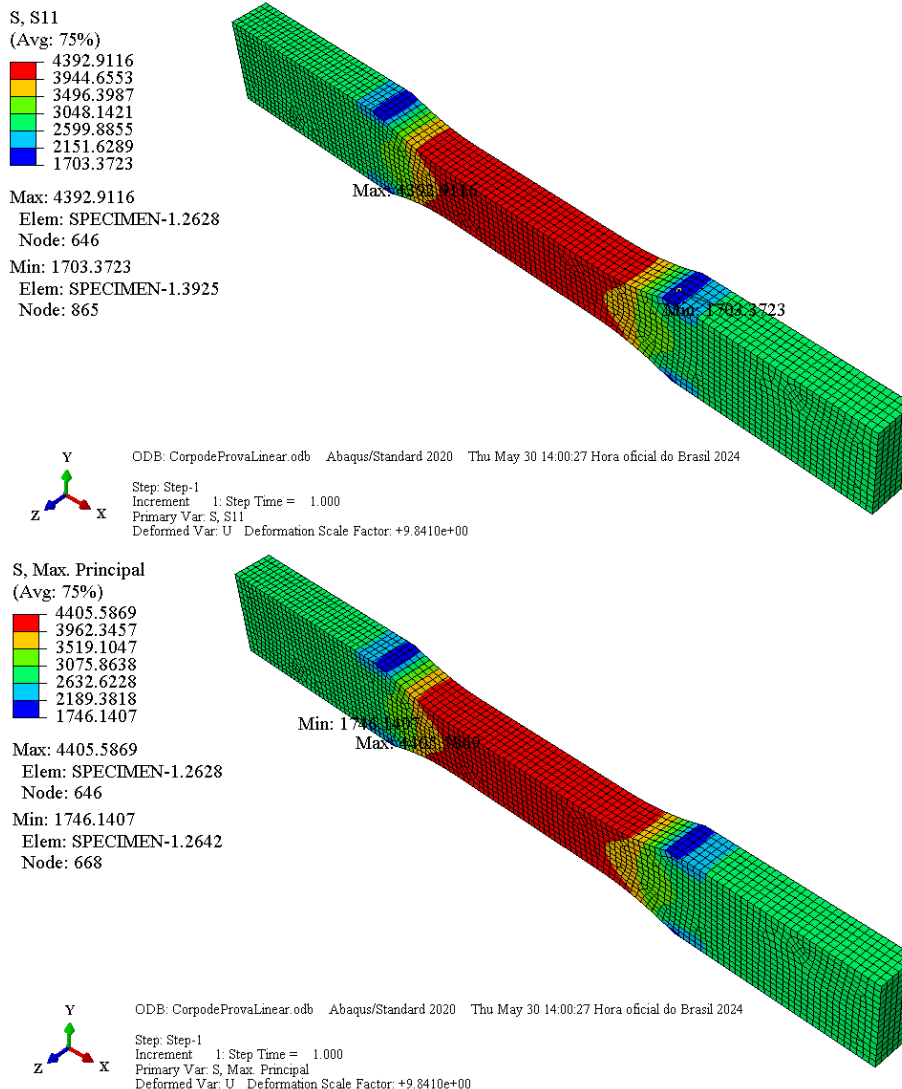


Figura 15. Tensões S11 e máxima principal, obtidas com a força unitária.

Como pode ser observado nas figuras acima, a modelagem empregada resultou em uma concentração de tensão na transição das seções (“notch”). Dividindo-se a tensão máxima pela tensão no meio do corpo de prova, obtém-se um fator aproximadamente igual a $4393/4145 = 1,06$.

Como os resultados numéricos foram coerentes, procedeu-se com a estimativa da vida à fadiga utilizando o *software* Fe-Safe.



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	14/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

3.3. Simulação no FE-Safe

O FE-Safe 2020 foi utilizado para estimar a vida à fadiga. Resumidamente, os seguintes parâmetros precisam ser definidos nesse *software*:

- Geometria e tensões obtidas a partir de um programa de elementos finitos, como o ABAQUS, ANSYS ou NASTRAN, bem como o sistema de unidades utilizado.
- Propriedades do material, dinâmicas e estáticas, como a curva S-N e a resistência última.
- Histórico de carregamento.
- Algoritmo de análise.
- Opções de análise.
- Arquivos a serem exportados.

3.3.1. Validação para carregamentos simples

Antes de prosseguir com a estimativa de vida à fadiga do corpo de prova feito com HDPE, foi feita uma validação das configurações adotadas no FE-Safe com casos de carregamento simples, que podem ser calculados de forma relativamente rápida em um programa como o MS Excel.

Para evitar os efeitos de entalhes, o corpo de prova foi simulado com a seção transversal constante (Figura 16). Os resultados obtidos fazendo o inverso do somatório dos danos de cada ciclo, n_i/N_i , são comparados aos resultados obtidos pelo FE-Safe nas Figuras 17 a 19.

Como pode ser observado, houve excelente concordância entre as vidas obtidas analiticamente com o FE-Safe. Para o caso em que o carregamento é muito superior à resistência última de 25 MPa ($R = 0$, amplitude de 40 MPa), o programa retornou a seguinte mensagem “58560 nodes with stress too high for fatigue analysis”, indicando que a análise não foi concluída com sucesso, devido ao dano elevado. Destaca-se também que não foram observadas alterações nos resultados devido à sequência do carregamento. Diante da coerência dos resultados, as configurações adotadas foram consideradas adequadas para o desenvolvimento do trabalho.

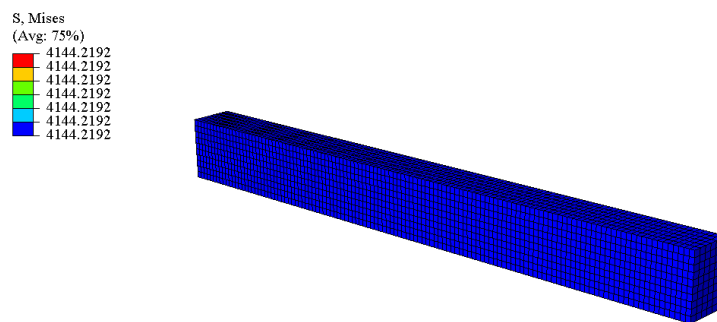


Figura 16. Tensões de Von Mises em uma barra de 246 mm x 19 mm x 12,7 mm submetida uma força de tração de 1 N.

$R = -1$	Amplitude de tensão MPa	Dano calculado para 1 ciclo $\sum n_i/N_i$	$N_{\text{calculado}}$	$N_{\text{FE-Safe}}$
	20	0,0187	53,491	53,491
	25	0,1360	7,350	7,350
	15	0,0014	691,137	691,133
	10	3,93E-05	25458,097	25457,969
	3	-	Sem dano	No damage

Figura 17. Resultados para $R = -1$.



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	15/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

$R = 0$	Amplitude de tensão MPa	Dano calculado para 1 ciclo $\sum n_i/N_i$	$N_{\text{calculado}}$	$N_{\text{FE-Safe}}$
	40	29953,388	0,000	Não rodou
	26	0,275	3,635	3,635
	20	3,68E-03	272,037	272,034
	10	6,00E-07	1.667.877,419	1.667.866,625
	1	-	Sem dano	No damage

Figura 18. Resultados para $R = 0$.

Sequência do carregamento: 3 ciclos + 3 ciclos	Número de repetições calculado	Número de repetições do FE-Safe
	14,901	14,900
	14,901	14,900

Figura 19. Resultados obtidos mudando a ordem dos carregamentos.

3.3.2. Configurações para representar o corpo de prova

Neste item são descritas as configurações utilizadas no FE-Safe, para avaliar a vida à fadiga do corpo de prova fabricado com o material HDPE.

Inicialmente, a geometria e as tensões obtidas com o ABAQUS foram importadas do arquivo “.odb”, gerado na Seção 3.2, e as unidades foram informadas como mostrado na Figura 20.

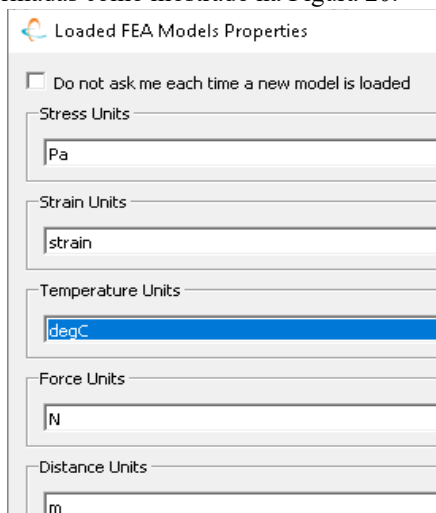




Figura 20. Definição do sistema de unidades utilizado no modelo de elementos finitos.

	Universidade de São Paulo Escola Politécnica		
Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	16/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

As propriedades do material são mostradas na Figura 21. O limite de vida à fadiga (*constant amplitude endurance limit*) foi adotado igual a $2 \cdot 10^7$ reversos. Além disso, os dois pontos *S* e *N* inseridos correspondem aos limites da curva S-N obtida na Seção 2 ($N = 1$ ciclo e $N = 10^7$ ciclos), para $R = -1$. Apenas dois pontos foram definidos, por simplicidade e porque não foram obtidos resultados diferentes em testes com mais pontos. Como pode ser observado na Figura 21, todas as propriedades sem informação foram removidas, ficando com o valor *undefined*.

Property	Value
HDPE_Trabalho_PNV5101_LSF	
gen : Algorithm	UniStressLife-Goodman
gen : Material Class	Other
gen : Materials Units	Metric - MPa, deg.C
gen : composition (%)	undefined
gen : Const Amp Endurance Limit (2nf)	2E7
gen : Default Knock-down Curve	undefined
gen : Default MSC or FRF	"C:\SIMULIA\EstProducts\2020\win_b64\Durability_resources\database\goodman.msc"
gen : E (MPa)	1352.56
gen : equivalent-specs	undefined
gen : equivalent-specs-possibles	undefined
gen : heat-treatment	undefined
gen : Hours List (s)	undefined
gen : Poissons Ratio	0.42
gen : ref-code	undefined
gen : specimen-type	undefined
gen : Temperature List (degC)	undefined
gen : UCS (MPa)	undefined
gen : UTS (MPa)	25.02
gi : SWT Life Curve Exponent	undefined
sn curve : N Values (nf)	1, 1E7
sn curve : R Ratios	-1
sn curve : S Values (MPa)	31.28506, 5.109083
tn curve : N Values (nf)	undefined

Figura 21. Propriedades do material definidas no FE-Safe.

No FE-Safe, a resposta obtida pelo ABAQUS, para o corpo de prova sujeito a uma força unitária de tração, é multiplicada por um histórico de carregamento, definido em um arquivo ou criado no próprio programa. Neste caso, o arquivo com as forças em kN foi lido e multiplicado por 1000, para manter a consistência entre as unidades (ver o fator de escala de 1000 mostrado na Figura 22).

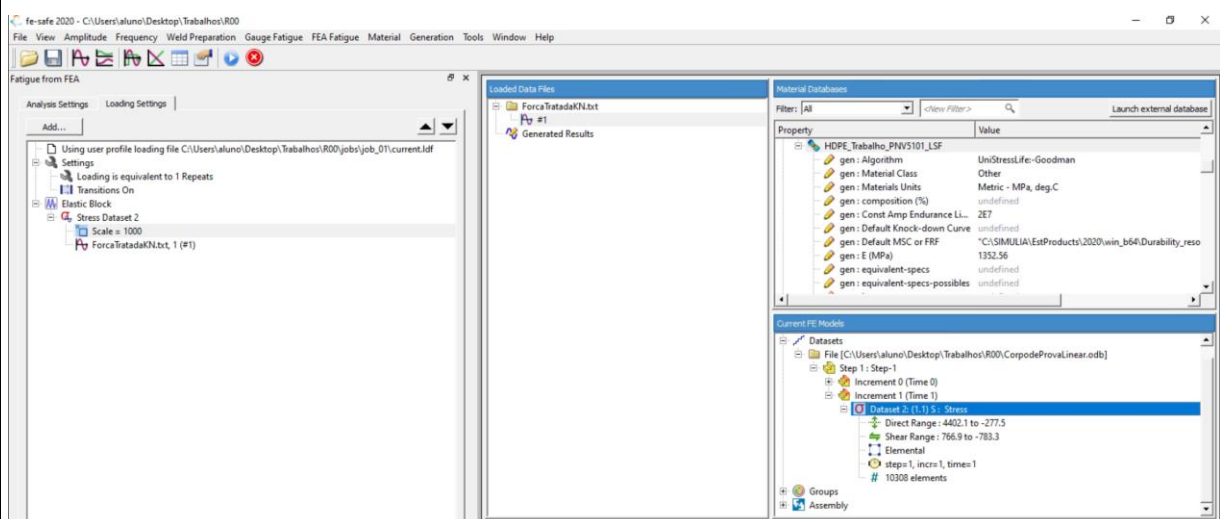
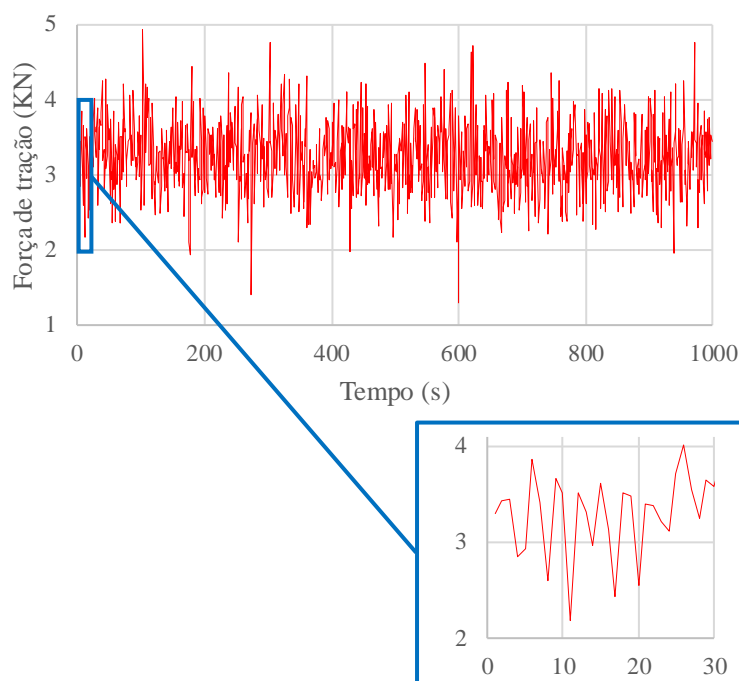


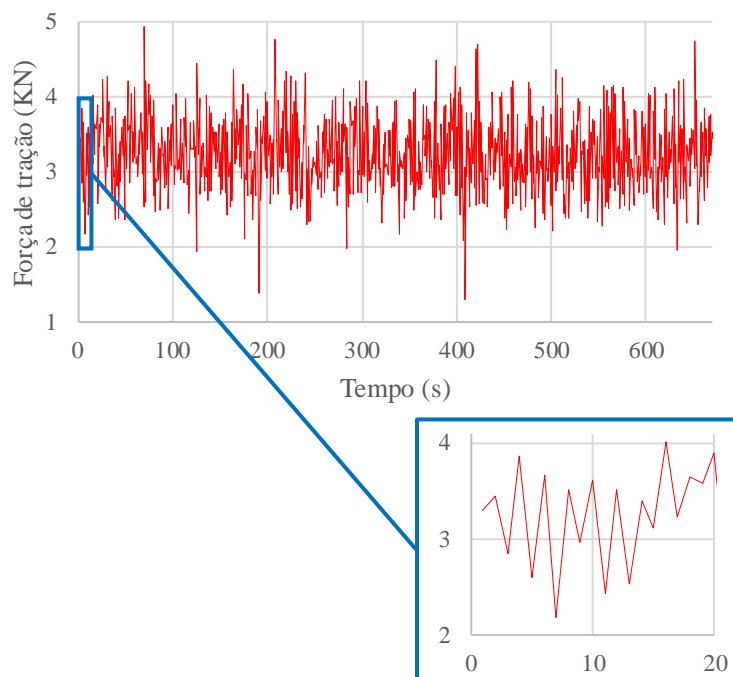
Figura 22. Tela principal do software FE-Safe mostrando as principais configurações realizadas.



Dois carregamentos foram analisados individualmente: o primeiro corresponde ao histórico de forças original; e o segundo a um histórico processado, em que foram removidos os pontos repetidos ou intermediários. Como pode ser observado na Figura 23, esse processamento reduziu o número de entradas de 999 para 671.





(a) Histórico original.



(b) Histórico processado, sem os pontos de força consecutivos repetidos e pontos intermediários.

Figura 23. Históricos de carregamento analisados.

	Universidade de São Paulo Escola Politécnica		
Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	18/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

O algoritmo de análise escolhido foi o *UniStressLife-Goodman* e o acabamento da superfície foi tomado igual a 1 (ver as configurações usadas na Figura 24).

Fatigue from FEA

Analysis Settings | Loading Settings

Group Parameters

Manage Groups...

	Subgroup	Surface Finish	Material	Algorithm	In-plane residual stress	SN Scale	Knock-Down
HDPE	Whole	Kt = 1	HDPE_Trabalho_PNV5101_LSF	UniStressLife-Goodman		1	Disabled
Default	Whole	Kt = 1	HDPE_Trabalho_PNV5101_LSF	UniStressLife-Goodman		1	Disabled

Figura 24. Definições de análise, como acabamento, material e algoritmo de análise.

Outro ponto relevante é o item *Analysis Options*, que contém as padronizações utilizadas pelo FE-Safe. Por padrão, o programa considera que as tensões iguais ou abaixo de 10 MPa provocam dano zero. Como a resistência ao escoamento do HDPE é de 24,3 MPa, observa-se que esse valor é muito elevado para esse material. Neste estudo, adotou-se o valor 0,01 MPa no campo *Near-zero stress value* (Figura 25).

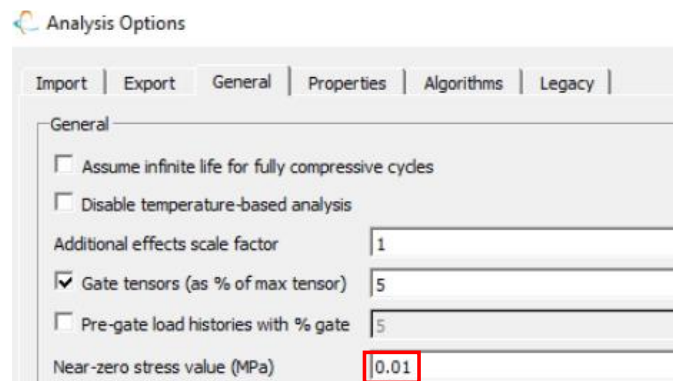


Figura 25. Alteração do parâmetro *Near-zero stress value* para 0,01 MPa.

Por último, as seguintes informações a serem exportados foram definidas: vida à fadiga, dano e a tensão máxima do carregamento (Figura 26).

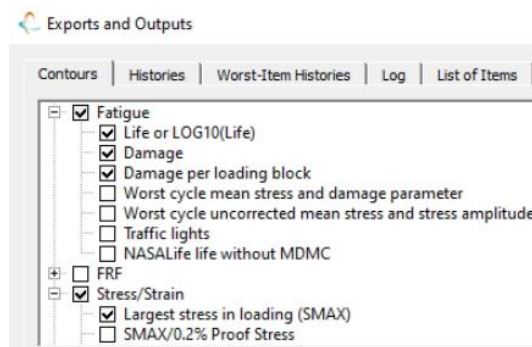


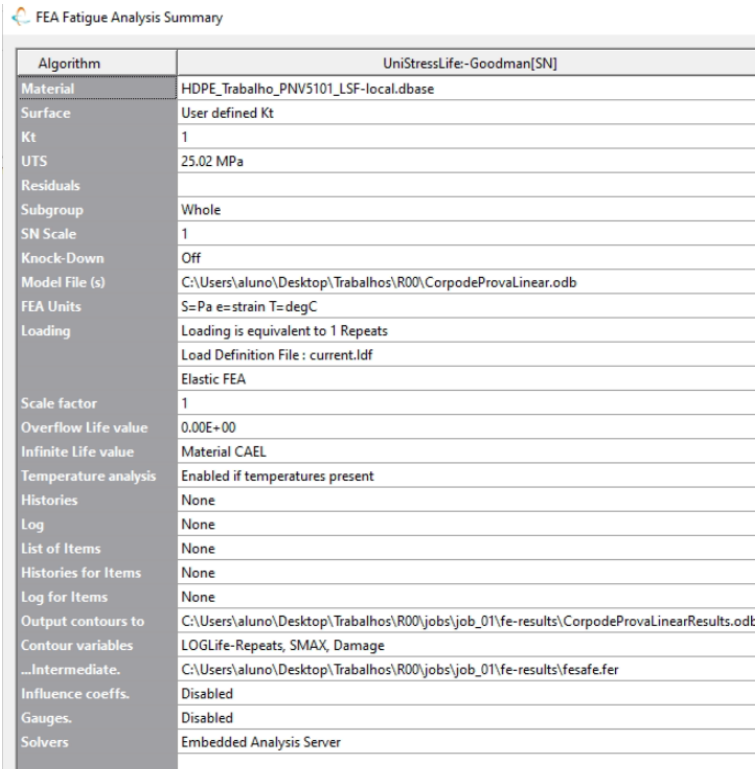


Figura 26. Itens a serem exportados pelo FE-Safe.

Um resumo das informações da análise, como o nome do modelo de entrada, saída e resistência última, é mostrado na Figura 27.

	Universidade de São Paulo Escola Politécnica		
Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	19/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

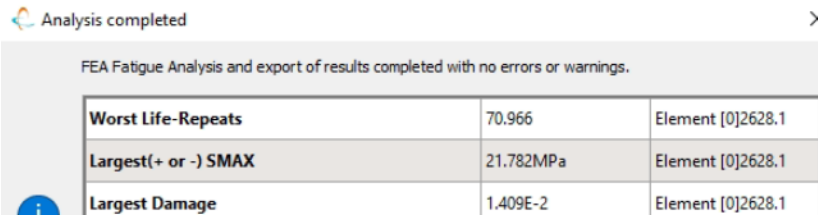


Algorithm	UniStressLife-Goodman[SN]
Material	HDPE_Trabalho_PNV5101_LSF-local.dbase
Surface	User defined Kt
Kt	1
UTS	25.02 MPa
Residuals	
Subgroup	Whole
SN Scale	1
Knock-Down	Off
Model File (s)	C:\Users\aluno\Desktop\Trabalhos\R00\CorpodeProvaLinear.odt
FEA Units	S=Pa e=strain T=degC
Loading	Loading is equivalent to 1 Repeats Load Definition File : current.Idf
Scale factor	1
Overflow Life value	0.00E+00
Infinite Life value	Material CAEL
Temperature analysis	Enabled if temperatures present
Histories	None
Log	None
List of Items	None
Histories for Items	None
Log for Items	None
Output contours to	C:\Users\aluno\Desktop\Trabalhos\R00\jobs\job_01\fe-results\CorpodeProvaLinearResults.odt
Contour variables	LOGLife-Repeats, SMAX, Damage
...Intermediate.	C:\Users\aluno\Desktop\Trabalhos\R00\jobs\job_01\fe-results\fesafe.fer
Influence coeffs.	Disabled
Gauges.	Disabled
Solvers	Embedded Analysis Server

Figura 27. Resumo das configurações da análise no FE-Safe.

3.4. Avaliação dos resultados do FE-Safe

O número de repetições crítico do histórico de carregamento foi 70,966, tanto para o modelo com o carregamento original, quanto para o processado (Figura 28). Isso comprova que o FE-Safe faz esse processamento automaticamente.



FEA Fatigue Analysis and export of results completed with no errors or warnings.		
Worst Life-Repeats	70.966	Element [0]2628.1
Largest(+ or -) SMAX	21.782MPa	Element [0]2628.1
Largest Damage	1.409E-2	Element [0]2628.1

Figura 28. Número de repetições obtido com o FE-Safe.

Analisando o modelo gerado pelo FE-Safe (Figura 29), pode-se observar que o número de repetições crítico corresponde ao ponto com maior tensão (ver a Figura 13), que ocorre em uma região de transição das seções transversais (“notch”). Considerando o fator de concentração de tensões de 1,06 obtido na Seção 3.2 e a força máxima de 4,94 kN, encontra-se $1,06 \cdot 4940 \text{ N} / 241,3 \text{ mm}^2 = 1,06 \cdot 20,47 = 21,70 \text{ MPa}$, valor próximo ao obtido pelo FE-Safe (21,76 MPa).

Observando a Figura 29, percebe-se que a tensão máxima no centro do corpo de prova é de 20,474 MPa. Além disso, o logaritmo do número de repetições é 2,378, o que equivale a $10^{2,378} = 239$ repetições, valor próximo ao obtido analiticamente (259,83 repetições).



Disciplina: PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações

Página:

20/22

Docentes: Diego Felipe Sarzosa Burgos

Aluna: Caroline Correa de Faria

NUSP:

15325699

Descrição: Final Project – Variable Amplitude/Loading

Data:

31/05/2024

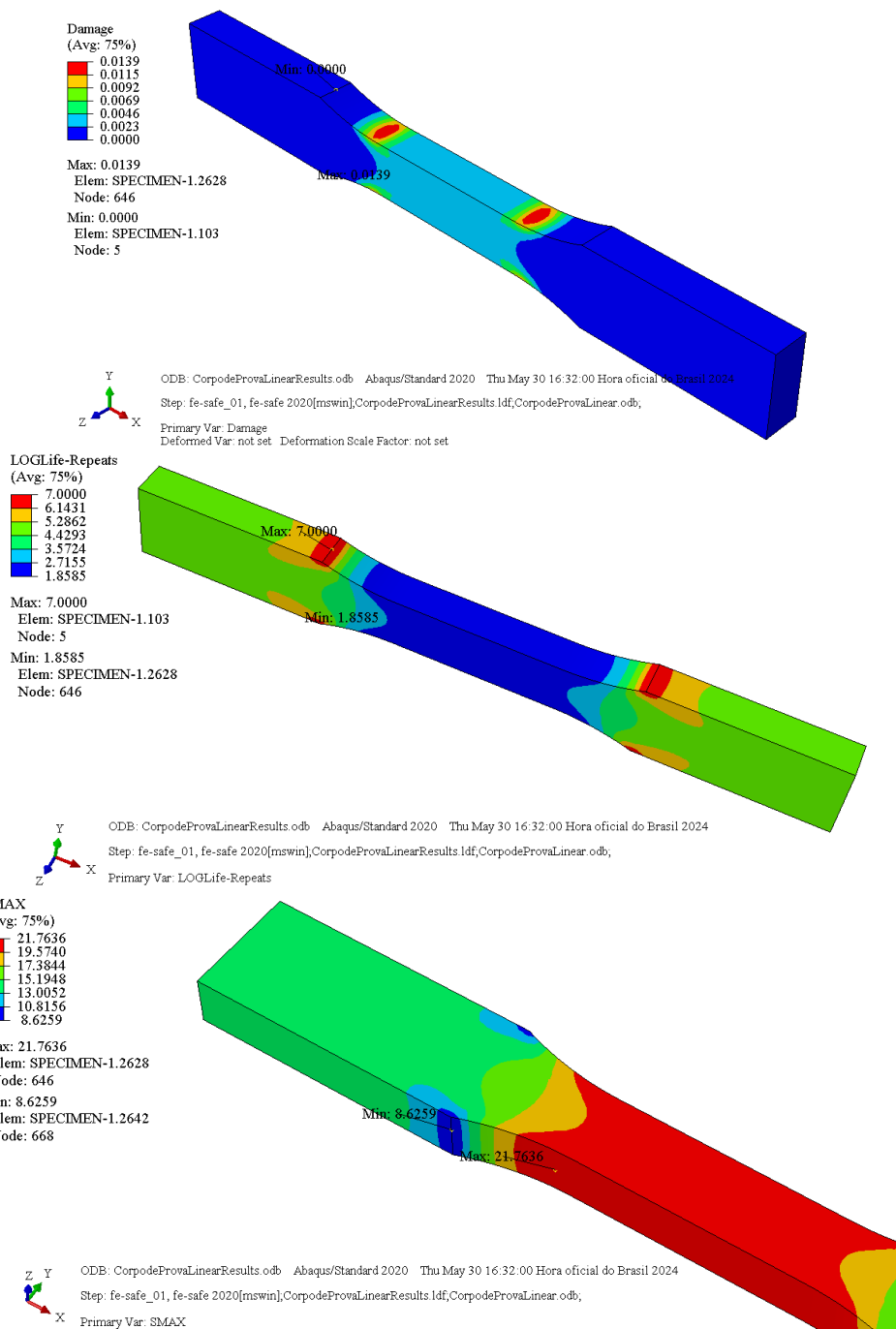




Figura 29. Dano para um histórico de carregamento, número de repetições e tensões para o carregamento máximo obtidos utilizando o FE-Safe.

	Universidade de São Paulo Escola Politécnica		
Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	21/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

Probe Values

Field Output...

Step: 2, fe-safe_01 Frame: 0

Field output variable for Probe: **LOGLife-Repeats**

Probe Values

Select from viewport Key-in label Select a display group

Probe: Elements Components: Selected Position: Element Nodal

Value for Attached nodes:

Part Instance	Element ID	Type	Attached nodes	LOGLife-Repeats
<input type="checkbox"/>	SPECIMEN-1	5366	C3D8	113, 4302, 384, 2, 2065 2.37805, 2.37795, 2.3778, 2.3779, 2.37805, 2.37794, 2.3778, 2.3779

Probe Values

Field Output...

Step: 2, fe-safe_01 Frame: 0

Field output variable for Probe: **SMAX**

Probe Values

Select from viewport Key-in label Select a display group

Probe: Elements Components: Selected Position: Element Nodal

Value for Attached nodes:

Part Instance	Element ID	Type	Attached nodes	SMAX
<input type="checkbox"/>	SPECIMEN-1	5366	C3D8	113, 4302, 384, 2, 2065 20.4735, 20.4738, 20.4741, 20.4738, 20.4735, 20.4738, 20.4741, 20.4739

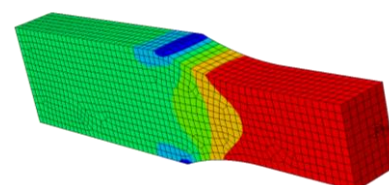
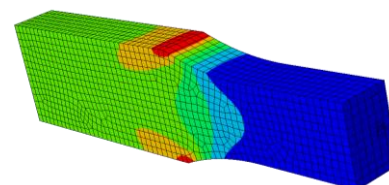


Figura 30. Número de repetições e tensões obtidos no meio do corpo de prova.

4. Conclusão

Neste trabalho, o comportamento à fadiga de um corpo de prova fabricado com o material HDPE foi investigado. Inicialmente, a curva S-N foi obtida utilizando os resultados experimentais e o critério de Goodman. Em seguida, foi feita a contagem com método *Rainflow* utilizando a ferramenta FDT (Souto *et al*, 2023). Com bases nessas informações e na curva S-N, obteve-se o dano associado a um histórico de carregamento igual a 0,00385, o que equivale a um número de repetições igual a 259,83.

O dano à fadiga também foi calculado utilizando métodos numéricos, com o auxílio dos programas ABAQUS 2020 e FE-Safe 2020. O modelo criado para representar o corpo de prova apresentou concentração de tensões nas regiões de transição de seção transversal, sendo observado um fator de concentração de tensões igual a 1,06.

Os resultados do modelo de elementos finitos foram importados no FE-Safe 2020. Conforme descrito anteriormente, várias configurações devem ser realizadas nesse *software* antes de proceder com a estimativa de vida à fadiga. Em particular, destacam-se as etapas de criação do material, definição da carga e do algoritmo de análise e configuração do item *Analysis Options*. É importante ressaltar também que a etapa de validação com casos simples foi crucial para um melhor entendimento do programa e interpretação dos resultados.

Após a etapa de validação, o *software* FE-Safe foi utilizado para prever o número de repetições do histórico de carregamento aplicado no corpo de prova. O programa resultou em um número de repetições crítico de 70,966, que ocorre no ponto de tensão máxima, na região de transição. Possivelmente, a forma de aplicação das condições de contorno levou a uma concentração de tensões no local, o que resultou em uma vida crítica muito conservadora. Ao analisar o modelo de elementos finitos resultantes, observa-se que fora da região de transição, as vidas são majoritariamente superiores: nas extremidades, onde a área é de 368,3 mm², a maior parte dos elementos possui no mínimo $10^{3,5724} = 3736$ repetições. Além disso, no centro do corpo de prova, onde a área é 241,3 mm² observou-se que o número de repetições é igual a 239, que é um valor próximo ao obtido analiticamente (Figura 30).

Portanto, em estudos futuros, sugere-se um estudo aprofundado das condições de contorno, que melhor se adequem aos resultados experimentais. Idealmente, poderia ser feita uma validação do modelo de elementos finitos com os resultados de tensão vs deformação obtidos por meio do ensaio de tração. Adicionalmente, seria interessante avaliar outros métodos para a análise da vida, como Morrow/SWT, e explorar mais os parâmetros do FE-Safe, como a forma de importação dos resultados nos pontos de integração ou nos nós dos elementos.



Disciplina:	PNV5101 - Fadiga de Materiais Estruturais: Fundamentos e Aplicações	Página:	22/22
Docentes:	Diego Felipe Sarzosa Burgos		
Aluna:	Caroline Correa de Faria	NUSP:	15325699
Descrição:	Final Project – Variable Amplitude/Loading	Data:	31/05/2024

5. Referências

American Society for Testing and Materials. D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Pennsylvania, 2014.

Dowling, N. E. *et al.* Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, 4 ed. England: Pearson, 2013.

Lee, Y. L. Fatigue testing and analysis: theory and practice. Elsevier Butterworth-Heinemann, 402 p., 2005.

Morsch, I. B. Análise estrutural de veículos comerciais tipo ônibus. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Souto, C. Fatigue Damage Accumulation (2023). Disponível em: <<https://github.com/carlos-souto/Fatigue-Damage-Accumulation>>, GitHub. Acesso em 20 de maio, 2024.

Souto, C. *et al.* Fatigue Damage Tool (FDT) - A Tool for Fatigue Damage Assessment According to Design Codes. Procedia Structural Integrity, vol. 22, Elsevier BV, 2019, p. 376–85, doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.047.