

Alumínio e suas ligas não apresentam o limite de fadiga mostrado pelo aço de baixo carbono nas curvas S-N^[20].

Na Tabela 1 pode-se observar alguns exemplos das propriedades mecânicas das ligas 7075 e 7475, de composição química semelhante à liga 7175 como mostra Tabela 2^[23].

Tabela 1: propriedades mecânicas de algumas ligas da classe 7X75^[23].

Material	7075-T6	7075-T61	7075-T65	7075-T73	7075-T7351	7475-T761
E (GPa)	71	70	72	71	71	_____
σ_{LE} (MPa)	470	_____	_____	413	382	414
σ_{LR} (MPa)	580	_____	_____	482	462	475
σ_f (MPa)	801	_____	_____	579	_____	_____
RA (%)	33	_____	_____	23	8,4	13,5
ϵ_f	_____	_____	_____	0,26	_____	_____
n	0,113	_____	_____	0,054	_____	_____
H (MPa)	913	852	646	593	695	_____
n'	0,088	0,074	0,032	0,032	0,094	0,059
H' (MPa)	913	_____	_____	510	695	675
σ'_f (MPa)	886	1231	1294	800	989	983
b	-0,076	-0,122	-0,125	-0,098	-0,140	-0,107
ϵ'_f	0,446	0,263	10,202	-0,260	6,812	4,246
c	-0,759	-0,806	-1,231	-0,730	-1,198	-1,066

Tabela 2: Composição química da ligas 7075, 7175 e 7475^[24].

Material	Elementos								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
7075	0,40	0,50	1,2-2,0	0,30	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,20	balanço
7175	0,15	0,20	1,2-2,0	0,10	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,10	balanço
7475	0,40	0,12	1,2-1,9	0,06	1,9-2,6	0,18-0,25	5,2-6,2	0,06	balanço

MATERIAIS E MÉTODOS

Em corpos-de-prova da liga de alumínio AA7175-T1, obtidos através da extrusão a quente da liga parcialmente solubilizada e envelhecida após a extrusão, cuja composição química encontra-se na Tabela 3, foram realizados ensaios de tração e de fadiga em uma máquina universal de ensaios MTS, servo-controlada e com capacidade de carga de 250kN, apresentada na Figura 21. Os ensaios de tração foram realizados com o intuito de determinar a rigidez, a resistência mecânica e a ductilidade da liga enquanto os de fadiga foram conduzidos para determinar os parâmetros de Basquin-Morrow e Coffin-Manson para carregamento cíclico.

Tabela 3: Composição química da liga AA7175-T1 em estudo.

Elemento	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Si	Al
%massa	5,13	2,32	1,40	0,18	0,02	0,09	balanço



Figura 21: Máquina universal de ensaios MTS utilizada na realização dos ensaios de tração e de fadiga de baixo ciclo, com capacidade de carga de 250kN.

Estes corpos-de-prova foram usinados, segundo ASTM E606-90, e a seguir lixados e polidos e são apresentados nas Figuras 22 e 23. O lixamento foi realizado por lixas de diversas granulações: #80, #220, #320, #400 e #600. No polimento, realizado em seguida, foi utilizado óxido de cromo de granulometria $2\mu\text{m}$. Na Tabela 4 apresenta-se a rugosidades transversal e longitudinal dos corpos-de-prova polidos, medidas segundo a norma JIS 1994, apresentando valores abaixo do exigido na norma ASTM E606-92^[25], de $0,2\mu\text{m}$.

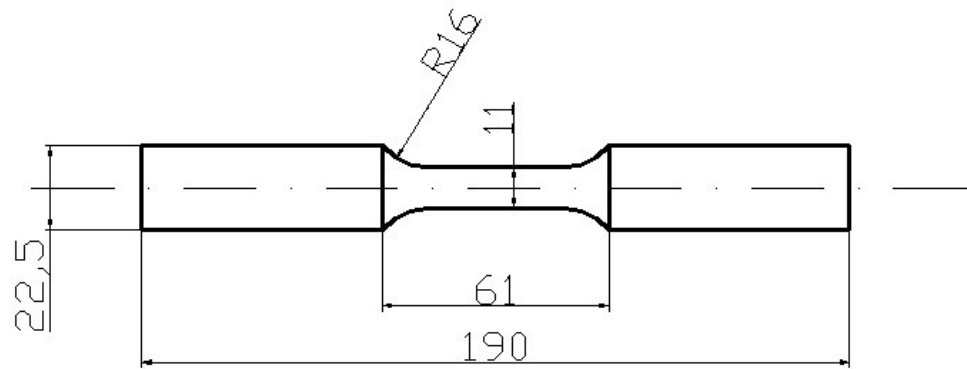


Figura 22: Desenho com as dimensões do corpo-de-prova após a usinagem.



Figura 23: apresentação ilustrativa do corpo-de-prova utilizado para a realização dos ensaios de tração e de fadiga de baixo ciclo.

Tabela 4: Rugosidade superficial dos corpos-de-prova após polimento.

Rugosidade Transversal (μm)	Rugosidade Longitudinal (μm)
$0,035 \pm 0,015$	$0,038 \pm 0,018$

Além dos ensaios monotônicos de tração, foram realizados ensaios de fadiga de baixo ciclo com deformação média nula, controlados por um extensômetro de 25 mm de

curso, como mostra Figura 24, a temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$, onde houve uma variação nas porcentagens das amplitudes de deformação impostas de 0,6 a 1,5 %, com frequência aplicada de 0,5 Hertz. Nos ensaios de fadiga de baixo ciclo realizados com deformação média de 0,5% a variação nas porcentagens das amplitudes de deformação impostas foi de 0,5 a 1,5%. Já nos ensaios de fadiga de baixo ciclo realizados com deformação média de 1,0% a variação nas porcentagens das amplitudes de deformação impostas foi de 0,7 a 1,5%; nos realizados com deformação média de 1,5% a variação nas porcentagens das amplitudes de deformação impostas foi de 0,6 a 1,0% e nos realizados com deformação média de 2,0% a porcentagem da amplitude de deformação imposta foi de 0,5 %.



Figura 24: Extensômetro com curso útil de 25 mm utilizado para controlar por deformação os ensaios de fadiga de baixo ciclo.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados dezesseis ensaios de tração nos corpos-de-prova da liga AA7175-T1, que apresentou a curva típica do ensaio monotônico de tração na Figura 25. A curva de tensão real em função da deformação plástica real encontra-se na Figura 26, de onde se obtém a equação de Tensão-Deformação Plástica Real para o trecho de deformação plástica uniforme.

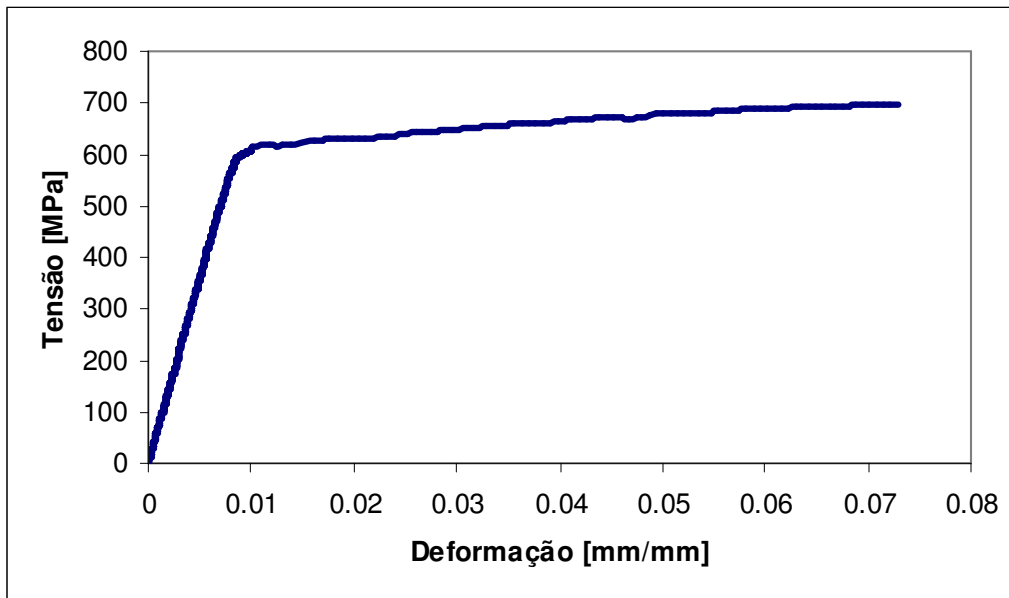


Figura 25: Curva Tensão-Deformação (σ - ϵ) típica do material estudado, AA7175-T1, obtida através dos ensaios de tração.

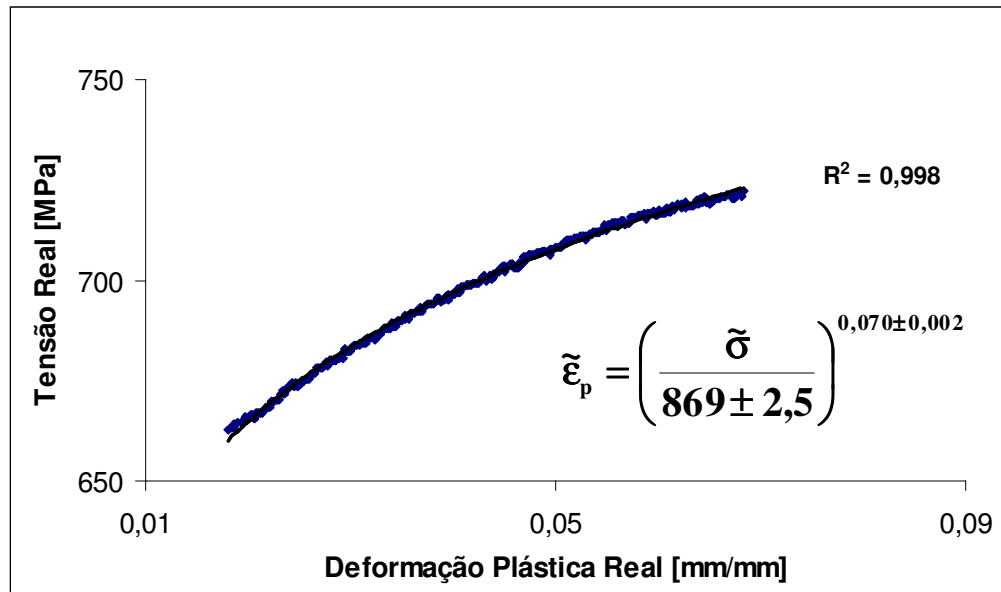


Figura 26: Curva de tensão em função da deformação plástica real uniforme monotônica, que apresenta os pontos da curva monotônica de tração entre os limites de escoamento e resistência, de onde se pode obter a equação relacionando tensão e deformação plástica real e os respectivos coeficiente de resistência (H) e expoente de encruamento (n), com seus respectivos desvios padrão.

A partir da curva acima, pode-se obter a equação de Tensão-Deformação Monotônica Real apresentando o valor do coeficiente de resistência (H) e do expoente de encruamento (n), escrita abaixo:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\tilde{\sigma}}{71000} + \left(\frac{\tilde{\sigma}}{869} \right)^{\frac{1}{0,070}} \quad (\text{eq. 31}).$$

Os ensaios apresentaram os seguintes valores médios mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades Mecânicas Monotônicas do material em estudo.

Propriedades Mecânicas	Liga AA7175-T1
Módulo de Elasticidade, E [GPa]	71±1,8
Limite de escoamento, σ_{LE} [MPa]	611±6,5
Limite de Resistência, σ_{LR} [MPa]	656±9,7
Limite de Ruptura, σ_f [MPa]	638±15
Tensão Real de Ruptura, $\bar{\sigma}_f$ [MPa]	735±4,3
Alongamento em 25 mm [%]	10±1,3
Redução de Área, RA [%]	13,2±2,5
Deformação Real de Ruptura, $\bar{\epsilon}_f$ [mm/mm]	0,142±0,025
Expoente de Encruamento, n	0,070±0,002
Coefficiente de Resistência, H	869±2,5
Deformação Real Uniforme, ϵ_u	0,058±0,008

A Figura 27 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga com deformação média nula em uma curva amplitude de deformação pelo número de ciclos até a fratura (ϵ -N), da qual foram extraídos os coeficientes de resistência (σ_f') e ductilidade à fadiga (ϵ_f') e os expoentes de Basquin (b) e Coffin (c), apresentados na equação de amplitude de deformação total em função do número de ciclos para a fratura.

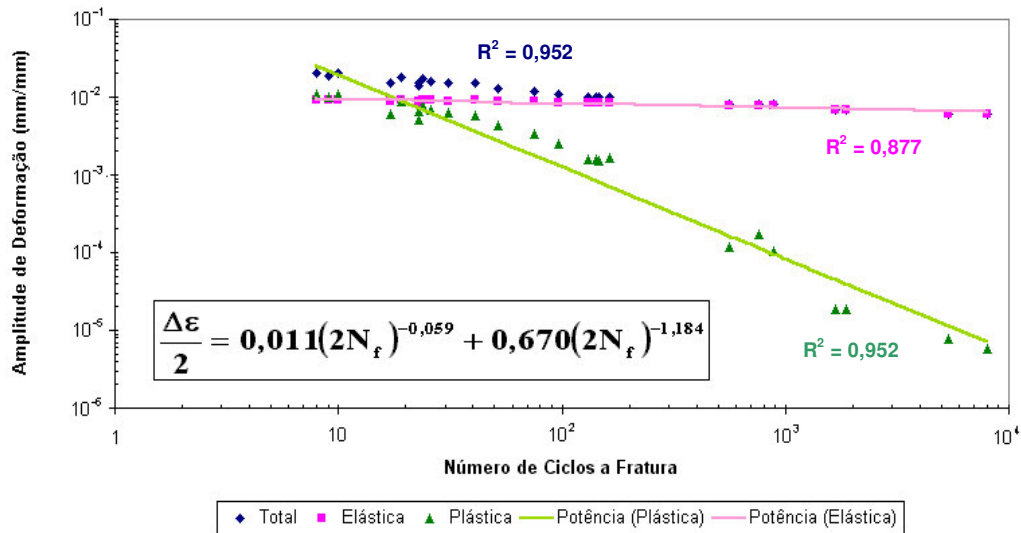


Figura 27: curva amplitude de deformação pelo número de ciclos para fratura, obtida em ensaios de fadiga de baixo ciclo com deformação média nula ($R=-1$) em corpos-de-prova polidos.

Do gráfico obteve-se a equação 32, de amplitude de deformação elástica, e a equação 33, de amplitude de deformação plástica:

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = 0,011(N_f)^{-0,059} \quad (\text{eq. 32}).$$

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = 0,295(N_f)^{-1,184} \quad (\text{eq. 33}).$$

Da soma das duas parcelas plástica e elástica obteve-se a equação a amplitude total de deformação imposta em função do número de ciclos até a fratura, conforme equação 34:

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = 0,011(2N_f)^{-0,059} + 0,670(2N_f)^{-1,184} \quad (\text{eq. 34}).$$

A partir dos ensaios de fadiga de baixo ciclo, pode-se obter a curva de Tensão-Deformação Cíclica Real para o trecho de deformação plástica uniforme, observada na Figura 28. A partir desta curva chega-se aos valores do coeficiente de resistência cíclico (H') e do expoente de encruamento cíclico (n').

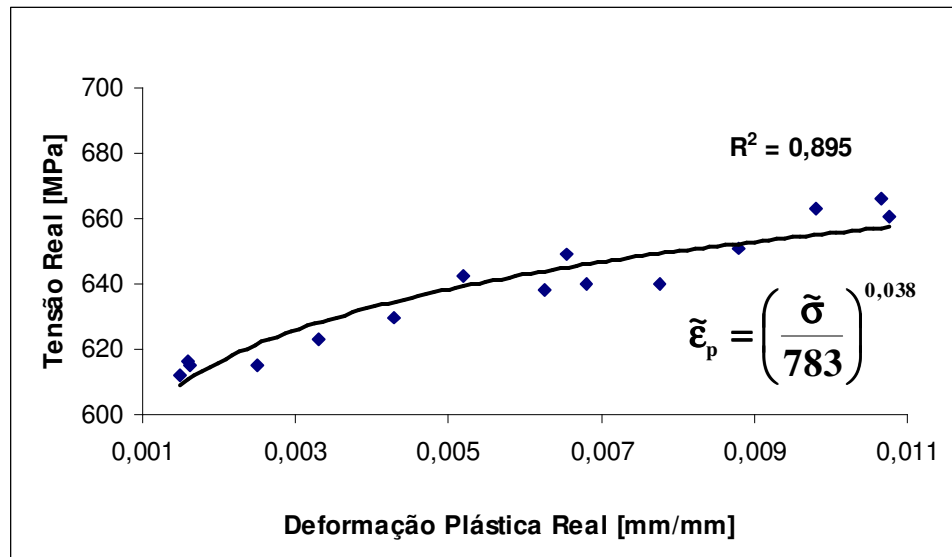


Figura 28: curva Tensão-Deformação Cíclica Real do material, obtida a partir dos pontos dos ensaios de fadiga de baixo ciclo, apresentando os valores do coeficiente de resistência H' e do expoente de encruamento n' .

A partir da curva acima, pode-se obter a equação de Tensão-Deformação Cíclica Real apresentando o valor do coeficiente de resistência cíclico (H') e do expoente de encruamento cíclico (n'), escrita abaixo:

$$\tilde{\epsilon}_a = \frac{\tilde{\sigma}_a}{71000} + \left(\frac{\tilde{\sigma}_a}{783} \right)^{\frac{1}{0,038}} \quad (\text{eq. 35})$$

onde $\tilde{\sigma}_a$ e $\tilde{\epsilon}_a$ são, respectivamente a amplitude real de tensão e de deformação.

Os dados obtidos nos ensaios de fadiga para deformação média nula estão reunidos na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades Mecânicas Cíclicas do material em estudo obtidas em $\varepsilon_m=0$:

Propriedades Mecânicas	Liga AA7175-T1
Expoente de Encruamento Cíclico, n'	0,038
Coefficiente de Resistência Cíclico, H' [MPa]	783
Coefficiente de Resistência a Fadiga, σ_f' [MPa]	814
Expoente de Basquin, b	-0,059
Coefficiente de Ductilidade a Fadiga, ε_f' [mm/mm]	0,670
Expoente de Coffin, c	-1,184

Na Figura 29 pode-se observar o comportamento cíclico do material para deformação média de 0,5% através da curva amplitude de deformação pelo número de ciclos até a fratura ε - N , da qual foram extraídos os coeficientes de resistência (σ_f') e ductilidade à fadiga (ε_f') e os expoentes de Basquin (b) e Coffin (c), apresentados na equação de amplitude de deformação total em função do número de ciclos a fratura. Do gráfico obteve-se a equação a amplitude total de deformação imposta em função do número de ciclos até a fratura, conforme mostra equação 36. A curva de Tensão-Deformação Cíclica Real para o trecho de deformação plástica uniforme é observada na Figura 30. A partir desta curva chega-se aos valores do coeficiente de resistência cíclico (H') e do expoente de encruamento cíclico (n') para deformação média de 0,5% e pode-se obter a equação 37 de Tensão-Deformação Cíclica Real. Os dados obtidos nos ensaios para deformação média de 0,5% estão reunidos na Tabela 7.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0,013(2N_f)^{-0,103} + 0,773(2N_f)^{-1,174} \quad (\text{eq. 36}).$$

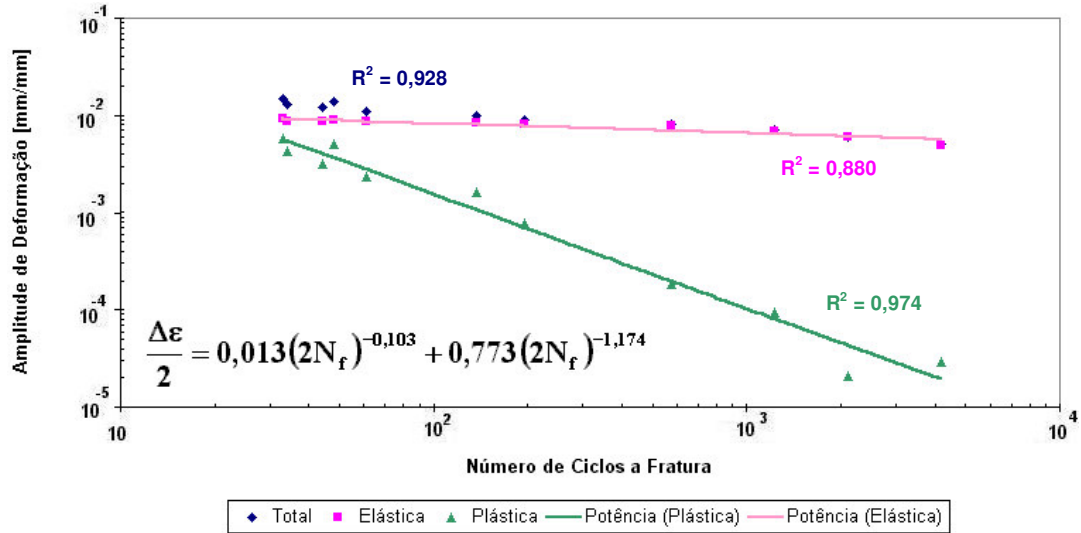


Figura 29: curva amplitude de deformação pelo número de ciclos para fratura, obtida em ensaios de fadiga de baixo ciclo com deformação média de 0,5% em corpos-de-prova polidos.

$$\tilde{\epsilon}_a = \frac{\tilde{\sigma}_a}{71000} + \left(\frac{\tilde{\sigma}_a}{774} \right)^{\frac{1}{0,036}} \quad (\text{eq. 37})$$

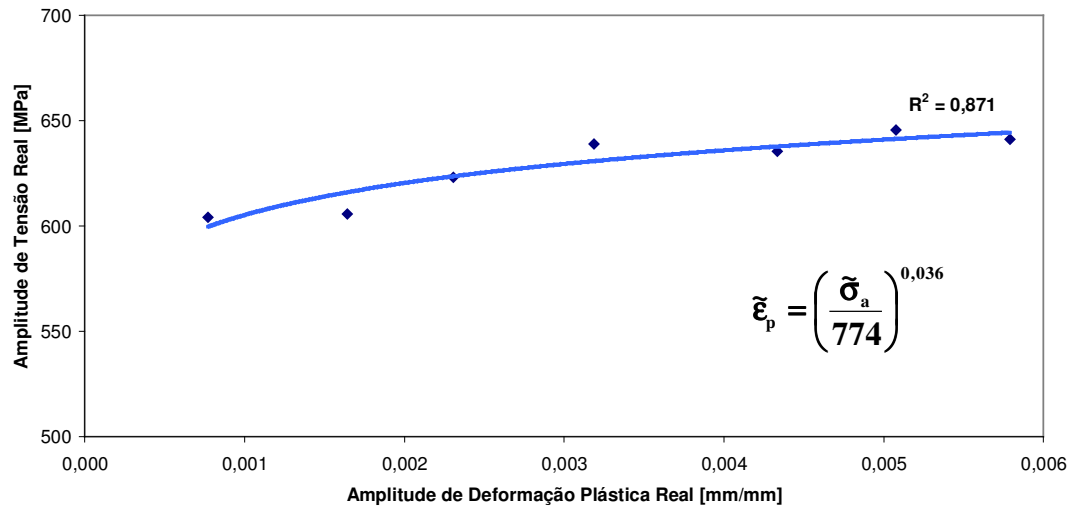


Figura 30: curva Tensão-Deformação Cíclica Real do material, obtida a partir dos pontos dos ensaios de fadiga de baixo ciclo, apresentando os valores do coeficiente de resistência H' e do expoente de encruamento n' para deformação média de 0,5%.

Tabela 7: Propriedades Mecânicas Cíclicas do material em estudo a deformação média de 0,5%:

Propriedades Mecânicas	Liga AA7175-T1
Expoente de Encruamento Cíclico, n'	0,036
Coeficiente de Resistência Cíclico, H' [MPa]	774
Coeficiente de Resistência a Fadiga, σ_f' [MPa]	1014
Expoente de Basquin, b	-0,103
Coeficiente de Ductilidade a Fadiga, ϵ_f' [mm/mm]	0,773
Expoente de Coffin, c	-1,174

Na Figura 31 pode-se observar o comportamento cíclico do material para deformação média de 1,0% através da curva amplitude de deformação pelo número de ciclos até a fratura ϵ - N , da qual foram extraídos os coeficientes de resistência (σ_f') e ductilidade à fadiga (ϵ_f') e os expoentes de Basquin (b) e Coffin (c), apresentados na equação de

amplitude de deformação total em função do número de ciclos a fratura. Do gráfico obteve-se a equação a amplitude total de deformação imposta em função do número de ciclos até a fratura, conforme mostra equação 38. A curva de Tensão-Deformação Cíclica Real para o trecho de deformação plástica uniforme é observada na Figura 32. A partir desta curva chega-se aos valores do coeficiente de resistência cíclico (H') e do expoente de encruamento cíclico (n') para deformação média de 1,0% e pode-se obter a equação 39 de Tensão-Deformação Cíclica Real. Os dados obtidos nos ensaios para deformação média de 1,0% estão reunidos na Tabela 8.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = 0,012(2N_f)^{-0,065} + 1,103(2N_f)^{-1,213} \quad (\text{eq. 38}).$$

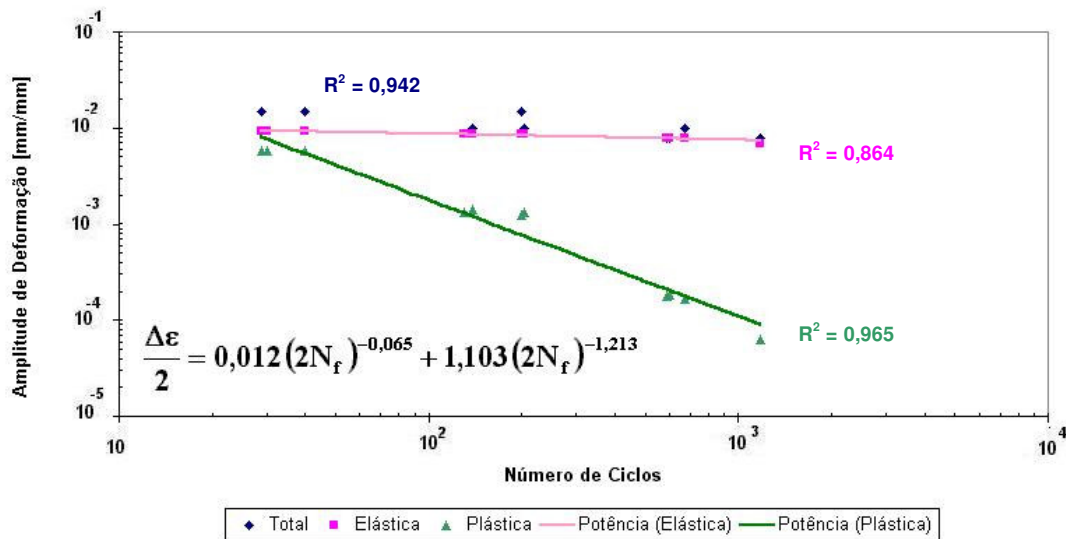


Figura 31: curva amplitude de deformação pelo número de ciclos para fratura, obtida em ensaios de fadiga de baixo ciclo com deformação média de 1,0% em corpos-de-prova polidos.

$$\tilde{\epsilon}_a = \frac{\tilde{\sigma}_a}{71000} + \left(\frac{\tilde{\sigma}_a}{752} \right)^{0,032} \quad (\text{eq. 39}).$$

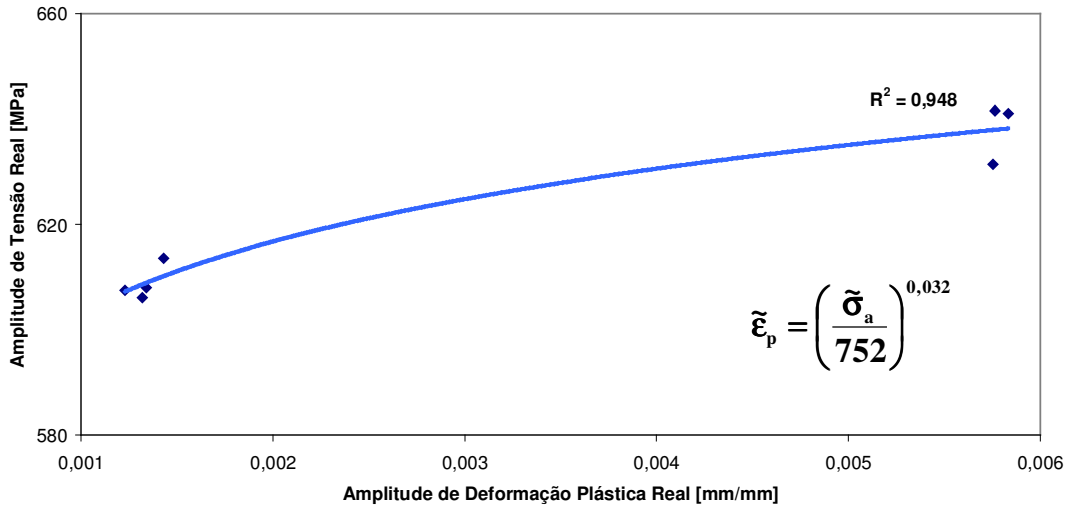


Figura 32: curva Tensão-Deformação Cíclica Real do material, obtida a partir dos pontos dos ensaios de fadiga de baixo ciclo, apresentando os valores do coeficiente de resistência H' e do expoente de encruamento n' para deformação média de 1,0%.

Tabela 8: Propriedades Mecânicas Cíclicas do material em estudo a deformação média de 1,0%:

Propriedades Mecânicas	Liga AA7175-T1
Expoente de Encruamento Cíclico, n'	0,032
Coeficiente de Resistência Cíclico, H' [MPa]	752
Coeficiente de Resistência a Fadiga, σ_f' [MPa]	869
Expoente de Basquin, b	-0,065
Coeficiente de Ductilidade a Fadiga, ϵ_f' [mm/mm]	1,103
Expoente de Coffin, c	-1,213

Na Figura 33 pode-se observar o comportamento cíclico do material para deformação média de 1,5% através da curva amplitude de deformação pelo número de ciclos até a fratura ϵ - N , da qual foram extraídos os coeficientes de resistência (σ_f') e ductilidade

à fadiga (ϵ'_f) e os expoentes de Basquin (b) e Coffin (c), apresentados na equação de amplitude de deformação total em função do número de ciclos a fratura. Do gráfico obteve-se a equação a amplitude total de deformação imposta em função do número de ciclos até a fratura, conforme mostra equação 40. A curva de Tensão-Deformação Cíclica Real para o trecho de deformação plástica uniforme é observada na Figura 34. A partir desta curva chega-se aos valores do coeficiente de resistência cíclico (H') e do expoente de encruamento cíclico (n') para deformação média de 1,5% e pode-se obter a equação 41 de Tensão-Deformação Cíclica Real. Os dados obtidos nos ensaios para deformação média de 1,5% estão reunidos na Tabela 9.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 0,018(2N_f)^{-0,137} + 1,537(2N_f)^{-1,260} \quad (\text{eq. 40}).$$

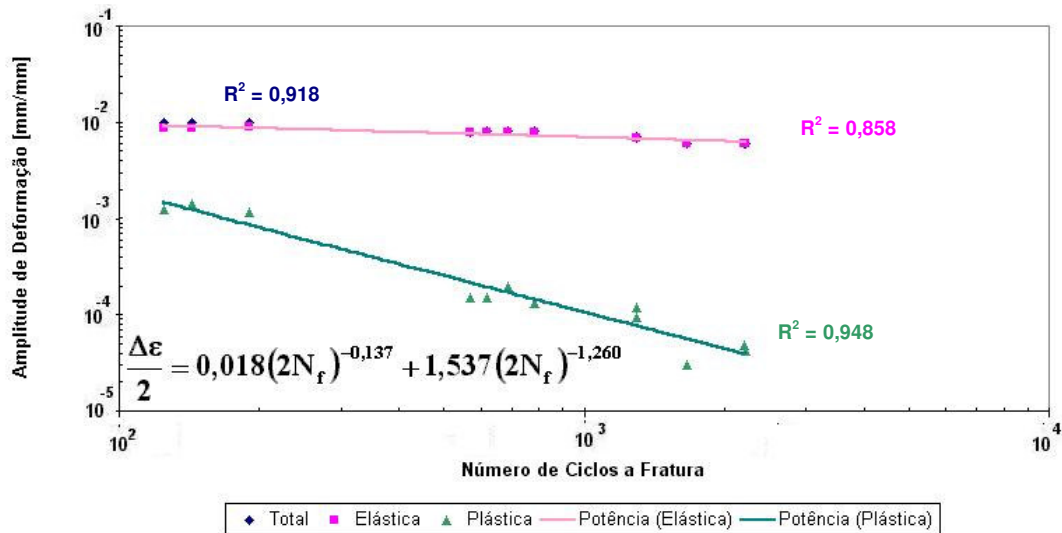


Figura 33: curva amplitude de deformação pelo número de ciclos para fratura, obtida em ensaios de fadiga de baixo ciclo com deformação média de 1,5% em corpos-de-prova polidos.

$$\tilde{\epsilon}_a = \frac{\tilde{\sigma}_a}{71000} + \left(\frac{\tilde{\sigma}_a}{734} \right)^{0,032} \quad (\text{eq. 41}).$$

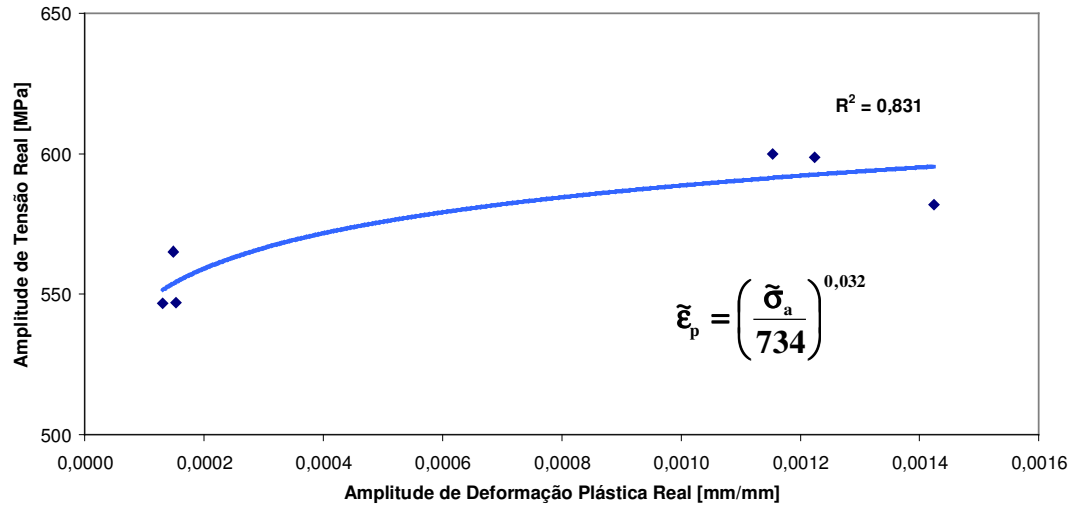


Figura 34: curva Tensão-Deformação Cíclica Real do material, obtida a partir dos pontos dos ensaios de fadiga de baixo ciclo, apresentando os valores do coeficiente de resistência \underline{H} e do expoente de encruamento \underline{n} para deformação média de 1,5%.

Tabela 9: Propriedades Mecânicas Cíclicas do material em estudo a deformação média de 1,5%:

Propriedades Mecânicas	Liga AA7175-T1
Expoente de Encruamento Cíclico, n'	0,032
Coeficiente de Resistência Cíclico, H' [MPa]	734
Coeficiente de Resistência a Fadiga, σ_f [MPa]	1398
Expoente de Basquin, b	-0,137
Coeficiente de Ductilidade a Fadiga, ϵ_f [mm/mm]	1,537
Expoente de Coffin, c	-1,260

Na Figura 35 pode-se observar o comportamento cíclico do material para deformação média de 2,0% através da curva amplitude de deformação pelo número de ciclos até a fratura ϵ -N, da qual foram extraídos os coeficientes de resistência (σ_f') e ductilidade

à fadiga (ϵ_f') e os expoentes de Basquin (b) e Coffin (c), apresentados na equação de amplitude de deformação total em função do número de ciclos a fratura. Do gráfico obteve-se a equação a amplitude total de deformação imposta em função do número de ciclos até a fratura, conforme mostra equação 42; os dados obtidos nos ensaios estão reunidos na Tabela 10.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 0,005(2N_f)^{-0,006} + 0,006(2N_f)^{-0,726} \quad (\text{eq. 42}).$$

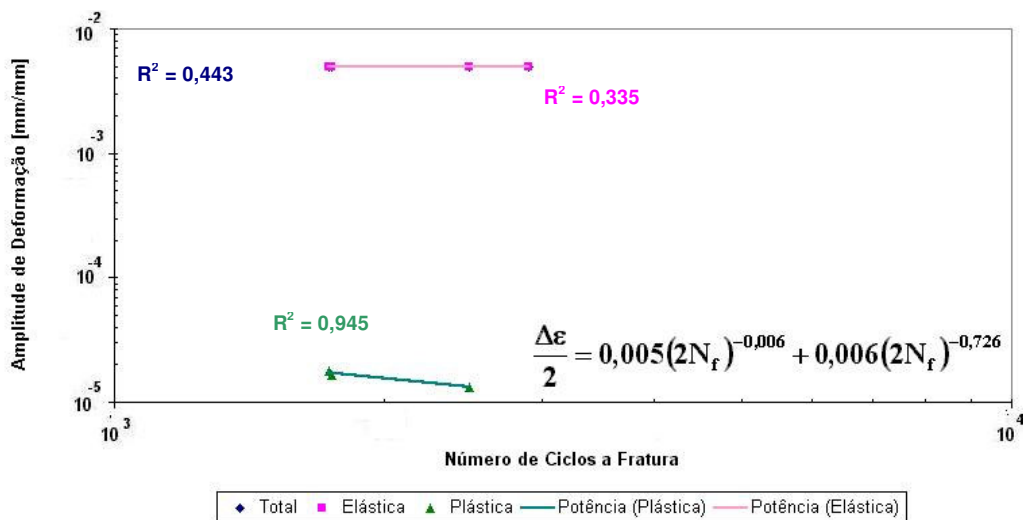


Figura 35: curva amplitude de deformação pelo número de ciclos para fratura, obtida em ensaios de fadiga de baixo ciclo com deformação média de 2,0% em corpos-de-prova polidos.

Devido ao pequeno número de dados, não foram obtidos os valores do coeficiente de resistência \underline{H}' e do expoente de encruamento \underline{n}' para deformação média de 2%.

Tabela 10: Propriedades Mecânicas Cíclicas do material em estudo a deformação média de 2,0%:

Propriedades Mecânicas	Liga AA7175-T1
Coeficiente de Resistência a Fadiga, σ'_f [MPa]	371
Expoente de Basquin, b	-0,006
Coeficiente de Ductilidade a Fadiga, ϵ'_f [mm/mm]	0,006
Expoente de Coffin, c	-1,726

DISCUSSÃO

A partir das Eq. (31 e 35), pode-se obter o gráfico Tensão Real – Deformação Real Uniforme, que demonstra que o material em estudo apresenta comportamento misto, conforme Figuras 36 e 37. Entre os valores de deformação 0,007 e 0,045 mm/mm o material sofre endurecimento cíclico, a partir de 0,045 mm/mm (aproximadamente o valor de deformação real correspondente ao limite de resistência) o material sofre amolecimento cíclico, caracterizando o comportamento misto do material em estudo.

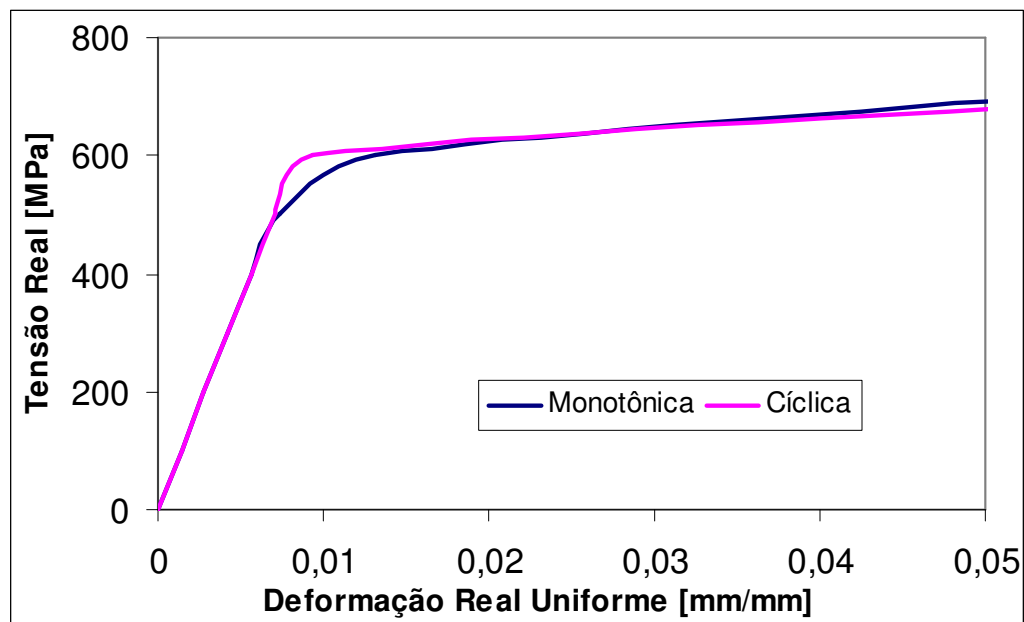


Figura 36: curva Tensão – Deformação a partir das equações 29 e 33, que demonstram o comportamento misto do material em estudo.

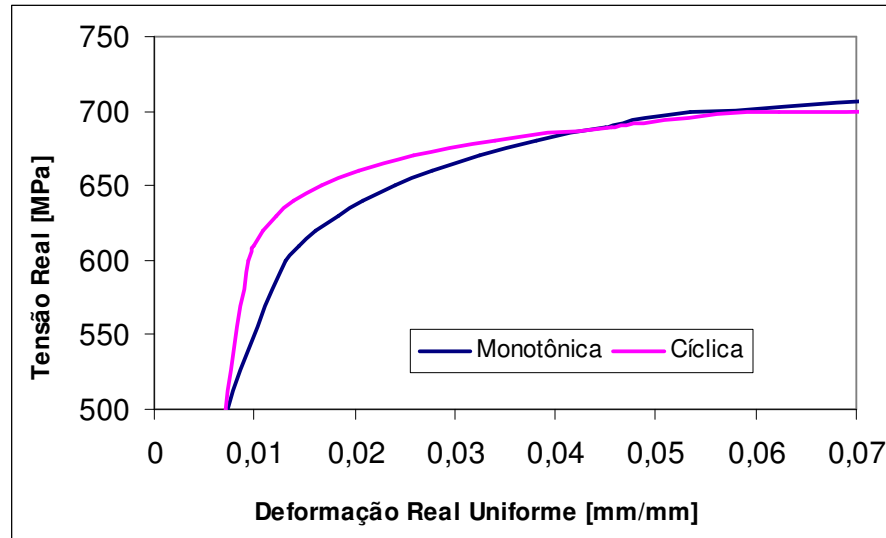


Figura 37: curva Tensão – Deformação no trecho específico que demonstra o comportamento misto.

Os valores encontrados para o coeficiente de resistência a fadiga (σ'_f) para o ensaio de deformação média nula e a tensão real de ruptura ($\tilde{\sigma}_f$) são diferentes, de acordo com a Tabela 11. Portanto para o material em estudo não se pode considerar os valores do coeficiente de resistência a fadiga (σ'_f) para o ensaio de deformação média nula e a tensão real de ruptura ($\tilde{\sigma}_f$) aproximadamente iguais devido a grande diferença apresentada nos dados obtidos dos ensaios realizados (aproximadamente 10%).

Tabela 11: Valores de σ'_f e $\tilde{\sigma}_f$ para a liga em estudo.

Coeficiente de Resistência a Fadiga, σ'_f [MPa]	814
Tensão Real de Ruptura, $\tilde{\sigma}_f$ [MPa]	735±4,3

Os valores encontrados para o coeficiente de ductilidade a fadiga (ϵ'_f) para o ensaio de deformação média nula e a deformação real de ruptura ($\tilde{\epsilon}_f$) também são diferentes, de acordo com a Tabela 12. Assim, para o material em estudo não se pode considerar os valores do coeficiente de ductilidade a fadiga (ϵ'_f) para o ensaio de deformação média

nula e a deformação real de ruptura ($\tilde{\epsilon}_r$) aproximadamente iguais devido a grande diferença apresentada nos dados obtidos dos ensaios realizados.

Sendo assim, os dados obtidos em ensaios monotônicos não podem ser utilizados para prever a vida em fadiga do material em estudo. Além disso, os valores encontrados para deformação real uniforme ($\tilde{\epsilon}_u$) e para o expoente de encruamento (n) são diferentes, de acordo com os valores obtidos em ensaios, como mostra Tabela 13. Portanto para o material em estudo também não se pode considerar o expoente de encruamento (n) aproximadamente igual a deformação real uniforme ($\tilde{\epsilon}_u$).

Tabela 12: Valores de ϵ_f' e $\tilde{\epsilon}_r$ para a liga em estudo.

Coefficiente de Ductilidade a Fadiga, ϵ_f' [mm/mm]	0,670
Deformação Real de Ruptura, $\tilde{\epsilon}_r$ [mm/mm]	0,142±0,025

Tabela 13: Valores do expoente de encruamento (n) e a deformação real uniforme ($\tilde{\epsilon}_u$) para a liga em estudo.

Expoente de Encruamento, n (ensaios)	0,070±0,002
Deformação Real Uniforme, $\tilde{\epsilon}_u$ [mm/mm]	0,058±0,008

De acordo com a equação 30 o valor do expoente de encruamento cíclico pode ser determinado em função dos expoentes de Basquin (b) e Coffin (c), porém para o material em estudo, esta relação não se aplica, pois o valor encontrado de acordo com os ensaios realizados é diferente do calculado, como mostra a Tabela 14. Portanto, a equação 30 não é válida para estimar o valor do expoente de encruamento cíclico (n'), devido o comportamento real do material. Isso é devido ao fato dos valores dos expoentes de Basquin (b) e Coffin (c) serem obtidos de uma aproximação linear dos pontos de deformação em função do número de ciclos dos ensaios realizados, o que

nem sempre descreve perfeitamente o comportamento do material, principalmente devido a deformação heterogênea que ocorre em ligas de alumínio^[17].

Tabela 14: Valores do expoente de encruamento cíclico (n') para a liga em estudo.

Expoente de Encruamento Cíclico, n' (ensaio)	0,038
Expoente de Encruamento Cíclico, n' (equação 30)	0,050

Através da equação 18 o valor do coeficiente de resistência (H) pode também ser obtido relacionando a deformação real de ruptura ($\tilde{\epsilon}_r$), a tensão real de ruptura ($\tilde{\sigma}_r$) e o expoente de encruamento (n) e comparando este valor ao encontrado através dos ensaios, pode-se concluir mais uma vez que os valores são diferentes, como mostra Tabela 15. Porém, a diferença é de aproximadamente 5%, portanto a equação 18 é válida apenas para estimar o valor do coeficiente de resistência (H), pois o material apresenta um comportamento mais resistente, não provocando erros de projeto.

Tabela 15: Valores do coeficiente de resistência (H) para a liga em estudo.

Coeficiente de Resistência, H (ensaio)	869±2,5
Coeficiente de Resistência, H (equação 18)	841

Através da equação 27 o valor do coeficiente de resistência cíclico (H') pode também ser obtido relacionando o coeficiente de ductilidade à fadiga (ϵ_f'), o coeficiente de resistência à fadiga (σ_f') e o expoente de encruamento cíclico (n') e comparando este valor ao encontrado através dos ensaios, pode-se concluir que há uma diferença de aproximadamente -5%, como mostra Tabela 16. Portanto, a equação 27 não corresponde ao real comportamento do material não sendo válida para estimar o valor do coeficiente de resistência (H'), devido ao fato deste material apresentar, segundo esta equação, característica mais resistente com valores de deformação menores (de acordo com a equação 19) em relação aos dados obtidos nos ensaios de fadiga,

podendo causar erros de projeto e falhas inesperadas. Deve ainda ser considerado o erro atribuído à variação dos dados para a obtenção do coeficiente de ductilidade à fadiga (ϵ_f') e do coeficiente de resistência à fadiga (σ_f') do gráfico de Amplitude de Deformação-Número de Ciclos.

Tabela 16: Valores do coeficiente de resistência (H') para a liga em estudo.

Coeficiente de Resistência, H' (ensaios)	783
Coeficiente de Resistência, H' (equação 27)	826

Através dos ensaios feitos com deformação média diferente de zero pode-se verificar que os valores dos expoente de Basquin (b) e do coeficiente de resistência (σ_f') à fadiga são diferentes dos valores obtidos com os ensaios de deformação média nula, conforme Tabela 17. A Figura 38 apresenta as curvas de amplitude de deformação elástica em função do número de ciclos até a fratura com inclinações diferentes para os diferentes valores de deformação média.

Tabela 17: Valores do coeficiente de resistência à fadiga (σ_f') e expoente de Basquin (b) para os diferentes valores de deformação média.

Deformação Média	σ_f' [MPa]	b
0,0 (%)	814	-0,059
0,5 (%)	1014	-0,103
1,0 (%)	869	-0,065
1,5 (%)	1398	-0,137
2,0 (%)	371	-0,006

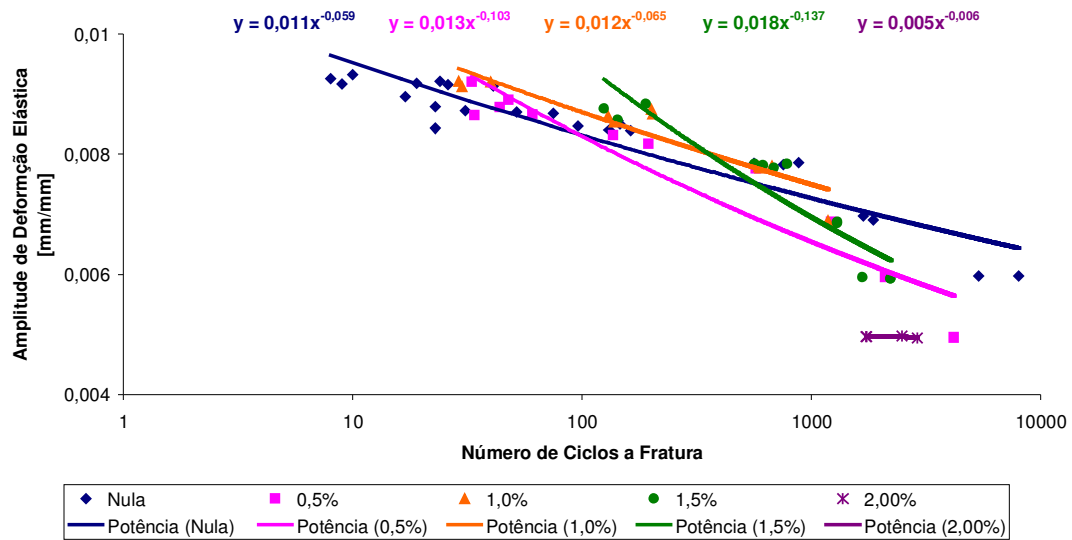


Figura 38: curvas de amplitude de deformação elástica em função do número de ciclos a fratura para diferentes valores de deformação média mostrando os diferentes valores do coeficiente de resistência à fadiga (σ_f') e expoente de Basquin (b).

Com deformação média diferente de zero também pode-se verificar que os valores dos expoente de Coffin (c) e do coeficiente de ductilidade à fadiga (ϵ_f') são diferentes dos valores obtidos com os ensaios de deformação média nula, conforme Tabela 18. A Figura 39 apresenta as curvas de amplitude de deformação plástica em função do número de ciclos até a fratura com inclinações diferentes para os diferentes valores de deformação média.

Tabela 18: Valores do coeficiente de ductilidade à fadiga (ϵ_f') e expoente de Coffin (c) para os diferentes valores de deformação média.

Deformação Média	ϵ_f' [mm/mm]	c
0,0 (%)	0,670	-1,184
0,5 (%)	0,773	-1,174
1,0 (%)	1,103	-1,213
1,5 (%)	1,537	-1,260
2,0 (%)	0,006	-0,726

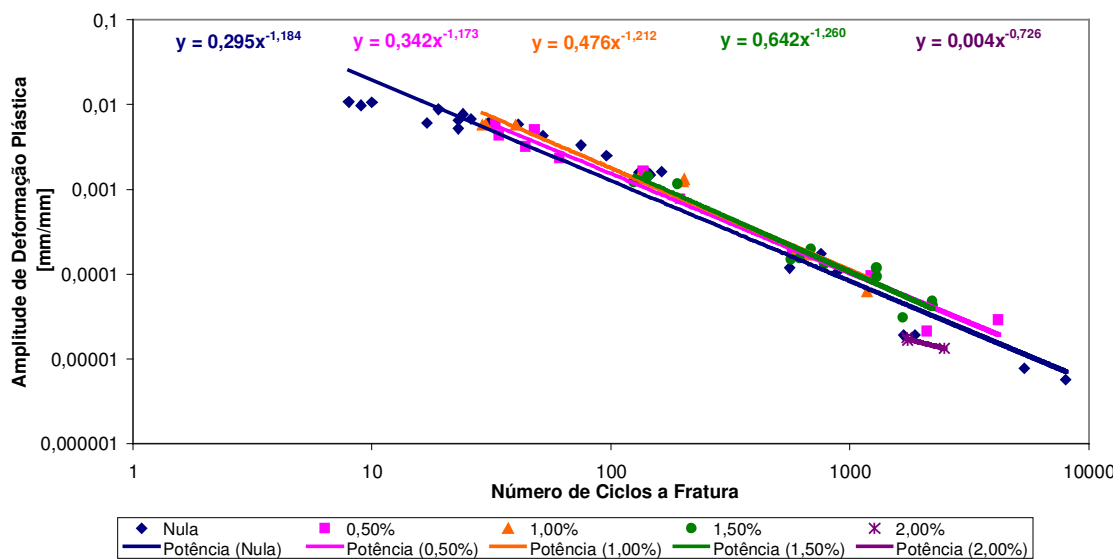


Figura 39: curvas de amplitude de deformação elástica em função do número de ciclos a fratura para diferentes valores de deformação média mostrando os diferentes valores do coeficiente de resistência à fadiga (ϵ_f') e expoente de Coffin (c).

Portanto não há como utilizar o método de obtenção dos expoentes de Basquin e Coffin (b e c) e dos coeficientes de resistência e ductilidade (σ_f' e ϵ_f') das curvas com deformação média diferente de zero, pois estes podem ser obtidos somente a partir da deformação média nula devido à variação dos valores. Sendo assim a caracterização das propriedades do material em estudo é dada apenas pela Figura 27, equação 34 e

Tabela 6. Assim, não foram estudadas as equações 24 e 25 para deformação média diferente de zero, pois, segundo Morrow, os valores dos expoentes de Basquin e Coffin (b e c) e dos coeficientes de resistência e ductilidade (σ'_f e ϵ'_f) não variam^[14].

Substituindo na equação 26, parâmetro 'SWT', as propriedades obtidas com deformação média nula apresentadas na Tabela 6, para os diferentes valores de deformação média aplicada, obtém-se a equação 43, pois assume-se que a parcela $\sigma_{\text{máx}} \epsilon_a$ é constante e independente da variação da deformação média. A Figura 40 apresenta a constante na forma $\sqrt{\sigma_{\text{máx}} \epsilon_a} E$ em MPa (facilitando a compreensão dos números envolvidos) e mostra que a equação 43 é válida, já que os pontos dos diferentes valores de deformação média estão muito próximos da curva de deformação média nula.

$$\sigma_{\text{máx}} \epsilon_a E = \alpha (2N_f)^\beta + \gamma (2N_f)^\delta \quad (\text{eq. 43}),$$

onde:

$$\alpha = \sigma_f'^2 = 814^2 = 662.596 \text{ MPa}^2$$

$$\beta = 2b = 2 \cdot (-0,059) = -0,118$$

$$\gamma = \sigma_f' \cdot \epsilon_f' \cdot E = 814 \cdot 0,670 \cdot 71000 = 38.721.980 \text{ MPa}^2$$

$$\delta = b + c = (-0,059) + (-1,184) = -1,243$$

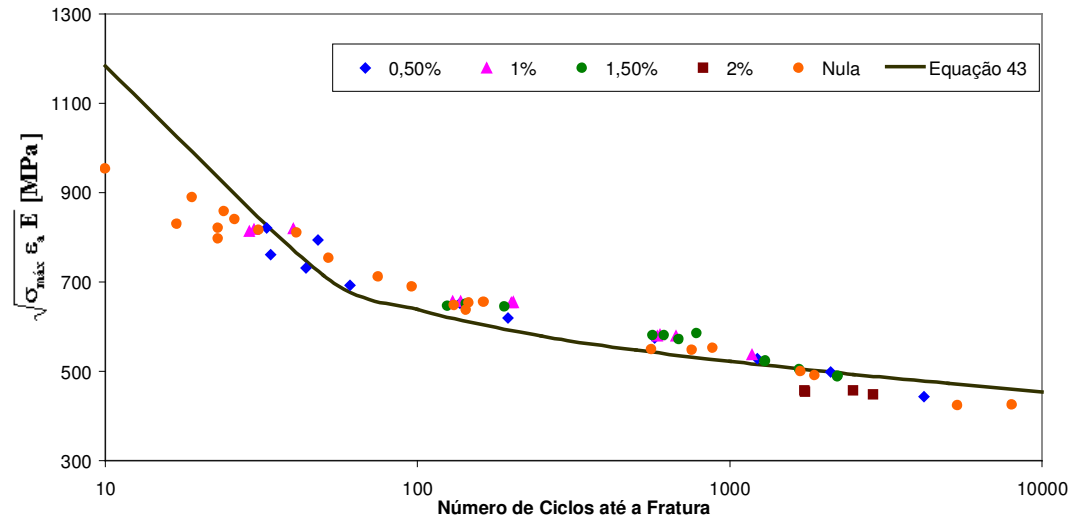


Figura 40: curva da constante $\sqrt{\sigma_{\max} \epsilon_a E}$ em função do número de ciclos a fratura para os valores de deformação média de 0 a 2%.

Portanto, a equação 26, parâmetro ‘SWT’, é válida para quantificar a vida em fadiga quando aplicada deformação média no ciclo do material em estudo, pois a parcela é constante independente da variação da deformação ou tensão média, exceto em relação ao ensaio de 2% de deformação média, porém este não apresentou dados confiáveis também na curva ϵ -N.

CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

1. A liga AA7175-T1 apresenta comportamento misto, ou seja, endurecimento cíclico próximo ao valor do limite de escoamento e amolecimento cíclico próximo ao valor real do limite de resistência, quando solicitada ciclicamente.
2. As propriedades do material em carregamento monotônico ($\bar{\sigma}_f$ e $\bar{\epsilon}_f$) são diferentes das propriedades em carregamento cíclico (σ'_f e ϵ'_f), portanto dados monotônicos não podem ser utilizados para prever o comportamento do material em fadiga.
3. O coeficiente de resistência cíclico (H') não pode ser obtido em função dos valores do expoente de encruamento cíclico (n'), do coeficiente de ductilidade à fadiga (ϵ'_f) e do coeficiente de resistência à fadiga (σ'_f). E o expoente de encruamento cíclico (n') também não pode ser obtido através dos valores dos expoentes de Basquin e Coffin (b e c), pois os valores obtidos nos ensaios dependem da variação dos pontos experimentais plásticos e elásticos da curva ϵ - N .
4. As equações de Morrow que levam em consideração a parcela de tensão média não representam o comportamento do material em diferentes valores de deformação média devido a variação dos expoentes de Basquin e Coffin (b e c) e dos coeficientes de resistência e ductilidade (σ'_f e ϵ'_f) para cada valor de deformação média aplicada.
5. O material em estudo foi caracterizado sob fadiga de baixo ciclo para deformação média nula, e a partir destes dados foi comprovada a validade, para diferentes valores de deformação média, do parâmetro 'SWT'



desenvolvido por (Smith, Watson e Topper), que sendo assim rege o comportamento da liga AA7175-T1. Portanto, independente do carregamento considerado pode-se prever a vida em fadiga utilizando os dados de deformação média nula, exceto pela deformação média de 2%.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MEYERS, M. A. Mechanical Behavior of materials. Prentice Hall: NJ 1999 1.ed cap.14.
2. DOWLING, N. E. Mechanical Behavior of materials. Prentice Hall: NJ 1999 2. ed cap.9.
3. SURESH, S. Fatigue of Materials Cambridge Press: Boston 2 ed. 1998 cap.8.
4. ASM Handbook Fatigue and Fracture Fundamentals of Modern Fatigue Analysis for Design ASM International- The Materials Information Society Volume 19 págs. 227-249.
5. ASM Handbook Fatigue and Fracture Effect of Surface Condition and Processing on Fatigue Performance ASM International- The Materials Information Society Volume 19 págs. 314-320.
6. SURESH, S. Fatigue of Materials Cambridge Press: Boston 2 ed. 1998 cap.4.
7. KHIREDINE, M. H. Low Cycle Fatigue Behavior of an Aluminium Alloy with small Shearable Precipitates: Effect of Surface Coating International Journal of Fatigue 22 (2000) págs. 585-591.
8. PETITJEAN, S. e MENDEZ, J. Influence of Surface Finish on High Cycle Fatigue Behaviour of a 304L Austenitic Stainless Steel SAE Fatigue 2001 págs. 123 a 130.
9. CURTIS, S., de los RIOS, E. R., RODOPOULOS, C. A. e LEVERS, A. Analysis of the effects of controlled shot peening on fatigue damage of high strength aluminium alloys International Journal of Fatigue 25 (2003) págs. 59-66.
10. SURESH, S. Fatigue of Materials Cambridge Press: Boston 2 ed. 1998 cap.10.
11. DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica Guanabara Dois 2 ed. 1981 cap.3. págs. 62 a 68.
12. ASM Handbook Mechanical Testing Tension Testing ASM International-The Materials Information Society Volume 8 pág. 24.
13. CALLISTER, W.D. Materials Science and Engineering an Introduction 4.ed 1996 cap.6. pág. 125 e 126.
14. STEPHENS, R. I. Metal Fatigue in Engineering 2. ed Wiley-Interscience Publication USA 2001 pág.113 a 115.



15. DOWLING, N. E. Mechanical Behavior of materials. Prentice Hall: NJ 1999 2. ed cap.14.
16. SURESH, S. Fatigue of Materials Cambridge Press: Boston 2 ed. 1998 cap.3.
17. MITCHELL, M. R. Fatigue analysis for design I Seminário internacional de fadiga – SAE Brasil 31 de outubro de 2001 São Bernardo do Campo – SP p. 1-29.
18. RIBEIRO, A. S. Fadiga Oligocíclica. Propriedades Cíclicas da Liga de Alumínio XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 99 22-26 novembro São Paulo (anais em CD-ROM).
19. SMITH, K.N., WATSON, P., TOPPER, T.H., A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals Journal of Materials JMLSA Vol. 5 Nº. 4 Dec. 1970 p. 767 - 778.
20. HATCH, J. E. Aluminum, Properties and Physical Metallurgy. American Society for Metals Metals Park, Ohio 1984.
21. ABAL Guia Técnico do Alumínio – Extrusão p. 35 - 37.
22. YOUNG G. A e SCULLY J. R. The Effects of Test Temperature, Temper, and Alloyed Copper on the Hydrogen-Controlled Crack Growth Rate of an A-Zn-Mg-(Cu) Alloy Metallurgical and Materials Transactions Volume 33A, Janeiro 2002 págs. 101-105.
23. ASM Handbook Fatigue and Fracture ASM International - The Materials Information Society Volume 19 p. 231, 795, 796 e 978.
24. ASM Hndbook Aluminum and Aluminum Alloys ASM International - The Materials Information Society p. 23.
25. ASTM E606-92 Standard Practice for Strai-Controlled Fatigue Testing ASM International- The Materials Information Society 1992.
26. GARCIA, A., SPIM, J. A., SANTOS, C. A. Ensaios dos Materiais. Livros Técnicos e Científicos Editora cap.2.
27. GARCIA, A., SPIM, J. A., SANTOS, C. A. Ensaios dos Materiais. Livros Técnicos e Científicos Editora cap.8.