

Análise crítica das normas utilizadas em ensaios de trilhos soldados aluminotermicamente

Alessandra Regina Machado Schifino¹ e Afonso Reguly²

¹Engenharia Metalúrgica, Mestranda, Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) PPGE3M/UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. alessandraschifino@gmail.com

²Engenheiro Metalúrgico, Prof. Dr. Afonso Reguly, Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) PPGE3M/UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS., Brasil. areguly@gmail.com

Resumo – Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre as normas utilizadas para liberação de soldas aluminotérmicas em trilhos do tipo – Vignole dos modelos TR, utilizada em reparos de trilhos ferroviários. As normas a serem comparadas são: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AREMA (American Rail Way Engineering and Maintenance of Way Association) e a Norma Europeia (British Standard – Railway Application Track – Aluminothermic Welding of Rails). Esta comparação será realizada para avaliar a relevância da variação dos parâmetros utilizados em cada uma das normas e quais fatores devem ser analisados em mais de uma norma para que não haja dúvidas que a soldagem foi realizada corretamente. Através da realização dos ensaios mecânicos e metalúrgicos, exigidos pelas normas, foram encontrados defeitos microestruturais e propriedades mecânicas não adequadas, causadas por diversos fatores, tais como: processo de fabricação, falhas operacionais na soldagem, de preenchimento, de solidificação. Utilizando-se deste conjunto de informações será possível validar as soldas aluminotérmicas testadas.

Palavras-chave: Soldagem aluminotérmica, normas de soldagem aluminotérmica

Abstract – In this work, it was carried out a comparative study between standards used for validation of aluminothermic welding on Premium – Vignole rails of TR models, used on rail repairs. The standards to be compared are ABNT (Brazilian Association of Technical Standards), AREMA (American Rail Way Engineering and Maintenance of Way Association) and European Standard (British Standard - Railway Application Track - Aluminothermic Welding of Rails). The comparison will be performed to evaluate the relevance in variation of the parameters used in each standard and what factors should be analyzed in more than one standard, so there is no doubt the welding was performed correctly. Through the performance of mechanical and metallurgical tests, suggested by the standards themselves, we find microstructural defects and inappropriate mechanical properties, caused by several factors, such as: manufacturing process, operational failures in welding, filling, solidification among others. Using this set of information, it will be possible to validate the aluminothermic welds tested.

Keywords: Aluminothermic welding, Aluminothermic welding standard.

I. INTRODUÇÃO

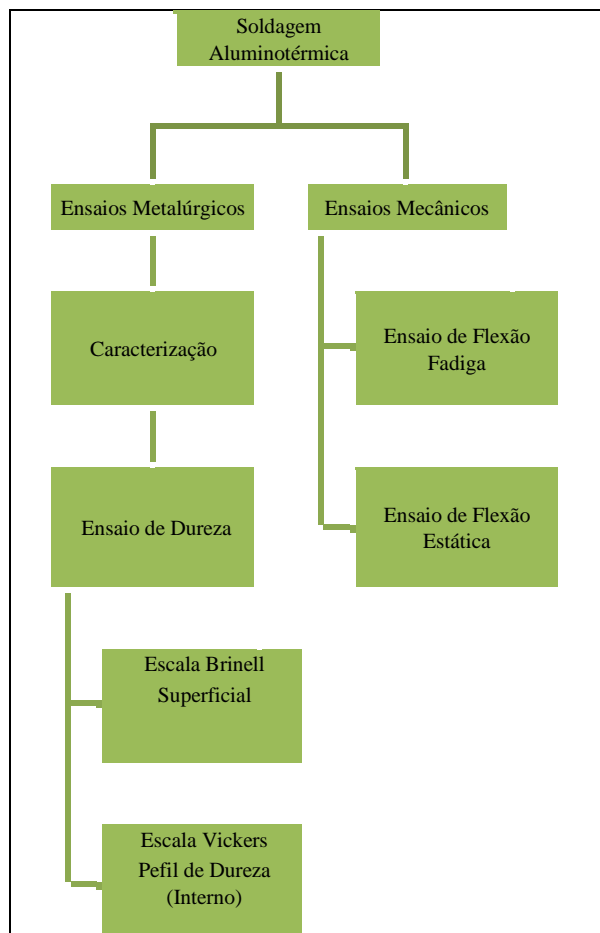
O transporte ferroviário possui vantagens em relação a outros meios de transporte, pois permite maior capacidade de transporte de carga e de passageiros. Em países em desenvolvimento, tais como África e América Latina, foi escolhido o uso predominante das rodovias ao invés das ferrovias [1]. Dentre as ferrovias brasileiras de grande porte se pode citar a Estrada de Ferro Carajás (EFC) pertencente à Companhia Vale do Rio Doce (Vale) que faz a ligação entre a Serra do Carajás e o Terminal Ferroviário da Ponta da Madeira, totalizando 900 quilômetros de via contínua [2]. Na manutenção e preservação destas ferrovias, utiliza-se a soldagem aluminotérmica. Levando-se em conta seu curto tempo e flexibilidade de realização em campo, podendo ser executada entre as passagens dos trens. Isto tudo ocorre pela sua relativa simplicidade e principalmente independência de fontes externas de energia neste processo [3]. Há diferentes normas, tais como ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2011 [4], AREMA (American Rail Way Engineering and Maintenance of Way Association), 2006 [6] e a europeia (British Standard – Railway Application Track – Aluminothermic Welding of Rails), 2006 [5]. Utiliza-se as normas citadas para determinar os tipos de ensaios e variações de resultados que devem ser avaliados para identificar as amostras que serão liberadas ou rejeitadas. Os trilhos que serão analisados são todos do tipo “Vignole”, modelos TR. Neste trabalho, através de ensaios mecânicos e metalúrgicos, obteremos resultados que permitem a certificação de acordo com os resultados, quais as normas mais rigorosas ou brandas para o fabricante e o cliente.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma mostrado na Figura 1 apresenta o planejamento experimental utilizado neste estudo. Com exceção da soldagem, os demais ensaios e análises foram realizados nas dependências do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS). Os ensaios realizados para garantir a liberação das soldas aluminotérmicas foram: dureza Brinell e flexão estática e flexão fadiga, também foram realizados perfis de dureza Vickers no metal de base da zona termicamente

afetada e no metal de solda. Todos estes ensaios foram realizados de acordo com os parâmetros exigidos pelas três normas estudadas neste trabalho, sendo que apenas para o ensaio de fadiga não existe exigência na norma AREMA, 2006 [6]. Os demais ensaios foram realizados e seus resultados comparados.

Figura 1 – Fluxograma experimental.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 1 apresenta a matriz de ensaios, que nos informa quais ensaios foram realizados em cada uma das amostras.

Tabela 1 – Matriz de Ensaios

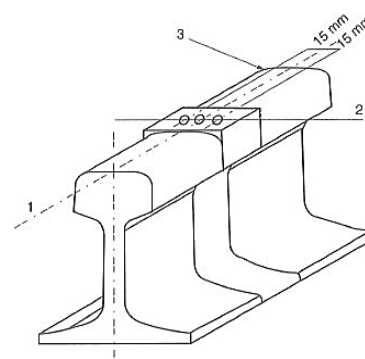
Identificação da Amostra	Dureza Brinell	Dureza Vickers	Ensaio de Fadiga	Ensaio Estático
01A	X	X	X	
02A	X	X		
02B			X	X
03A	X		X	X
04A	X			X
06A				X

A. Ensaios metalúrgicos

Ensaio de Dureza Brinell

Os ensaios de dureza superficial do bolete são realizados na escala Brinell e devem ser conduzidos de acordo com a norma ABNT [4] e a norma EN14730-1 [5], item 7.2 e o Anexo E. Ambas as normas sugerem que os ensaios sejam realizados utilizando-se esfera com diâmetro de 10 mm, carga aplicada de 3000 kg/f e tempo de aplicação da carga de 15s. A dureza deve ser medida abaixo da zona de decarbonetação (0,5 mm abaixo da superfície do rolamento). A medição deve ser efetuada conforme Figura 2. Três valores de dureza devem ser determinados para cada solda, sendo considerada como a dureza real a média das três leituras, os valores podem ser visualizados na Tabela 2. Tais valores se aplicam para as duas normas [4] e [5]. A norma AREMA possui valores de dureza acima das outras normas, pois permite a presença, mesmo que em baixa porcentagem de martensita.

Figura 2 – Diagrama de Medição de Dureza Brinell.



Legenda

- 1 eixo central do trilho
- 2 linha do centro transversal da solda
- 3 superfície de rolamento

NOTA As distâncias de 15 mm correspondem às distâncias entre os centros dos furos.

Fontes: [4] e [5].

O durômetro utilizado é digital dura vison 30, modelo DV30 para faixas de 120 a 510 HBW 10/3000 (Brinell), como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Durômetro digital Dura Vison 30, modelo DV30 para faixas de 120 a 510 HBW 10/3000 (Brinell).



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 2 – Tabela comparativa de valores de dureza Brinell.

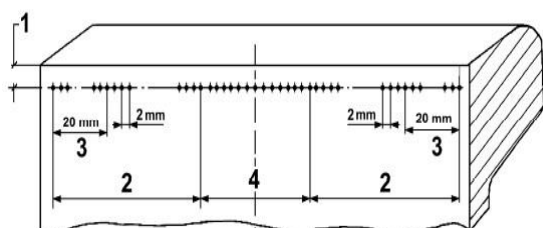
ABNT/ EN14730-1		AREMA	
Dureza da Superfície do Rolamento do Trilho (HB)	Dureza Central da Solda (HB)	Dureza Superficial (HB)	Dureza Superficial Máxima do Boletó (HB)
200 a 240	230±20	370	410
220 a 260	250±20	-	-
260 a 300	280±20	-	-
260 a 300	300±20	-	-
260 a 300	280±20	-	-
320 a 360	330±20	-	-
350 a 390	350±20	-	-
350 a 390	350±20	-	-

Fontes: [4], [5] e [6].

Ensaio de Dureza Vickers

Nos casos onde for necessário realizar um perfil de dureza, a medição de dureza será efetuada seguindo o Anexo J da norma EN14730-1 [5]. Nesta é citado que a distribuição da dureza na zona afetada pelo calor deve ser medida utilizando a escala Vickers e uma carga de 30 kg. As impressões devem estar posicionadas em uma linha situada entre 3 e 5 mm abaixo da superfície longitudinal do boletó. A dureza na direção transversal deve-se estender para ambos os lados da solda, continuando até 20 mm da zona não afetada do metal base. A medição deve ser realizada até os pontos distantes 2 mm dos 20mm já citados, para cada lado da solda, como mostrado na Figura 4. As demais normas seguem os mesmos parâmetros.

Figura 4 – 1) Região de 3 a 5 mm abaixo da superfície longitudinal do boletó; 2) Região do metal base (zona não afetada); 3) Representação das 10 medidas com espaçamentos de 2mm entre elas; 4) Região da Zona de Fusão

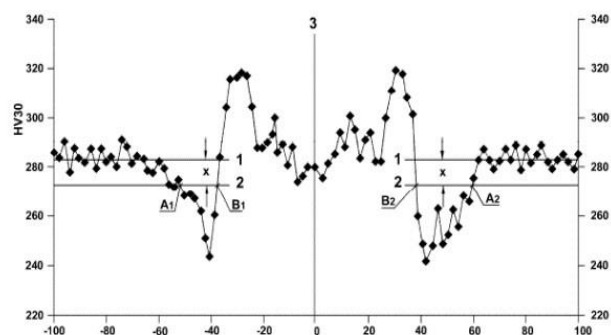


Fontes: [5].

A dureza média do boletó na região do metal base em ambos os lados da solda é calculada a partir de um mínimo de dez medidas realizadas em intervalos de 2 mm na região. Como pode-se observar na Figura 4, região 3. Uma linha igual com os valores medidos de dureza média é marcada no gráfico para cada lado da

solda como mostrado (linha 1). A linha de dureza de medição (linha 2) é marcada paralelamente à linha de dureza média e a distância dos pontos de dureza X se encontra entre as linhas 1 e 2. A variação da zona afetada pelo calor é definida pela distância entre os pontos A e B na Figura 5.

Figura 5 – Perfil de dureza típico para trilhos “Vignole”.



Fonte: [5].

O microdurômetro utilizado é da marca Instron, modelo Tukson 2100 na escala HV com carga de 300g de acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Microdurômetro marca Instron na escala HV com carga de 300g.



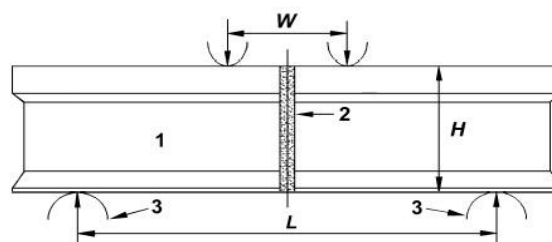
Fonte: Elaborado pela autora

B. Ensaios mecânicos

Ensaio de Flexão Fadiga

Segundo a norma EN14730-1[5], item 7.4.3, Anexo K os ensaios devem ser realizados em quatro pontos de flexão com o apoio em tensão. Como na Figura 7.

Figura 7 – Arranjo para o Ensaio de Flexão Fadiga. 1) Trilho; 2) Solda; 3) Apoios.



Fonte: [5].

Caso a amostra frature na região da solda durante o ensaio tendo realizado menos de 5 milhões de ciclos, o resultado não é considerado e para o caso de não haver fratura, a solda deve ser submetida a flexão até a ruptura para examinar a face de fratura quanto a região de início da falha. Se a fadiga tiver sido iniciada por falta de defeito de fusão, o processo será rejeitado.

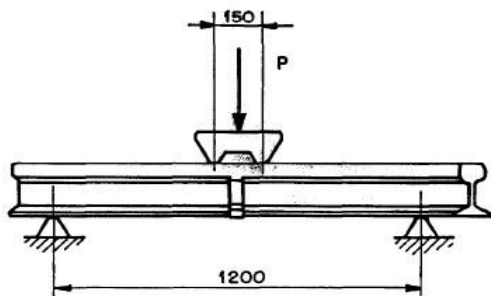
Segundo a Norma ABNT, 2011 [4] para tal ensaio é necessário um atuador com dispositivo, como na Figura 8. Deve-se submeter o trilho a um carregamento cíclico, até completar 2 milhões de ciclos. A frequência utilizada é de normalmente 300 ciclos por minuto. A carga mínima e máxima a ser fornecida pelo atuador é calculada pelas Equações 1 e 2.

$$P_{min} = \frac{\sigma_{min} \cdot AWx}{L - L_0} \quad (1)$$

$$P_{max} = \frac{\sigma_{max} \cdot AWx}{L - L_0} \quad (2)$$

onde $\sigma_{min} = 50$ MPa, $\sigma_{max} = 230$ MPa, Wx é o módulo resultante do trilho (mm^3), L = distância entre os apoios (mm) e L_0 = distância entre os cutelos (mm).

Figura 8 – Disposição do Trilho no Ensaio de Fadiga



Fonte: [4].

Ambas as normas seguem os parâmetros citados na Tabela 4, de acordo com [4] e [5].

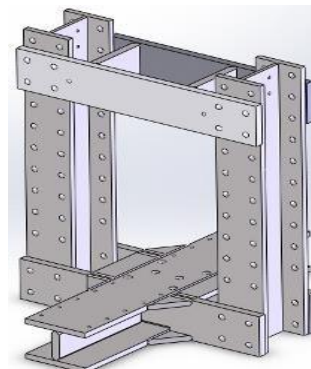
Tabela 4 – Tabela comparativa de parâmetros de ensaio de fadiga.

Parâmetros	Norma EN14730-1	Norma ABNT
Carga Máxima	Depende da tensão aplicada	50 MPa
Carga Mínima	Depende da tensão aplicada	230 MPa
Frequência	-	-
W (distância entre os cutelos)	150 mm	150 mm
L (distância entre apoios)	$L \geq 150 \text{ mm} + 2 \cdot H$	1.200 mm
Raio dos apoios e cutelos (min)	40 mm	20 mm

Na norma AREMA [6] não existe especificações para este tipo de ensaio.

Os equipamentos utilizados nos ensaios se encontram representados nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 – Desenho do quadro da bancada utilizada no ensaio de flexão fadiga



Fonte: Elaborado pelo LAMEF.

Este quadro possui 2000 mm de altura por 1600 mm de comprimento, suportando amostras de até 2000 mm por 700 mm. A capacidade da carga em fadiga é de 1000 kN.

Figura 10 – Célula de carga utilizada é da marca HBM modelo S40 com capacidade de 5 toneladas.



Fonte: Elaborado pelo LAMEF.

Figura 11 – Atuador Hidráulico da marca MTS, modelo 244.41 com capacidade de carga em fadiga de 500 kN.

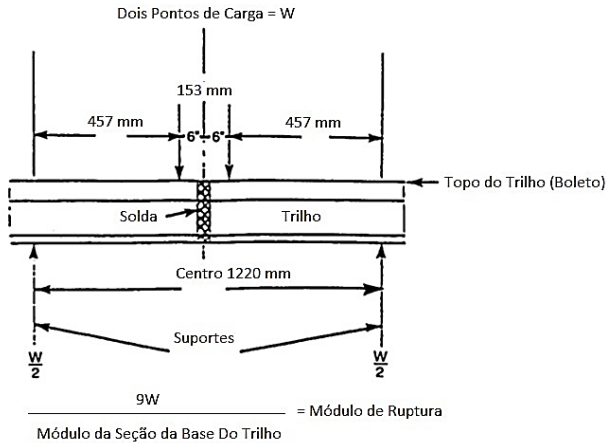


Fonte: Elaborado pelo LAMEF.

Ensaio de Flexão Estático

A norma AREMA [6] indica no item 3.14.4.7 e retorna ao item 3.11.3.6, que os ensaios de flexão estática devem ser realizados de acordo com a Figura 12. Um suporte externo deve ser capaz de compensar qualquer desalinhamento na base.

Figura 12 – Arranjo de Carga para o Teste de Flexão Estático.



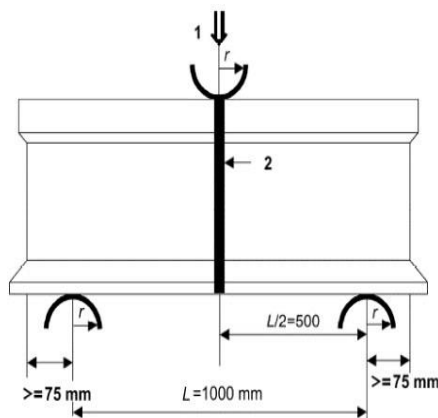
Fonte: [6].

A norma EN14730-1 [5] determina no item 7.3 que a carga mínima de fratura (kN) seja arredondada para o mais próximo possível de 5 kN, esse valor é definido pela Equação 3 (Equivalente a uma resistência mínima à flexão à tração de 800 MPa), em que S (mm^3) é a seção da base do trilho.

$$F = 0,032 \cdot S \quad (3)$$

Devem ser respeitados: $25 \text{ mm} \leq r \leq 70 \text{ mm}$; $L =$ Comprimento mínimo da amostra = 1150 mm, Taxa de carregamento $\leq 60 \text{ kN/s}$.

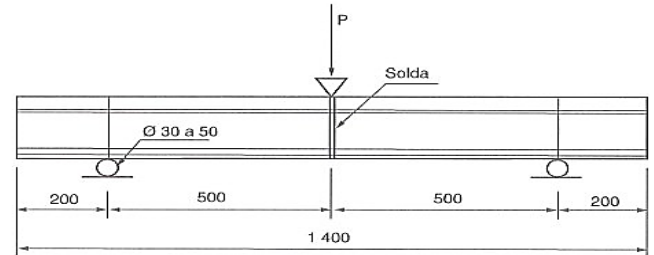
Figura 13- Arranjo de Carga para o Ensaio de Flexão Estático. 1) Carga. 2) Solda.



Fonte: [5].

A norma ABNT, 2011 [4] indica no item 16 que no ensaio de flexão estática se deve aplicar uma carga crescente no centro do trilho e no ponto central da solda até a ruptura. O centro da prensa deve incidir sobre o boleto no local da solda equidistante dos apoios. Os pontos de apoio devem possuir forma cilíndrica com diâmetro de 30 mm a 50 mm, e a distância entre eles deve ser de 1.000 mm. O corpo de prova deve ter comprimento aproximado de 1.400 mm à temperatura ambiente, como na Figura 14.

Figura 14 – Arranjo de Carga para o Ensaio de Flexão Estático. P) Carga.



Fonte: [4].

Os cálculos dos valores mínimos das cargas de ruptura devem ser feitos pela Equação 4, onde Wx é o valor do módulo de resistência do patim, expresso em milímetros cúbicos (mm^3). Para os tipos de trilhos especificados na ABNT NBR 7590 [7], os valores são apresentados na Tabela 5.

$$F = 0,032 \cdot Wx \quad (4)$$

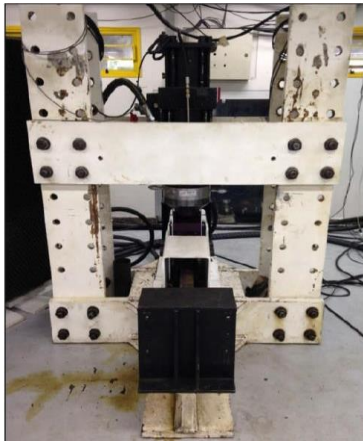
Tabela 5 – Valores Mínimos de Carga de Ruptura

Tipo de Trilho	Carga de Ruptura (kN)
TR 37	521
TR 45	799
TR 50	933
TR 57	1.154
UI C60	1.200
TR68	1.244
GB 60	1.484
14 ORE	1.586
14 IRE	1.519

As Figuras 15, 16 e 17 são referentes aos dispositivos utilizados nos ensaios de flexão estática. O quadro da Figura 15 possui 2000 mm de altura por 1600 mm de comprimento, suportando amostras de até 2000 mm por 700 mm. A capacidade da carga em fadiga é de 1000 kN. Já o atuador hidráulico da Figura 16 tem capacidade de carga em fadiga de 1000 kN em tração e 1600 kN em compressão.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 15 – Desenho do quadro da bancada utilizada no ensaio de flexão fadiga.



Fonte: Elaborado pelo LAMEF.

Figura 16 – Atuador Hidráulico da marca Hidrausul.



Fonte: Elaborado pelo LAMEF.

Figura 17 – Célula de carga utilizada é da marca KRATUS com capacidade de 3000 kN.



Fonte: Elaborado pelo LAMEF.

A. Ensaios metalúrgicos

Ensaio de Dureza Brinell

A Tabela 6 representa a medição de dureza Brinell na região da solda, foram medidas as amostras 01A, 02A, 03A e 04A e calculadas suas média e desvios padrão. Como pode-se observar na Tabela 2, os desvios para dureza central das soldas, variam de $\pm 20\text{HB}$, para qualquer intervalo dentro das normas ABNT, 2011 [4] e EN14730-1, 2006 [5]. Então, todas as amostras testadas estão de acordo com as normas, obtendo desvios muito abaixo do valor máximo exigidos pelas normas estudadas neste trabalho, sendo assim aprovadas. A norma AREMA, 2006 [6], não possui intervalos para que se possa calcular o desvio apropriadamente, então nada pode se concluir.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de dureza Brinell na solda.

Amostras	Dureza (HB) Ponto A	Dureza (HB) Ponto B	Dureza (HB) Ponto C	Média (HB)	Aprovado
01A	306	299	304	303	✓
02A	354	345	354	351	✓
03A	321	313	321	318	✓
04A	321	313	313	316	✓

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 7 foram medidas as durezas superficiais nos boletos dos trilhos nas amostras 02A, 03A e 04A, que foram aprovados para liberação de acordo com as normas ABNT e EN41730-1. Sobre a norma AREMA [6], a amostra 02A pode ter alcançado a dureza de 397 pela possibilidade de martensita em sua microestrutura.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de dureza Brinell na região do boleto do trilho.

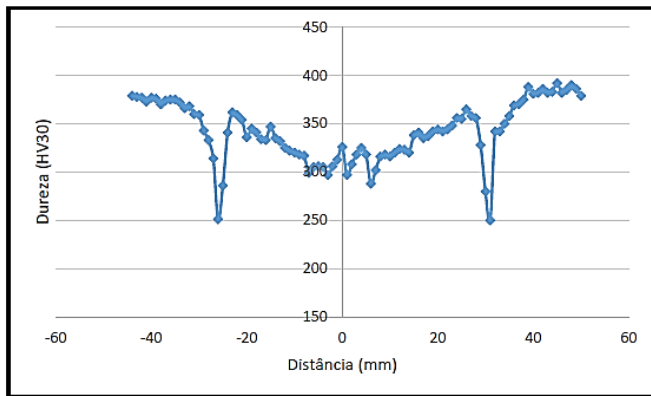
Amostras	Dureza (HB) Ponto A	Dureza (HB) Ponto B	Dureza (HB) Ponto C	Média (HB)	Aprovado
01A	-	-	-	-	-
02A	372	372	392	397	✓
03A	313	313	313	313	✓
04A	313	313	313	313	✓

Fonte: Elaborada pela autora.

Ensaio de Dureza Vickers

O resultado dos ensaios de dureza Vickers é apresentado graficamente nas Figuras 19 e 20. Os perfis de dureza são realizados na secção longitudinal do boleteo, na região próxima da superfície de rolamento, observada na Figura 4. Na Figura 19, a amostra 01A, indicou um perfil de dureza na solda inferior ao do metal base do trilho, atingindo valores em torno de 300 HV no centro da solda e valores mínimos de 250 HV na zona afetada pelo calor. O metal base do trilho apresentou 380 HV.

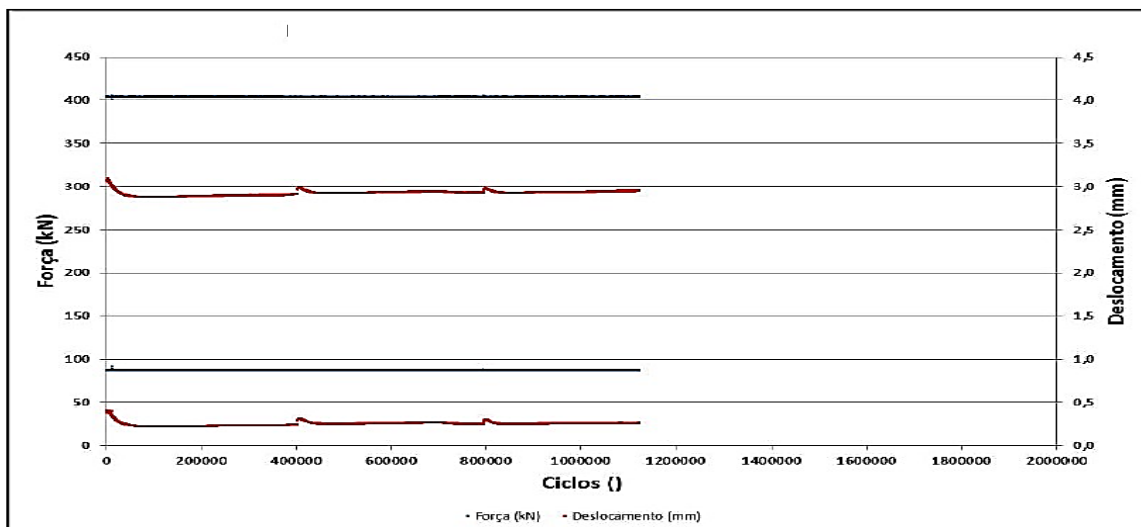
Figura 19 – Perfil de Dureza na Região da Solda – Amostra 01A.



Fonte: Elaborada pela autora.

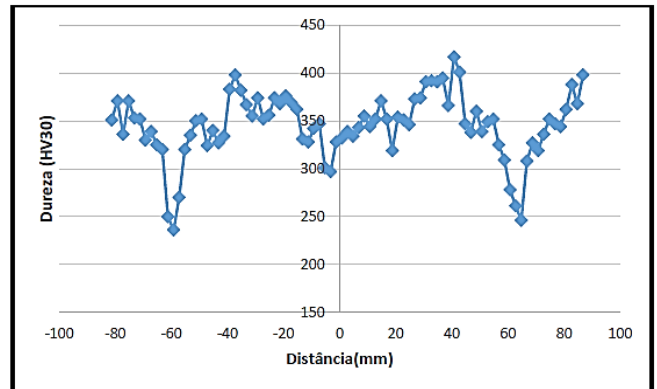
A Figura 20 apresenta a amostra 02A, que apresentou dureza na solda inferior a do metal base do trilho em torno de 300 HV no centro da solda e valores mínimos de 250 HV na zona afetada pelo calor. O metal base do trilho apresentou 400 HV.

Figura 21 – Resultados de ensaio de dureza na região da solda – Amostra 01A



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 20 – Perfil de Dureza na Região da Solda– Amostra 02A



Fonte: Elaborada pela autora.

Em resumo, observa-se que na amostra 02A são observados resultados semelhantes aos da amostra 01A.

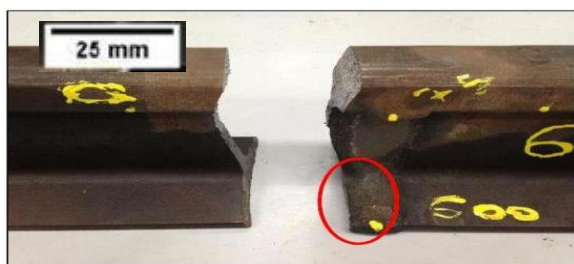
B. Ensaios mecânicos

Ensaio de Flexão e Fadiga

A Figura 21 representa a curva da força (kilonewtons) e o deslocamento (milímetros) em função do número de ciclos na amostra 01A.

A Figura 22 apresenta a fratura, após o ensaio de fadiga.

Figura 22 – Amostra Fraturada, após ensaio de fadiga, círculo (vermelho) da representa o início da falha – Amostra 01A.



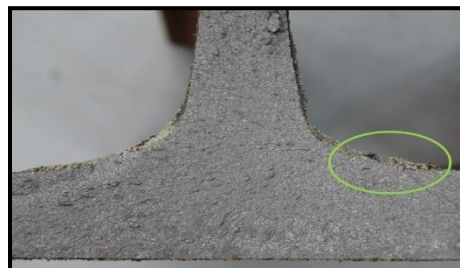
Fonte: Elaborada pela autora.

A ruptura na amostra 02B foi observada com 335.500 ciclos (Figura 24), valor muito abaixo do mínimo

Aplicando-se as cargas de acordo com a Tabela 5, os valores são semelhantes para as três normas citadas neste trabalho. Na amostra 02B a fratura ocorreu na região da elipse, região superior do patim, sendo propagada por uma trinca até a sua ruptura, conforme ilustra a Figura 23.

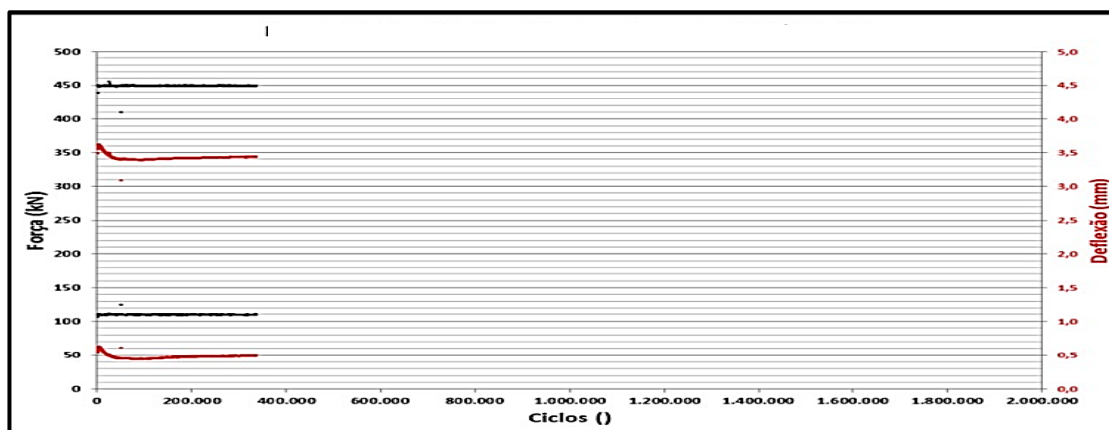
exigido nas normas ABNT (2011), [4] e EN14730-1 (2006), [5]. A norma AREMA não avalia o quesito fadiga. Na Figura 25 apresenta-se também a análise da Amostra 03A.

Figura 23 – Amostra Fraturada, após ensaio de fadiga, círculo (verde) da representa o início da falha – Amostra 02B.



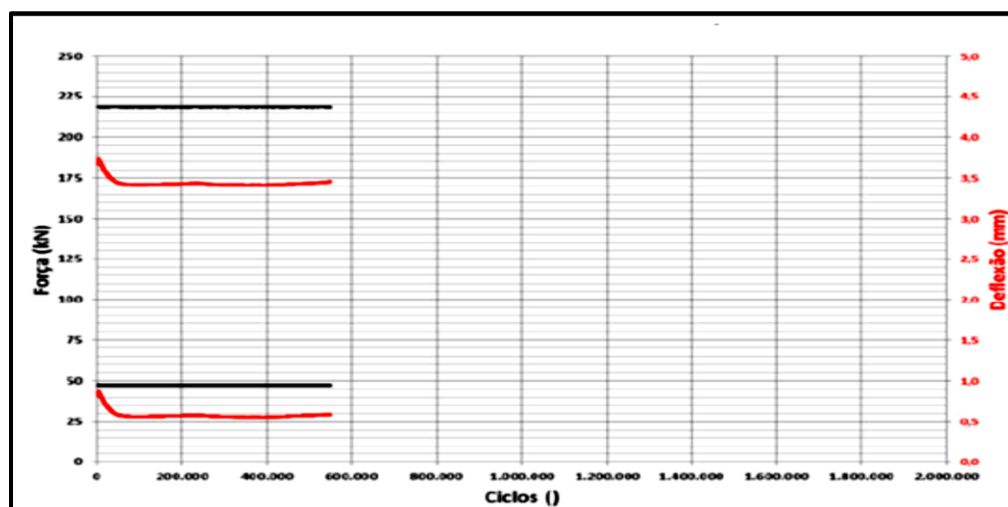
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 24 – Gráfico força e deslocamento em função do número de ciclos do ensaio da amostra 02B.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 25 – Gráfico força e deslocamento em função do número de ciclos do ensaio- Amostra 03A.

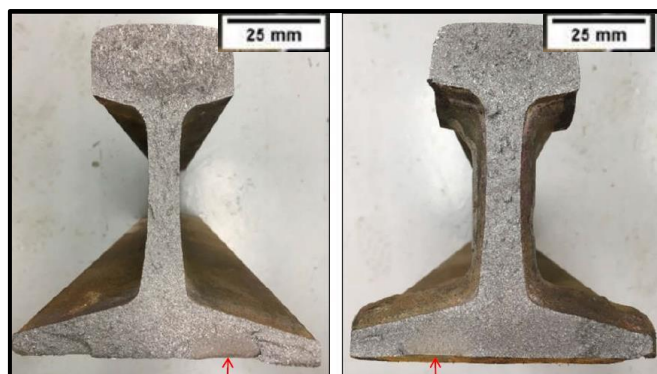


Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a Figura 25, a amostra 03A foi à ruptura em 547.062 ciclos, estando também abaixo do estabelecido pelas duas normas das normas, visto que exige o valor mínimo de 2.000.00 de ciclos.

Na Figura 26, pode-se identificar que as fraturas ocorreram por propagação de trinca iniciada na zona afetada pelo calor, na interface do trilho e o colar do metal de solda.

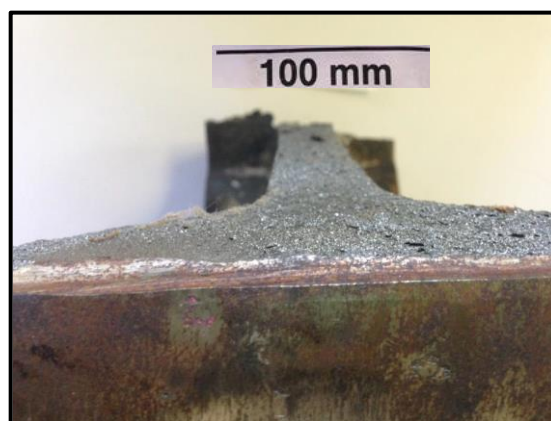
Figura 26 – Imagem das superfícies de fratura, com indicação do início da falha – Amostra 03A



Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se também na Figura 26, que o início da falha está relacionado com concentrador de tensões (indicado pelas setas), introduzidos durante a retificação (esmirlhamento) da solda na região do patim.

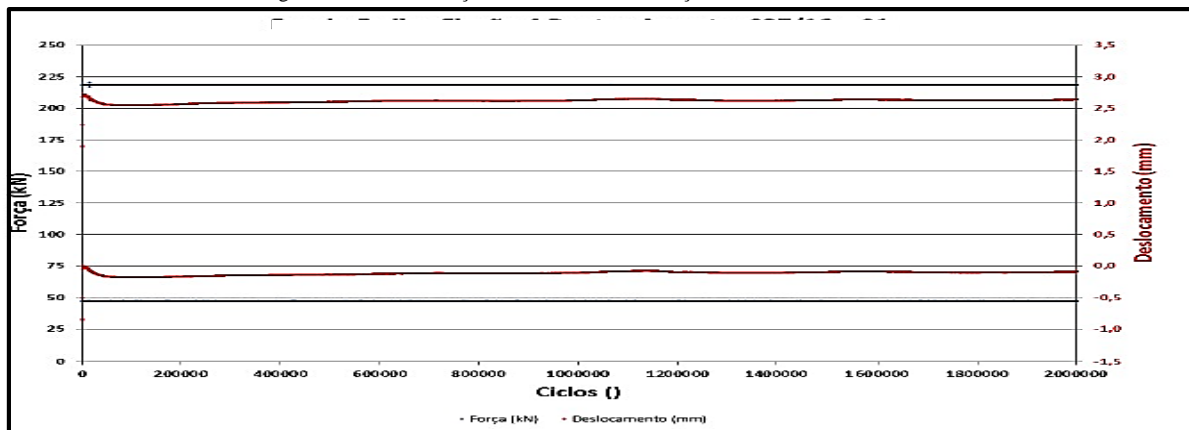
Figura 27 – Imagem da vista onde foi feito acabamento superficial na solda, gerando regiões de concentração de tensões- Amostra 03A.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 28 são apresentadas as análises da amostra 04ª. O ensaio de flexão fadiga chegou aos 2.000.00 de ciclos, estando então dentro das duas normas ABNT, 2011 [4] e EN14730-1, 2006 [5].

Figura 28 – Gráfico força e deslocamento em função do número de ciclos – Amostra 04A.



Fonte: Elaborada pela autora

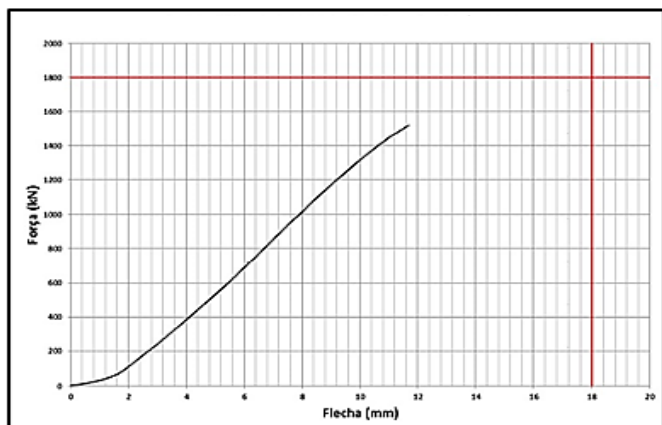
Ensaio de flexão estático

As Figuras 29, 30 e 31 representam a curva da força (kilonewtons) e o deslocamento (milímetros) em função do número de ciclos dos protocolos ensaiados e a fratura causada respectivamente.

A Figura 29 que representa a amostra 02B, representada os valores de força e de deformação (flecha) máximas atingidas nos ensaios de flexão estática, que foram de 1469 kN e 11,54 mm respectivamente.

Estes valores encontram-se abaixo do valor especificado pelas três normas analisadas, pois, para trilhos TR-68 (Amostra 02B), a carga mínima que deve ser atingida é 1.800 kN e o valor de flecha de 18 mm.

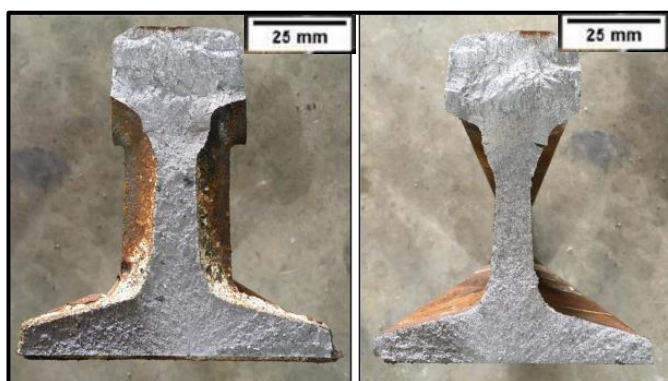
Figura 29 – Gráfico em função do deslocamento do ensaio de flexão estático - Amostra 02B.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 30, pode-se observar a amostra após o ensaio estático.

Figura 30 – Imagens da superfície de fratura – Amostra 02B, após o ensaio de flexão estático



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 31 sua respectiva superfície de fratura em aumento.

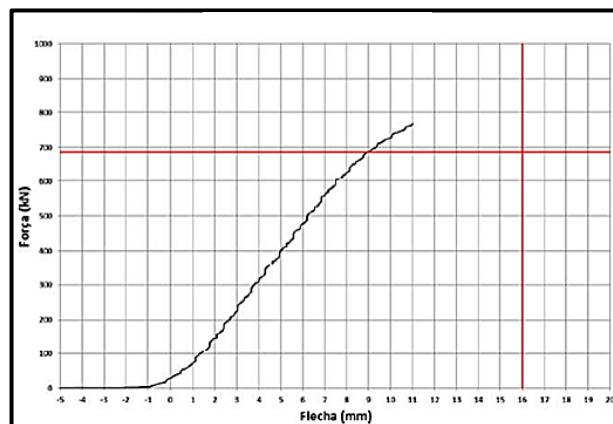
Figura 31 – Imagem da superfície de fratura – Amostra 02B, após o ensaio de flexão estático. Elipse indica o local de iniciação da falha.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 32 respectiva à amostra 03A a carga máxima atingida foi de 767 kN e a flecha (deslocamento) no valor de 11 mm.

Figura 32 – Gráfico em função do deslocamento do ensaio de flexão estático - Amostra 03A.



Fonte: Elaborada pela autora.

Já na Figura 33 observamos a superfície de fratura, após o ensaio de flexão estática da Amostra 03A.

Figura 33 – Imagens da superfície de fratura – Amostra 03A, após o ensaio de flexão estática

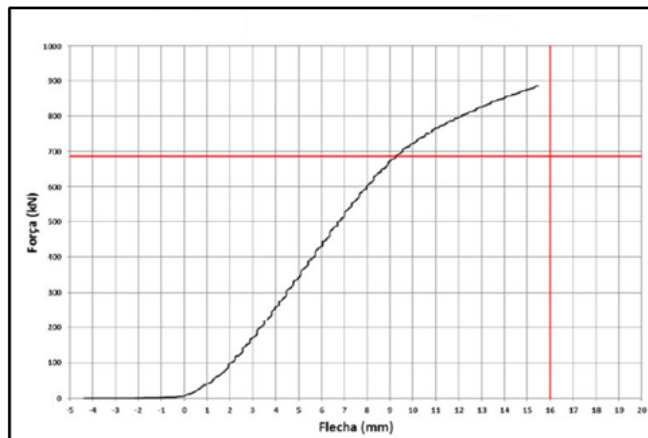


Fonte: Elaborada pela autora.

A amostra 3A não foi aprovada no ensaio estático, tendo como base os requisitos das normas ABNT [4], AREMA [6] e EN14730-1 [5], visto que a amostra rompeu com carga inferior a 799 kN, que é a especificada para trilhos do modelo TR- 45. Para o valor de flecha, a norma ABNT [4] especifica 16 mm e a amostra alcançou o valor máximo de 11,54 mm. Nas AREMA [6] e EN14730-1 [5] o valor de flecha não é abordado.

A Figura 34 refere-se à amostra 06^a, para a qual obteve-se resultado acima de 2 milhões de ciclos no ensaio de fadiga. No ensaio de flexão estático, a carga máxima atingida foi de 855 kN e o valor de flecha máxima foi de 15,5 mm.

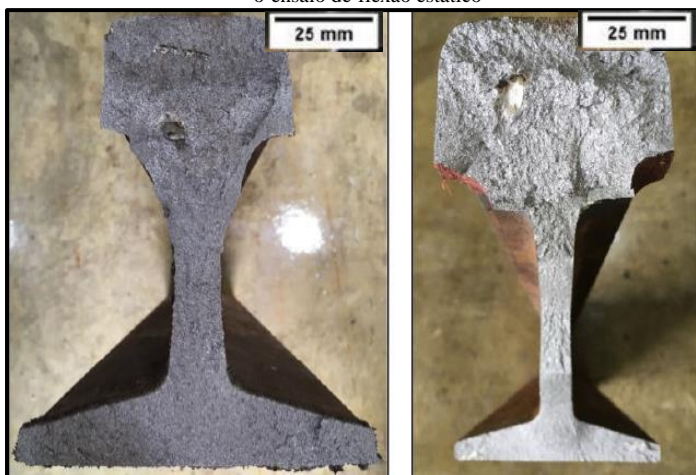
Figura 34 – Gráfico em função do deslocamento do ensaio de flexão estático - Amostra 06A.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 35 observa-se a superfície de fratura, estando de acordo com as normas AREMA [6] e EN14730-1 [5], que não levam este fator valor de flecha em consideração.

Figura 35 – Imagens da superfície de fratura – Amostra 06A, após o ensaio de flexão estático



Fonte: Elaborada pela autora.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a partir dos ensaios de inspeção visual, durezas Brinell e Vickers, flexão fadiga, flexão estática e análises metalográficas, tais como macrografia e micrografia, concluímos que a norma menos rigorosa é a AREMA, pois a mesma não exige ensaio de flexão fadiga e nem valor mínimo de flecha nos ensaios de flexão estática e ainda permite a presença de martensita não revenida.

Devido à reduzida quantidade de ensaios requerida para liberação dos trilhos, conclui-se que o fabricante que utiliza a norma AREMA é favorecido de reclamações futuras de seus clientes, isentando-se de responsabilidades, pois está embasado na norma AREMA.

Já a norma EN14730-1 isenta-se apenas da exigência do valor de flecha do ensaio de flexão estática, não sendo tão vaga quanto a ausência de inúmeros ensaios como na norma AREMA.

A norma ABNT mostrou-se mais completa em termos de exigências de ensaios para liberação dos trilhos, solicitando todos testes apresentados neste trabalho, inclusive o de valor de flecha no ensaio de flexão estática, que não é exigido em nenhuma das demais normas abordadas. É, então, a norma mais rigorosa em relação a proteção ao cliente/consumidor de trilhos modelo TR.

Os resultados de dureza Brinell foram afirmativos para todas as amostras de acordo com os intervalos tabelados nas normas ABNT e EN14730-1 variando de 299 a 351 HB. Apenas a amostra 02A alcança a dureza de 379 HB na região do boleto, estando também de acordo com a norma AREMA, pois esta permite a presença de martensita na sua microestrutura, fazendo com que a dureza alcance valores mais altos, como 379 e 410HB.

No caso das durezas Vickers, as amostras apresentaram particularidades na solda inferior ao do metal base do trilho, atingindo valores em torno de 300 HV no centro da solda valores mínimos de 250 HV na zona afetada pelo calor. O metal base do trilho apresentou 380 HV de acordo com a norma EN14730-1, [5].

Nos ensaios de flexão fadiga nas amostras 02A e 03A não estão de acordo com as normas, pois não alcançaram o número mínimo exigido de 2 milhões de ciclos pelas normas ABNT [4] e EN14730-1[5]. Apenas a amostra 04A corresponde aos requisitos exigidos pelas normas citadas. A norma AREMA [6] não indica nenhum valor mínimo para ensaios de fadiga.

Nos ensaios de flexão estática, no caso da amostra 02B, os valores de força e a deformação (flecha) máximas atingidas nos ensaios foram de 1469 kN e 11,54 mm respectivamente, e para a amostra 03A foram de 799 kN e 11 mm. Para a amostra 02B, o valor da carga está coerente com o exigido pelas três normas, mas o valor de flecha não satisfaz a norma ABNT [4], o que implica que a amostra 02B aprovada. A amostra 06A foi ensaiada em flexão estática, após não romper no ensaio de fadiga, superando os 2 milhões de ciclos, obtendo carga máxima atingida de 855 kN e a flecha máxima de 15,5 mm, estando de acordo com as normas EN14730-1[5] e AREMA [6], que não levam em consideração o valor de flecha. Para alcançar êxito na norma ABNT [4], que exige valor de flecha mínimo de 16mm, a observação realizada na amostra 06A encontra-se próxima deste valor, com uma diferença de apenas 0,5 mm para baixo.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, J. C. L. da. **Breve História das Ferrovias**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilescola.uol.com.br/geografia/ferrovias.htm>>. Acesso em: 12 dez 2010.
- [2] MACEDO, B. F. **Estudo do Desgaste de Trilhos Ferroviários**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.
- [3] ROSA, J. S. C. **Avaliação de Solda Aluminotérmica em Ângulo**. Dissertação (Mestrado).
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15997**. Trilho - Soldagem Aluminotérmica – Rail Aluminothermic Welding. 2011.
- [5] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI. **BS EN14730-1**. Railway applications —Track — Aluminothermic welding of rails. London: British Standards Institution, 2006.
- [6] AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION. **AREMA**, v. 1. Lanham, 2006.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7590**: Trilhos Vignole, 1991.