

AValiação DAS TENSões RESIDUAIS EM TRILHOS EMPREGADOS COMO VIA DE TRANSPORTE DE AÇO LÍQUIDO EM SIDERURGIA PELO MÉTODO DO FURO CEGO

Anderson de Matos Gomes, gomes.anderson@gmail.com

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br

Nilton da Silva Maia, niltonmaia@des.cefetmg.br

Carlos Eduardo Santos, carloseduardo@deii.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais. Endereço para correspondência: Av. Amazonas, 5.253 - Nova Suíça - Belo Horizonte – Minas Gerais.

Resumo: Definido como suporte e guia de equipamentos industriais, o componente trilho é elemento de grande importância na continuidade do funcionamento de um sistema de produção de uma planta industrial. Elevados valores de carregamentos cíclicos associados a tensões residuais remanescentes do processo de fabricação tornam o referido componente suscetível a falhas de diversas naturezas, exigindo continuamente a substituição de parte ou da totalidade do mesmo. Nesse contexto, no presente trabalho a distribuição das tensões residuais remanescentes do processo de fabricação foi investigada experimentalmente na superfície de trilhos utilizados como via de transporte de aço líquido em siderurgia. Foram avaliados trilhos com duas composições químicas. As tensões residuais aliviadas foram detectadas pelo método do furo cego. Os resultados obtidos por essa técnica consideraram as possíveis variações microestruturais do material. Os valores medidos ultrapassaram os limites previstos por norma, sendo caracterizados por tensões predominantemente compressivas.

Palavras-chave: trilho, tensões residuais, método do furo cego.

1. INTRODUÇÃO

Tensões residuais são aquelas existentes em um corpo sem que estejam agindo sobre ele quaisquer forças externas (AMOROS, 2008). Essas tensões surgem em um componente, por exemplo, quando a deformação plástica através da seção transversal total da parte deformada não é uniforme (DIETER, 1981).

De acordo com Laszlis (2002), qualquer processo de fabricação que altere a forma de um sólido ou que envolva gradientes severos de temperatura leva à geração de tensões residuais que influenciam no comportamento do material à fadiga, na resistência à fratura e, até mesmo, na resistência à corrosão, dentre outros fatores. Dessa forma, o estado de tensões residuais em um componente pode ser um dos mais importantes parâmetros influenciando no comportamento do material em relação à tensão de escoamento (LOHE; LANG; VOHINGER, 2002).

Trilhos, que são constituídos pelas partes apresentadas na Fig. (1), são produzidos por laminação a quente e são resfriados ao ar até à temperatura ambiente. Como em todo processo de laminação, durante a geração do perfil do produto final, o material é submetido a tensões compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem e das tensões cisalhantes superficiais, geradas pelo atrito entre os rolos e o material (AMOROS, 2008).

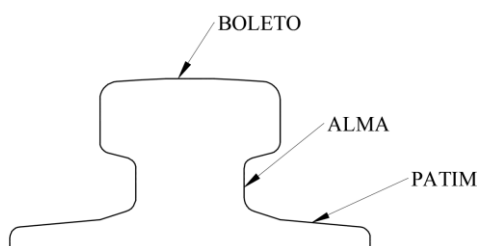


Figura 1. Partes constituintes de um trilho tipo A100 conforme norma DIN 536/1991.

As regiões do trilho que estão sob a ação de tensões residuais são as mais propensas à formação e crescimento de trincas (LO; MUMMERY; BUTTLE, 2010). Nesse contexto, as tensões residuais podem aparecer em cada uma das três etapas do processo de fabricação de trilhos: laminação a quente, resfriamento e desempenho (RINGSBERG; LINDBACK, 2003). Após ser laminado, o trilho passa por um processo de resfriamento em leitos até adquirir uma temperatura próxima ao ambiente tendo sua forma longitudinal alterada devido às diferentes velocidades de arrefecimento das suas diferentes partes. Dessa forma, o trilho é levado à fase de desempenho por uma série de rolos sendo submetido a ciclos de flexão a fim de remover deslocamentos e curvaturas. A última etapa da fabricação de um trilho é o desempenho por uma série de rolos. Já desempenado, o trilho não deve exceder um determinado valor de tensões residuais, uma vez que as tensões residuais de tração próximas ao boleto podem levar à nucleação e propagação

de trincas. Considerando o fato de que a etapa de desempenho é a última fase do processo de fabricação, a mesma terá uma grande influência sobre as propriedades finais do trilho (SCHLEINZER; FISCHER, 2000), sendo que após o desempenho prevalecem as tensões residuais trativas no boleto e no patim e compressivas na alma (SCHLEINZER; FISCHER, 2001). Considerando as características do material, Pyzalla et al. (2001) verificaram uma tendência de elevação do nível de tensões residuais em materiais de maior dureza.

Por ser um método utilizado há muitos anos e os resultados serem considerados de relativa facilidade de interpretação e por possuir procedimento definido (norma ASTM E837–13a), dentre as técnicas experimentais para medição de tensões residuais, a técnica de ensaio do furo cego, conduzida por meio de extensometria, é aquela mais largamente utilizada (FILHO, 2004). Outro aspecto a ser considerado é que os danos causados ao corpo de prova (um pequeno furo) são muitas vezes toleráveis ou reparáveis, sendo a técnica aplicada, em geral, a todos os grupos de materiais usináveis, isotrópicos e elásticos e de parâmetros conhecidos. Kandil et al. (2001) apresentaram uma classificação que sugeria a popularidade de cada técnica de medição de tensões residuais, sendo que a técnica do furo cego incremental foi apontada com 30 % de aplicação, seguida de difração de raio-x (26%), difração de nêutron (19%), remoção de camada (16%) e outras técnicas, incluindo magnética, ultrassônica e Raman (9%).

O princípio da medição de tensões residuais pelo método do furo cego (*hole-drilling technique*) envolve a introdução de um pequeno furo de aproximadamente 1,8 mm de diâmetro e 2,0 mm de profundidade no local onde as tensões residuais serão medidas. Devido à perfuração, as tensões residuais retidas são aliviadas e as tensões correspondentes na superfície são medidas por meio de *strain gage* do tipo roseta colados na superfície ao redor do furo. A partir das deformações medidas em torno do furo, as tensões residuais são calculadas usando constantes de calibração adequadas para o tipo particular de *strain gage* utilizados.

A deformação total medida é a soma das deformações causadas pela relaxação das tensões existentes em cada incremento (CARDOSO, 2012). É um método mais complexo por trabalhar com matrizes. A Fig. (2) representa um perfil típico de tensões residuais aliviadas pelo método do furo cego incremental (MARTINS et al., 2004).

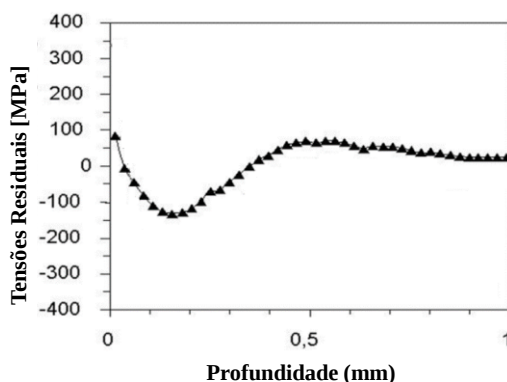


Figura 2. Perfil típico de tensões residuais aliviadas obtido pelo método do furo cego incremental (MARTINS et al., 2004).

Este trabalho tem por objetivo avaliar os níveis de tensões residuais resultantes do processo de fabricação de trilhos tipo A100 da norma DIN 536/1991 empregados como via de movimentação de carro de transferência de aço líquido (CTAL) em ambiente siderúrgico. Para tal, foi utilizada a técnica do furo cego incremental, que é regida pela norma ASTM E837–13a para peças grossas (o caso do trilho investigado). Nesse caso, segundo critérios da norma ASTM E837–13a, admitem-se como resultados satisfatórios tensões residuais limitadas a 80% do valor da tensão de escoamento do material. Nesse contexto, foram utilizados trilhos fabricados em faixas de composição química distintas previstas pela norma DIN 536/1991. Assim, foram consideradas as variações microestruturais e, por conseguinte, as propriedades mecânicas de cada amostra investigada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição Geral

Neste trabalho foi realizada a análise de tensões residuais, caracterizações microestrutural e de propriedades mecânicas de amostras novas de trilhos tipo A100 da norma DIN 536/1991 já apresentado na Fig. (1).

A análise foi iniciada pela determinação da composição química de cada material de duas amostras de comprimento 1000 mm cada uma. Por meio da referida análise, foi confirmada a disponibilização de duas amostras de composições químicas distintas. No sequenciamento dos trabalhos, foi considerada a preservação do comprimento do material até o momento no qual se fez necessário o corte em seções para medição de dureza e posterior corte para a realização da análise da microestrutura. Na Figura (3) são representados, de forma esquemática, os cortes das amostras para a

realização dos experimentos, cuja sequência foi: ensaios para a análise das tensões residuais, dureza Rockwell, caracterização da microestrutura por microscopia óptica e dureza Vickers (microdureza).

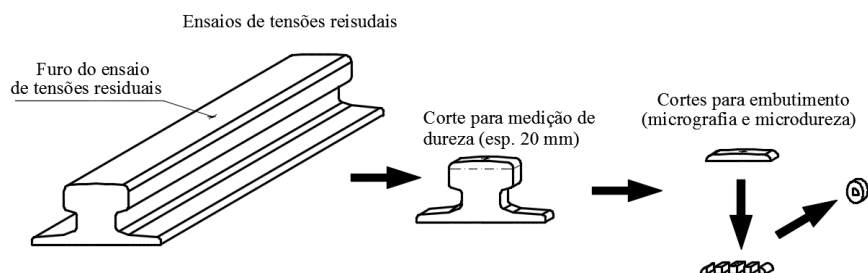


Figura 3. Sequenciamento de ensaios e corte das amostras.

2.2. Determinação da Composição Química

As composições químicas dos trilhos foram determinadas por meio de um espectrômetro de emissão óptica Shimadzu modelo Foundry Master Xpert.

2.3. Ensaio de Tensões Residuais

A análise das tensões residuais nos trilhos foi conduzida por meio do método do furo cego. Foram realizadas três furações em cada trilho, sendo uma central e as outras duas a 150 mm da borda das amostras.

A preparação da superfície e a colagem das rosetas seguiram os procedimentos recomendados pelo fabricante. Para as medições das deformações foram coladas rosetas modelo KFG-1,5-120-28-11 da marca KYOWA *strain gages*. Como orientação da roseta, adotou-se o eixo longitudinal do trilho como eixo “x”, como apresentado na Fig. (4). Seguiu-se, assim, a numeração de cada *strain gage* (SG) da roseta em concordância com a Norma ASTM E837-13a.

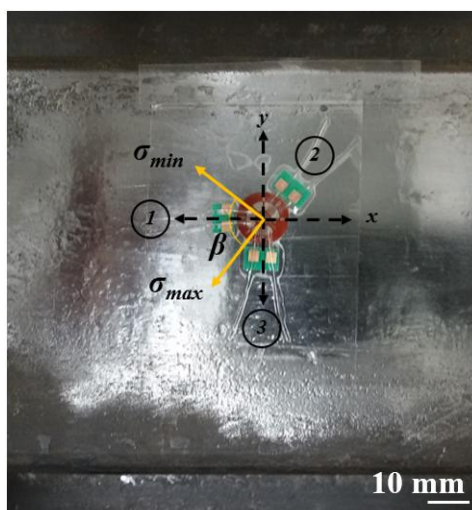


Figura 4. Roseta colada com orientações dos SG's, eixos e tensões principais (montagem típica).

O equipamento utilizado para a furação, apresentado na Fig. (5), é dotado de parafusos que possibilitam o nivelamento do equipamento, parafusos para ajuste paralelo à superfície e um anel para impedir o movimento após a centralização do equipamento em relação ao centro da roseta. Para a verificação da correta centralização, o equipamento é dotado de uma lente de aumento micrométrica. O equipamento possui, também, anel antirotação e molas do tipo lâmina. Para o sistema de furação foi utilizado o equipamento da marca Vishay, modelo RS-200. Para a aquisição de dados (leitura de cada valor de resistência do SG em cada furação incremental) foi utilizado um multímetro digital Agilent modelo 3440A. Utilizou-se na perfuração brocas odontológicas Carbide FG 37, KG SORESEN, de 1/16" de diâmetro, acionadas pneumaticamente com a pressão variando de 6,5 kgf/cm² a 7,0 kgf/cm².

Em cada ponto de colagem da roseta foram realizados vinte furos incrementados a cada 0,05 mm (conforme a Norma ASTM E837-13a) após estabelecer a altura “zero” que corresponde à superfície do boleto. A partir da altura

“zero” e a cada incremento de furo, mede-se o valor de resistência (em ohm) apresentado em cada um dos três canais do multímetro. Foram, assim, obtidas as resistências R1, R2, e R3, que são dados de entrada para determinação das deformações nas direções 1, 2 e 3 e, posteriormente, das tensões residuais em cada um dos três furos das três amostras consideradas. Para a realização dos cálculos e geração dos gráficos das tensões residuais aliviadas foi utilizada uma planilha com as equações definidas na Norma ASTM E837–13a.



(a)



(b)

Figura. 5 – Ensaio de tensões residuais: (a) componentes do equipamento, (b) montagem típica para o ensaio.

Considerando que pela referida norma é cabível o cálculo de tensões uniformes e não uniformes para amostras espessas, optou-se em determinar tensões residuais não uniformes para este trabalho por não haver informações prévias disponíveis embasadas na geometria ou no processo de fabricação que garanta a uniformidade (conforme orientações descritas nos itens 9.1.1 e 9.1.2 da Norma ASTM E837–13a) e as características de fabricação do trilho.

Para peças de espessura elevada (caso do trilho investigado), segundo a norma ASTM E837–13a, admite-se como resultados satisfatórios tensões residuais limitadas a 80% do valor da tensão de escoamento do material. Para o presente trabalho os valores de referência são apresentados na Tabela 1. Nesse caso, o valor de referência foi determinado a partir de 80% do valor do limite de escoamento mínimo (declarado pelo fornecedor) para cada faixa de teor de carbono, segundo o documento de referência (ArcelorMittal Commercial RPS - Document ref. CRTS01.1).

Por fim, ressalta-se que, de acordo com a norma ASTM E837–13a, a técnica do furo cego possui resultados confiáveis somente próximos à superfície.

Tabela 1. Tensões residuais limites para as amostras do trabalho em função do % de C, conforme ArcelorMittal Commercial RPS - Document ref. CRTS01.1.

Especificação	%C	Limite de resistência (MPa) (mín.)	Limite de escoamento (MPa) (mín.)	Valor referência para peça grossa (MPa)
A100	0,40 a 0,60	690	355	284
	0,60 a 0,80	880	440	352

2.4. Caracterização Mecânica e Microestrutural das Amostras

Ensaio de dureza Rockwell B foram realizados na seção transversal de amostras retiradas dos trilhos ao longo de todo o boleto e parte da alma e do patim, possibilitando verificar a homogeneidade ou não da propriedade mecânica em virtude do processo de fabricação do componente. No caso do boleto, os ensaios foram espaçados de 5 mm nas direções horizontal e vertical e para a alma e o patim, a distância foi de 10 mm. Seções de 20 mm de espessura foram cortadas, de forma simétrica, a partir do centro do furo oriundo do ensaio de tensões residuais conforme descrito na Fig. (3). Os ensaios foram realizados em um durômetro Rockwell IGV modelo RM401A utilizando a escala B.

Ensaio de microdureza foram realizados em áreas menores (definidas de A1 até A3) próximos à superfície superior dos trilhos em diferentes regiões em conformidade com as regiões nas quais foram conduzidas, também, as análises de

microestrutura. Assim, o emprego dessa técnica, em complementação aos ensaios de (macro) dureza, permitiu verificar alterações em porções menores dos componentes. Para a distribuição dos pontos, distou-se 0,05 mm da superfície superior do boleto totalizando 10 medidas com essa variação (até a cota de 0,95 mm) e prosseguindo com a variação de 0,5 mm entre cada penetração até atingir o limite máximo 9,95 mm de distância da referência inicial. Os testes foram conduzidos em um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T, com penetrador Vickers, empregando carga de 200 gf e tempo de aplicação de 15 s. As áreas foram as mesmas utilizadas para a análise microestrutural.

A caracterização microestrutural consistiu na análise micrográfica por meio de microscopia óptica. Dessa forma, após a preparação metalográfica convencional e ataque químico (reativo NITAL 3%) em cada área embutida foram digitalizadas uma ou duas regiões para análise (em uma extremidade, por exemplo, foram consideradas duas regiões denominadas A e B, na área seguinte apenas uma região, denominada C e, em sequência, região D. Ainda, em uma mesma região, foram observadas as características efetivamente próximas à superfície do trilho e próximas à porção inferior da área, que representariam o trilho como um todo. A microestrutura foi observada e digitalizada em um microscópio Fortel com sistema de captura de imagens Kontrol modelo M713.

As Figuras (6.a), (6.b) e (6.c) representam, respectivamente, as posições de medições de dureza Rockwell, de medições de dureza Vickers e as regiões nas quais foram retiradas as porções para análise microestrutural.

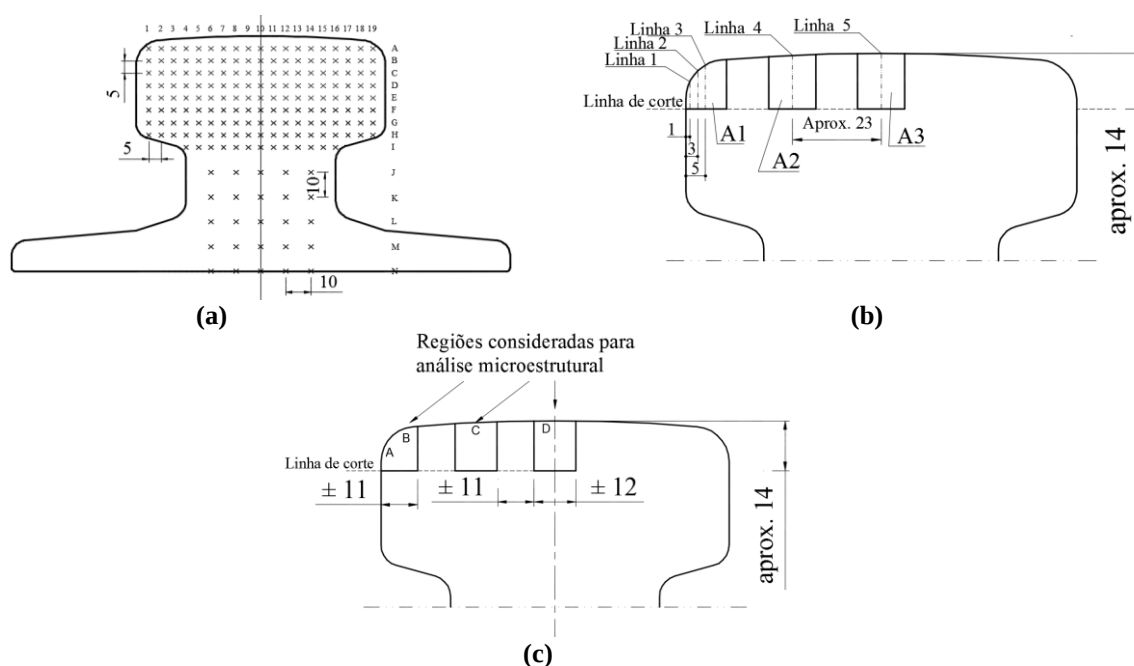


Figura 6. Representações esquemáticas das posições das caracterizações: (a) medições de dureza Rockwell B, (b) posições das medições de dureza Vickers (microdureza), (c) de análise da microestutura (dimensões em mm).

3. RESULTADOS

3.1. Composição Química

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise química dos trilhos investigados. Verifica-se que as composições químicas das amostras são diferentes perfazendo, dessa forma, uma variável para o trabalho. Os valores constantes na respectiva tabela são condizentes com os valores previstos na norma DIN 536/1991. Os trilhos com menor e maior teores de carbono são denominados de T05 e T08, respectivamente.

Tabela 2. Composição química (% em peso) do trilho novo.

Elementos	T05 (%)	T08 (%)
C	0,486	0,796
Si	0,232	0,247
Mn	0,861	1,090
S	0,0192	0,0075
Cr	0,0352	0,0735
Ni	0,0223	0,0234
Cu	0,0152	0,0549

3.2. Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Trilhos

Os valores médios de dureza ao longo da seção transversal dos trilhos são apresentados na Fig (7). Verifica-se que, em geral, não há diferenças consideráveis na propriedade tanto ao longo do boleto como na alma e no patim na referida seção para ambas as amostras. os resultados estão de acordo com o valor mínimo estabelecido na especificação do fornecedor, que é 200 HB (≈ 94 HRB) para T05 e 262 HB (≈ 103 HRB) para T08, sendo a diferença observada condizente com o maior percentual de carbono na amostra T08.

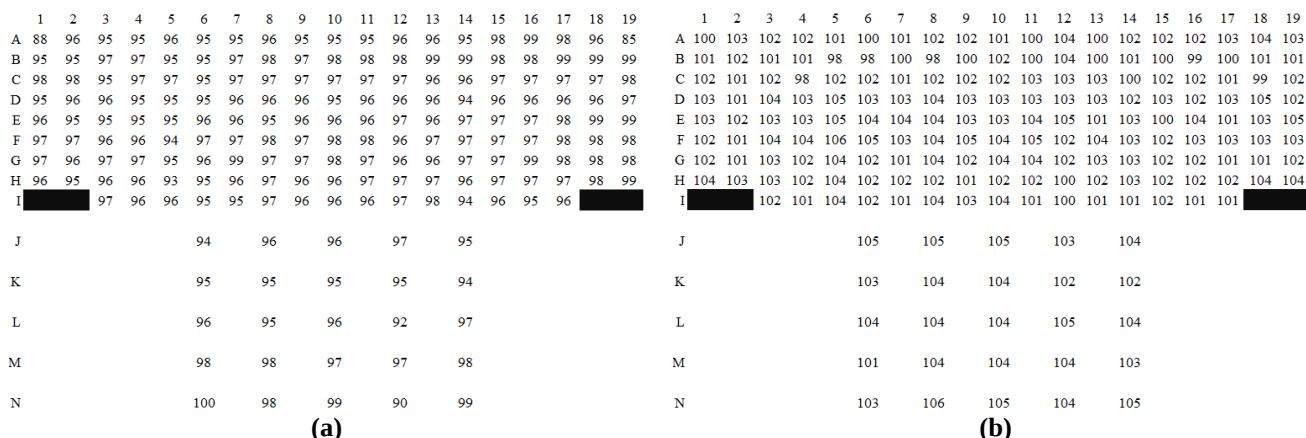
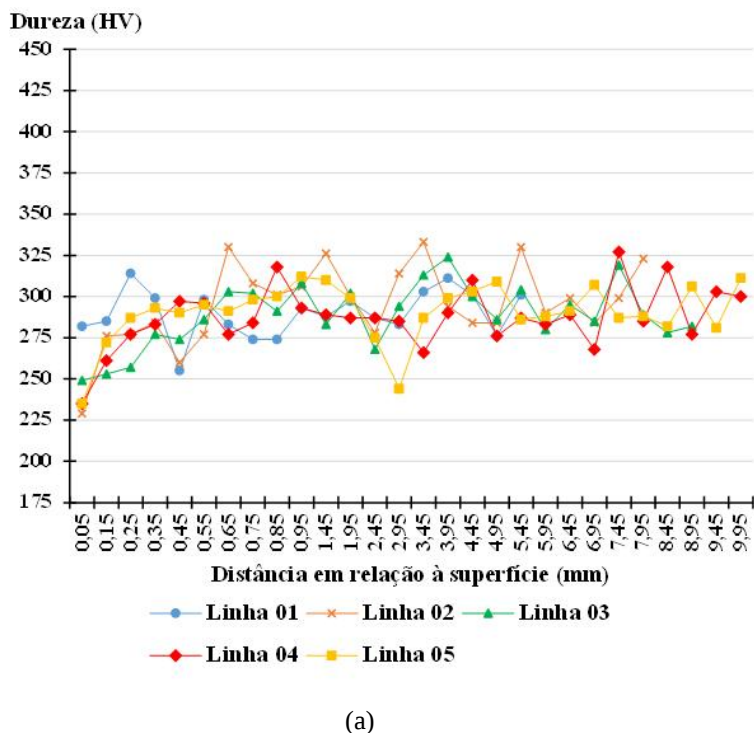


Figura 7. Perfil de dureza médio Rockwell B (HRB): (a) seção transversal amostra T05, (b) seção transversal amostra T08.

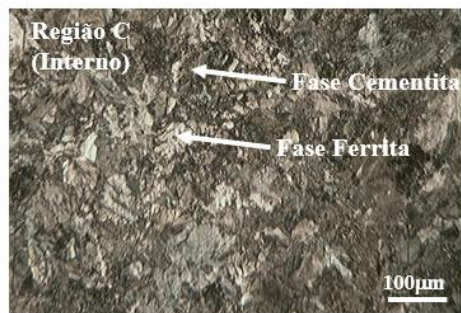
Na Figura (8) são apresentadas imagens da microestrutura dos materiais e as distribuições de dureza Vickers a partir da superfície dos trilhos, de acordo com a representação previamente exibida na Fig (6). Considerando as micrografias, ressalta-se que são apresentadas apenas imagens da região B, uma vez que as demais apresentarem aspectos similares. Em relação ao T05, a microestrutura do material, como um todo, apresenta-se condizente com as composição química apresentada, caracterizando-se um aço hipoeutetóide com grãos de ferrita proeutetóide situados entre as colônias de perlita. Em adição aos constituintes presentes, observa-se a ocorrência de grãos de ferrita em maior proporção na região próxima à superfície do trilho representada pela área clara das micrografias, Fig (8.b). Esse fenômeno pode estar relacionado à ocorrência de descarbonetização do material durante o processo de fabricação do componente. Como essa operação é a laminação a quente, os níveis de temperatura utilizados certamente foram elevados o suficiente para permitir a difusão dos átomos de carbono do trilho para a atmosfera, levando durante o resfriamento ao desenvolvimento de uma microestrutura típica de um teor de reduzido de carbono com grande quantidade de ferrita pró-eutetóide. Resultados similares foram observados no trabalho realizado por Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013).

Ahlstrom; Karlsson (2005) descreveram a ocorrência de valores de dureza mais baixos próximos à superfície associados ao processo de descarbonetização (primeiros pontos de todas as linhas) corroborando com o resultado apresentado na Fig. (8.a). Nesse caso, verifica-se uma ligeira tendência de aumento (com oscilações) dos valores de microdureza à medida que o ponto de medição se afasta da superfície relacionando-se de forma lógica com a maior presença das colônias do constituinte perlita (região escura da micrografia) representado na Fig. (8.c).

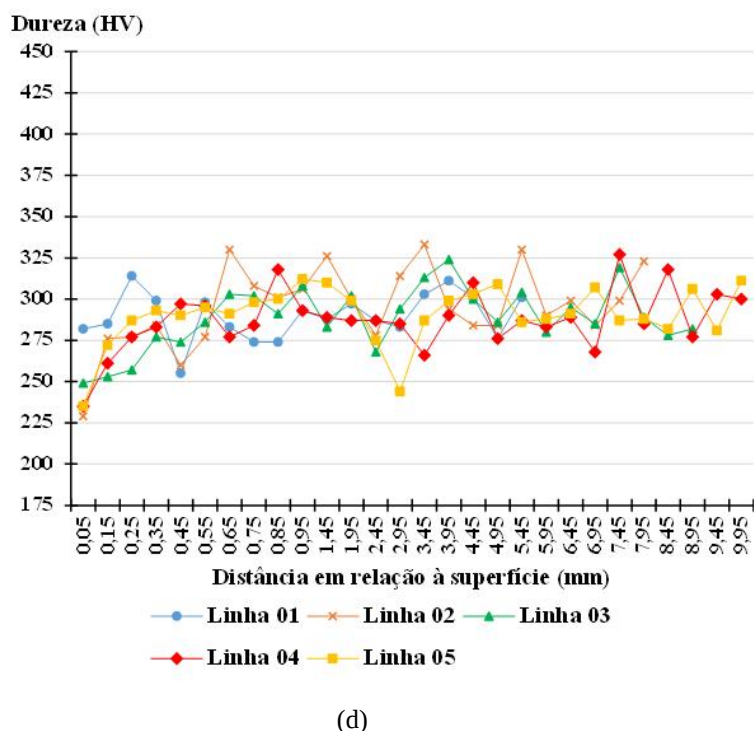
Considerando o trilho T08, a predominância de perlita na microestrutura é evidenciada na Fig. (8.f), fato que está de acordo com a composição química do componente e ainda com os resultados obtidos nos ensaios de dureza. No entanto, observa-se nas camadas mais superficiais (Fig. 8.e) a presença de ferrita pró-eutetóide, cuja quantidade diminui à medida que se afasta do topo do boleto. Acredita-se que, da mesma forma que ocorre em T05, esse resultado está relacionado à ocorrência do fenômeno de descarbonetização durante a fabricação (por laminação a quente) e resfriamento do trilho. Na Figura (8.d) são apresentados os perfis de dureza Vickers da amostra T08. Verifica-se que para as cinco linhas, o primeiro valor de dureza é inferior aos demais. Este resultado parece estar relacionado, mais uma vez, à porção superficial descarbonetada do boleto sendo que o efeito da descarbonetização, destacado na Fig. (8.e) é mais significativo aqui do que na amostra T05 em função do maior teor de carbono (maiores diferenças de dureza do primeiro para os demais pontos) em T08.



(b)



(c)



(e)



(f)

Figura 8. Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da amostra: T05 [(a), (b) e (c)] e T08 [(d), (e) e (f)].

3.3. Tensões Residuais

As tensões residuais próximas às regiões de rodagem nas amostras T05 representados nas Figs. (9.a), (9.b) e (9.c) e T08 nas Figs. (9.d), (9.e) e (9.f). Buscando normalizar os gráficos gerados e, assim, permitir uma comparação adequada entre os valores de tensões aliviadas, foram adotados nos eixos das ordenadas os valores máximos das tensões principais (σ_{max} e σ_{min}) e dos ângulos das tensões principais (β) em relação ao *strain gage* 1 (Fig. 4). Apesar de terem

sido feitos 20 incrementos (1 mm de profundidade) adotou-se nos gráficos valores correspondentes a pontos de 10 incrementos (0,5 mm de profundidade). Esses ajustes nas escalas visaram propiciar uma melhor visibilidade nas medidas de tensões residuais próximas à superfície. Na maioria das medições foram obtidos perfis semelhantes ao apresentado por Martins et al. (2004), que aplicou a técnica de análise de tensões residuais pelo método do furo cego.

Observa-se que os valores de tensões residuais são elevados (sendo superiores a 80% da tensão de escoamento mínima de referência do fabricante), tornando o componente propenso à formação de trinca, segundo Lo; Mummery; Buttle (2010).

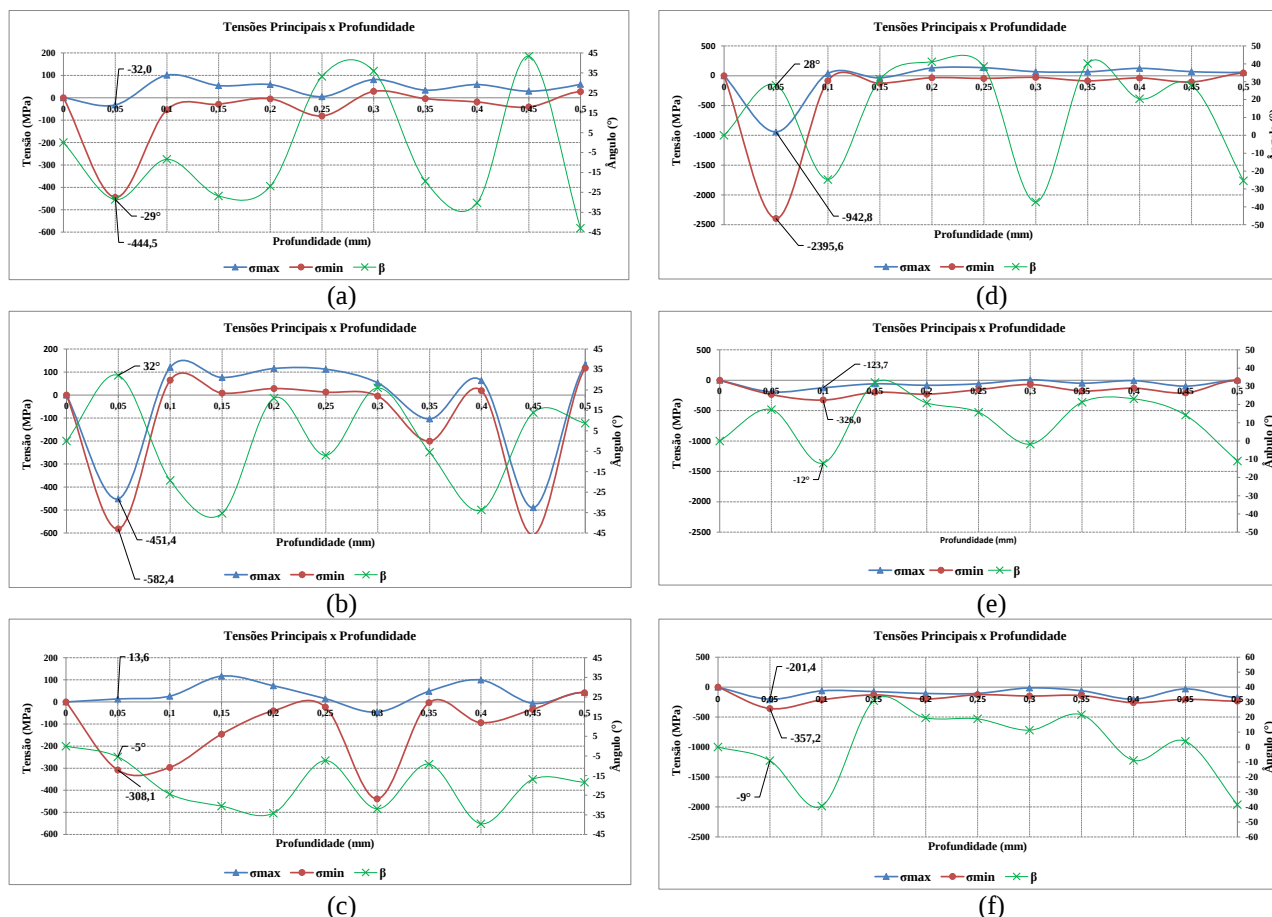


Figura 9. Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da amostra: T05 [(a), (b) e (c)] e da amostra T08 [(d), (e) e (f)] T08].

A Tabela (3) apresenta os picos das tensões principais aliviadas máximas, mínimas e ângulo β para os pontos de cada amostra.

Tabela 3. Tensões principais aliviadas e ângulo β correspondentes.

Amostra	Posição do furo	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	$\sigma_{mín.}$ (MPa)	β (°)
T05	1	-32	-445	-29
	Centro	-451	-582	32
	2	14	-308	-5
T08	1	-943	-2396	28
	Centro	-124	-326	-12
	2	-201	-357	-9

Em ambos os casos foi observada a forte incidência de elevadas tensões compressivas na região do boleto resultante do processo de prensagem de rolos sobre a matéria prima durante a formação do produto final por meio do processo de

laminação (AMOROS, 2008). Assim, a expectativa em se ter tensões predominantemente tratativas para um trilho novo desempenado não foi confirmada, divergindo em relação a literatura (SCHLEINZER; FISCHER, 2001).

Corroborando com a literatura (BIEMPICA et al., 2009), o pico das tensões residuais, que corresponde ao ponto de alívio das tensões residuais, ocorre próximo à superfície. Esse comportamento é bem caracterizado ocorrendo próximo à superfície do boleto à 0,05 mm como observado nas Figs. (9.a), (9.b), (9.d) e (9.f).

A extremidade 2 da amostra T05, apresentada na Fig. (9.c), parece não ter tido a tensão superficial aliviada corretamente. Na medição central da amostra T08, ilustrada na Fig. (9.e), foi constatado um alívio de tensão residual deslocada à 0,1 mm de profundidade diferenciando-se das demais situações (0,05 mm).

Conforme Garnham; Davis (2009), as variações de composição química do material do trilho associadas ao processo de laminação podem afetar o grau de homogeneidade da microestrutura. Esse fato é percebido de forma mais notória para os valores de tensões aliviadas encontrados no ponto 1 de T08 no qual foram observados valores dispersos em relação aos demais pontos da mesma amostra.

Dessa forma, a dispersão dos resultados revelados nos ensaios de tensões residuais dos trilhos (ambas composições) torna-se mais compreensível em função das caracterizações realizadas. Essa dispersão também é revelada pelas variações do ângulo β apresentadas em todos os gráficos dos trilhos de ambas composições.

A heterogeneidade microestrutural retratada para as amostras não permite avaliar de forma linear e proporcional as tensões residuais quanto ao aspecto dureza. No entanto, ao comparar diretamente amostras novas e de percentuais de carbono diferentes entre si, ou seja, T05 e T08, a tendência prevista por Pyzalla et al. (2001) que atribuiu maiores níveis de tensões residuais para materiais de maior valor de dureza parece ocorrer de forma mais acentuada nas tensões compressivas (σ_{min}).

4. CONCLUSÕES

Os perfis de dureza demonstraram haver considerável influência em relação à composição química, ou seja, valores distintos de dureza foram observados para os dois trilhos. De forma macro, com utilização da dureza Rockwell foi possível vislumbrar a homogeneidade da propriedade ao longo da seção transversal dos trilhos. Em um segundo momento, de forma pontual, a dureza Vickers (microdureza) propiciou compreender a variação de propriedade em função da posição em relação à superfície dos trilhos investigados. A análise microestrutural evidenciou a presença de ferrita proeutetóide e perlita e predominantemente perlita para os trilhos com teor de carbono de aproximadamente 0,5% e 0,8%, respectivamente. A ocorrência de descarbonetização do material foi verificada para os dois trilhos avaliados, possivelmente relacionada ao processo de fabricação, laminação a quente, dos componentes.

A aplicação da técnica do furo cego para análise de tensões residuais na superfície das amostras dos trilhos atingiu o propósito de aliviar as tensões oriundas do processo de fabricação. O processo de fabricação do trilho, no qual esforços de compressão a quente são mandatórios, parece ter influenciado na presença de trações compressivas na superfície, contrariando as expectativas quando ao tipo de tensão esperada (tratativa) em função de um processo de desempenho subsequente característico em produtos longos. Mesmo sendo regido por uma norma (ASTM E837-13a), a heterogeneidade microestrutural apresentou-se como fator influente na uniformidade dos resultados para o referido ensaio.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP pelo apoio financeiro por meio da compra de equipamentos, ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear CDTN/CNEN pela disponibilização da infraestrutura e pelo apoio à realização dos ensaios para a análise das tensões residuais pelo método do furo cego e ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG pelo uso dos laboratórios para os demais experimentos do trabalho.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHLSTROM, J.; KARLSSON, B. Fatigue behavior of rail steel – a comparison between strain and stress controlled loading. **Wear**. Goteborg, v. 258, n. 7-8, p. 1187-1193, mar. 2005.
- ALWAHDI, F. A. M.; KAPOOR, A.; FRANKLIN, F. J. Subsurface microstructural analysis and mechanical properties of pearlitic rail steels in service. **Wear**. Elbyada, v. 302, n. 1-2, p. 1453-1460, abr. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) **E837-13a** Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, 2013.
- AMOROS, R. T. **Avaliação de tensões residuais em chapas planas de aço carbono, destinadas a processos de corte a laser, pelo método da anisotropia planar**. 2008, 147 f. Dissertação (Mestrado) – Desenvolvimento em Tecnologia, Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba.

- ArcelorMittal Commercial RPS - Document ref. CRTS01.1) – Technical Specification for Delivery of Crane Rails From ArcelorMittal Rodange (Luxemburgo), 2014.
- BIEMPICA, C. B. ‘. Nonlinear analysis of residual stresses in a rail manufacturing process by FEM. **Applied Mathematical Modelling**, Oviedo, v. 33, n. 1, p. 34-53, jan. 2009.
- CARDOSO, F. A. A. **Medição de tensões residuais a partir de um ensaio de flexão em quatro pontos**. 2012, 107 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 536/1991**: crane rails: hot rolled flat bottom crane rails (type A) – dimensions, section parameters and steel grades, 1991.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653.
- FILHO, F. T. P. **Avaliação de sistemas de medição de tensões e tensões residuais em dutos**. 2004, 105 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica (EMC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.
- GARNHAM, J.E.; DAVIS, C.L. **Rail materials**: wheel– rail interface handbook, Birmingham, 2009, p. 125-171.
- KANDIL, F. A. et al. A review of residual stress measurement methods – a guide to technique selection. NPL report MATC (A) 04. **Research Gate**. Teddington, jan. 2001.
- LASMIS, J. L. Prestress engineering of structural material: a global design approach to the residual stress problem. In: TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. **Handbook of Residual stress and deformation of steel**. Ohio: ASM International, 2002, p. 11-26.
- LO, K.H.; MUMMERY, P.; BUTTLE, D.J. Characterization of residual principal stresses and their implications on failure of railway rails. **Engineering failure analysis**, Macau, v. 17, n. 6, p. 1273–1284, set. 2010.
- LOHE, D; LANG, K. H.; VOHINGER, O. Residual stresses and fatigue behavior. In: TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. **Handbook of Residual stress and deformation of steel**. Ohio: ASM International, 2002, p. 27-53.
- MARTINS, C. O. D. et al. Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100. **Matéria**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 23-31, 2004.
- PYZALLA, A. et al. Changes in microstructure, texture and residual stresses on the surface of a rail resulting from friction and wear. **Wear**, Berlin, v. 251, n. 1-12, p. 901-907, out. 2001.
- RINGSBERG, J. W.; LINDBÄCK, T. Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheel-rail contact loads. **International Journal of Fatigue**, Goteborg, v. 25, n. 6, p. 547-558, jun. 2003.
- SCHLEINZER, G.; FISCHER, F.D. Residual stresses in new rails. **Materials Science and Engineering A**, Leoben, v. 288, n. 2, p.280–283, set. 2000.
- SCHLEINZER G.; FISCHER F.D. Residual stress formation during the roller straightening of railway rails. **Mechanical Sciences**, Leoben, v. 4, n. 10, p. 2281–2295, out. 2001.

EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN RAILS EMPLOYED IN TRANSPORTATION OF LIQUID STEEL IN STEEL PLANT BY THE HOLE DRILLING METHOD

Anderson de Matos Gomes, gomes.anderson@gmail.com
Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br
Nilton da Silva Maia, niltonmaia@des.cefetmg.br
Carlos Eduardo Santos, carloseduardo@deii.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais. Endereço para correspondência: Av. Amazonas, 5.253 - Nova Suíça - Belo Horizonte – Minas Gerais.

Abstract: *Defined as support and guide industrial equipment, the rail component is a very important element in the continuity of the operation of an industrial plant production system. High values of cyclic loading associated with remaining residual stresses of the manufacturing process render the said component susceptible to failures of various kinds, requiring constant replacement of part or all of the same. In this context, in the present work the distribution of residual stresses of the manufacturing process was experimentally investigated on the surface of rails used as a transport route for liquid steel in the steel industry. Rails with two chemical compositions were evaluated. Relieved residual stresses were detected by the hole drilling method. The results obtained by this technique considered the possible microstructural variations of the material. The measured values exceeded the limits provided by norm, being characterized by tensions predominantly compressive.*

Key-words: rail, residual stresses, hole drilling method.