

AVALIAÇÃO COMPORTAMENTAL EM FLUÊNCIA DE VASOS PARA TRANSPORTE DE MATERIAL SIDERÚRGICO: CASO DOS CARROS TORPEDO DA COMPANHIA ARCELORMITTAL TUBARÃO¹

Octávio Manga Eulotério²
Salustiano Martins P. Junior³
Nirlando Antônio Rocha⁴
Jefferson José Vilela⁵
Leonardo Barbosa Godefroid⁶
Luiz Cláudio Cândido⁶

Resumo

Os carros torpedo utilizados em usinas siderúrgicas estão submetidos a altos níveis de carregamento e temperaturas relativamente altas, assim estão sujeitos à deformação plástica ao longo do tempo. Este trabalho estudou as características comportamentais de um aço do tipo 16Mo3 sob fluência. Além da caracterização do material metálico, foram realizadas simulações matemáticas para verificar a distribuição de tensões, e análise termográfica em um carro torpedo. Foram realizados ensaios de ruptura por fluência, inicialmente, com valores próximos ao limite de escoamento do material, e em níveis reais de trabalho do aparelho. Notou-se que a temperatura crítica de operação de um carro torpedo é em torno de 440°C. Os CPs ensaiados sob fluência sofreram ruptura para níveis de carregamento abaixo de 95% até 70% do limite de escoamento. Com 50% os CPs não se romperam em tempos maiores que 3.000 horas de ensaio.

Palavras-chave: Carro torpedo; Aço estrutural; Fluência.

THE BEHAVIOR OF HOT-METAL TRANSFER CAR IN CREEP: CASE FROM ARCELORMITTAL TUBARÃO METALLURGICAL COMPANY

Abstract

The hot-metal transfer cars are subjected to the creep phenomenon. The objective of this work was to evaluate the behavior of 16Mo3 steel type in constant load, in a less level yielding stress, in 450°C. It was observed that the operation critical temperature of the hot-metal transfer car was 440°C. Mathematic simulation was used to detect the stress distribution in the equipment. The material underwent creep easily in stress around yielding stress. With 50% yielding stress the specimen did not break during more than 3,000 hours.

Key words: Hot-metal transfer car; Structural steel; Creep

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engº Mecânico; Mestrando da REDEMAT; octavio.euloterio@arcelormittal.com

³ Engº Mecânico; M.C.; salustiano.pinto@arcelomittal.com

⁴ Técnico Ensaios Mecânicos – CDTN/CNEN; nar@cdtn.br

⁵ Engº Mecânico.; M.C.; D.C. – CDTN/CNEN; jjv@cdtn.br

⁶ Engº Metal.; M.C.; D.C; Membro da ABM; Prof. Associado II; Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais; Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais – Escola de Minas/UFOP; leonardo@demet.em.ufop.br ; candido@em.ufop.br

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais resistentes às condições de ambientes severos, bem como altas tensões e temperaturas, tornou-se uma solução para atendimento às necessidades científicas, tecnológicas e econômicas, principalmente no que diz respeito ao aumento de vida útil, otimização de recursos e confiabilidade de equipamentos. De acordo com Siegel,⁽¹⁾ estas necessidades requerem materiais disponíveis para trabalhos em condições próximas dos seus limites de capacidade, de tal forma que conjuguem uma combinação de boas propriedades mecânicas a altas temperaturas e resistência ao processo de degradação, condições evidentemente necessárias para resistir a ambientes de serviço hostis por um longo período de tempo. Nabarro e Villiers,⁽²⁾ e Evans e Wilshire⁽³⁾ abordam o assunto sobre fluência de forma detalhada.

O Carro Torpedo (CT) desempenha papel fundamental na logística siderúrgica por transportar toda produção de ferro gusa em altas temperaturas. Os CTs são constituídos de um vaso em aço especial (16 Mo3) com boas propriedades de resistência mecânica a altas temperaturas, revestido internamente com material refratário. Ao longo dos anos de trabalho os CTs apresentam grandes deformações plásticas em seus vasos caracterizadas por ovalização e empenos em seus apoios.

Um amplo estudo estrutural foi desenvolvido com base nos projetos e em dados colhidos em campo, no intuito de identificar possíveis falhas nos CTs e propor melhorias. Não foram encontradas falhas significativas no projeto relacionadas ao vaso e suas deformações presentes, concluindo como sendo resultado direto das condições de operação e do tempo de vida. O trabalho identificou, porém que parte das deformações encontradas possivelmente é resultado do fenômeno de fluência no material exposto a constante temperatura elevada e intenso ciclo de carregamento.

A Figura 1 ilustra esquematicamente um CT utilizado na Companhia ArcelorMittal Tubarão (Cia AMT). E a Figura 2 mostra a exposição de um CT à calor durante etapa de descarregamento na aciaria.

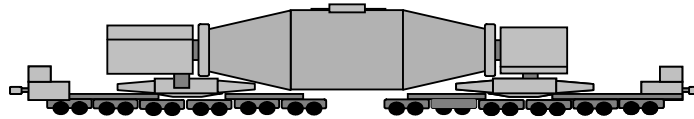


Figura 1 – Representação esquemática de um carro torpedo da Cia AMT.



Figura 2 – Fotografia de um carro torpedo da Cia AMT sob ação de radiação.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado neste trabalho foi o aço EN 10028-2, Grau 16Mo3. Um tipo de aço estrutural para aplicações a altas temperaturas, como caldeiras, vasos de pressão, vasos transportadores e reatores nucleares. As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição química e propriedades mecânicas do material. A Figura 3 ilustra o corpo-de-prova (CP) utilizado no ensaio de fluência, com diâmetro de $12,50 \times 10^{-3} \text{m}$.

Tabela 1 - Composição química nominal (% em peso) do aço 16Mo3⁽⁴⁾

C	Si _{Máx}	Mn	P _{Máx}	S _{Máx}	Cr _{Máx}	Cu _{Máx}	Mo	Ni _{Máx}
0,12-0,20	0,35	0,40-0,90	0,030	0,025	0,30	0,30	0,25-0,35	0,30

N - 120 ppm

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço 16Mo3

σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	ϵ (%)
283	442	27

σ_e - limite de escoamento; σ_r - limite de resistência; ϵ (%) - alongamento total (%).

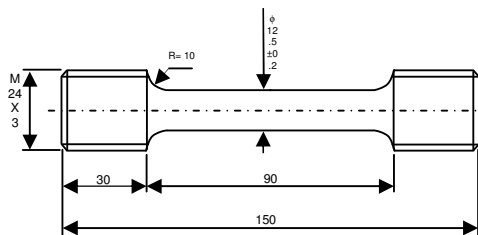


Figura 3 – Representação esquemática do corpo-de-prova para ensaios de fluência.⁽⁵⁾

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina servo-hidráulica Instron de 25t, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFOP. Os ensaios de ruptura por fluência foram realizados em um equipamento do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/Belo Horizonte) (Figura 4).⁽⁶⁾



Figura 4 – Equipamento para ensaios de fluência.

A Figura 5 (a,b) apresenta a microestrutura do aço analisado. Nota-se que é constituída de uma estrutura com ferrita e perlita, com certo bandeamento de perlita.

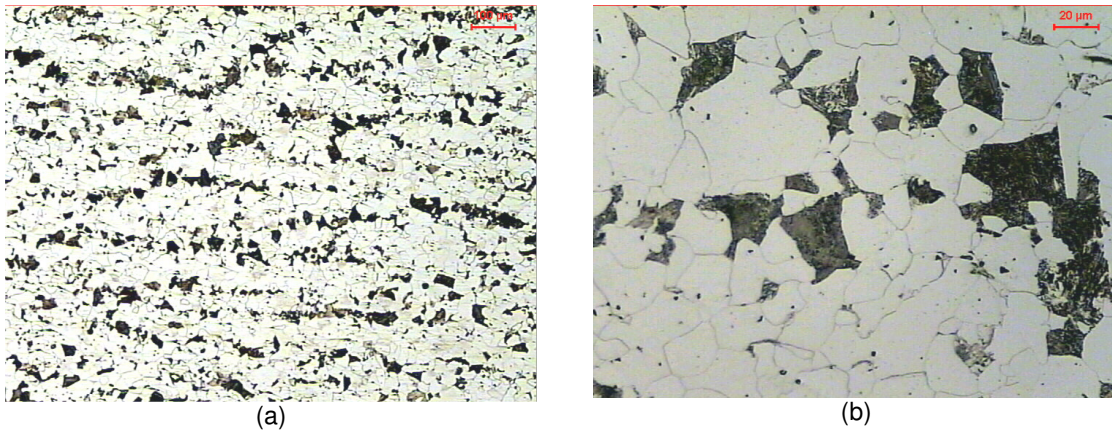


Figura 5 – Microestrutura do aço 16Mo3; ataque: Nital (2%); (a) 100X; (b) 500X.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 6 e 7, observam-se alguns valores referentes às deformações encontradas em um carro torpedo da empresa. Os dados destacados em vermelho indicam uma predição de condições futuras, baseada nos dados topográficos levantados em campo.

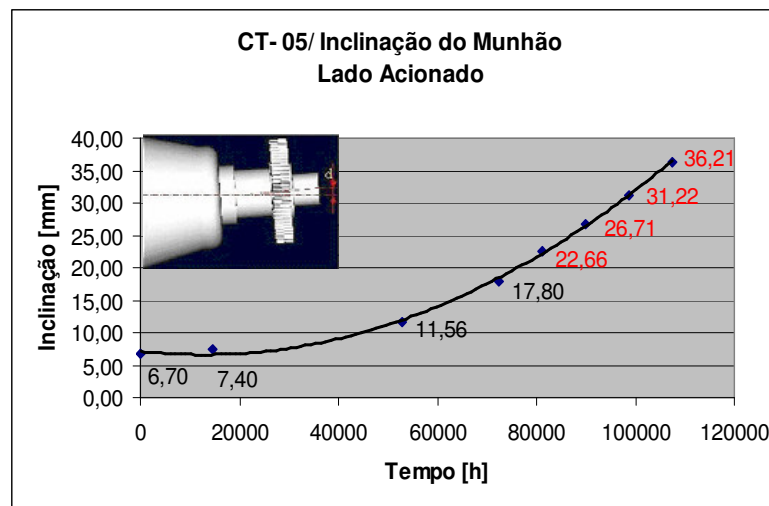


Figura 6 - Curva de inclinação do munhão de um carro-torpedo da Cia AMT.

Nos ensaios de ruptura por fluência, foi simulada nos corpos-de-prova da primeira amostragem a tensão crítica em que os carros torpedo são submetidos. Para isso, a definição deste estado de tensão foi realizada por meio de cálculo analítico e numérico. A Figura 8 apresenta os valores encontrados em análise realizada com a utilização do *software Ansys*.

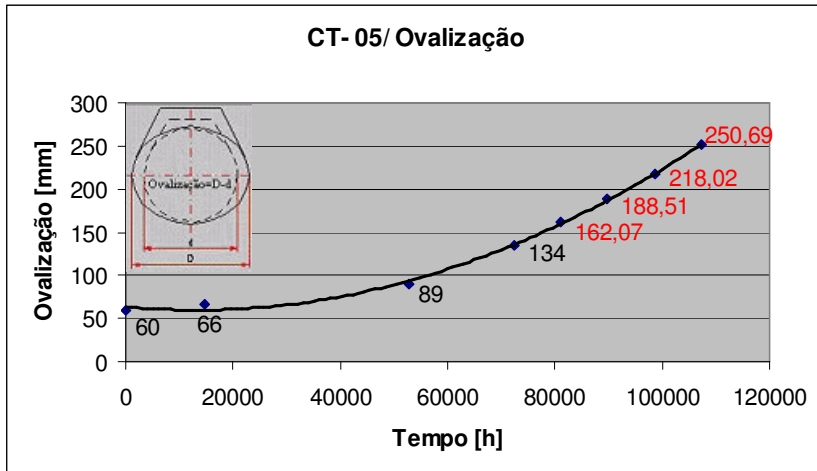


Figura 7 - Curva de ovalização de um carro-torpedo da Cia AMT.

Com base na tensão crítica, definiu-se o valor da carga aplicada ao corpo-de-prova, de acordo com os seguintes dados:

$$\sigma_T \cong 21\text{MPa}$$

$$\phi_{CP} = 12,50 \times 10^{-3}\text{m}$$

Cálculo da força aplicada ao corpo-de-prova (F_A): $\sigma_t = F_A / A_{CP}$

Portanto, $F_A \cong 2.577\text{N}$.

Onde:

σ_T - tensão de trabalho do carro torpedo;

ϕ_{CP} - diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova;

A_{CP} - área da seção transversal do corpo-de-prova.

Considerando o sistema de alavanca que constitui a máquina, utilizada para realização dos ensaios de fluência, definiu-se a carga de peso morto (P) aplicada na extremidade da mesma para obtenção da carga, $F_A = 2.577\text{N}$ no CP.

$$\begin{aligned} \Sigma M_O &= 0 \\ L_1 \cdot P - L_2 \cdot F_A &= 0 \end{aligned}$$

Como $L_1 = 1,50\text{m}$ e $L_2 = 0,10\text{m}$, tem-se que $P = 171,50\text{N}$.

Onde:

L_1 – distância do ponto de apoio da máquina ao suporte de pesos;

L_2 – distância do ponto de apoio ao corpo-de-prova de fluência.

Considerando que as cargas reais de trabalho são relativamente baixas, procurou-se inicialmente aplicar níveis de tensão próximos ao limite de escoamento (95%). Após constatação de que CPs sofreram fratura por fluência, neste nível de carregamento, diminuiu-se para 70%, o que novamente pôde ser observado o fenômeno com rompimento de CPs. Ensaios com 50% do limite de escoamento não promoveram ruptura de CPs num tempo superior a 3.000h.

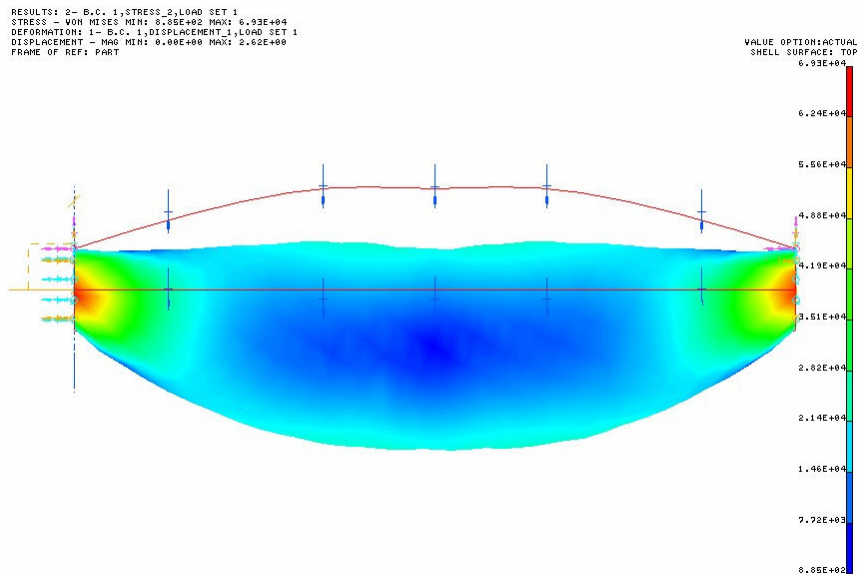


Figura 8 - Representação do estado de tensões no carro torpedo; *software Ansys*.

Conforme dados termográficos obtidos em um carro torpedo, ilustrados na Figura 9, a temperatura crítica de operação dos carros torpedo é de aproximadamente 440°C. A partir desta temperatura de referência, definiu-se a temperatura de aproximadamente 450°C para realização dos ensaios.

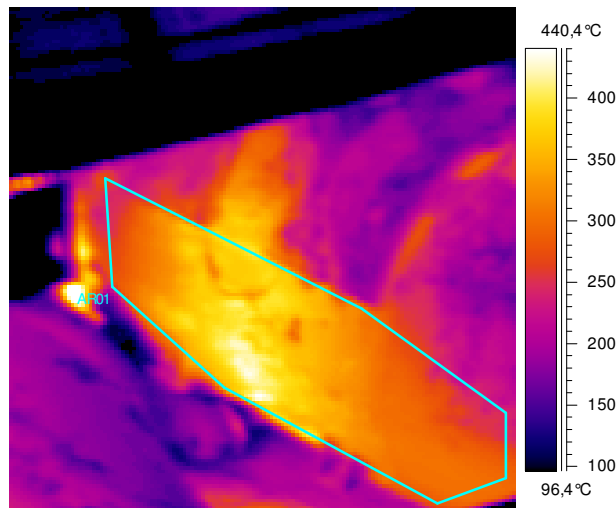


Figura 9 - Análise termográfica realizada em carro torpedo da Cia AMT.

A Figura 10(a-d) apresenta alguns CPs que foram ensaiados sob fluência. Pode-se notar o efeito da temperatura e carregamento na deformação plástica do material, comprovando o fenômeno de fluência para níveis de carregamento inferiores ao limite de escoamento. O aspecto da macrofratografia é similar ao desenvolvido em ensaios de tração, na temperatura ambiente, com fratura do tipo “taça-cone” característica de materiais com comportamento dúctil.



Figura 10 – Corpos-de-prova de ensaios de ruptura por fluência; (a) CP rompido, dentro do forno; (b) e (c) comparação entre um CP não ensaiado (A), e outros ensaiados – (B) não rompido e (C) rompido; (d) detalhe de um CP com fratura do tipo “taça-cone”.

A Figura 11(a-f) ilustra a microestrutura do CP ensaiado sob fluência correspondente à Figura 10(b,B), em que o mesmo não sofreu ruptura, mas apresentou acentuada estricção (deformação plástica localizada). Pode-se observar na Figura 11(c-f) que, na região central onde ocorreu o “empescoçamento”, os grãos estão alongados, caracterizando a deformação plástica do material.

A Tabela 3 apresenta os resultados de alguns ensaios de ruptura por fluência, onde nota-se que para níveis próximos ao limite de escoamento o tempo de ruptura foi relativamente rápido. Com o decréscimo da carga, particularmente, 50% do limite de escoamento o CP não sofreu rompimento num tempo superior a 3.000 horas.

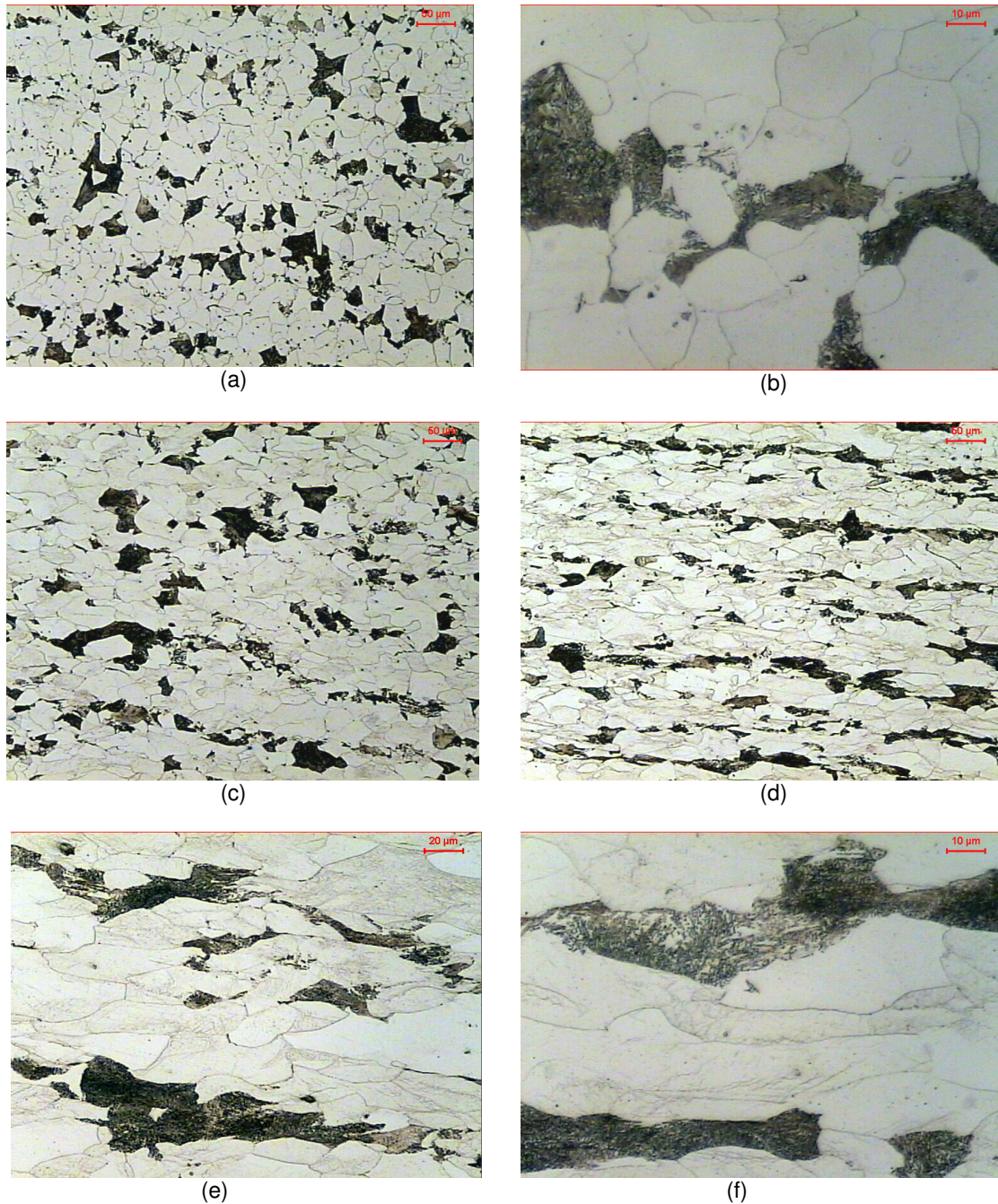


Figura 11 – Microestrutura do CP ensaiado sob fluência, correspondente à Figura 10(b,B); (a) - 200X e (b) - 1000X, região não deformada plasticamente de maneira localizada; (c) e (d) - 200X, (e) - 500X, (f) - 1000X, evolução da região que sofreu estrição; ataque: Nital (2%).

Tabela 3 – Dados de ensaios de ruptura por fluência do aço 16Mo3; 450 °C

Ensaio	Carga(N)/Tensão aplicada (MPa)	% σ_e	Tempo (h)
1	2.099 / 269	95	258
2	1.640 / 198	70	685
3	1.148 / 142	50	NR

σ_e . limite de escoamento = 283MPa; NR – não rompeu num tempo superior a 3.000 horas.

4 CONCLUSÕES

- ◆ Constatou-se que a estrutura metálica do carro torpedo sofreu deformação plástica, e que a temperatura crítica de operação é em torno de 440°C.
- ◆ O aço do tipo 16Mo3 ensaiado sob regime de fluência, para níveis inferiores ao limite de escoamento sofreu acentuada deformação plástica e ruptura, na temperatura de 450°C.
- ◆ Com tensão aplicada de 50% do limite de escoamento o material não rompeu com tempo superior a 3.000 horas, na temperatura de 450°C.
- ◆ Observou-se que na região de deformação plástica localizada, devido ao fenômeno de fluência, a microestrutura encontrava-se com textura cristalográfica acentuada.

REFERÊNCIAS

- 1 SIEGEL, M. Tendências em ligas para temperaturas elevadas. Metalurgia e Materiais, p.208-211, 1996..
- 2 NABARRO, F. R. N.; VILLIERS, H. L. The physics of creep. London: Taylor & Francis, 1995. 413p.
- 3 EVANS, R. W.; WILSHIRE, B. Introduction to creep. London: Oakdale Printing Company Ltd, 1993. 115p.
- 4 UNE-EN 10028-2: 1992. Productos planos de acero para aplicaciones a presión. aceros no aleados y aleados con propiedades a altas temperaturas.
- 5 ASTM 2000, Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials – *American Standard Testing Materials* – ASTM E-139-00.
- 6 VILELA, J.J., DI LORENZO, R.F., ROCHA, N.A. A implantação do ensaio de fluência usando a técnica de peso morto no Laboratório de Ensaio Mecânicos do CDTN/CNEN. In: CONEN 2004, 10p.