

## Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga térmica

Brandim, A.S.<sup>I</sup>; Sousa, R.R.M.<sup>I</sup>; Alves Jr., C.<sup>II</sup>

<sup>I</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí, Departamento de Mecânica, Teresina, PI, Brasil.

e-mail: [sabrandim@yahoo.com.br](mailto:sabrandim@yahoo.com.br), [romulorms@gmail.com](mailto:romulorms@gmail.com)

<sup>II</sup>Labplasma, Departamento de Física – UFRN, Campus Universitário, 59072-970 Natal, RN, Brasil.

e-mail: [clodomirom@dem.ufrn.br](mailto:clodomirom@dem.ufrn.br)

---

### RESUMO

Este trabalho apresenta a análise termo-mecânica do aço inoxidável martensítico 423Co quando submetido a um ensaio de fadiga térmica visando simular as condições de trabalho de rolos de lingotamento contínuo. Para tanto, foi desenvolvido um equipamento que reproduzisse o comportamento dos materiais quando submetidos a contínuos gradientes térmicos. Nesse estudo foram considerados os seguintes parâmetros: o sistema de aquecimento e resfriamento para geração dos ciclos térmicos; o tipo e geometria do corpo-de-prova; a restrição total e o controle do estado de tensões aplicados no corpo-de-prova durante o ensaio. O monitoramento e o controle desses parâmetros foram realizados por um sistema de aquisição de dados que permitiu a correção “*in-locu*” dos mesmos durante o ensaio. Foi observado que esses parâmetros propiciaram de forma eficaz a simulação eficientemente do fenômeno da fadiga térmica, nos materiais estudados, principalmente no aço inoxidável martensítico 423Co, foco desse trabalho. Os ensaios de fadiga térmica realizados no equipamento mostram a evolução dos principais mecanismos de deterioração nos metais, particularmente para o aço inoxidável martensítico 423Co utilizado como revestimento dos rolos de lingotamento contínuo.

**Palavras-chaves:** fadiga térmica, ensaio de fadiga térmica, comportamento termo-mecânico.

---

### Development by one Equipment to Thermal Fatigue Test

#### ABSTRACT

This research presents a thermo-mechanical analysis of the martensitic stainless steel 423Co when submitted to a thermal fatigue test carried out in such a way that simulates the work conditions of the rolls used in continuous caster process. In order to perform this experiment it was developed an equipment to reproduce the behavior of materials submitted to a continuous thermal gradient. In this study the following parameters were considered: the cooling and heating system to produce thermal cycles; the type and geometry of the sample; the total restraint and control of the strain state applied on the sample during the test. The monitoring and control of these parameters were carried out through a system of data acquisition which allows “*in situ*” correction during the test. It was observed that these parameters provide an efficient simulation of the thermal fatigue phenomenon on the analyzed material, mainly on the martensitic stainless steel 423Co. The thermal fatigue tests realized with the equipment showed the evolution of the main deteriorating mechanism in metals, particularly for the martensitic stainless steel 423Co which is utilized as covering of the studied rolls.

**Keywords:** thermal fatigue, thermal fatigue test, thermo-mechanical behavior.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Fadiga térmica é por definição, um processo de aplicação repetitiva de ciclos térmicos, durante o qual tensões e deformações são resultantes exclusivamente da imposição de gradientes de temperatura sem a aplicação de cargas mecânicas. A falha inicia-se com a ocorrência de trincas na superfície do material, que se propagam com a continuidade da aplicação dos ciclos térmicos, podendo resultar na ruptura do material [1, 2].

A resistência do metal à fadiga térmica é uma característica importante para o aumento da sua vida útil em diversas aplicações na engenharia. Por outro lado, é uma propriedade difícil de ser determinada experimentalmente, pois o comportamento em serviço é influenciado por um número de fatores difíceis de serem reproduzidos em laboratório [3, 4].

A condição real de carregamento térmico em serviço de estruturas e partes de máquinas é difícil de ser simulada com precisão em laboratório. Entretanto, a simulação dos ciclos térmicos sofridos deve ser tão precisa quanto possível. O corpo-de-prova usado no ensaio deve ser capaz de reproduzir as condições de trabalho do componente. Resultados assim obtidos permitiriam avaliar a vida em serviço do material ensaiado, identificando os fatores que influenciam na durabilidade das ligas utilizadas.

Alguns autores [3, 5] sugerem que o tempo de vida útil do material ou resistência à fadiga térmica é função do número de ciclos térmicos necessários para a ocorrência da primeira trinca visível. Porém, em materiais, especialmente se o ciclo de fadiga térmica causa substancial deformação, o instante no qual uma única trinca ocorre torna-se de difícil identificação, assim como a presença de uma rede de finas trincas na superfície pode aparecer quase simultaneamente.

A motivação deste trabalho surge devido à falta de um ensaio de fadiga térmica normalizado e a necessidade de se avaliar novas ligas utilizadas pelo processo de soldagem para várias aplicações tecnológicas. Portanto, fez-se uma série de análises termo-mecânicas para idealização de corpos-de-prova metálicos para o desenvolvimento de um equipamento para realização desses ensaios de forma a estimar e comparar em laboratório o comportamento desses em serviço [6, 7].

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Análise Termomecânica da Geometria e Distribuição da Temperatura na Amostra

No projeto do corpo-de-prova, a geometria cilíndrica foi escolhida com o objetivo de evitar cantos vivos que provocasse concentração de tensões, como mostra a Figura 1. O diâmetro da seção reduzida foi de 3 mm, para garantir que a temperatura fosse obtida tanto com pirômetros óticos, como pelos termopares, na superfície e no seu interior, respectivamente.

Outro fator que foi considerado para utilização dessa geometria e dimensões foi à possibilidade da confecção de corpos-de-prova obtidos a partir dos revestimentos depositados pelo processo de soldagem, visto que tais revestimentos apresentam uma espessura por cordão entre 4 a 5 mm.

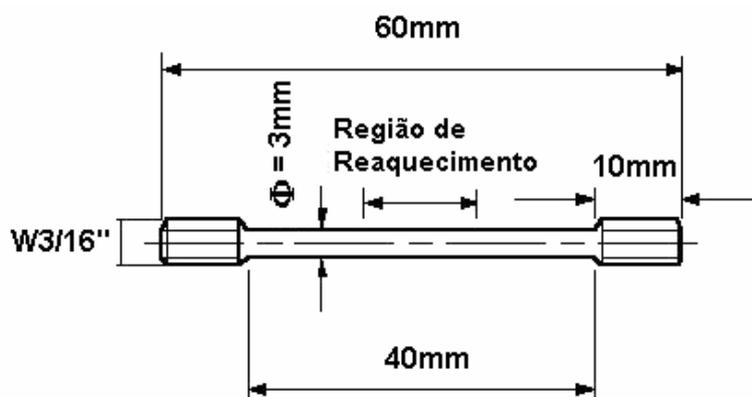


Figura 1: Geometria e dimensões do corpo-de-prova.

Durante o ensaio de fadiga térmica, o corpo-de-prova deverá ser submetido a intensos gradientes térmicos, sem a possibilidade do mesmo expandir-se e contrair-se livremente induzindo a produção de tensões térmicas. Para que o ensaio possa ser reproduzível os corpos-de-prova na condição de total restrição, não podem apresentar nem o fenômeno de flambagem ou dobramento. Assim, essas tensões térmicas são calculadas pela equação 1 [2].

$$\sigma_{térmica} = -\alpha \cdot E \cdot (T - T_o) \quad (1)$$

Onde:

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica

$E$  = módulo de elasticidade  
 $T$  = temperatura final  
 $T_0$  = temperatura inicial,

Obs: o sinal negativo indica uma tensão de compressão resistindo à expansão da barra.

Se a restrição do corpo-de-prova é parcial, a equação anterior pode ser escrita como mostra a equação 2.

$$\sigma = -K.\alpha.E.(T - T_0) \quad (2)$$

Onde:  
 $K$  = representa o coeficiente de restrição.

O valor da deformação térmica para o corpo-de-prova em estudo é determinado pela equação 3.

$$\varepsilon_t = \alpha.(T - T_0) \quad (3)$$

A mudança de comprimento do corpo-de-prova ( $\Delta L$ ) provocado pela mudança de temperatura pode ser calculada pela equação 4.

$$\Delta L = \alpha L_0 (T - T_0) \quad (4)$$

Onde:  
 $L_0$  = representa o comprimento inicial do corpo-de-prova.

Considerando que o corpo-de-prova esteja totalmente restrito e usando o aço inoxidável martensítico [5], para efeito de dimensionamento, a tensão térmica pode ser calculada pela equação 1.

Os parâmetros utilizados para o cálculo da tensão foram:  
 $\alpha = 1,51 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  – (faixa de temperatura de 200 a 600°C, determinada experimentalmente)  
 $E = 16,5 \times 10^4$  MPa – (obtido na literatura para  $T = 600^\circ\text{C}$  [8])  
 $T = 650^\circ\text{C}$  – (determinado durante o ensaio)  
 $T_0 = 50^\circ\text{C}$  – (determinado durante o ensaio)  
 $\sigma_{\text{térmica}} = - 149,4$  MPa = - 15,25 kgf/mm<sup>2</sup>

O valor da deformação térmica foi calculado pela equação 3 que apresentou o resultado abaixo.

$$\varepsilon_t = \alpha.(T - T_0) = 0,0009$$

Para a avaliação da flambagem, com o objetivo de conferir a existência ou não de deformação do corpo-de-prova durante o ciclo térmico, fez-se necessário determinar o valor da carga crítica sobre a mesma, para tanto se utilizou a equação 5.

$$P_{\text{crit.}} = \frac{\pi^2 . E . I}{L^2} \quad (5)$$

Para o caso de restrição total do corpo-de-prova, de comprimento total “ $L$ ”, foi utilizado como comprimento útil  $0,5L$ , e o seu momento de inércia foi determinado pela equação 6.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (6)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi 3^4}{64} = 3,9676\text{mm}^4$$

Substituindo o valor do momento de inércia na equação 5, determina-se o valor da carga crítica:

$$P_{\text{crit.}} = \frac{\pi^2 E I}{0,5.L^2} = 823\text{kgf}$$

Com o valor da carga crítica, determinou-se o valor de tensão crítica para comparação com a tensão gerada pela temperatura.

$$\sigma_{\text{crit.}} = \frac{P_{\text{crit.}}}{A} = 117\text{kgf/mm}^2 = 1146,6\text{MPa}$$

Como a  $\sigma_{\text{térmica}} = 149,4\text{MPa} < \sigma_{\text{crítica}} = 1.146,6\text{MPa}$ , conclui-se que não haverá flambagem durante os ensaios de fadiga térmica.

## 2.2 Operação e Ajustes do Equipamento de Ensaio de Fadiga Térmica

Ensaio preliminares com o equipamento de fadiga térmica foram realizados com o objetivo de determinar o número de rotações,  $N$ , da mesa giratória de forma que as condições de aquecimento e resfriamento dos corpos-de-prova fossem ajustadas. Nesses ensaios foi pré-definida a temperatura máxima na faixa de 600 a 700°C e temperatura mínima na faixa de 25 a 50°C, isto para atender as condições de operação de rolos de lingotamento contínuo [9, 10].

O número de rotações ( $N$ ) foi determinado em função das seguintes variáveis: diâmetro do corpo-de-prova, tempo de permanência nas estações de aquecimento e resfriamento, para que se alcancem os picos de temperatura máxima, na faixa de 600 a 700°C, e da temperatura mínima, na faixa de 25 a 50°C. Após algumas alterações na disposição das tochas, o  $N$  determinado para a execução do ensaio foi de 2,6 rpm. Vale ressaltar que com esta rotação conseguiu-se uma leitura de temperatura via sensor de infravermelho, com a sensibilidade de  $\pm 1\%$  de leitura ou  $\pm 1,4^\circ\text{C}$  o que propicia um tempo de resposta do sensor de 165ms.

O tempo de aquecimento para alcançar a temperatura máxima entre 600 a 700°C sem a presença de gradientes térmicos entre a sua superfície e o seu interior, foi determinado em função do seu diâmetro e do  $N$ , já previamente determinado, com isso foi verificado que seriam necessário 4,5 segundos para atingir a faixa de temperatura máxima.

O tempo necessário para obter a temperatura no interior do corpo-de-prova entre 25 a 50°C a partir da máxima temperatura foi de aproximadamente 6s. A temperatura no interior do corpo-de-prova foi determinada pela inserção de um termopar durante o ensaio, bem como pela utilização de um sensor de infravermelho na sua superfície.

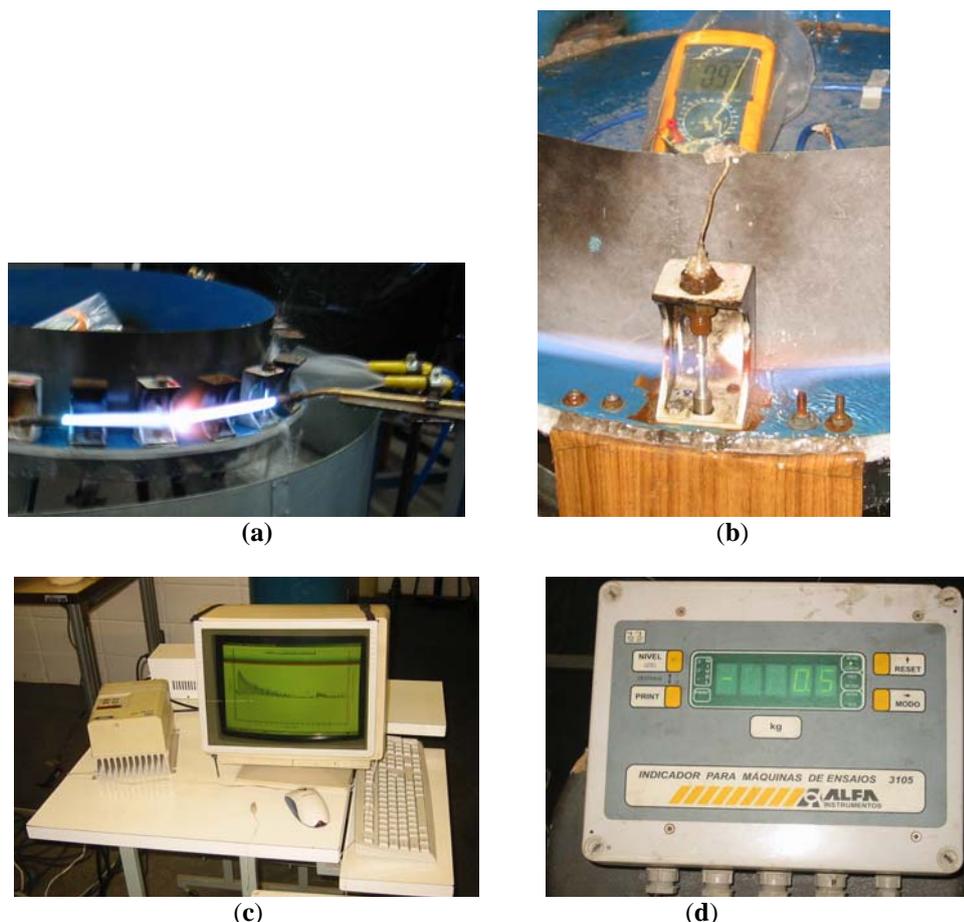
A inserção do termopar no interior de um dos corpos-de-prova foi para constatação da ausência de gradientes térmicos entre a superfície e a parte central interna desses, como também de monitoramento das temperaturas captadas pelos sensores de infravermelho. Uma vez determinadas todas as condições necessárias para a execução do ensaio, vários ciclos térmicos foram realizados para comprovação da reprodutibilidade das condições impostas. O controle da temperatura tanto pelo termopar quanto pelos sensores de infravermelho garantiu a manutenção das temperaturas nas estações de aquecimento e resfriamento do que no equipamento proposto por MARRA *et al.* [9].

A faixa de temperatura máxima foi atingida pela utilização de dois maçaricos de aquecimento, para cada estação de aquecimento, usando GLP e oxigênio como gases combustíveis. Estes maçaricos foram dispostos de forma tal que um deles tem a função de pré-aquecer e o outro de gerar calor suficiente para atingir o patamar máximo de temperatura.

A temperatura mínima do corpo-de-prova, durante os ensaios de fadiga térmica como mostra a Figura 2, foi obtida com a utilização de dois bicos aspersores ajustáveis. Em cada estação de resfriamento, a água à temperatura ambiente era jogada diretamente sobre os mesmos provocando a diminuição da temperatura de forma brusca.

O procedimento inicial para a obtenção das condições de execução dos ensaios, foi à disposição do corpo-de-prova, seguido de sua restrição no porta-amostra (por meio de parafuso, porca e contra-porca). Essa

disposição também facilitou a calibração das distâncias dos sensores de infravermelho, para captação das temperaturas durante a passagem desses pelas estações de aquecimento e de resfriamento.



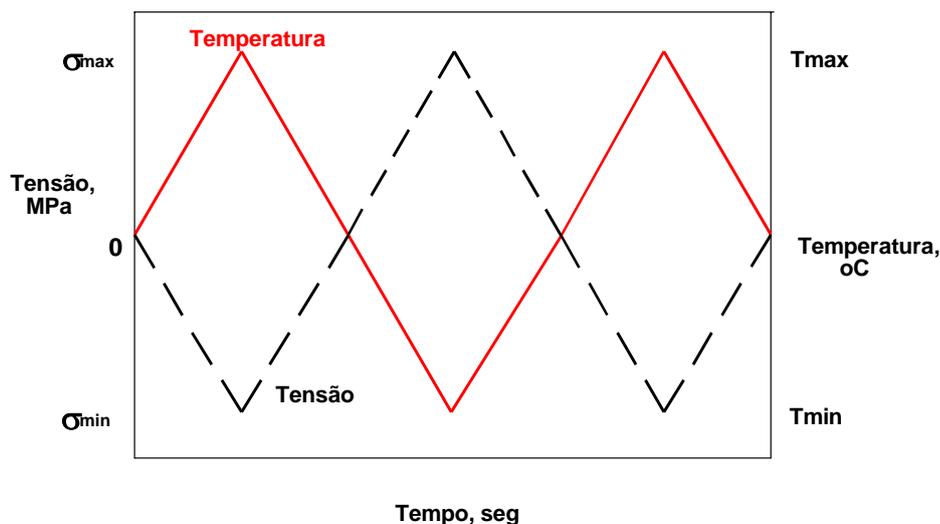
**Figura 2:** Equipamento de fadiga térmica. A) Em destaque a estação de aquecimento realizado pelos maçaricos de aquecimentos e de resfriamento realizados; b) Corpo-de-prova disposto sobre a célula de carga; c) Computador com o sistema de aquisição de carregamento; d) Indicador digital do carregamento sobre imposto ao corpo-de-prova conectado a célula de carga.

### 3 RESULTADOS

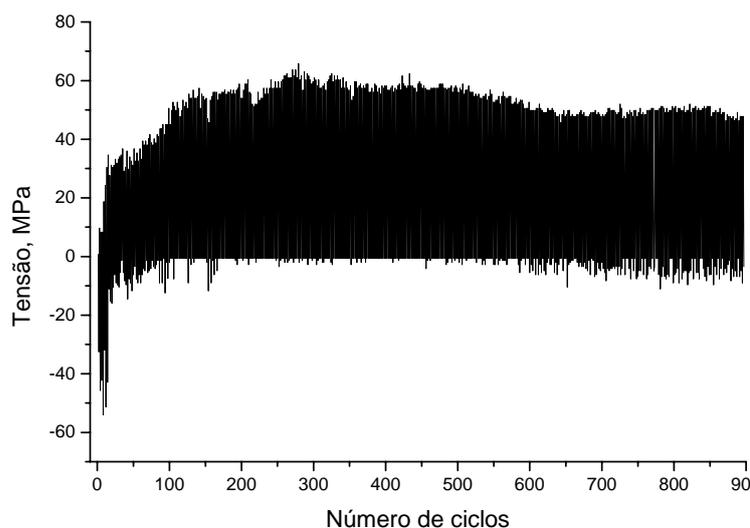
#### 3.1 Variação da Carga Durante o Ensaio de Fadiga Térmica

No ensaio de fadiga térmica, durante o aquecimento, os corpos-de-prova ficaram submetidos aos ciclos de tensão de compressão e, durante o resfriamento, aos ciclos de tensão de tração. Isto é, as tensões apresentaram-se fora de fase com relação à temperatura resultante da expansão e contração do volume no estado de total restrição. Esse comportamento durante um ciclo no ensaio de fadiga térmica pode ser observado esquematicamente na Figura 3.

Um dos fatores que se pode atribuir para a alternância dos esforços de compressão e de tração sobre os corpos-de-prova, em função do nível de temperatura, deve-se à condição de restrição que se impôs, portanto a tensão de compressão é gerada pelo aumento da temperatura desde  $T_0$  até  $T_{max}$  e pela impossibilidade de dilatação do corpo-de-prova. Logo a seguir, impõe-se uma condição de resfriamento brusco que induz uma tensão de tração, isto é, a diminuição da temperatura,  $T_{max}$  para  $T_{min}$ , gera a elevação de uma tensão máxima de tração ( $\sigma_{max}$ ) quando o corpo-de-prova atinge a  $T_{min}$ . A Figura 4 apresenta a curva obtida durante os ensaios, mostrando a variação das tensões geradas durante os ciclos térmicos impostos.



**Figura 3:** Esquema mostrando a relação entre temperatura, tensão e tempo durante os primeiros ciclos do ensaio de fadiga térmica.



**Figura 4:** Variação da tensão na amostra durante os ciclos térmicos para os corpos-de-prova ensaiados.

Na Figura 4, foi observado que durante os primeiros ciclos térmicos o comportamento do material apresenta-se elástico, ou seja, quando a temperatura aumenta o corpo-de-prova experimenta uma tensão de compressão, posteriormente, quando a temperatura é diminuída, a tensão volta até valores próximos de zero. Estes primeiros ciclos são caracterizados por apresentarem uma alta tensão de compressão e mínima tensão de tração. Tal efeito foi comprovado porque o corpo-de-prova não apresentou nenhuma alteração dimensional, nem ao logo do comprimento e nem ao longo do seu diâmetro.

Quando aumenta o número de ciclos, o corpo-de-prova se deforma plasticamente em compressão quando aquecida até a temperatura máxima,  $T_{max}$ , diminuindo o seu comprimento. Porém, quando o corpo-de-prova atinge a temperatura mínima,  $T_{min}$ , e pelo fato de estar restrita nos seus extremos surge uma tensão de tração. A deformação plástica foi percebida e verificada pela diminuição do comprimento do corpo-de-prova e ligeiro abaulamento da região onde foi submetido o ensaio de fadiga térmica.

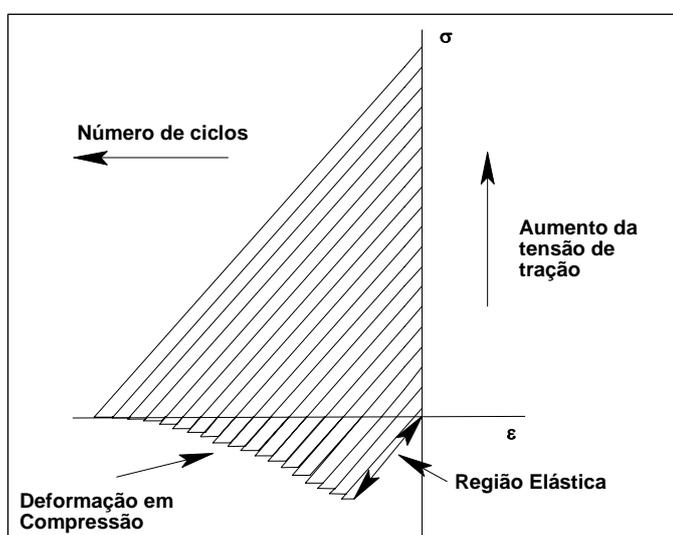
A mudança do comportamento do material se deve ao efeito que ocorre nos metais quando são submetidos a carregamentos cíclicos (compressão seguido por tração ou tração seguida por compressão), sendo que a tensão de escoamento na recarga é muito menor que a tensão alcançada no final da primeira

carga e pode ser ainda menor que a tensão de escoamento inicial. Este efeito é chamado de efeito Bauschinger [11].

Para ciclos posteriores esta tensão de tração continua aumentando pelo mesmo mecanismo mencionado anteriormente, porém quando se atinge aproximadamente 50 ciclos esta tensão de tração apresenta-se estável, provavelmente, devido ao fato que após uma considerável deformação plástica (em compressão verificada pela diminuição do comprimento do corpo-de-prova), é dificultada a redistribuição das discordâncias para uma carga inversa e a deformação causada pelo efeito Bauschinger aproxima-se de zero.

Os valores das tensões obtidos durante os ensaios são baixos, pois a temperatura máxima do corpo-de-prova obtém-se no centro da mesma, aproximadamente num comprimento de 10 mm, causando, portanto, uma tensão e deformação localizada, o que provoca um menor valor da tensão com relação à amostra, caso a mesma fosse submetida à mesma temperatura por completo. A Figura 5 apresenta a evolução da variação das tensões e a deformação cíclica ocorrida nas amostras estudadas para os primeiros ciclos da fadiga térmica.

Na Figura 5 pode-se observar que a tensão de tração vai aumentando gradualmente para os ciclos posteriores, tal fenômeno se deve à deformação plástica em compressão que causa um encurtamento significativo do corpo-de-prova. Essa tensão de tração atinge um valor máximo e permanece estável durante todo o ensaio, como mostrado na Figura 4.



**Figura 5:** Esquema da variação tensão – deformação para os corpos-de-prova fadigados termicamente.

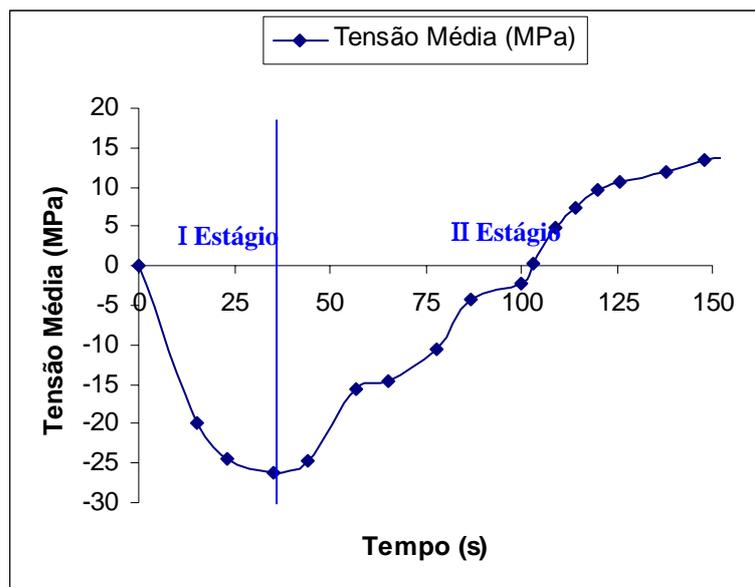
### 3.2 Comportamento Cíclico do Corpo-de-Prova Durante o Ensaio de Fadiga Térmica

Nas Figuras 4 e 5, pode-se também observar uma forte assimetria dos picos de tensões de compressão e tração, que revela uma apreciável tensão média negativa, nos primeiros ciclos, uma condição intermediária e positiva no restante do ensaio. Assim sendo, o comportamento dos esforços de tensão sobre o material, durante o ensaio de fadiga térmica, pode ser dividido em três estágios:

#### 3.2.1 Estágio I: comportamento elástico

O corpo-de-prova, devido à sua condição de total restrição, fica submetido a esforços de compressão quando se encontra na estação de aquecimento. Neste momento, a sua temperatura se eleva rapidamente desde  $T_o \rightarrow T_{max}$  e o seu estado de tensão passa  $\sigma_o \rightarrow \sigma_{compressão\ máximo}$ . Logo em seguida, em consequência ao brusco resfriamento, ocorre à recuperação de sua condição inicial, isto é  $T_{max} \rightarrow T_o \Rightarrow \sigma_{compressão\ máximo} \rightarrow \sigma_o = 0$ .

O estágio I, como mostra a Figura 5, é caracterizado pela manutenção do material sob uma tensão inferior à tensão de escoamento, possibilitando um comportamento elástico; portanto, não é observada nenhuma deformação plástica localizada. Também pode ser observado na Figura 6 que a duração deste estágio é de apenas 3 ciclos térmicos.



**Figura 5:** Tensão média nos primeiros 150 segundos de ensaio de fadiga térmica, aproximadamente 16 ciclos.

### 3.2.2 Estágio II: transição

Neste estágio, também destacado na Figura 5, o corpo-de-prova é induzido termicamente a pequenas e contínuas taxas de deformação plástica em compressão em cada ciclo térmico, devido aos seguintes fatores:

- Pelo efeito da  $T_{max}$  do ensaio de fadiga térmica, uma vez que o módulo de elasticidade diminui com a elevação da temperatura, resultando numa menor tensão para gerar uma deformação plástica na temperatura ambiente;
- Pela pequena amplitude do ciclo térmico, fato que dificulta a redistribuição das discordâncias quando o material fica submetido à carga inversa;
- Pelo efeito Bauschiger.

O estágio II tem início a partir do momento em que o material atinge a sua condição de máxima deformação plástica e a tensão média em compressão deixa de ser crescente, em módulo, e passa à condição de tração crescente até se estabilizar quando cessa esse estágio. A duração do estágio II é de 50 ciclos térmicos.

### 3.2.3 Estágio III: estabilidade

Após o corpo-de-prova ter sido deformado plasticamente resultando na diminuição do seu comprimento, durante o segundo estágio, o material permanece num estado de tensão média de tração, como mostra a Figura 6, até o final do ensaio de fadiga térmica. Neste estágio III, foi observado que, quando o material é bruscamente resfriado, desenvolve-se uma máxima tensão de tração, isto é,  $T_{max} \rightarrow T_o \Rightarrow \sigma_{otração\ máxima}$  por causa do encurtamento do material. Quando o corpo-de-prova é aquecido, ocorre a recuperação da condição inicial, isto é,  $T_o \rightarrow T_{max}$ , e o seu estado de tensão passa da condição de  $\sigma_{tração\ máximo} \rightarrow \sigma_o$ , de maneira oposta ao que acontece no estágio I. Esse comportamento está de acordo com [12].

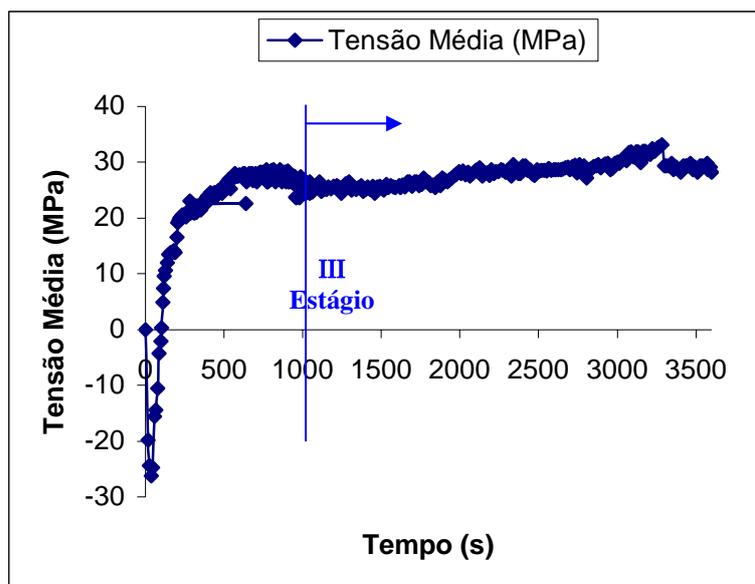


Figura 6: Tensão média durante todo o ensaio de fadiga térmica, 600 ciclos.

#### 4 CONCLUSÕES

O equipamento de fadiga térmica mostrou-se adequado e eficiente para a simulação da fadiga térmica em materiais metálicos. Quanto à geometria do corpo-de-prova utilizado foi adequada para o referido estudo não apresentando nenhuma característica de flambagem ou dobramento. Além disso, foi verificada a homogeneidade de temperatura, na superfície e no centro do corpo-de-prova, comprovando a ausência de gradientes térmicos sobre o mesmo. Também, verificou-se que o ensaio de fadiga térmica apresenta três estágios bem definidos: I – Comportamento Elástico, II – Transição e III – Estabilidade. Destaca-se também que durante o ensaio de fadiga térmica sob condição de restrição total ocorre a diminuição da tensão de compressão e aumento da tensão de tração, que resulta no aumento da tensão média, reduzindo a vida útil à fadiga térmica.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e a FAPESP pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho e a Soudage.

#### 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] CHUDZICKI, J., HORN, B., TSAI, C., “Mechanisms of surface deterioration – Cladded rolls for continuous slab casting” – Phase I, *36<sup>th</sup> Mechanical Working and steel Processing Conf. Proc., ISS – AIME*, v. XXXII, pp. 67-77, 1995.
- [2] ARMAS, A., ARMAS, A.F., PETERSEN, C., “Thermal fatigue of a 12% chromium martensitic stainless steel”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 17, n. 6, pp. 671-681, February 1994.
- [3] WERONSKI A., HEJWOWSKI, T., *Thermal fatigue of metals*, 1ed, Ed.: Pergamon Press, pp.366, 1991.
- [4] COFFIN, L.F., SCHENECTADY, N.Y., “A study of effects of cyclic thermal stress on a ductile metal”, *Transactions of the ASME*, v. 176, pp.931-950, August 1954.
- [5] HORN, B.D., FRANCIS, E.D., “Criteria for selection of weld surfaced rolls for continuous caster application”, *MWSP Conference Proceeding, ISS – AIME*, pp. 267-271, Cleveland Ohio, 1986.

- [6] BRANDIM, A., *Efeito da fadiga térmica sobre as microestruturas e propriedades mecânicas de revestimentos de aços inoxidáveis martensíticos*, Tese de D.Sc., DEMA – UFSCar, pp.187, São Carlos, SP, Brasil, 2002.
- [7] SARRIA, O.J.H., *Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga térmica*, Tese de D.Sc., PPG-CEM, Engenharia de Materiais, UFSCar, pp. 179, Abril 2001.
- [8] LUNDIN, L, NORELL, M, ANDRÉN, H.O, NYBORG, L., “Remanent life assessment of creep resistant modified 12% chromium steels: microstructural analysis and microestrutural development models”, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v. 26, pp.27-40, February 1997.
- [9] MARRA, K.M., SILVA, L.G., LARANGEIRA, J.C.R., VIEIRA, A.M., “Avaliação da susceptibilidade a fadiga térmica de depósitos de solda dos aços inoxidáveis usados na recuperação de rolos de lingotamento contínuo”, *XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS*, pp. 209-224, Junho 1995.
- [10] MARKARIAN, K.M., RUMLER, A.J., EMLING, W.H., “Improvement of roll life in a continuous slab caster”, *Iron and Steelmaker*, v. 18, n. 11, pp. 43-51, November 1991.
- [11] DORN, J.E., *Mechanical behavior of materials at elevated temperatures*, McGraw Hill, New York, 1961.
- [12] LEE, S., KIM, D.H., RYU, J.H., SHIN, K., “Correlation of microstructure and thermal fatigue property of three work rolls”, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, v. 28, n. 12, pp. 2595-2608, December 1997.