



## **PROJETO DE UMA MÁQUINA PARA ENSAIO DE CORROSÃO SOB TENSÃO**

### **Geraldo de Paula Martins**

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: gpm@cdtn.br

### **Antônio Eustáquio de Melo Pertence**

Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Campus, Pampulha, 30123-970, Belo Horizonte, MG, e-mail: pertence@dedalus.lcc.ufmg.br

### **Roberto Francisco Di Lorenzo**

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: rfl@cdtn.br

### **Tanius Rodrigues Mansur**

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: tanius@cdtn.br

**Resumo.** *A corrosão sob tensão (CST) é uma das formas mais agressivas de corrosão localizada já encontrada. É definida em termos de um processo de fratura frágil. Este processo requer a ação simultânea de tensões de tração e de um ambiente corrosivo.*

*Como o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) necessita realizar estudos de corrosão sob tensão em diversos materiais e o equipamento para a realização de ensaios com taxa de deformação tão pequena não é convencional e, portanto, o seu custo é muito alto, optou-se por projetar um equipamento de ensaio mecânico, cujo desenvolvimento é apresentado neste trabalho. Tal equipamento tem como características principais:*

- taxa de deformação de até  $10^{-7}$ /seg;
- capacidade de carga de 50.000 N;
- controle de carga;
- controle de deslocamento;
- controle de deformação.

*O tipo de mecanismo utilizado foi o de transmissão por rosca, aliado a um sistema de redução por engrenagens.*

*Após cálculo, detalhamento, tomada de preços de material e peças necessários à execução do projeto, concluiu-se a viabilidade do mesmo a um custo bem inferior ao existente no mercado.*

**Palavras-chave:** ambiente agressivo, corrosão sob tensão, ensaios

## **1. INTRODUÇÃO**

Para os trabalhos de gerenciamento de vida e também para a avaliação do envelhecimento de estruturas e componentes mecânicos é necessário o acompanhamento, a verificação das propriedades dos materiais e a sua real situação.

Muitas propriedades devem ser determinadas, dentre elas a suscetibilidade à propagação de trincas em ambientes assistidos (Kim and Wilde, 1977). O ensaio de corrosão sob tensão verificará a suscetibilidade à propagação de trincas nestes ambientes. A corrosão sob tensão é característica de componentes ou estruturas que estão sob ambiente aquoso, gasoso, a temperaturas ambientes ou altas e submetidos à esforços mecânicos de trabalho ou montagem. A maioria dos materiais sob estas condições sofrem corrosão e conseqüentemente perda da vida projetada.

Existem testes normalizados para a avaliação da suscetibilidade ao crescimento de trinca ambientalmente assistida e para testes de corrosão sob tensão (Theus and Cels, 1977 e Parkins, 1977). O teste a baixa taxa de deformação é aplicável para a avaliação de uma grande variedade de materiais metálicos.

Com estes testes são feitas simulações aceleradas da resistência dos materiais metálicos sob diversas condições ambientais.

A deformação (variação de comprimento sobre comprimento útil) é aplicada à taxa constante na faixa de  $10^{-4}$  até  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$ .

A taxa de deformação deve ser lenta o bastante para permitir um certo tempo para que a corrosão aconteça, mas rápido o bastante para produzir falha da amostra em período de tempo razoável com objetivos de avaliação.

Como o ensaio de corrosão sob tensão é muito importante para as atividades do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), propõe-se neste trabalho, o projeto de uma máquina de tração com baixa taxa de deformação.

## 2. CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA

Baseando-se nas condições de ensaio que foram apresentadas na introdução, a máquina deve apresentar as seguintes características:

- capacidade de carga: 50.000 N;
- taxa de deformação:  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ;
- controle de carga;
- controle de deformação;
- máquina compacta, leve e de baixo custo.

## 3. CÁLCULOS MECÂNICOS

### 3.1. Cálculo da redução necessária para se obter a deformação exigida no ensaio

A Figura (1) apresenta o corpo-de-prova típico para o ensaio de corrosão sob tensão. Considerando o comprimento útil do corpo-de-prova igual a 20 mm e a taxa de deformação de  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$ , obtém-se a rotação  $n_f$  através da Eq. (1) e, como conseqüência, a redução necessária através da Eq. (2).

$$n_f = \frac{\dot{L}}{p} = \frac{1,2 \times 10^{-4} \text{ mm/min}}{2 \text{ mm/volta}} = 6 \times 10^{-5} \text{ rpm} \quad (1)$$

Redução necessária:

$$R = \frac{n_m}{n_f} = \frac{1.800 \text{ rpm}}{6 \times 10^{-5} \text{ rpm}} = 3 \times 10^7 \quad (2)$$

A redução necessária é satisfeita escolhendo-se um motor de 1.800 rpm.

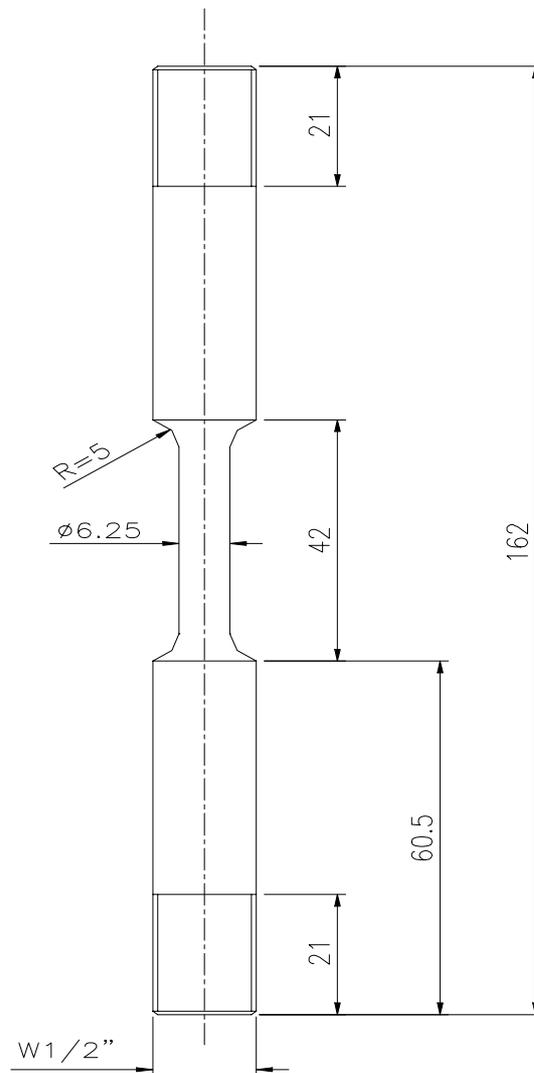


Figura 1. Tipo e dimensões do corpo-de-prova para ensaios de corrosão sob tensão

### 3.2. Motor, redutores e acoplamentos

Considerando-se a existência no mercado dos componentes necessários para o projeto, o motor, os redutores e acoplamentos foram escolhidos para atender as características citadas. Para se conseguir a redução necessária, apresentada acima, foram definidos os seguintes redutores:

Redutor 1: Moto redutor Compabloc de engrenagens helicoidais - Relação de redução: 1:56,2.

Redutor 2: Redutor Planetário - Planibloc - Relação de redução: 1:4305.

Redutor 3: Redutor de engrenagens cônicas e helicoidais Orthobloc - Relação de redução: 1:124.

Motor: Tipo TFVE 0,55 kW, 1800 rpm. Isolamento classe F.

Acoplamentos: Elásticos Teteflex - Tamanhos, D4, D7 e D9.

Redução total: 1 : 30.000.000 - Torque de saída nominal: 1162 N.m.

Foram realizados cálculos de resistência dos materiais para o dimensionamento dos diversos elementos definidos no projeto tais como; parafusos, porcas, célula de carga, juntas universais para fixação do corpo-de-prova e também para a estrutura suporte do mecanismo de ensaio e suporte do motor e redutores.

As dimensões e composição dos diversos elementos do projeto estão representados na Fig. (2) que apresenta o conjunto final.

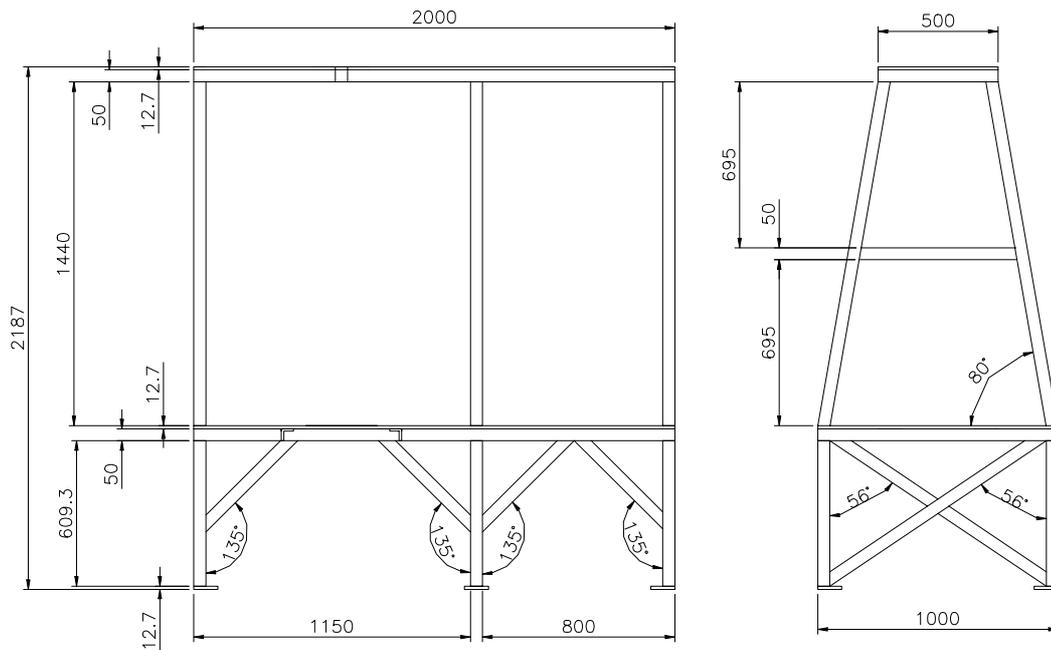


Figura 2. Estrutura suporte do equipamento de ensaios de corrosão sob tensão

### 3.3. Conjunto parafuso-porca, para o ensaio de tração do corpo-de-prova

Conforme apresentado na introdução, o ensaio de corrosão sob tensão é um ensaio de tração lento, com uma taxa de deformação de  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$ . O dispositivo de aplicação de esforço para tracionar o corpo-de-prova escolhido compõe-se de um conjunto parafuso-porca, o qual foi dimensionado em função do esforço de 50.000 N e a taxa de deformação de  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$ , especificados.

O material escolhido para o conjunto porca e parafuso, foi o aço AISI 4340, com limite de escoamento  $\sigma_{\text{esc}} = 960 \text{ MPa}$  e limite de resistência à tração  $\sigma_r = 1158 \text{ MPa}$ , normalizado a  $870^\circ\text{C}$ , temperado em óleo a  $840^\circ\text{C}$  e revenido a  $540^\circ\text{C}$ , com dureza Brinell  $\cong 350$ .

### 3.4. Dimensionamento das bases superior e inferior

As bases superior e inferior e a estrutura suporte correspondente foram calculadas em função dos pesos do motor, dos redutores dos acoplamentos e do esforço a ser aplicado no ensaio.

Para o cálculo das bases superior e inferior, os cálculos foram efetuados utilizando-se a teoria das placas e cascas e, em seguida, foram verificados utilizando-se o ANSYS. Os resultados obtidos pelo ANSYS foram compatíveis com os calculados. Para os cálculos escolheu-se a priori, em função das dimensões de conjunto, uma chapa de 1.200 mm de comprimento, 500 mm de largura e 12,7 mm de espessura.

### 3.5. Dimensionamento dos pilares que sustentam a carga de ensaio

Para o dimensionamento dos pilares de sustentação da carga de ensaio, foram realizados cálculos baseados em flambagem. A seção escolhida para os pilares foi circular, com diâmetro  $d = 30 \text{ mm}$ . As barras horizontais e inclinadas foram barras chatas, Fig. (2), foram verificadas quanto à resistência à flambagem.

Definições e simbologia e as dimensões finais estão indicadas na Fig. (4) que apresenta um desenho de conjunto, onde todas as partes foram calculadas passo a passo em função dos

esforços transmitidos e as dimensões pré-determinadas, o que é satisfeito pelo conjunto motor e redutores especificados.

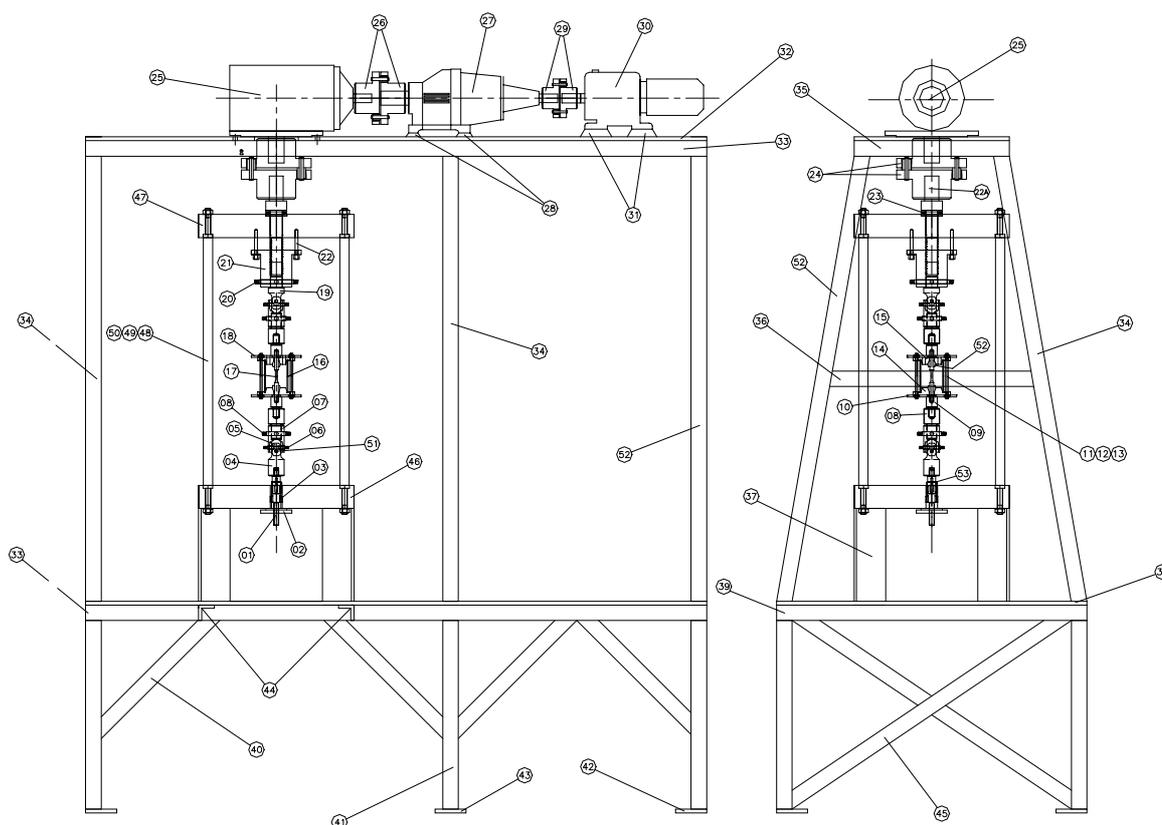


Figura 3. Desenho de conjunto do equipamento para ensaio de corrosão sob tensão

Na Figura (3), as peças 1, 2 e 3 compõem o conjunto da célula de carga; as peças 4, 5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21 e 22 pertencem ao dispositivo para fixação do corpo-de-prova; as peças 46 e 47 formam as bases superior e inferior do dispositivo de fixação do corpo-de-prova; as peças 48, 49 e 50 fazem parte das colunas da estrutura de fixação do corpo-de-prova; as peças 25, 27 e 30 são os moto-redutores; as peças 26 e 29 são os acoplamentos; as peças 28 e 31 formam as bases de fixação dos moto-redutores; e as peças 32, 33, 34, 41, 42, 43, 44 e 45 compõem a estrutura externa.

#### 4. DIMENSIONAMENTO DA CÉLULA DE CARGA

O dimensionamento da célula de carga foi realizado baseando-se em análise de tensões, a partir do esforço a ser aplicado ao corpo-de-prova e na deformação do mesmo.

Definições e simbologia

- $\Delta V$  – Tensão de saída da Ponte de Wheatstone;
- $V$  – Tensão de alimentação da Ponte de Wheatstone;
- $K$  – Fator de sensibilidade do Strain-Gage utilizado na confecção de células;
- $A$  – Seção transversal onde se cola os Strain-Gages;
- $\varepsilon_1$  – Deformação no sentido de aplicação da carga no corpo da célula de carga.

$$\Delta V = \frac{VK}{4} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_1 + \varepsilon_1 + \mu \varepsilon_1) \quad (3)$$

$$\Delta V = \frac{VK\varepsilon_1(2+2\mu)}{4} = \frac{2VK\varepsilon_1(1+\mu)}{4} = \frac{VK\varepsilon(1+\mu)}{2} \Rightarrow \frac{\Delta V}{V} = \frac{K\varepsilon}{2}(1+\mu) \times 10^3 \left( \frac{mV}{V} \right) \quad (4)$$

$$2 = \frac{2 \times \varepsilon \times 1,3 \times 10^3}{2} \Rightarrow \varepsilon = \frac{2}{1,3 \times 10^3} = 0,001538 \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{P}{A}; \quad \sigma = E\varepsilon \Rightarrow \sigma = 210000 \times 0,001538 = 323 \text{ MPa} \quad \text{ou} \quad \sigma = 350 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \Rightarrow A = \frac{P}{\sigma} = \frac{50000 \text{ N}}{350 \text{ MPa}} = 143 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 143 \text{ mm}^2 \quad (6a)$$

A Figura (4) apresenta o esquema da célula de carga dimensionada. A seção transversal do elemento sensor em forma de I foi calculado para minimizar os efeitos de qualquer esforço de dobramento.

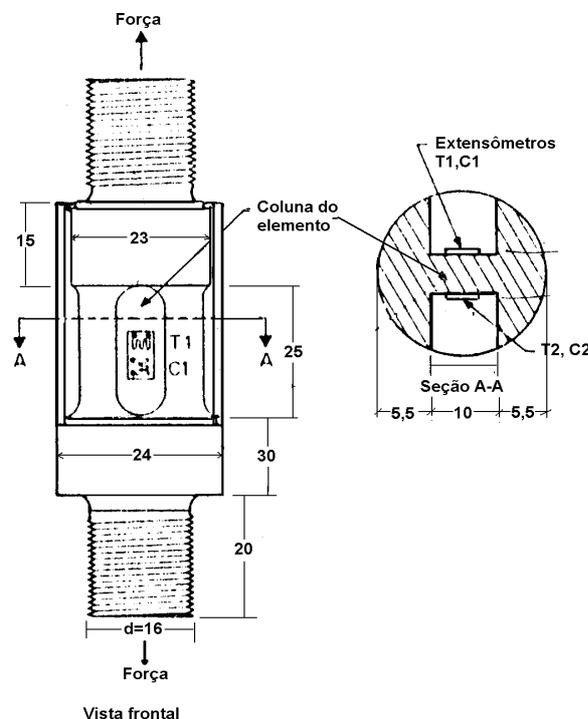


Figura 4. Célula de carga tipo coluna, para tração, de acordo com as especificações determinadas

## 5. CONCLUSÃO

Um exame detalhado do projeto final, Fig. (3), e uma análise econômica baseada no preço de um equipamento para realização de ensaios de corrosão sob tensão, e os preços dos diversos elementos para a fabricação do equipamento, objetivo do projeto permite concluir que a opção para se fabricar um equipamento, resulta em uma economia de, aproximadamente a 60%, considerando-se que, no mínimo, três Instituições se beneficiarão desta economia.

## 6. REFERÊNCIAS

Kim, C. D., Wilde, B. E. "A Review of the Constant Strain-Rate Stress Corrosion Cracking Test". In: Stress Corrosion Cracking - The Slow Strain-Rate Technique. American Society for Testing and Materials. Toronto, Canadá, 2-4 May, 1977.

Theus, G. J., Cels, J. R. "Slow Strain-Rate Technique: Application to Caustic Stress Corrosion Cracking Studies". In Stress Corrosion Cracking - The Slow Strain-Rate Technique. American Society for Testing and Materials. Toronto, Canadá, 2-4 May, 1977.

Parkins, R. N. "Development of Strain-Rate Testing and its Implications". In: Stress Corrosion Cracking - The Slow Strain-Rate Technique. American Society for Testing and Materials. Toronto, Canadá, 2-4 May, 1977.

## **DEVELOPMENT OF A STRESS CORROSION CRACK TESTING EQUIPMENT**

### **Geraldo de Paula Martins**

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: gpm@cdtn.br

### **Antônio Eustáquio de Melo Pertence**

Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Campus, Pampulha, 30123-970, Belo Horizonte, MG, e-mail: pertence@dedalus.lcc.ufmg.br

### **Roberto Francisco Di Lorenzo**

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: rfl@cdtn.br

### **Tanius Rodrigues Mansur**

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: tanius@cdtn.br

**Abstract.** *Stress corrosion is one of the most aggressive form of localized corrosion encountered. It is defined in terms of a brittle fracture process. This process require a simultaneous action of tensile stress and a corrosive environment. As the CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) needs to make studies on stress corrosion in several materials and the equipment for achievement of very slow strain rate is not conventional and, therefore, its cost is very high, it was choose to design a mechanical test equipment whose development is presented in this paper. The main characteristics of this equipment are:*

- *strain rate up to  $10^{-7}$ /sec;*
- *load capacity: 50000N;*
- *load indicator;*
- *strain indicator.*

*The type of mechanism used was screw thread transmission, allied to a reduction by gearing.*

*After calculations, detailing and verification of costs materials price, its a concluded about the design viability at a lower price than the existing machines in the market.*

**Keywords:** *aggressive environment, stress corrosion, testing*