

## 2

### Procedimento para Teste e Procedimentos para Ajuste

#### 2.1

##### Procedimento para Teste.

Apesar dos testes de tração convencional serem muito simples, medir curvas ~~σ<sub>x</sub>~~ nos limites operacionais das máquinas de teste não é uma tarefa propriamente elementar. Requer uma habilidade maior do operador a fim de se evitar oscilações ou ruídos nos resultados. Além das preocupações com as incertezas descritas nas Figuras 12 e 13, é necessário ter cuidado com a qualidade do aterramento elétrico; do alinhamento, das folgas e da rigidez das garras e dos demais componentes do trem de carga; da rigidez e da montagem do *clip-gage* no corpo de prova (que controlam a sua frequência natural e a sua reposta dinâmica); e da taxa de aquisição e dos ganhos da realimentação do circuito PID de controle da máquina.

##### 2.1.1

##### Determinação do Número de Corpos de Prova.

A determinação do número de corpo de prova, em teoria, pode ser estimada através da equação (4), onde  $N$  é o número de corpos de prova que devem ser ensaiados,  $Z_{\alpha/2}$  é o valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado,  $S$  é o desvio-padrão, e  $\Omega$  é a margem de erro.

$$N = \left( \frac{Z_{\alpha/2} S}{\Omega} \right)^2 \quad (4)$$

Entretanto, neste trabalho, como se trata de um ensaio não trivial, a experiência mostrou que para atingir um nível satisfatório de calibração da máquina, o número determinado pela equação 4 pode ser considerado apenas um referencial. Todavia, estimou-se um valor conservativo de 10% para o desvio-padrão e margem de erro. Impondo o valor crítico de 1,96, que corresponde a 95% do

grau de confiança desejado, chega-se ao número mínimo estimado de 4 corpos de prova por taxa de deformação ensaiada. Assim, para atender as 7 taxas de deformação programadas nesta dissertação a quantidade mínimo teórica seria de 28 CPs.

### 2.1.2 Caracterização do Material e Rastreabilidade.

O material utilizado foi produzido inicialmente a partir do processo de laminação e posteriormente por um processo de trefilação, ambos à quente. Os processos foram realizados na empresa Gerdau Cosigua, localizada em Itaguaí, Rio de Janeiro, cujo produto final foi uma vara de aço SAE 1020 de 6 metros de comprimento e diâmetro de 12,5 mm. Apesar de nominalmente feito a quente, tal processo de fabricação introduziu no material um encruamento não desprezível, como indicam os valores de resistência ao escoamento ( $S_E$ ) e resistência máxima ( $S_R$ ) na tabela (1), quando comparados com os valores obtidos no estudo de NOBREGA (2010) do aço SAE 1020 recozido. Ambos os valores foram realizados por ensaio de tração controlado por taxa de deformação da mesma ordem de grandeza (taxa usual  $\dot{\epsilon} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) e na mesma máquina de ensaio Instron modelo 8501 no laboratório de Fadiga da PUC-RJ, representando tensões reais.

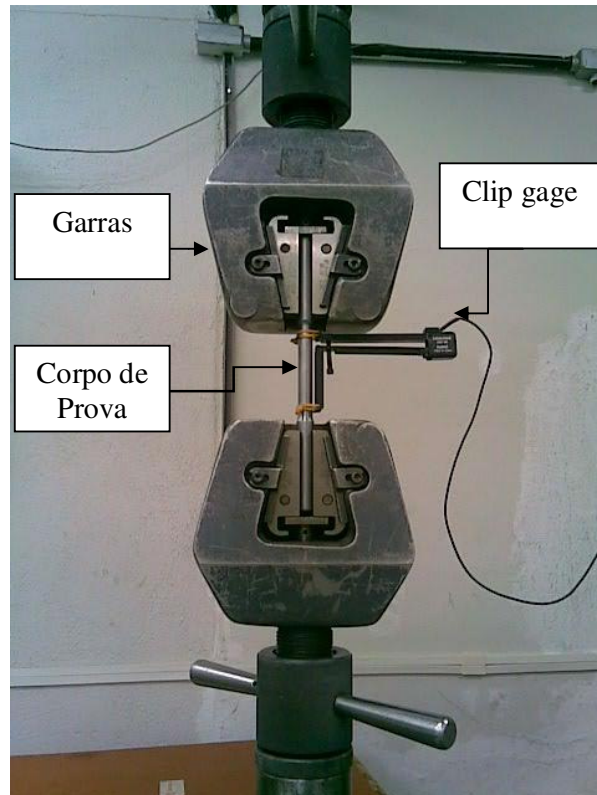
SAE 1020 RECOZIDO		SAE 1020 PRÉ-ENCRUADO	
$S_E$ (MPa)	$S_R$ (MPa)	$S_E$ (MPa)	$S_R$ (MPa)
330	590	591	679

Tabela 1 – Comparação entre aço SAE 1020 recozido versus pré-encruado na taxa de referência.

### 2.1.3 Descrição da Máquina de Ensaio e Corpo de Prova.

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina servo-hidráulica computadorizada Instron 8501 de 100 kN de capacidade trativa, dotada de uma servoválvula Moog de 40 l/min, usando um transdutor de deformação tipo *clip-gage* Instron 260-604 de 20 mm de base de medida e 12.5 mm de faixa trativa, e

garras hidráulicas cuidadosamente alinhadas dentro de 0.01 mm. Tal máquina encontra-se no Laboratório de Fadiga do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC do Rio de Janeiro. A Figura 14 mostra o sistema de garras com o *clip-gage* alinhado no corpo de prova. A Figura 15 mostra o painel de controle da máquina. Os CPs de 10 mm de diâmetro foram usinados segundo a norma ABNT 6152.



**Figura 1**

Figura 14 – Conjunto garra, corpo de prova e clip gage.

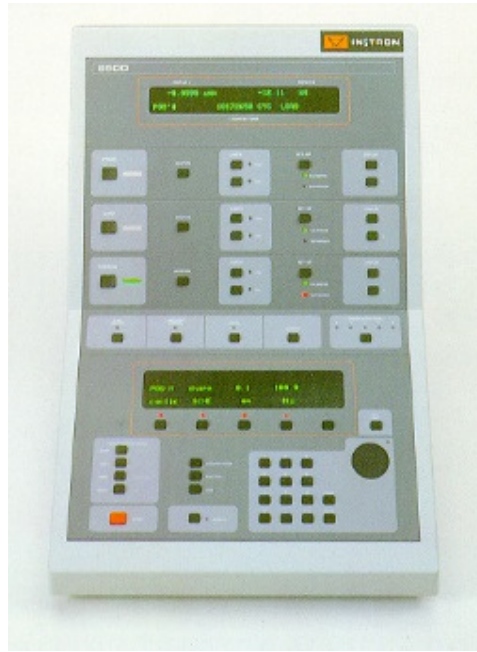


Figura 15 – Painel de Controle da Instron modelo 8501

A Figura 16 mostra em detalhes o corpo de prova utilizado com as suas principais dimensões.

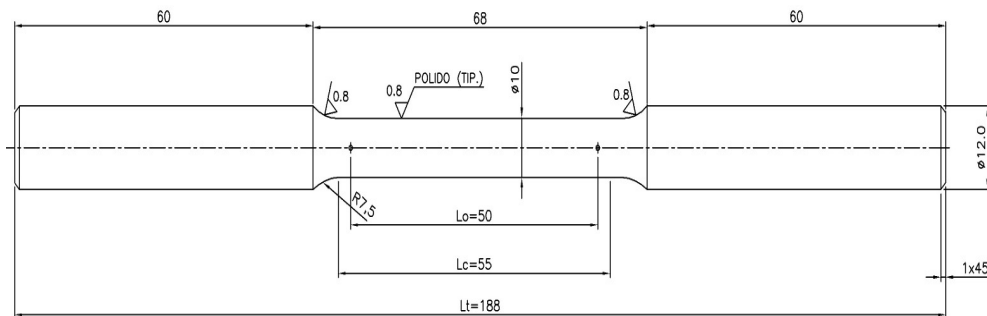


Figura 16 – Corpo de prova segundo norma ABNT 6152

#### 2.1.4 Parametrização dos Ensaios de tração.

Os ensaios de tração foram realizados por controle de taxa de deformação, onde a menor delas usada nos testes foi limitada pelo ruído mecânico intrínseco à servoválvula e pela relação sinal/ruído do transdutor, enquanto a maior foi restrita pela capacidade de fluxo da servoválvula e pela velocidade do sistema de

controle digital da máquina, cuja taxa de aquisição é 5 kHz. Importante citar que os testes foram feitos sob temperatura ambiente do laboratório e, portanto controlados a uma temperatura de aproximadamente 22 °C. A tabela 2 mostra as taxas de deformação reais mantidas constantes durante os ensaios de tração, as quais foram escolhidas para cobrir um intervalo de 5 ordens de grandeza em torno da taxa de referência ( $\dot{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ).

Taxa de deformação $\dot{\epsilon}$
0,001 (%/s)
0,01 (%/s)
0,25 (%/s) Taxa de Referência
1 (%/s)
10 (%/s)
100 (%/s)
300 (%/s)

Tabela 2 – Taxas de deformação real usadas nos ensaios de tração.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido para este trabalho é constituído de uma placa AD de captura e de dois programas, ambos escritos na linguagem Labview. A placa lê e digitaliza os sinais do *clip-gage* e da célula de carga e os envia para o primeiro programa, que faz uma plotagem em tempo real dos dados medidos ao longo do ensaio, vide Figura 17, e os armazena num arquivo apropriado. O segundo programa faz a análise e a filtragem desses dados, para retirar os ruídos da leitura, gerando curvas  $\sigma \times \epsilon$  de engenharia e real.

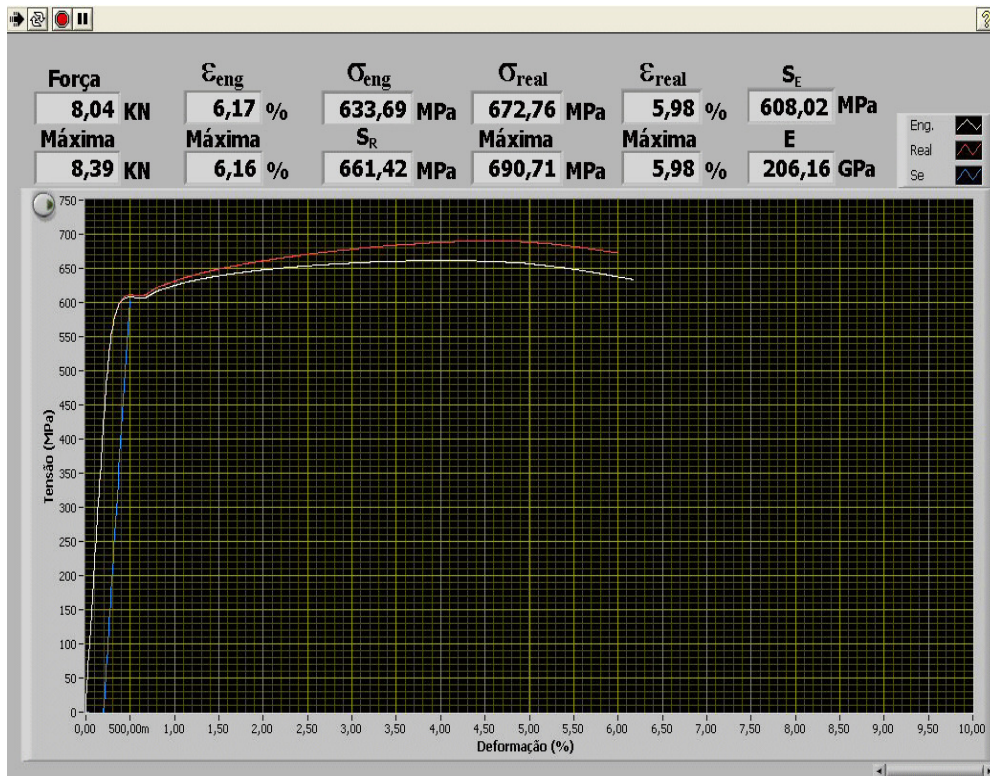


Figura 17 – Tela de acompanhamento dos ensaios de tração em tempo real.

O gráfico mostrado na Figura 17, também permitiu o acompanhamento em tempo real da deformação versus o tempo de ensaio, caracterizando a taxa de deformação.

### 2.1.5

#### Razões para Ensaio de Tração Real e suas Propriedades Mecânicas.

Segundo SOUZA (1979), as propriedades mecânicas mais comuns usadas para avaliar e especificar as propriedades dos metais, como resistência ao escoamento, resistência máxima, alongamento e estrição, quando calculados considerando a seção inicial do corpo de prova e o seu comprimento inicial efetivo, estão sujeitos a erros, pois durante o ensaio estes valores se modificam. Para materiais dúcteis durante a fase elástica, onde a deformação é pequena, essas diferenças são pequenas, entretanto após atingir a zona plástica essas diferenças podem ser grandes, introduzindo erros consideráveis nos valores das propriedades mecânicas. Desta forma, a curva tensão-deformação convencional não fornece uma indicação precisa das características de deformação do material,

por isso neste trabalho serão analisados os valores obtidos do gráfico tensão-deformação real, o qual se baseia nos valores instantâneos da seção do corpo de prova e da base de medida real da deformação. As propriedades que são determinadas na fase plástica, que são: resistência máxima, ductilidade e tenacidade, diferem apreciavelmente do ensaio convencional. A resistência máxima dado pela curva real,  $S_R$ , é calculado a partir da resistência medida pela curva convencional,  $S_r$  e alongamento uniforme convencional,  $\epsilon_u$ , isto é, o alongamento até a resistência máxima da curva tensão deformação convencional.

$$S_R = S_r (1 + \epsilon_u) \quad (5)$$

Segundo SOUZA (1974), a ductilidade real é baseada somente na deformação real até a carga máxima,  $\epsilon_{uts}$ , e corresponde ao alongamento real. Assim, o alongamento real,  $A_R$ , pode ser definido por:

$$A_R = 100 \cdot \epsilon_{uts} \quad (6)$$

A ductilidade ainda pode ser expressa quantitativamente como um alongamento percentual ou como uma redução da área percentual, conforme a norma ABNT NBR 6152. De qualquer maneira, a ductilidade representa uma medida do grau de deformação plástica que foi suportada até o momento da fratura.

O conceito de tenacidade é importante para projeto de peças que devam sofrer tensões estáticas ou dinâmicas acima da resistência ao escoamento sem se fraturar, como é o caso, por exemplo, de engrenagens, engates, correntes, ganchos de guindastes, molas, eixos, estruturas de veículos entre outras peças similares. Segundo SOUZA (1979), a equação 9 descreve o módulo de tenacidade real  $U_T$ .

A equação 8, que é a equação de HOLLomon, mostra a relação da tensão real,  $\sigma_R$ , com a deformação real,  $\epsilon_R$ , a constante plástica de resistência,  $K$ , e o fator de sensibilidade da taxa de deformação,  $m$ , também conhecido como coefi-

ciente de encruamento. A constante  $\mathbf{K}$  mede a tensão real quando a deformação real vale 1,0, tendo, portanto, dimensões de tensão e indicando algum nível de resistência do material. Já a constante  $\mathbf{m}$  mede a capacidade de encruamento do material e tem seu valor calculado pela equação 7, sendo  $\sigma_A$  e  $\sigma_B$  valores de tensão real nos pontos A e B pertencentes a região elástica e  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_B$  valores de deformação real nos pontos A e B pertencentes a região elástica. O valor de  $\mathbf{m}$  ainda pode ser determinado igualando-se ao valor da deformação real na carga máxima,  $\varepsilon_{uts}$ .

Vale ressaltar que, conforme SOUZA (1979), embora essas grandezas sejam consideradas como constantes, elas podem variar de acordo com o tratamento que o material for submetido.

Todavia, cabe a essa dissertação analisar se o efeito da taxa de deformação provoca significativa alteração nos valores de  $\mathbf{K}$  e  $\mathbf{m}$ , o que posteriormente será apresentado no capítulo 4 e comentado no capítulo 5.

$$m = \frac{\log \sigma_A - \log \sigma_B}{\log \varepsilon_A - \log \varepsilon_B} \quad (7)$$

$$\sigma_R = K \cdot \varepsilon_R^m \quad (8)$$

$$U_T = \frac{K \cdot m^{m+1}}{m+1} \quad (9)$$

## 2.2

### Metodologia de Ajuste de Dados Experimentais.

Um dos métodos mais utilizados para ajuste de curva linear a dados experimentais é o método de mínimos quadrados. De forma resumida, o método objetiva minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado, previsto por modelos matemáticos, e os dados observados. Esta diferença é cha-



mada de resíduo, logo um bom ajuste é aquele em que o valor do resíduo é pequeno. Entretanto, a região de interesse dos ensaios de tração desta dissertação é descrita por curvas não lineares compreendidas entre os valores da resistência ao escoamento até a resistência máxima do material. Os parâmetros de alguns modelos matemáticos, que serão melhor definidos no capítulo 3, devem ser ajustados para descrever o conjunto de todos os pontos experimentais medidos nos vários ensaios, e não apenas as curvas medidas em cada teste.

Isto se trata, em última análise, de um problema de mínimos quadrados não lineares, onde existem diversas maneiras de solução. Neste trabalho foi considerado o algoritmo de Levenberg-Marquardt, que consiste em um aperfeiçoamento do método de Gauss-Newton que, por sua vez, é uma variante do método de Newton. O algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) minimiza o erro quadrático entre as previsões geradas por modelos não-lineares e os pontos experimentais, logo permite que se avalie a qualidade dos modelos estudados. Em termos matemáticos, dados  $m$  pontos  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , LM procura iterativamente o vetor  $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$  (onde  $T$  significa transposto) dos  $n$  parâmetros ajustáveis do modelo  $f(x_i, p)$  especificado, de forma que eles minimizem a soma  $S(p)$  dos desvios quadráticos entre os vários valores medidos  $y_i$  e os valores calculados nos pontos  $x_i$  (usando os vários parâmetros ajustados  $p_i$  da função  $f$ ):

$$S(p) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, p)]^2 \quad (10)$$

Em outras palavras, a equação (10), também conhecida como função erro, retrata a qualidade do ajuste. A equação (11), conhecida como coeficiente de determinação, indicado por  $R^2$  ( $R^2$  igual a 1 é o ajuste perfeito), também é uma medida de qualidade do modelo em relação a sua habilidade de estimar corretamente os valores da variável resposta.

Descrevendo  $\sigma_{\text{experimental}}$  como a tensão obtida dos ensaios de tração e  $\sigma_{\text{calculado}}$  como a tensão obtida dos modelos matemáticos, tem-se a função **erro** que é dada por:  $ERRO = \sigma_{\text{experimental}} - \sigma_{\text{calculado}}$ . Sabendo-se que  $X$  é o número filtrado de pontos obtidos pelo experimento, tem-se a função  $R^2$  abaixo descrita.

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{(X \cdot \sum (ERRO^2))}{X \cdot \sum (\sigma_{experimental}^2) - (\sum \sigma_{experimental})^2} \right] \quad (11)$$

Alguns programas genéricos, como Mathcad e Matlab e.g., possuem funções dedicadas que efetuam esses cálculos (cuja convergência, diga-se de passagem, é muito sensível ao chute inicial dos valores das incógnitas). Em 2009, CASTRO e MEGGIOLARO utilizaram LM para ajustar a equação de FORMAN modificada aos dados experimentais de propagação de trinca por fadiga. A figura 18 abaixo mostra a versatilidade do algoritmo com curvas não lineares.

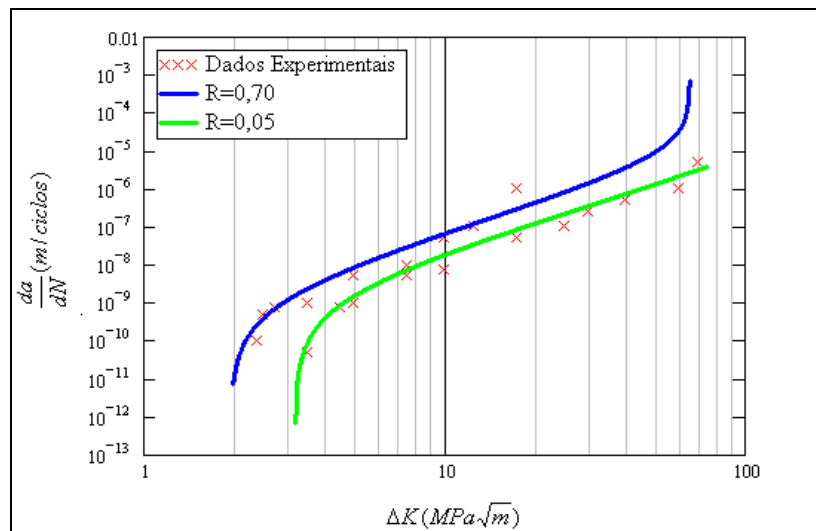


Figura 18 – Ajuste de dados para o aço 300M e API 5L-X60

Todavia, apesar de usar o mesmo algoritmo de otimização dos resultados, vale ressaltar que cabe a este trabalho determinar um único valor aos parâmetros dos modelos que melhor se ajuste ao conjunto dos dados experimentais. A tabela 3 abaixo mostra alguns valores encontrados no estudo de CASTRO e MEGGIOLARO.

Material / Constantes	$A_f$	$m_f$	$p_f$	$\alpha_f$	$R^2$
<b>Aço 300M</b>	$1,20 \cdot 10^{-8}$	1,44	0,82	0,58	0,91
<b>Aço API 5L-X60</b>	$1,25 \cdot 10^{-8}$	2,58	0,79	0,91	0,95

Tabela 3 - Constantes ajustadas por LM.

Nos estudos bibliográficos realizados foi observado o uso do algoritmo de LM, devido a sua confiabilidade e principalmente pela velocidade de convergência.

### 2.3 Metodologia para Determinação de $S_E$

Complementando o que foi mencionado no item 2.1.5, o ensaio real durante a zona elástica não difere muito do ensaio convencional, de modo que algumas propriedades mecânicas, que são funções exclusivas do regime elástico do material, são praticamente as mesmas. Essas propriedades são: resistência ao escoamento,  $S_E$ , rigidez e resiliência.

A metodologia apresentada para a determinação da resistência ao escoamento abrange a curva do ensaio tensão versus deformação convencional, real e as curvas projetadas pelos modelos matemáticos, que serão apresentados no capítulo 3.

Todavia, é importante ressaltar que todos os modelos matemáticos apresentados nesta dissertação têm o objetivo de descrever apenas a região de interesse deste estudo, ou seja, a região compreendida entre a resistência ao escoamento e resistência máxima da curva tensão versus deformação real.

Embora a máquina de tração definida no item 2.1.3 seja sensível a variação da taxa de deformação e ideal para medidas precisas no estudo do escoamento, foi adotado por motivos práticos que o valor da resistência ao escoamento seria obtido para uma deformação de 0,2% a partir da origem do gráfico tensão versus deformação.

a Figura 19 mostra que no ensaio experimental a projeção paralela da linha elástica na deformação a 0,2% determina o valor da resistência ao escoamento no eixo y (Tensão Real). Para os modelos matemáticos, que embora começam a descrever a curva na deformação de 0,2% e por isso não possuem a linha elástica de referência, pode-se fazer uma projeção da linha elástica tendo início na origem e término no início da curva projetada no gráfico. Esse procedimento garante um menor erro entre os valores de  $S_E$  obtidos pelo ensaio experimental e os modelos matemáticos.

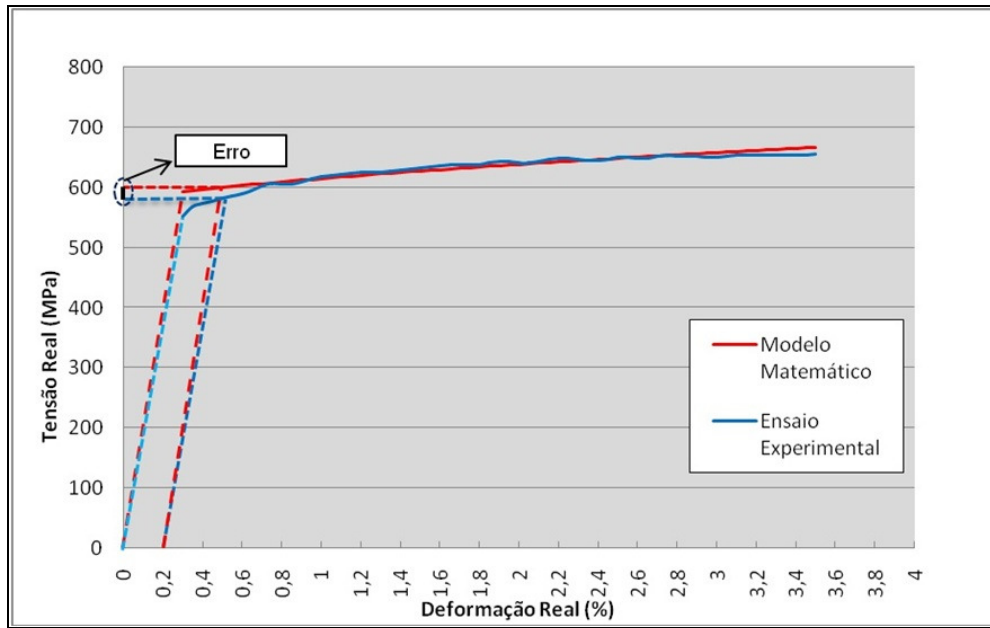


Figura 19 – Determinação de  $S_E$  para os ensaios experimentais e modelos matemáticos