

3 Modelagem analítica

Neste capítulo apresentam-se as equações utilizadas para a construção das curvas tensão - deformação, bem como as equações que representam as tensões e deformações na região elástica de cada duto analisado.

3.1. Equações analíticas

A Figura 3.1 apresenta os quatro tipos de componentes de tubos analisados, os quais foram testados experimentalmente (TPH) e modelados numericamente (MEF). Durante este trabalho serão utilizados os termos R1, R2 e R3 que fazem referência às posições onde foram colados os extensômetros de resistência elétrica EREs: R1 na superfície externa do tubo fora do defeito, R2 no centro do defeito nos tubos sem reparo ou sobre a fibra de material compósito nos tubos reparados, e R3 para os espécimes tipo Tê no tubo de menor diâmetro.

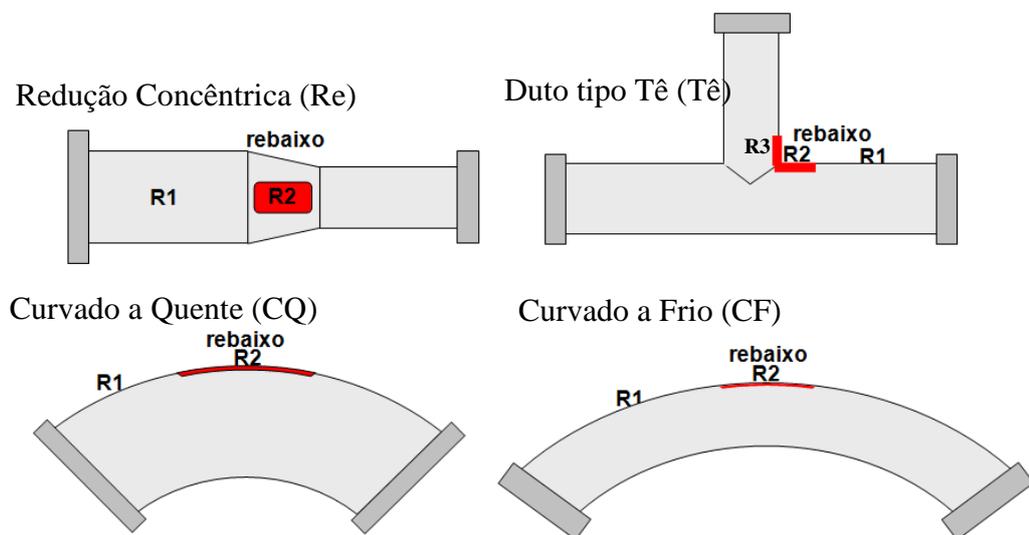


Figura 3.1 - Tipos de dutos analisados com rebaiços [16].

Para os espécimes Re e Tê as tensões circunferenciais e longitudinais na posição R1 podem ser calculadas por meio das equações de tubo de parede fina:

$$\sigma_c = \frac{P.D}{2.t} \quad \sigma_l = \frac{P.D}{4.t} \quad (3.1.1)$$

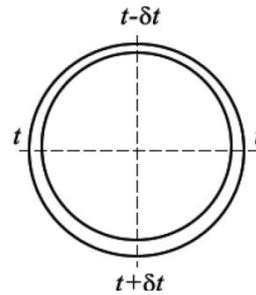
a tensão circunferencial no espécime CF para a posição R1 pode ser determinada como [31]:

$$\sigma_c = \frac{P.D_i}{4.t} \left[\left(\frac{2R + \frac{D_i}{2} \sin\theta}{R + \frac{D_i}{2} \sin\theta} \right) \right] \quad (3.1.2)$$

onde R é o raio de curvatura, θ é o ângulo na posição para a que se deseja calcular a tensão, 90° para R1.

Para os espécimes CQ, considerando-se sua espessura não uniforme, a tensão circunferencial pode ser calculada como [31]:

$$\sigma_c = \frac{P.D_i}{4.tn(1 - \delta \sin\theta)} \left[\left(\frac{2R + \frac{D_i}{2} \sin\theta}{R + \frac{D_i}{2} \sin\theta} \right) \right] \quad (3.1.3)$$



onde tn é a espessura nominal inicial e δ é a variação máxima no intradorso e extradorso.

Para comparações analíticas com modelos de elementos finitos na região elástica, as deformações principais podem ser obtidas das seguintes equações:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \nu\sigma_2) \quad (3.1.4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} (\sigma_2 - \nu\sigma_1) \quad (3.1.5)$$

onde E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson e as tensões σ_1 e σ_2 são as tensões circunferencial e longitudinal respectivamente.

Apresenta-se a seguir o desenvolvimento de uma equação analítica simples [8] para determinar a espessura de reparo a ser usado nos espécimes com defeito de perda de espessura. Esta solução é depois comparada, no capítulo 6, com as soluções analíticas apresentadas pela ISO [5] e ASME [16] e com as soluções numéricas desenvolvidas com o método de elementos finitos.

A solução analítica inicia com a hipótese de um estado uniaxial com tensão circunferencial causada pela pressão interna onde a pressão de ruptura P_u de uma conexão com espessura t é calculada como:

$$P_u = \frac{S_u \cdot 2t}{D_m} \quad (3.1.6)$$

onde D_m é o diâmetro nominal dos espécimes CF, CQ, diâmetro maior no espécime tipo Tê e diâmetro médio na conexão do espécime Re (embora possa se usar nesta expressão o diâmetro do tubo maior, querendo-se então dizer que a resistência da conexão será maior ou igual à do tubo com maior diâmetro).

Sabendo que a tensão circunferencial no ligamento de aço com espessura remanescente t^* , na região do defeito e com reparo aplicado é σ_c^* , que a tensão no material compósito é σ_R , que a espessura de material compósito é t_R , e que a influência do material epóxi de preenchimento do defeito é desprezível para o equilíbrio de forças nesta região do defeito, tem-se que:

$$\frac{P_u \cdot D_m}{2} = \sigma_c^* \cdot t^* + \sigma_R \cdot t_R \quad (3.1.7)$$

os termos que envolvem tensões (uniaxiais) para o aço e para o material compósito, são explicitados a partir de suas deformações (supostas idênticas ao ser consideradas pequenas espessuras para o tubo e reparo) levando em consideração suas regiões elásticas e plásticas. Entretanto, o material compósito é assumido como apenas elástico, assim:

$$\frac{P_u \cdot D_m}{2} = [\varepsilon \cdot E] \cdot t^* + [\varepsilon \cdot E_R] t_R \quad \text{se } \varepsilon \leq \varepsilon_y = \frac{SMYS}{E} \quad (3.1.8)$$

$$\frac{P_u \cdot D_m}{2} = [\varepsilon_y \cdot E + (\varepsilon - \varepsilon_y) \cdot E_H] \cdot t^* + [\varepsilon \cdot E_R] t_R \quad \text{se } \varepsilon > \varepsilon_y \quad (3.1.9)$$

onde ε_y é a deformação que define escoamento no aço para uma curva bilinear, E_H é o módulo de encruamento para esta curva bilinear, e E_R é o módulo de elasticidade do material compósito na direção circunferencial. Desta forma a espessura de material composto pode ser calculada como:

$$t_R = \frac{P_u \cdot D_m}{2 \cdot [\varepsilon \cdot E]} - \frac{E \cdot t^*}{E_R} \quad \text{se } \varepsilon \leq \varepsilon_y = \frac{SMYS}{E} \quad (3.1.10)$$

$$t_R = \frac{P_u \cdot D_m}{2 \cdot \varepsilon \cdot E_R} - \frac{1}{\varepsilon \cdot E_R} [\varepsilon_y \cdot E + (\varepsilon - \varepsilon_y) \cdot E_H] \cdot t^* \quad \text{se } \varepsilon > \varepsilon_y \quad (3.1.11)$$

As equações anteriores são utilizadas em dutos retos ou com reduções cônicas que é o caso dos espécimes Re. Para serem aplicados nos demais espécimes estudados é necessário a adição de um fator F que correlaciona a geometria dos espécimes CF, CQ e um fator de intensidade de tensões no espécime tipo Tê [25]. Assim:

$$F_{CF} = \left(\frac{2R + \frac{D}{2} \sin\theta}{2R + D \sin\theta} \right) \quad (3.1.12)$$

$$F_{CQ} = \frac{1}{(1 - \delta \sin\theta)} \left(\frac{2R + \frac{D}{2} \sin\theta}{2R + D \sin\theta} \right) \quad (3.1.13)$$

$$F_{Tê} = \left[\frac{3}{4} \cdot \frac{0,9}{h^{2/3}} \right] + \frac{1}{4} \quad (3.1.14)$$

onde R é o raio de curvatura nos espécimes CF, CQ. No espécime tipo Tê $h=2 \cdot t_{nom}/D$. Finalmente a equação pode ser reescrita:

$$t^* = \frac{P_u \cdot D_m \cdot F}{2 \cdot [\varepsilon \cdot E]} - \frac{E \cdot t^*}{E_R} \quad \text{se } \varepsilon \leq \varepsilon_y = \frac{SMYS}{E} \quad (3.1.15)$$

$$t_R = \frac{P_u \cdot D_m \cdot F}{2 \cdot \varepsilon \cdot E_R} - \frac{1}{\varepsilon \cdot E_R} [\varepsilon_y \cdot E + (\varepsilon - \varepsilon_y) \cdot E_H] \cdot t^* \quad \text{se } \varepsilon > \varepsilon_y \quad (3.1.16)$$

3.2.

Determinação das curvas tensão - deformação uniaxial para os materiais estudados

As propriedades mecânicas (curva tensão – deformação uniaxial) dos materiais usados para os tubos foram levantadas com base nos dados adquiridos nos ensaios experimentais usando-se para isto as rosetas (compostas de extensômetros biaxiais) posicionadas nas regiões nominais dos tubos de 12,75in de diâmetro, nos testes de pressão hidrostáticos dos espécimes Re3, CF4 e CQ2. Uma vez que estes tubos atingiram sua ruptura, toda a curva tensão – deformação de seus materiais pode ser determinada.

Estas curvas foram levantadas seguindo o procedimento proposto em [32]. Para isto foram usadas as deformações totais medidas pelos EREs longitudinal e circunferencial (compostas de rosetas) durante os testes dos espécimes Re3, CF4, CQ2, para cada pequeno incremento da pressão de teste. Estes parâmetros de deformações tiveram suas partes elásticas e plásticas separadas e estas foram usadas em conjunto com as tensões totais de von Mises e a deformações plásticas equivalentes de von Mises para a determinação da curva tensão - deformação.

A deformação plástica equivalente de von Mises é determinada pela equação (3.2.1).

$$\varepsilon_{equi} = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_{cp} - \varepsilon_{lp})^2 + (\varepsilon_{lp} - \varepsilon_{rp})^2 + (\varepsilon_{cp} - \varepsilon_{rp})^2]} \quad (3.2.1)$$

Onde as componentes ε_{cp} , ε_{lp} e ε_{rp} são as deformações plásticas nas direções circunferencial, longitudinal, e radial. Por conservação de volume na região plástica:

$$\varepsilon_{rp} = -(\varepsilon_{cp} + \varepsilon_{lp}) \quad (3.2.2)$$

onde ε_{rp} é a deformação plástica radial.

A equação 3.2.1 pode ser reescrita como 3.2.1.a.

$$\varepsilon_{equi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{[(\varepsilon_{cp})^2 + (\varepsilon_{lp})^2 + \varepsilon_{cp}\varepsilon_{lp}]} \quad (3.2.1.a)$$

Considerando a tensão radial σ_r igual a zero na parede externa do tubo de parede fina, as tensões totais circunferencial e longitudinal são descritas pelas equações 3.1.1 para o espécime Re, 3.1.2 para o CF e 3.1.3 para o CQ.

A tensão total de von Mises para cada valor de pressão é dada pela equação (3.2.3).

$$\sigma_{equi} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_l^2 + -\sigma_c\sigma_l} \quad (3.2.3)$$

Acoplando-se os pares de tensões totais e deformações plásticas com as relações entre tensões totais e deformações elásticas para um tubo de paredes finas, as curvas tensões - deformações com suas regiões elásticas e plásticas são determinada na Figura 3.2, a Figura 3.3, e a Figura 3.4 e usadas nas análises numéricas feitas no próximo capítulo.

A Figura 3.2 apresenta a curva tensão - deformação para o tubo de aço API 5L Grau B de 12,75 in (MAT 1) determinada pelas equações 3.2.1. e 3.2.3 a partir dos valores de deformações medidos pelos EREs circunferencial e longitudinal da roseta R1 para o espécime Re3. O apêndice C apresenta em detalhe o cálculo desta curva.

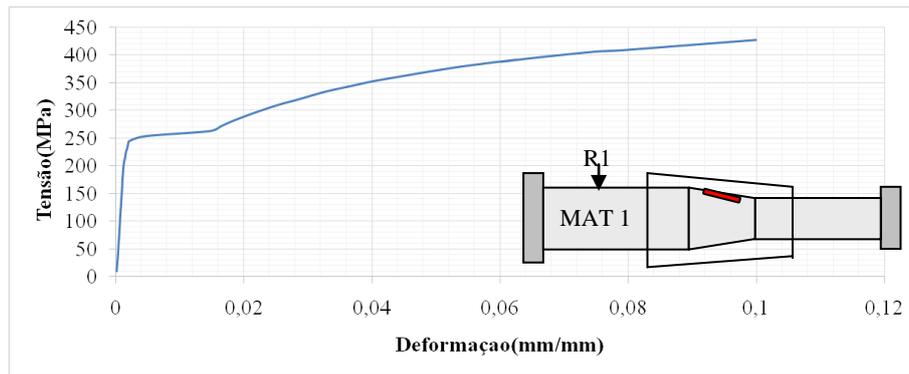


Figura 3.2 - Curva tensão - deformação levantada para o tubo de aço API 5L Grau B (MAT 1) a partir dos resultados experimentais coletados no ensaio hidrostático do espécime Re3, na seção nominal do tubo com diâmetro 12,75 in onde se posicionou a roseta extensométrica R1.

A Figura 3.3 apresenta a curva tensão - deformação para o tubo de aço API 5L Grau B (MAT 2) determinada pelas equações 3.2.1.a e 3.2.3 a partir dos valores de deformações medidos pelos EREs circunferencial e longitudinal da roseta R1 para o espécime CQ2.

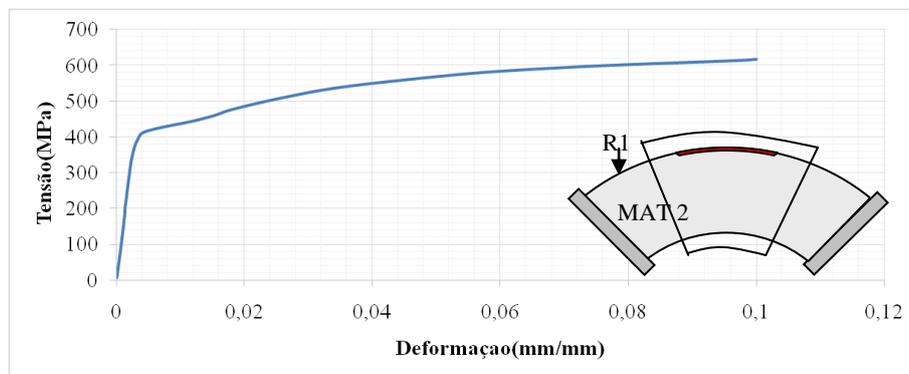


Figura 3.3 - Curva tensão - deformação levantada para o tubo de aço API 5L Grau B (MAT 2) a partir dos resultados experimentais coletados no ensaio hidrostático do espécime CQ2, na seção nominal do tubo com diâmetro 12,75 in onde se posicionou a roseta extensométrica R1.

A Figura 3.4 apresenta a curva tensão - deformação para o tubo de aço API 5L Grau B (MAT 3) determinada pelas equações 3.2.1. e 3.2.3 a partir dos valores

de deformações medidos pelos EREs circunferencial e longitudinal da roseta R1 para o espécime CF4.

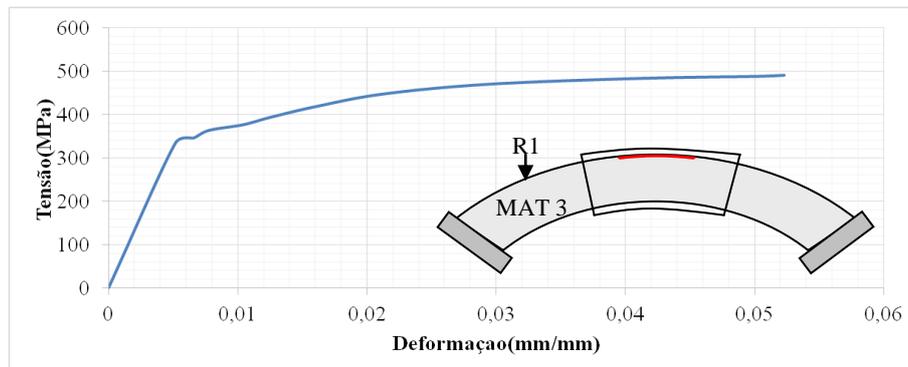


Figura 3.4 - Curva tensão - deformação levantada para o tubo de aço API 5L Grau B (MAT 3) a partir dos resultados experimentais coletados no ensaio hidrostático do espécime CF4 na seção nominal do tubo com diâmetro 12,75 in onde se posicionou a roseta extensométrica R1.

As propriedades mecânicas de resistência ao escoamento e à tração do material da conexão cônica usado nos espécimes Re foram estimadas a partir da combinação da curva tensão - deformação determinada no ensaio do espécime Re3 (Figura 3.2) e da curva tensão - deformação determinada para o centro do defeito da região cônica do espécime Re7 (Figura 3.5). Para isto foram usados os resultados experimentais determinados no ensaio do espécime Re7 que não sofreu reparo. Nesta curva, a ruptura ocorreu na posição central do defeito localizada na conexão cônica. A roseta R2 mediu as deformações que ocorreram nesta posição até o momento da ruptura.

A Figura 3.5 apresenta uma comparação entre a deformação circunferencial medida pelo ERE R2C posicionado no centro do defeito da conexão cônica do espécime Re7 e a deformação circunferencial determinada para esta mesma posição deste espécime usando-se o método de elementos finitos e a curva tensão - deformação levantada para o material do tubo de maior diâmetro usado (MAT 1) no ensaio do espécime Re3 e mostrada na Figura 3.2.

A partir das deformações circunferenciais medidas pelo extensômetro R2C e calculadas pelo método de elementos finitos para o mesmo ponto usando-se o

material MAT 1 (Figura 3.2) ajusta-se a curva tensão - deformação para o material da conexão.

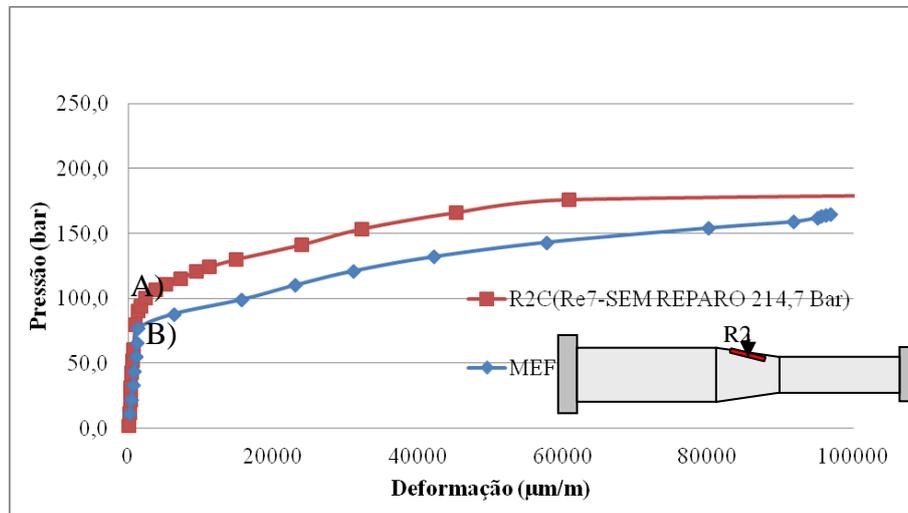


Figura 3.5 - Comparação entre as curvas pressão-deformação circunferencial, na conexão, medidos no centro do defeito do espécime Re7 sem reparo com o extensômetro R2C, e calculado para o mesmo ponto usando-se o método de elementos finitos e a curva tensão - deformação para o MAT 1 apresentada na Figura 3.2.

A curva tensão - deformação do material MAT 1 mostrada na Figura 3.2 foi ajustada para se tornar a curva tensão deformação do material da conexão cônica da seguinte forma. Usando-se a Figura 3.5 determinam-se as pressões nas quais as curvas deixam de ter um comportamento linear, pontos A) e B) tanto medidos pelo extensômetro R2C no TPH, como calculado no MEF. Os dois pontos têm uma diferença de 26,5 bar (2,65 MPa). Foi então calculada a tensão de von Mises (equação 3.2.3) para esta diferença de pressão de 2,65 MPa e somada na curva tensão - deformação da Figura 3.2 para todos os seus pontos a partir do seu limite de escoamento.

Finalmente a Figura 3.6 apresenta a curva tensão - deformação para a conexão cônica (MAT 4).

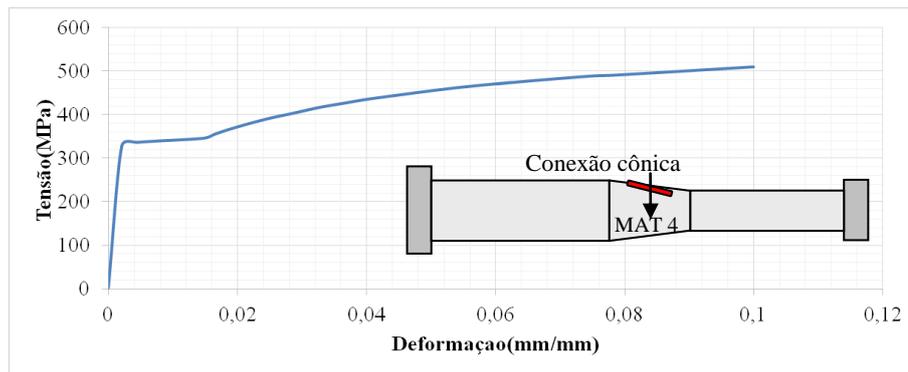


Figura 3.6 - Curva tensão-deformação levantada para a conexão cônica (MAT 4) a partir da modificação dos resultados experimentais gerados nos ensaios hidrostáticos dos espécimes Re3 e Re7.