

Referências bibliográficas

- [1] Luiz F. M. Gomes. – **O Mercado Potencial para o Transporte por Dutos no Brasil**. Rio de Janeiro : PUC 1984.
- [2] Revista electrónica.- **Pétroleo e Gás**. Globo Online
<http://oglobo.globo.com/petroleo>, 2005.
- [3] N-2737 Petrobrás.- **Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre Ontec SC-13**, Oleodutos e Gaseodutos, julho, 2005
- [4] José Luiz F. Freire. – **Análise da Integridade de Dutos – Noções Básicas** Engenharia de Dutos 2004.
- [5] Carlos Eduardo Foltran.- **Análise de Problemas Planos em Regime Elastoplástico pelo Método dos Elementos de Contorno**. São Paulo, agosto 1999, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.
- [6] Fernando Rodriguez, Avial Azcunaga.- **Resistencia de Materiales**. Madrid: Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, 1977
- [7] ASME B31.4, **Pipeline Transportation System for Liquids Hydrocarbons and Other Liquids**, ASME Code dor Pressure Piping, B31, An American National Standard, 1998 Edition.
- [8] API Specification 5L, **Specification for Line Pipe**, Forty-Second Edition, July 1, 2000. American Petroleum Institute
- [9] Ricardo Dias de Souza. – **Avaliação Estrutural de Dutos com defeitos de Corrosão Reais**. Rio de Janeiro, junho 2003, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, PUC-Rio
- [10] Jorge Luiz Coutinho Diniz.- **Resistência de Dutos com Defeitos Usinados**. Rio de Janeiro, maio 2002, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, PUC-Rio
- [11] API Recommended Practice 579, **Fitness for Service**, American Petroleum Institute, First Edition, jan.2000
- [12] Jaime Tupiassú P.C; Marco A. Meggiolaro.- **Fadiga sob Cargas de Serviço**. Primeira edição 2004.

- [13] Mendelson, Alexander.-**Plasticity: Theory and Application**. Segunda edição 1970
- [14] Nara Guidacci Berry.- **Avaliação de Propriedades Mecânicas e Adesivas de Resinas Epoxídicas com e sem Envelhecimento**. Rio de Janeiro, setembro 2004. Tese de Doutorado, Engenharia de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC-Rio.
- [15] Rita de Cásia Oliveira Marcelino Afonso.- **Adhesiveness Study of Polimeryc Matrix Composite Material for Pipelines Repair**. Laboratorio de Mateiais Compósitos, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil
- [16] Hart-Smith, J.L.- **Developments in Adhesives** – 2(ed. A. J. Kinloch) – Appl. Sci. Pub., London, 1981, pp.1.
- [17] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration – **Analitical** modeling od ASTM Lap Shear Adhesive Specimens. February 2003.
- [18] Dres. Juan José del Coz Díaz; D. Fco Jose Suarez Domínguez. E.T.S. Ingenieros Industriales – GIJON. <http://www.construccion.uniovi.es>
- [19] Abel Torres Andrews.- **Análise bidimensional da dinâmica de linhas flexíveis incluindo os efeitos do contato com o fundo marinho**. Rio de Janeiro, junho 2004, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- [20] Ansys Release 10.0 Documentation, Ansys Tutorial.s
- [21] Catalogo do produto Araldite® AV 138M with Hardener HV 998, 2005
- [22] ASTM A 370 – 03a.- **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**.
- [23] J.L.F, Diniz, R.D. Vieira, J.L.F. Freire. – Stress and Strain Analysis of Pipelines with localized Metal Loss. Proceedings of the SEM International Congress on Experimental and Applied Mechanics, 2004
- [24] J.N. Reddy.- Mechanics of Laminated Composite Plates, Theory and Analysis. Department of Mechanical Engineering, University College Station, Texas
- [25] Repair of Composite Laminates DOT – Department of Transportation, Federal Aviation Administration, EUA.

Apêndices

A

Fator de eficiência de junta longitudinal soldada

Especificação de aço	Classe do tubo	E
API 5L (a norma fornece outras classificações)	Sem costura	1.00
	ERW (soldagem por resistência elétrica)	1.00
	EFW (soldagem por fusão)	1.00
	Arco submerso	1.00
	Forno-topo	0.60

B

Caracterização do Material Utilizado

Para a caracterização do material utilizado, se fizeram ensaios a tração no laboratório do Ituc da PUC-Rio, de oito corpos de prova, dos quais três são retirados do tubo na direção circunferencial, três da chapa de aço preto e dois da chapa inox 304, no sentido de laminação de chapa. As provetas foram feitas segundo a ASTM A 370-03a [22]. A geometria do corpo de prova para o ensaio a tração é mostrada na figura B.1

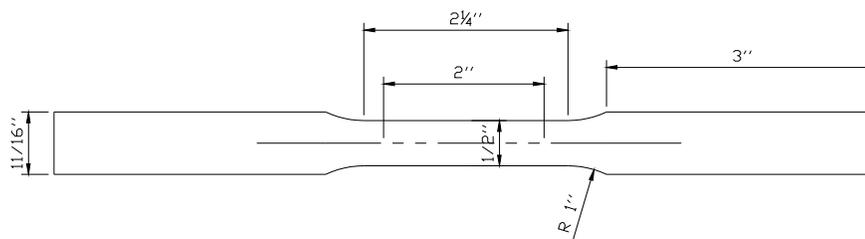


Figura B.1 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio a tração

Os resultados se mostram na tabela B.1 e na figura B.2

Tabela B.1 Propriedades mecânicas dos corpos de prova do ensaio a tração

Corpo de prova	Limite de escoamento MPa(Sy)	Resistência tração MPa (Su)	Alongamento(%)
DUTO CP 1 ⁽ⁱ⁾	256.81	307.52	36.0
DUTO CP2 ⁽ⁱ⁾	262.60	310.18	34.3
DUTO CP3 ⁽ⁱ⁾	260.11	309.81	36.4
CHAPA CP4 ⁽ⁱⁱ⁾	174.26	293.23	30.7
CHAPA CP5 ⁽ⁱⁱ⁾	167.70	295.10	35.0
CHAPA CP6 ⁽ⁱⁱ⁾	177.69	296.92	41,9
CHAPA CP7 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	296.94	818.27	98.9
CHAPA CP8 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	318.12	814.21	80.3

- (i) Tirados do duto no sentido circunferencial
- (ii) Tirados da chapa de aço baixo carbono no sentido de laminação
- (iii) Tirados da chapa de aço inoxidável 304 no sentido de laminação

Utilizam-se os dados dos espécimes DUTO CP2, CHAPA CP5 e CHAPA CP8 por serem os mais confiáveis.

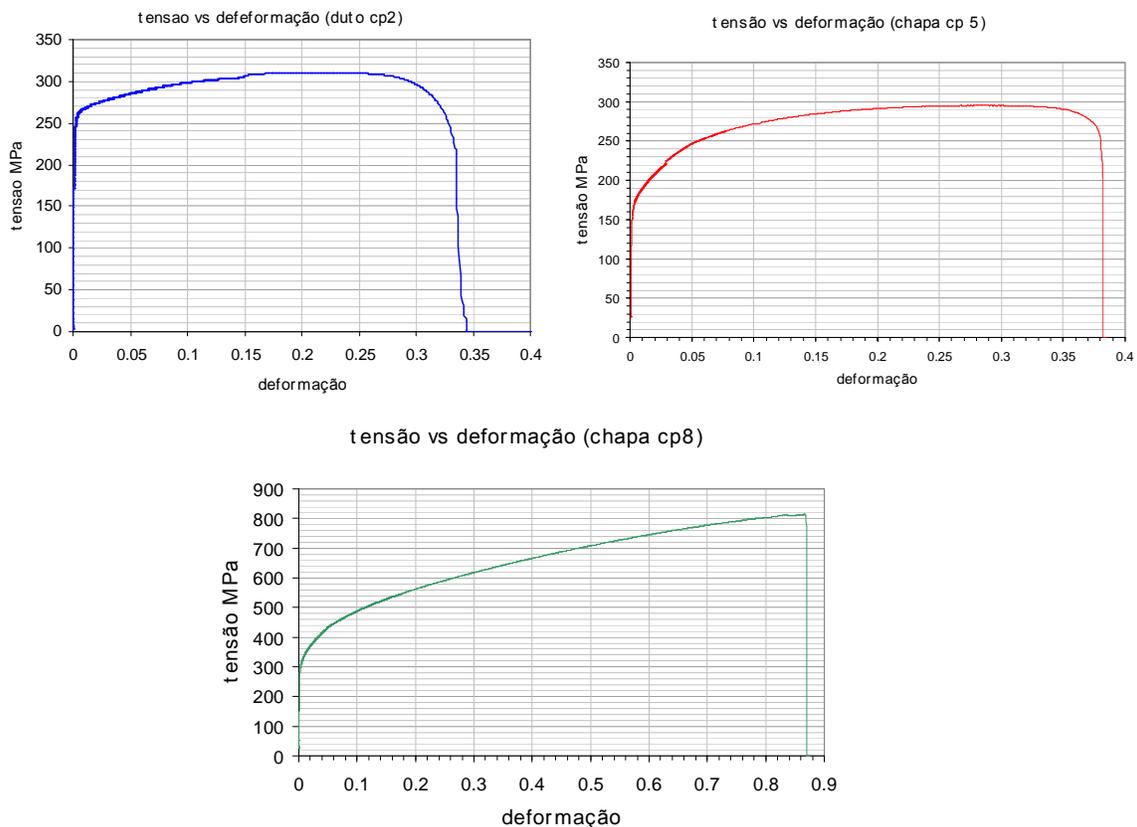


Figura B.2 - Gráficos tensão vs deformação dos corpos de prova de cada material

C

Determinação da Espessura Ideal da Camada Metálica no Reparo

Neste apêndice se continua com o estudo iniciado na seção 3.4.6. Na figura C.1 se mostram os resultados das tensões circunferenciais apresentadas na região do defeito para os modelos de 2, 3, 4, 5 e 6 camadas metálicas com igual espessura equivalente total (figura 3.25).

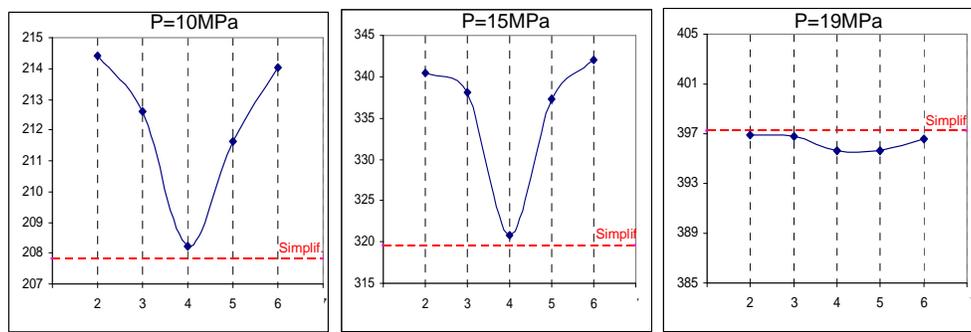


Figura C.1 – Tensões circunferências no defeito

Pode-se observar que o reparo que apresenta tensão circunferencial mais próxima à tensão apresentada no modelo simplificado, é o duto de quatro camadas metálicas. Pela distribuição de tensões circunferenciais nos cilindros de parede espessa pode-se entender que é inconveniente que as camadas metálicas fiquem mais afastadas a parede do duto, já que seu aporte de carga é menor. Isto acontece nos reparos que têm muitas camadas metálicas devido a maior espessura total das camadas de adesivo, como é o caso dos dutos de 6 e 5 camadas, em comparação ao duto de 4 camadas metálicas no reparo, ocasionando assim que a região do defeito trabalhe mais. Isto é válido para todos os reparos, como pode-se ver na figura C.2.b num reparo de 2 camadas metálicas onde a tensão no defeito diminui na medida que se reduz a camada de adesivo, mas devido a interação de outras forças nos reparos de 2 e 3 camadas, diminuí seu rendimento mais do que acrescenta o fato de ter menos adesivo, já que, para o modelo sem espessura de camada de adesivo, se espera um comportamento igual ao duto de reparo

simplificado, mas não é bem assim, este apresenta uma tensão no defeito de 211,9 MPa maior aos 207,8MPa que apresenta o reparo simplificado.

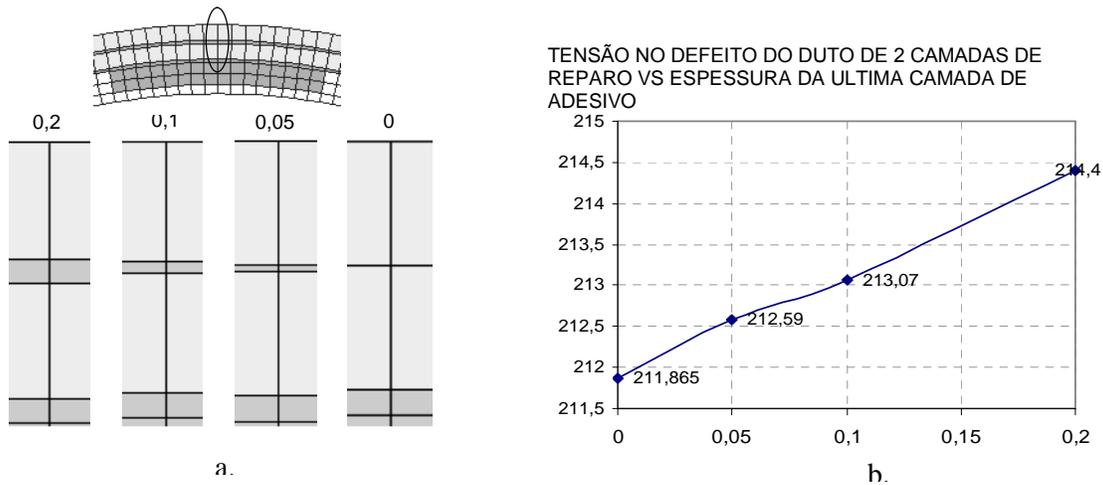


Figura C.2 – Variação da tensão com a variação na espessura da camada de adesivo.

O modelo de 2 camadas metálicas sem adesivo tem junções a 180° e 0°, em quanto que o modelo ideal não tem junção. Então, pode ser que a presença das junções origine uma distribuição irregular das tensões na circunferência do duto, afetando o rendimento do reparo. Isto se pode ver na figura C.3 onde se modelam dutos com reparo de 2, 3 e 4 camadas sem adesivo entre elas, sendo a de melhor desempenho a de 4 camadas, devido às junções das camadas metálicas ficam mais bem repartidas, logrando uma melhor distribuição das tensões na parede do duto.

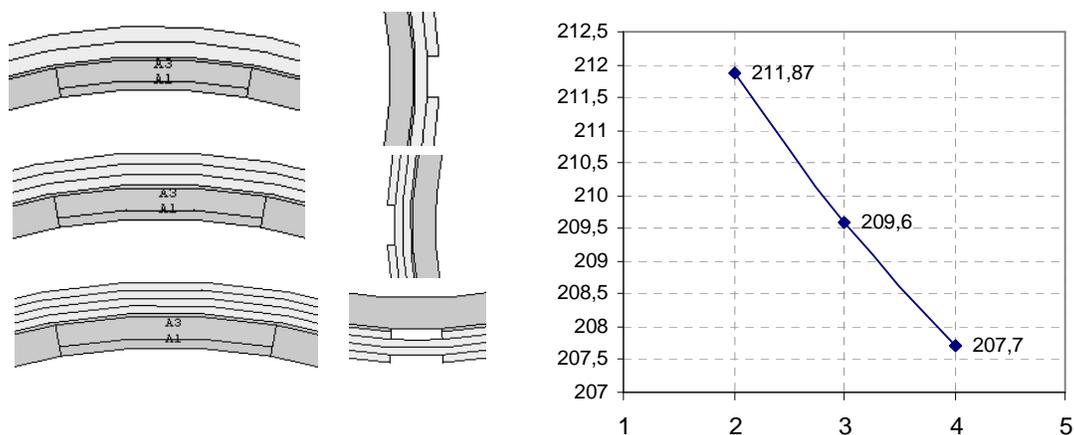


Figura C.3 – Modelos sm espessura de adesivo nas camadas.

A tendência das curvas da figura C.1 pode ser modificada se se resta o efeito das junções. Isto é feito modelando reparos de 2, 3 e 4 camadas convencionais, mas sem junção. A nova tendência destas curvas pode-se ver na figura C.4. Atribui-se a sua não linearidade ao aporte de carga do adesivo e outros fatores considerados irrelevantes no estudo.

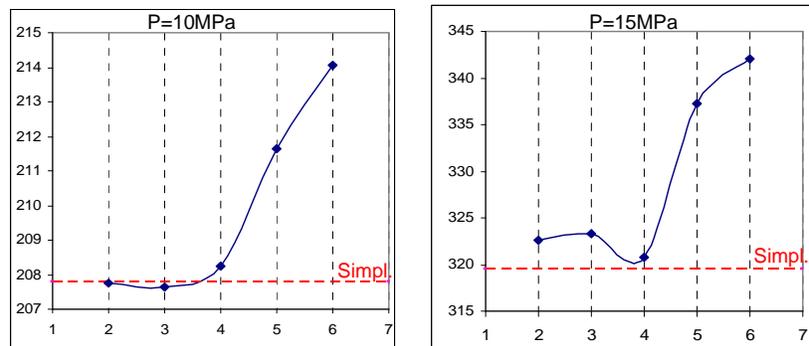


Figura C.4 – Comportamentos nos modelos sem junção.

D

Cálculo das Tensões a partir das Deformações Experimentais

Nesta seção, propõe-se um método para o cálculo das tensões a partir das deformações medidas na região do defeito. Devido à natureza das tensões, estas não podem ser medidas, mas sim calculadas. Este cálculo se complica quando se tem estados multiaxiais de tensões ou deformações.

Para a solução, dividem-se as curvas pressão vs deformação circunferencial dos testes dos espécimes tubulares e de a curva tensão vs deformação dos ensaios de tração, em três regiões. A primeira é a região elástica, que vai desde zero até o limite de proporcionalidade (neste trabalho se considera até 0.07% de deformação equivalente). A segunda é a região de transição, que se estende desde 0.07% a 0.25% de deformação equivalente. A terceira região é a plástica, vai desde 0.25% até 2% de deformação equivalente.

No cálculo das componentes equivalentes se faz as seguintes aproximações:

- $e_l \approx 0$, devido a os pequenos valores numéricos apresentados na região do defeito, já que, as regiões próximas do duto que não tem defeito, e o reparo, controlam e limitam a deformação longitudinal.
- $\delta e_l \ll \delta e_c$, no regime plástico se tem que os incrementos de deformação longitudinal são muito pequenos em comparação com os incrementos circunferenciais, pelo que são depreciáveis [23]
- $\sigma_r \approx 0$, a tensão radial se aproxima de zero por ser um duto de parede fina.

Este método não considera o efeito do encruamento do material, e então, não considera o aporte de deformação elástica em cada incremento de deformação após a ocorrência do limite proporcionalidade do material.

Na região elástica, se utilizam as equações constitutivas 2.10 para achar a tensão circunferencial a partir das deformações circunferenciais experimentais, e então achar a tensão equivalente. Outra forma trabalha diretamente com a curva tensão vs deformação do material, entrando com a deformação equivalente e achando tensão. As equações 2.10 para um cilindro no regime elástico se podem simplificar da seguinte forma:

$$e_l = \frac{1}{E} [\sigma_l - \mu(\sigma_r + \sigma_c)] \quad \text{usando } e_l \approx 0 \text{ e } \sigma_r \approx 0 \text{ se tem } \sigma_l = \mu\sigma_c$$

$$e_c = \frac{1}{E} [\sigma_c - \mu(\sigma_l + \sigma_r)] \quad \text{usando } \sigma_r \approx 0 \text{ e } \sigma_l = \mu\sigma_c \text{ se tem:}$$

$$\sigma_c = \frac{e_c \cdot E}{(1 - \mu^2)} \quad (\text{D.1})$$

$$e_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_c + \sigma_l)] \quad \text{usando } \sigma_r \approx 0, \sigma_l = \mu\sigma_c \text{ e a equação D.1, se tem:}$$

$$e_r = -e_c \frac{(\mu + \mu^2)}{(1 - \mu^2)} \quad (\text{D.2})$$

A tensão equivalente e a deformação equivalentes são:

$$\sigma_{eq-duto} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_c - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_c)^2}$$

$$e_{eq-duto} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_c - e_l)^2 + (e_l - e_r)^2 + (e_r - e_c)^2}$$

Estas equações, no regime elástico, podem ser escritas como funções da deformação circunferencial da seguinte forma:

$$\sigma_{eq-duto}^e = e_c \frac{E \cdot \sqrt{2\mu^2 - 2\mu + 2}}{\sqrt{2} \cdot (1 - \mu^2)} \quad (D.3)$$

$$e_{eq-duto}^e = e_c \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2} \cdot (\mu + \mu^2)}{(1 - \mu^2)} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{3}{2}} \quad (D.4)$$

Onde se substitui $\mu = 0.29$ e $E = 212\,000$ MPa tem-se:

$$\sigma_{eq-duto}^e = (206264.93) \cdot e_c \quad (D.5)$$

$$e_{eq-duto}^e = (0.807) \cdot e_c \quad (D.6)$$

Com a equação D.5 e os valores de pressão relacionados a e_c , pode-se fazer o gráfico da tensão equivalente em função da pressão no regime elástica, ou, com a equação D.6 entra-se na curva tensão vs deformação do material, para achar-se a tensão equivalente.

Na região de transição as tensões são achadas por relação simples entre as deformações equivalentes dos testes dos espécimes tubulares, e as deformações equivalentes do ensaio de tração do material do duto. Para o cálculo das deformações equivalentes ainda são usadas as equações constitutivas da elasticidade, sem ter erro considerável, já que o único parâmetro presente na equação é o coeficiente de Poisson (por exemplo a equação D.3). No caso do cálculo das tensões equivalentes no corpo de prova do ensaio de tração, tem-se que $\sigma_1 \neq 0$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, então através das equações 2.10 pode-se achar que: $e_1 = -\mu \cdot e_2 = -\mu \cdot e_3$, o qual é aplicado na equação 2.14 para calcular a deformação equivalente.

$$e_{eq-tração} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}, \text{ na região de transição se reduz}$$

a:

$$e_{eq-tração}^t = \frac{2}{3}(1 + \mu).e_1 \quad (D.7)$$

esta equação também é válida na região elástica. Então, com $\mu = 0.29$, tem-se:

$$e_{eq-tração}^t = (0.86).e_1 \quad (D.8)$$

A deformação equivalente na região do defeito é achada com a equação D.6

$$e_{eq-duto}^t = (0.807).e_c$$

A relação das deformações equivalentes pode ser feita ponto a ponto e assim obter a tensão, ou, se pode achar uma linha de tendência que correlacione as deformações com as tensões facilitando o processo, o qual é muito útil quando se tem uma grande quantidade de dados por correlacionar. Recomenda-se a relação ponto a ponto, já que se obtém resultados mais precisos, sobretudo nos extremos de cada região.

No regime plástico se considera que cada incremento de deformação não tem aporte de deformação elástica. A tensão também é achada por correlação entre as deformações equivalentes do espécime tubular e do corpo do prova do ensaio de tração. Para o cálculo da deformação equivalente, se considera que as deformações plásticas ocorrem a volume constante ($\Delta e_c^p + \Delta e_l^p + \Delta e_r^p = 0$) e se consideram os incrementos de deformação plástica longitudinal desprezíveis ($\Delta e_l^p \approx 0$), já que estes são pequenos em comparação aos incrementos de deformação plástica circunferencial ($\delta e_l^p \ll \delta e_c^p$), então se tem que $\Delta e_c^p = -\Delta e_r^p$. Então, a equação para achar os incrementos de deformação equivalente só depende dos incrementos de deformação circunferencial, da seguinte forma:

$$\Delta e_{eq-duto}^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta e_1^p - \Delta e_2^p)^2 + (\Delta e_2^p - \Delta e_3^p)^2 + (\Delta e_3^p - \Delta e_1^p)^2}$$

Então:

$$\Delta e_{eq-duto}^p = \frac{2\sqrt{3}}{3} . \Delta e_c^p$$

Tem-se a deformação equivalente total na região do defeito é igual a:

$$e_{eq-duto} = e_{eq}^e + e_{eq}^t + \sum .\Delta e_{eq-duto}^p$$

ou:

$$e_{eq-duto} = e_{eq-duto}^e + e_{eq-duto}^t + \sum \frac{2\sqrt{3}}{3} .\Delta e_c^p \quad (D.9)$$

No caso de um corpo de prova ensaiado à tração, tem-se:

$$\Delta e_{eq-tração}^p = \Delta e_1^p$$

Então a deformação equivalente total é igual a:

$$e_{eq-tração} = e_{eq-tração}^e + e_{eq-tração}^t + \sum .\Delta e_1^p \quad (D.10)$$

Aplica-se o procedimento ao duto de quatro camadas no reparo (DRC 006) para achar as tensões no defeito. Os resultados são mostrados na figura D.1.

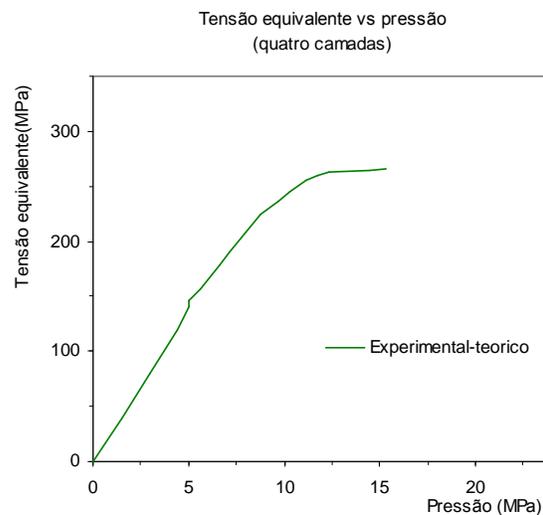


Figura D.1 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.

Este procedimento precisa ainda um estudo mais aprofundado, e avaliado com resultados experimentais. Recomenda-se obter curvas tensão vs deformação do material com a maior precisão possível, utilizando células de carga apropriadas para cada corpo de prova, assim como o dimensionamento exato do defeito, parâmetro onde pode se introduzir erro considerável pela dificuldade da sua medição. Estes possíveis erros podem ser muito relevantes, já que, no regime elástico, um pequeno incremento de deformação, apresenta um incremento considerável da tensão.

E**Variante da Técnica de Reparo Proposta**

Uma das principais limitações da técnica de reparo proposta é o tempo de aplicação do reparo, devido ao tempo de cura do adesivo para cada camada utilizada. Nesta seção se apresenta uma possível variante da técnica de reparo. Esta consiste em enrolar a chapa metálica ao tubo com adesivo epóxi, (a chapa foi previamente corta em forma de fita, figura E.1.a). Uma das vantagens deste método es que só precisa assegurar a camada metálica nos extremos (figura E.1.b), sem ter que colocar braçadeiras no médio do reparo, assim, pode-se enrolar outra fita metálica sem tirar as braçadeiras que asseguram a primeira fita metálica enrolada, quer dizer, que não precisa de esperar que o adesivo cure parcialmente camada traz camada.



Figura E.1 – Variante do método de reparo