

## 6 Avaliação e Comparação dos Resultados

Neste capítulo se faz a avaliação dos modelos numérico, analítico e experimental, mediante comparação dos resultados das (i) deformações circunferenciais, (ii) tensões equivalentes e (iii) pressões de escoamento e ruptura. Também se faz comparações adicionais dos resultados analíticos com resultados numéricos onde se mudam parâmetros como a profundidade do defeito e material do reparo. Ao final, se apresenta um exemplo de aplicação.

### 6.1 Comparações Numéricas, Analíticas e Experimentais.

Para a avaliação dos modelos numéricos, utilizam-se os dados das deformações circunferenciais nos espécimes de quatro e três camadas metálicas, junto aos valores das pressões que originam a ruptura e o escoamento. Nas comparações com as pressões de escoamento se deve ter em conta a observação feita na seção 3.4.10, onde se indica a diferença que se tem ao comparar esta pressão<sup>1</sup>. As tensões equivalentes (achadas mediante o procedimento de calculo indicado no Apêndice D) são um bom parâmetro de comparação entre os modelos analíticos e numéricos; já não são tão boas assim, quando são utilizadas para comparar os resultados experimentais, sobre tudo no regime elástico, onde apresenta certa discordância. Recomenda-se um estudo mais aprofundado para o uso deste parâmetro na comparação de resultados.

---

<sup>1</sup> Observar a figura 3.34

- **Duto de Quatro Camadas no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os três parâmetros de comparação (i, ii, iii).

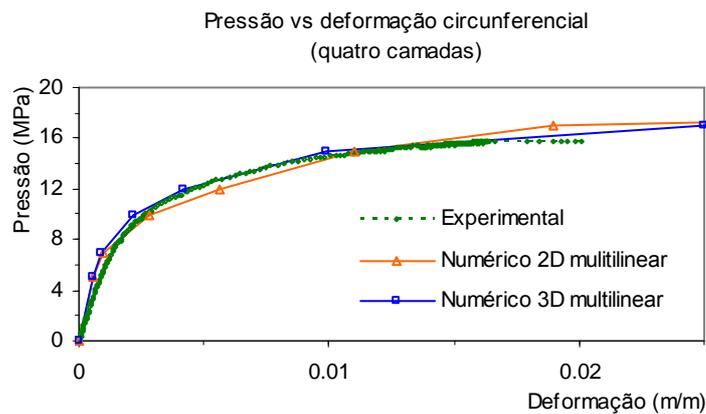


Figura 6.1 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de quatro camadas

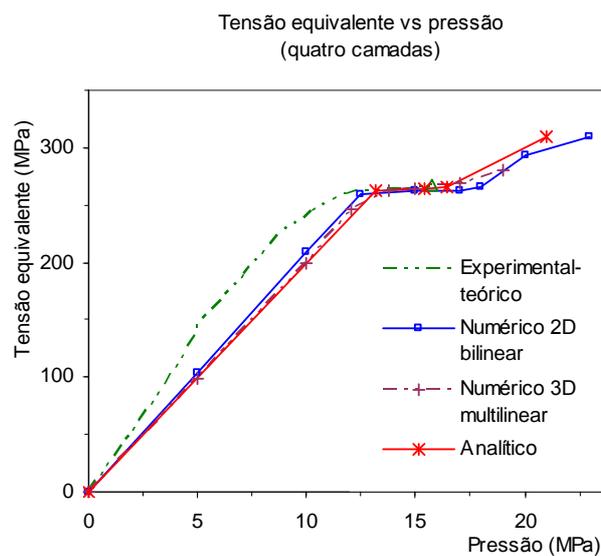


Figura 6.2 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de quatro camadas.

Tabela 6.1 Comparações de pressão no duto de quatro camadas

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica		Experimental
		2D bilinear	3D multilinear	
Pressão de escoamento	12.3	12.7	13.8	12.4
Pressão de ruptura no reparo.	21.7	22.8	--	--
Pressão de ruptura fora do reparo.	--	--	19	18.6

Na figura 6.1 se apresentam as deformações circunferenciais no defeito, onde os modelos numéricos multilíneares 2D e 3D conseguem representar os resultados experimentais, até aproximadamente 2% de deformação onde o extensômetro deixou de trabalhar.

Na figura 6.2 se pode ver a semelhança no comportamento dos modelos, coincidindo nos pontos importantes como a tensão de escoamento e ruptura. O ponto máximo que alcança a curva do modelo numérico 3D representa a tensão no defeito no momento que algum ponto fora do reparo atinge seu limite à ruptura e o programa deixa de admitir maiores pressões. Isto quer dizer que, a falha acontece fora do reparo como mostra o espécime tubular testado. No uso dos modelos 2D (analítico e numérico) o cálculo só é feito na região reparada.

Na tabela 6.1 se mostram as pressões que originam o escoamento e a ruptura no espécime.

- **Duto de Três Camadas no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os três parâmetros de comparação (i, ii, iii).



Pressão vs deformação circunferencial  
(três camadas)

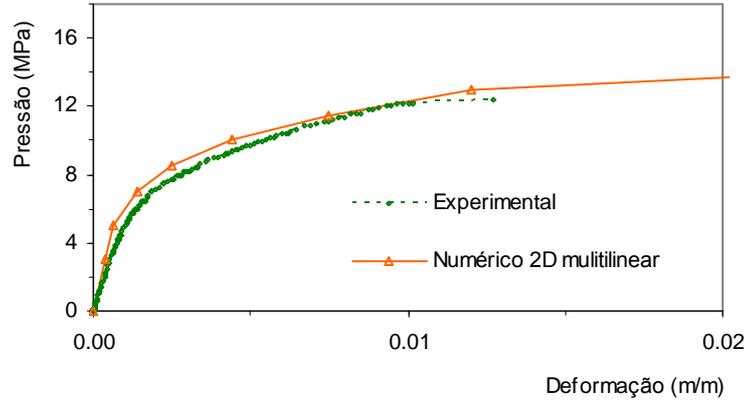


Figura 6.3 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de três camadas

Tensão equivalente vs pressão  
(três camadas)

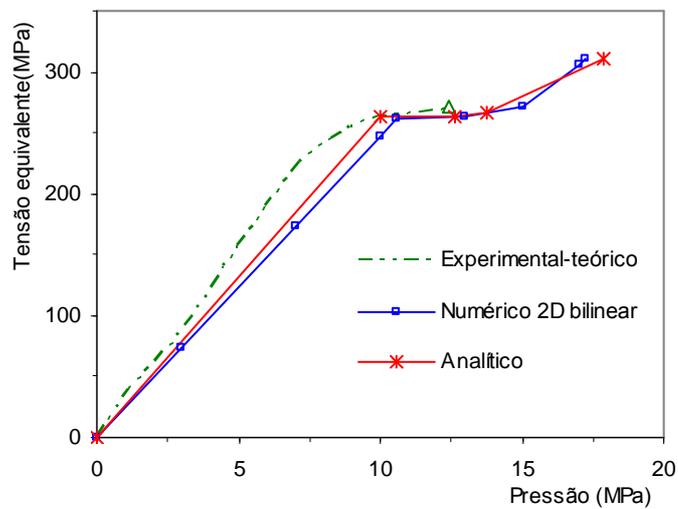


Figura 6.4 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de três camadas.

Tabela 6.2 Comparações de pressão no duto de três camadas.

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica	Experimental
Pressão de escoamento	10.1	10.6	11
Pressão de ruptura	17.9	17.2	18.3

- **Duto de Duas Camadas no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os parâmetros de comparação (ii) e (iii).

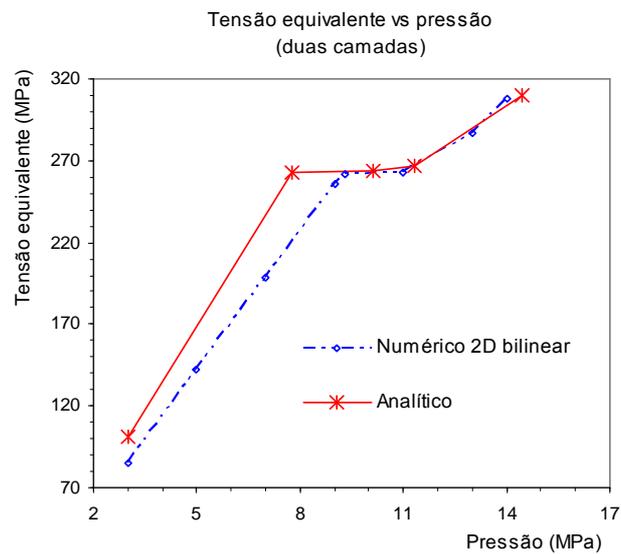


Figura 6.5 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de duas camadas

Tabela 6.3 Comparações de pressão no duto de duas camadas

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica	Experimental
Pressão de escoamento	7.78	9.3	8.4
Pressão de ruptura	14.4	14	13.2

- **Duto de Uma Camada no Reparo**

Faz-se a comparação analítica, experimental e numérica, utilizando os parâmetros de comparação (ii) e (iii).

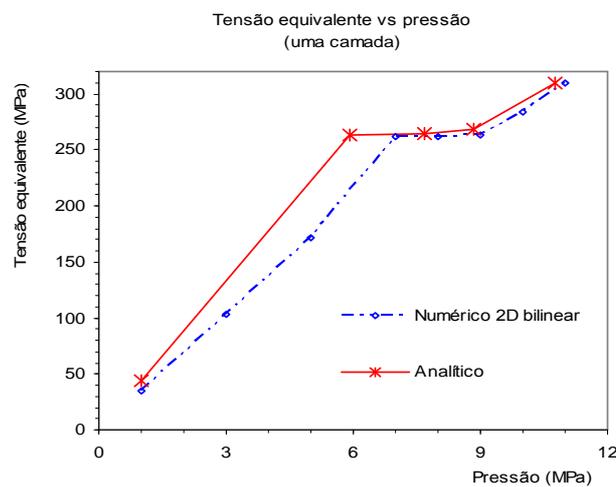


Figura 6.6 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de uma camadas

Tabela 6.4 Comparações de pressão no duto de uma camada

Pressão (MPa)	Modelagem Analítica	Modelagem Numérica	Experimental
Pressão de escoamento	5.9	7.26	6.3
Pressão de ruptura	10.7	10.6	8.7

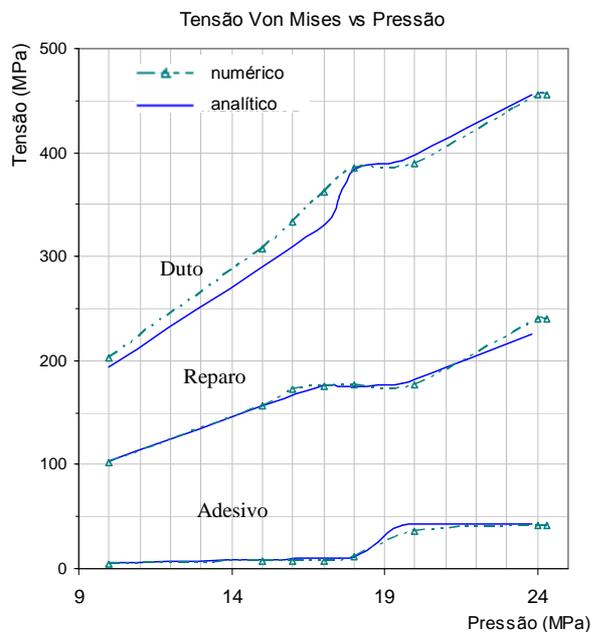
As comparações dos resultados das pressões de escoamento e ruptura são muito similares nos espécimes de quatro, três e duas camadas. Já no espécime de uma camada a diferença é considerável, sobretudo pelos resultados não conservativos dos modelos analítico e numérico. Esta diferença poderia ser atribuída a que o reparo de uma camada não limita suficientemente o abaulamento no defeito (acontecendo a estricção do material), o qual não é previsto pelos modelos analítico ou numérico. As comparações das tensões nos espécimes de duas e uma camada, não é muito boa na região elástica, sendo similares na região plástica.

## 6.2

### Comparações Adicionais dos Modelos Analítico e Numérico

Para avaliar a eficácia da modelagem analítica se faz comparações adicionais com modelos numéricos desenvolvidos no capítulo 3. Todos os resultados foram modelados utilizando propriedades bilineares do material e pequenos deslocamentos, além de ter quatro camadas no reparo, com espessura de camada metálica de 0.5mm e espessura de adesivo de 0.2mm (por camadas), como mostrado na figura 3.7

#### a. Modelo convencional



Características:

#### 1. Materiais

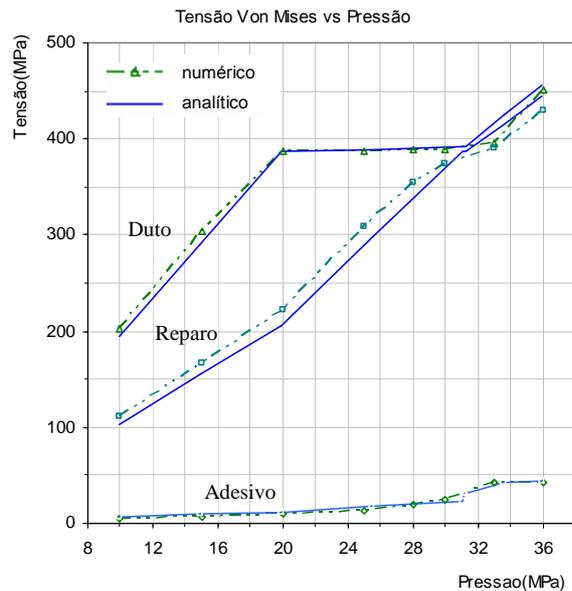
	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)
Duto	387	456	0.19	20
Camada metálica	175.8	279	0.088	36
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36

2. Raio = 38.1mm; Espessura = 2mm

3. Profundidade do defeito:  $h = 1,4 \text{ mm}$  ( $C = 0,3$ )

Figura 6.7 - Comparação numérica e analítica no modelo convencional

## b. Modelo com mesmo material do duto e do reparo



Características:

### 1. Materiais

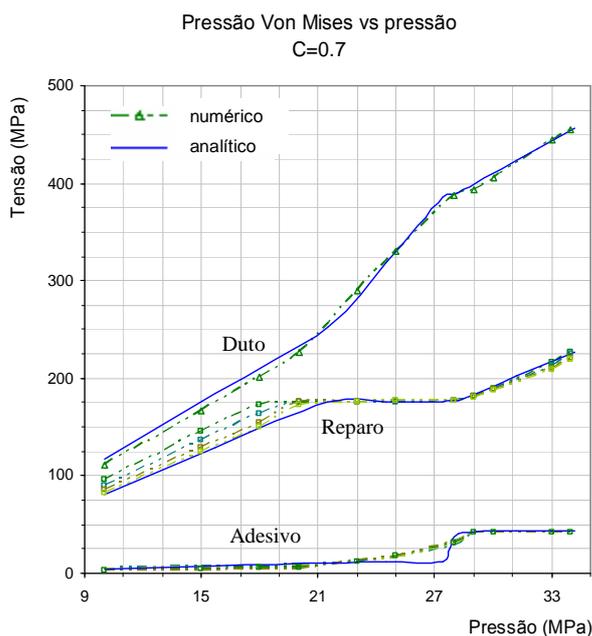
	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)
Duto	387	456	0.19	20
<b>Camada metálica</b>	<b>387</b>	<b>456</b>	<b>0.19</b>	<b>20</b>
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36

2. Raio = 38.1mm; Espessura = 2mm

3. Profundidade do defeito:  $h = 1,4 \text{ mm}$  ( $C = 0,3$ )

Figura 6.8 Comparação numérica e analítica no modelo com mesmo material no reparo.

## c. Modelo com diferente profundidade no defeito



Características:

### 1. Materiais

	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)
Duto	387	456	0.19	20
Camada metálica	175.8	279	0.088	36
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36

2. Raio = 38.1mm; Espessura = 2mm

3. **Profundidade do defeito:  $h = 0.6 \text{ mm}$**   
( $C = 0.7$ )

Figura 6.9 Comparação numérica e analítica no modelo com diferentes profundidades do defeito

### 6.3

#### Exemplo de Aplicação

Apresenta-se um exemplo de aplicação para o projeto de um reparo utilizando multicamadas metálicas coladas, mostrando como foi projetado o reparo do espécime DRC 008 (duas camadas de aço inoxidável no reparo).

Tem-se um duto que apresenta um defeito de perda de espessura. Este duto tem as seguintes características:

- Raio médio do duto: 37,1mm
- Espessura do duto: 2,04mm
- Profundidade do defeito: 1,4mm
- Limite de escoamento (a 0,5%): 262,6 MPa
- Limite à ruptura: 310 MPa
- Deformação máxima: 34%

Dispõe-se de uma chapa de aço inox 304 para ser utilizada no reparo, a qual tem as seguintes características:

- Espessura: 0,46mm
- Limite de escoamento: 318,2 MPa
- Limite de ruptura: 814 MPa
- Deformação máxima: 80%

(As propriedades mecânicas da chapa foram achadas através de ensaios de tração, cujos resultados são mostrados no Apêndice B)

Utiliza-se o adesivo formado pela mistura de Araldite AV 138 com o Endurecedor HV 998 com uma relação de 100/40 partes por peso como recomenda o fabricante, que tem limite de escoamento de 42,3 MPa e um módulo de elasticidade de 4700 MPa.

O pré-dimensionamento da espessura necessária na camada metálica é achado com a equação 4.13:

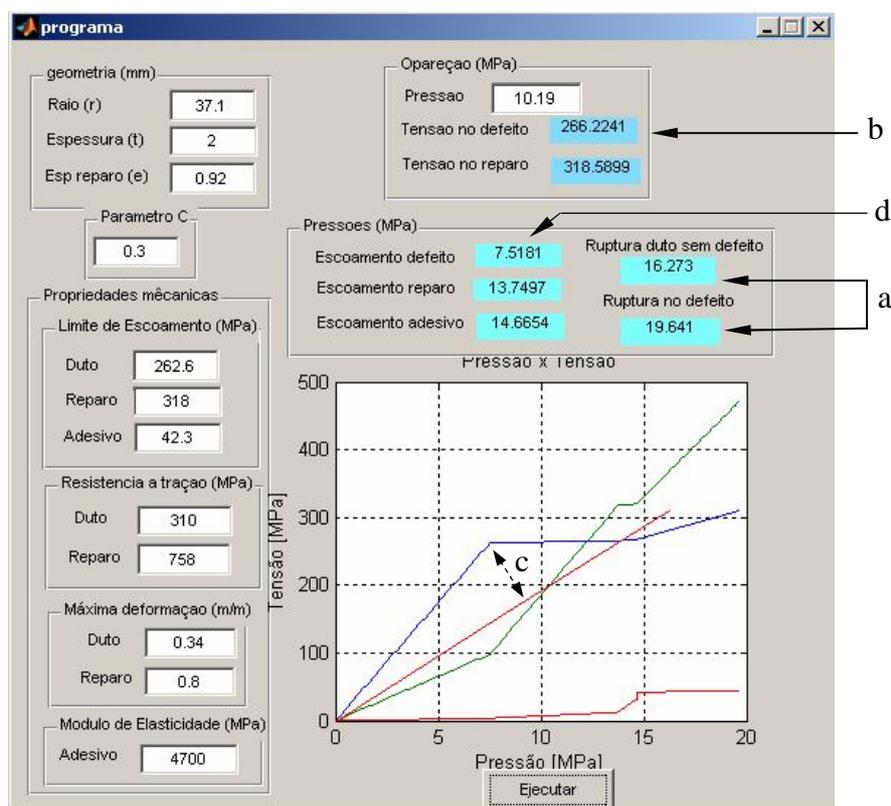
$$e_{aprox} = \frac{S_{ud} \cdot h}{S_{ur}} = \frac{310 \cdot (1,4)}{814} = 0,533 \text{ mm}$$

Dispõe-se de chapas de 0.46mm, então se testa com duas chapas no reparo (e=0.92mm)

Calculo do parâmetro C considerando defeito longo:

$$C = \left(1 - \frac{h}{t}\right) = \left(1 - \frac{1,4}{2}\right) = 0.3$$

Ingressam-se os dados ao modelo analítico para o cálculo das pressões, e assim projeta-se o reparo



\*Linhas: azul-duto reparado; vermelho-duto sem defeito; verde-reparo; laranja-adesivo

Figura 6.10 Resultados da modelagem matemática para o duto com reparo de aço inox 304

Pode-se ver que o uso de 2 camadas metálicas é suficiente para que a pressão de ruptura do duto reparado seja maior que a pressão de ruptura de um duto sem defeito, com um RSF - Fator de Resistência Remanescente igual a:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} = \frac{19.64}{16.27} = 1.21 > 0.9$$

onde, obtidos das janelas (a) da figura 6.10:

$L_{DC}$  : Carga limite ao colapso plástico do componente danificado.

$L_{UC}$  : Carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.

( $L_{DC}$  e  $L_{UC}$  indicados com a letra “a” na figura 6.10)

Segundo este critério de aceitação o reparo é aceitável, já que é maior do que 0.9.

Da norma B31.4 [7] a pressão máxima de operação para o duto sem defeito é (equação 2.4):

$$P_d = \frac{2.t.SMYS}{D} . F.E.T = \frac{2.(2).(262.6)}{74.2} . (0.72).(1).(1) = 10.19 MPa$$

A pressão na qual o defeito inicia o escoamento é de 7.51 MPa (indicado com a letra “d” na figura 6.10), o que indica que com uma pressão de operação de 10.19 MPa, o defeito reparado trabalha plasticamente. Com 10.19 MPa, o defeito reparado apresenta uma tensão aproximada de 266.22 MPa (“b” na figura 6.10), sendo o limite de escoamento do material igual a 262.6 MPa. Então, fica ao critério do projetista decidir aumentar o número de camadas ou só se basear no RSF para aceitar o reparo.

Na figura 6.10 a separação entre as linhas do comportamento do duto reparado (azul) e o duto novo sem reparo (vermelho), esta relacionada com a rigidez do reparo. Quer dizer, quanto maior for a separação “c”, maior será o trabalho do reparo na região plástica. Então, a maior rigidez do reparo, menor deverá ser a separação “c”.

No caso de se querer reduzir esta separação “c”, pode-se aumentar o número de camadas ou trocar o material do reparo. Escolhe-se a segunda opção e se trabalha com uma chapa de aço de baixo carbono, que tem um custo muito menor que a chapa anterior. Esta chapa apresenta as seguintes propriedades:

- Espessura: 0.46mm
- Limite de escoamento: 177.7 MPa

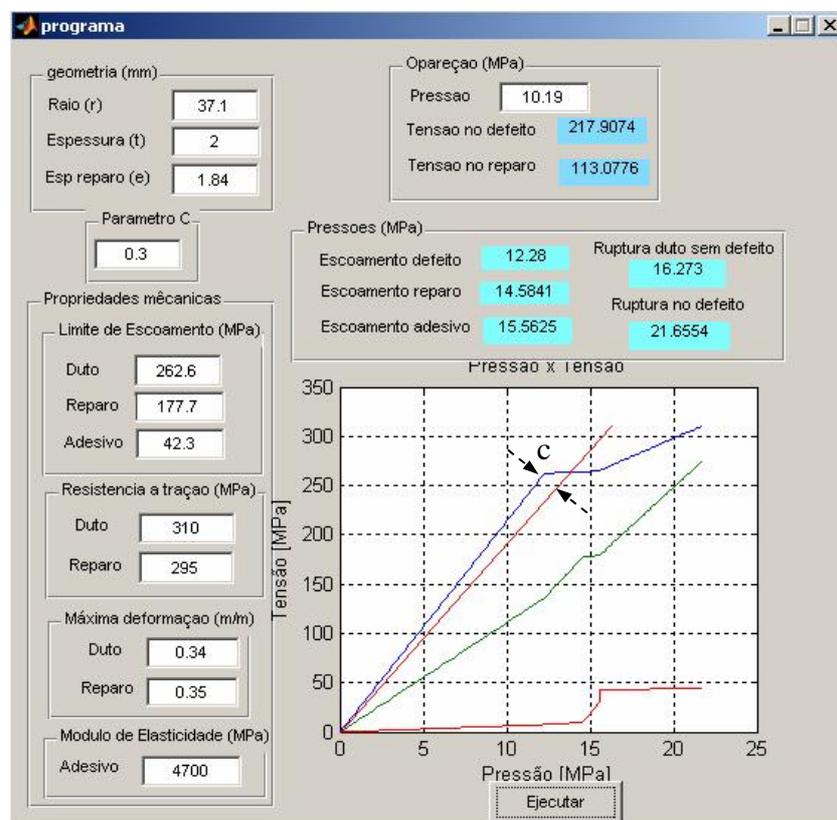
- Limite à ruptura: 295 MPa
- Deformação máxima: 35%

O pré-dimensionamento da espessura necessária na camada metálica é:

$$e_{aprox} = \frac{S_{ud} \cdot h}{S_{ur}} = \frac{310 \cdot (1.4)}{295} = 1.47 \text{ mm}$$

Então se precisa de  $1.47 / 0.46 = 3.2 \rightarrow 4$  camadas metálicas no reparo.

Ingressam-se os dados ao modelo analítico para o cálculo das pressões, e projeto do reparo.



\*Linhas: azul-duto reparado; vermelho-duto sem defeito; verde-reparo; laranja-adesivo

Figura 6.11 Resultados da modelagem analítica para o duto com reparo de aço de baixo carbono.

O Fator de Resistência Remanescente é  $RSF = \frac{22.66}{16.273} = 1.39$  ; e a pressão a

qual escoo o defeito reparado é de 12.28 MPa, maior que a pressão de operação do duto (10.19 MPa). Com 10.19MPa o defeito apresenta tensão de 217.09MPa, menor que seu limite de escoamento. A separação “c” (figura 6.11) é menor que

no reparo anterior. Considera-se que este reparo tem melhor qualidade, com rigidez maior.

A rigidez esta relacionada ao módulo de elasticidade do conjunto camada metálica-adesivo<sup>2</sup>. Considerando-se módulos de elasticidade iguais, uma rigidez maior pode-se obter trabalhando com camadas metálicas de menor  $S_y$  e  $S_u$ , já que se precisará de maior espessura de reparo para suportar as pressões de ruptura. Então, o projetista tem que fazer um balanço de custo, tempo e qualidade do reparo, considerando que ao utilizar um metal menos resistente nas camadas metálicas, vai ter que trabalhar com mais camadas, utilizar mais adesivo e precisar mais tempo para aplicar as camadas (mas se terá um reparo mas rígido). Outro parâmetro a ser otimizado pelo projetista é a espessura de cada chapa no reparo, segundo sua conveniência, para pré-curvar e aplicar as camadas no duto, já que a maior espessura de chapa, menos quantidade de adesivo é necessário, mas maior dificuldade para sua aplicação.

---

<sup>2</sup> Módulo de elasticidade ponderado, estudado no capítulo 4.