

4

Modelagem numérica

Neste capítulo são apresentados os parâmetros utilizados nos modelos numéricos, os quais são: condições de contorno, critérios de ruptura, tipo e ordem de malha. Foi usado o programa Ansys 14.5.

4.1. Descrição da modelagem numérica

Nesta seção é descrito o procedimento utilizado no programa.

Tipo de elemento

Todos os modelos rodados no programa foram 3D. Em todos eles foi utilizado o elemento Solid 187 (Figura 4.1). Este tipo de elemento tem deslocamento quadrático e é adequado para a modelagem de malhas irregulares.

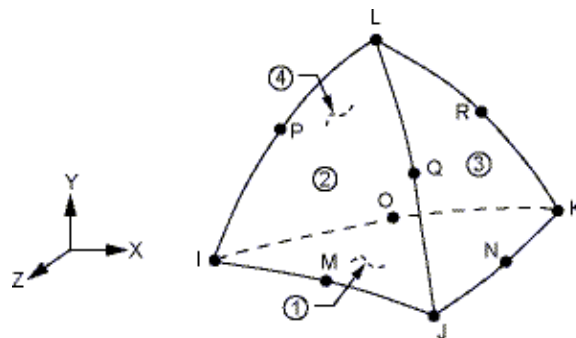


Figura 4.1 - Elemento Solid 187 3D [20].

O elemento é definido por 10 nós com três graus de liberdade em cada nó. O elemento permite trabalhar em condições de plasticidade, hiperelasticidade, fluência, grandes deslocamentos e deformações.

Material

Os dutos simulados foram feitos de aço API 5L Grau B. Embora todos os tubos e componentes sejam do mesmo tipo de aço, propriedades diferentes foram encontradas para alguns componentes, gerando diferentes propriedades mecânicas

nas curvas tensão - deformação. Assim foram determinadas, analiticamente, quatro curvas tensão - deformação: a primeira para os espécimes tipo Tê e os tubos da Redução, a segunda para os espécimes curvados a frio, a terceira para os espécimes curvados a quente e uma última ajustada a partir da primeira curva tensão - deformação utilizada na simulação da redução concêntrica para corresponder ao material da redução cônica. No capítulo 3 apresentam-se as equações utilizadas para a determinação destas curvas.

A Tabela 4.1 apresenta o resumo das propriedades dos tubos de aço (API 5L Grau B) utilizados no programa. No apêndice C são encontradas tabelas com todos os pontos de deformações e tensões reais usados para cada tipo de material simulado nas soluções por elementos finitos.

Material	SMYS* (MPa)	SMUS* (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	E* (GPa)
Aço API 5L Grau B— tubo com diâmetro 12,75in (Re - Tê)	242	413	245** Ensaio tubo, Figura 3.2	426** Ensaio Tubo, Figura 3.2	200
Aço API 5L Grau B – tubo com diâmetro 10,75in (Re - Tê)	242	413	245*** similar a tubo com diâmetro 12,75in	426*** similar a tubo com diâmetro 12,75in	200
Conexão entre tubos	-	-	328***, Figura 3.6	510***, Figura 3.6	200
Aço API 5L Grau B— tubo com diâmetro 12,75in (CQ)	-	-	411** Ensaio tubo, Figura 3.3	616** Ensaio Tubo, Figura 3.3	200
Aço API 5L Grau B— tubo com diâmetro 12,75in (CF)	-	-	333** Ensaio tubo, Figura 3.4	485** Ensaio Tubo, Figura 3.4	200
E: Módulo de Elasticidade					
* propriedade nominal					
** propriedade medida					
*** propriedade estimada					

Tabela 4.1 - Propriedades dos tubos de aço API 5L Grau B.

A Figura 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados em corpos de prova fabricados a partir de dois materiais compósitos usados nesta tese.

Um deles foi confeccionado a partir de 4 tecidos de resina epóxi reforçada por fibra de carbono (ERFC), o outro material compósito foi confeccionado de 7 tecidos de resina epóxi reforçada por fibra de vidro (ERFV). Os ensaios foram feitos seguindo as recomendações da norma ASTM D 3039-02. A velocidade de deslocamento do travessão foi de 1mm/min. A deformação foi medida com um extensômetro elétrico (clip - gage), que foi mantido fixo no corpo de prova até o fim do ensaio. Os dados obtidos foram gravados em planilhas Excel. O módulo de elasticidade foi calculado a partir das planilhas, escolhendo-se manualmente um trecho linear do gráfico tensão - deformação.

A Figura 4.2 apresenta duas curvas para o compósito ERFC. A curva A apresenta resultados de deformação deslocados devido a um escorregamento do clipe gage. A curva B apresenta os resultados previstos caso não tivesse escorregado o clipe gage, isto é realizado extrapolando os valores de deformação, para a posição onde os dados sofreram uma mudança abrupta de deformação (ERFC - B).

Foram encontrados valores de módulo de elasticidade de 41,8 GPa para a ERFC e 14,2 GPa para a ERFV.

A Tabela 4.2 apresenta o resumo das propriedades utilizadas na simulação das mantas de ERFC e ERFV.

O módulo de elasticidade do compósito ERFV calculada a partir da Figura 4.2 apresentou um desvio de 50% comparada com os resultados para o mesmo compósito, apresentado na Tabela 4.2. Os valores obtidos na Tabela 4.2 para o compósito ERFV foram calculados a partir de varias medições em testes experimentais usando a técnica DIC (Correlação Digital de Imagem) e mediante carregamentos de tração utilizando EREs colados nos espécimes [23], enquanto o resultado da Figura 4.2 foi determinado a partir de um único ensaio. Por isto foram considerados mais confiáveis os valores de módulo de elasticidade apresentados na Tabela 4.2.

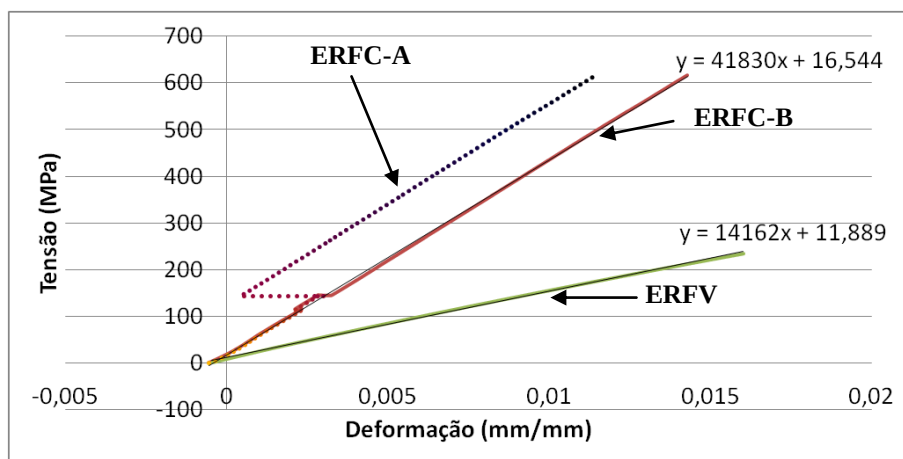


Figura 4.2 - Curva tensão - deformação das mantas de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e por fibra de carbono (ERFV, ERFC).

Material	E (Gpa)	Ec (Gpa) [23]	El (Gpa) [23]	Gcl (Gpa) [23]	μ_{cl} [23]	ϵ_u (%)	Su (MPa)
Resina epóxi reforçada por fibra de vidro (instalada pelo fornecedor)	-	9,4**	9,1**	2,9**	0,18**	1,6**	233**
Resina epóxi reforçada por fibra de carbono (instalada pelo fornecedor)	-	40**	40**	30***	0,35**	1,4**	600**
Resina epóxi de preenchimento do defeito	1,7*** [4]	-	-	-	0,4*** [4]	-	-
E: Módulo de Elasticidade; c: direção circunferencial; l: direção longitudinal; G: módulo de cisalhamento;							
μ : coeficiente de Poisson							
* propriedade nominal							
** propriedade medida							
*** propriedade atribuída a partir de testes realizados em outros materiais							

Tabela 4.2 - Propriedades das mantas de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e carbono.

Modelagem

Na modelagem de cada espécime são considerados três tipos de componentes: um duto, uma resina epóxi para preencher o defeito e uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de carbono ou fibra vidro (ERFC ou ERFV). Considera-se a hipótese de que não existe deslizamento entre os componentes.

Estes componentes são colados e simulados como um único corpo de diferentes propriedades.

O material metálico (aço) foi simulado como isotrópico e multilinear, os dados utilizados no modelo são encontrados no apêndice C. O material compósito foi simulado como lineal e ortotrópico e suas propriedades são apresentados na Tabela 4.2. A resina epóxi de preenchimento foi simulada como lineal isotrópico com tensão de escoamento $SMYS = 33 \text{ MPa}$ e módulo tangente $E_t = 870 \text{ MPa}$.

Foi realizada uma análise de sensibilidade de malha para cada componente simulado variando o tamanho dos elementos. Assim para os tubos foram realizados refinamento de malhas até obter resultados satisfatórios de tensões circunferenciais e de von Mises quando comparados com equações analíticas. Para as regiões dos defeitos foram realizados refinamentos de malha até obter valores satisfatórios na comparação das deformações circunferenciais na região central dos defeitos quando comparados com resultados experimentais nos espécimes sem reparo.

Na modelagem do defeito não é considerada com exatidão a geometria que leva à concentração de tensões devido aos raios de arredondamento realmente existentes entre as regiões com defeitos e sem defeitos, já que elas não têm relevância em uma análise de colapso plástico na região do defeito [21], ver apêndice E.

A pressão foi aplicada em incrementos com passos variando de 25 até 10^6 sub - passos, isto se traduz em termos de incrementos de pressão (ΔP), na região elasto - plástica e principalmente na região próxima à ruptura, em passos de pressão de até $\Delta P = P_{ruptura}/10^6$.

Para os espécimes simulados até a ruptura são considerados 3 critérios de ruptura: no aço é utilizado o critério de von Mises, nas mantas de resina epóxi reforçada (ERFC ou ERFV) o critério de Máxima Tensão ou critério de Máxima Deformação para o primeiro elemento (capítulo 2). Durante as simulações foram observadas as tensões e deformações principais a fim de determinar o critério que levaria o compósito à ruptura.

Para o aço, além do critério de von Mises utilizado para toda a solução, também foi utilizado o critério de não convergência numérica para definir a ruptura do material metálico. Por este motivo foram aplicados incrementos ΔP pequenos quando a solução numérica se aproximou da pressão de ruptura.

Para cada espécime foram feitas duas simulações, a primeira com uma pressão interna que atingisse uma tensão igual ao limite de escoamento nominal do duto. Caso esta simulação fosse satisfatória, no que se refere às comparações com as equações analíticas e os resultados fornecidos pelas rosetas e pelas pressões dos testes de pressão hidrostáticos, seria feito um segundo modelo com pressões que levassem à ruptura do espécime. O segundo modelo foi realizado devido a que os espécimes apresentavam diferentes espessuras remanescentes.

Todas as geometrias foram realizadas no Design Modeler (ANSYS) com as medidas obtidas a partir do levantamento dimensional descrito no apêndice A.

A Tabela 4.3 apresenta o resumo dos espécimes simulados, todos com defeitos superficiais tipo perda de espessura externa.

Espécimes		Tipo de reparo	TPH
Re	1	ERFC	Ruptura
	2, 6	ERFC	SMYS
	3	ERFV	Ruptura
	4, 5	ERFV	SMYS
	7	Sem reparo	Ruptura
CQ	1, 4	ERFC	SMYS
	2	ERFC	Ruptura
	3	ERFV	Ruptura
	5, 6	ERFV	SMYS
	7	Sem reparo	Ruptura
CF	1, 2	ERFC	SMYS
	3, 6	ERFV	SMYS
	4	ERFC	Ruptura
	5	Sem reparo	Ruptura
	7	ERFV	Ruptura
Tê	1, 3	ERFV	SMYS
	2	ERFC	Ruptura
	4	Sem reparo	Ruptura
	5,6	ERFC	SMYS
	7	ERFV	Ruptura

Tabela 4.3 - Resumo dos espécimes simulados. Dutos em redução concêntrica (Re), curvados a quente (CQ), curvados a frio (CF) e tipo Tê, com reparos constituídos de mantas de resina epóxi reforçados por fibra de vidro e fibra de carbono (ERFV - ERFC).

4.2.

Dutos com redução concêntrica

A Figura 4.3 apresenta a malha de elementos finitos adotada (ordem de 90 mil nós e 50 mil elementos) bem como as condições de contorno do modelo, simetria na seção verde em relação ao eixo X. O material compósito foi simulado adotando as coordenadas da Figura 4.3 com o eixo Y na direção circunferencial.

Os espécimes tubulares foram simulados com uma espessura de 9,7 mm no tubo de 325 mm (12,75 in) de diâmetro externo e 9,4 mm no tubo de 274 mm (10,75 in) de diâmetro externo.

Para os reparos, as espessuras foram de 28 mm para o compósito ERFV e 11 mm para o compósito EFRFC. Os espécimes foram simulados com defeitos tipo perda metálica no centro da conexão. Todos os espécimes simulados até a ruptura apresentaram diferentes espessuras remanescentes, assim:

- O espécime Re3 com espessura remanescente de 4 mm.
- O espécime Re7 com espessura remanescente de 4,12 mm.
- O espécime Re1 com espessura remanescente de 3 mm.

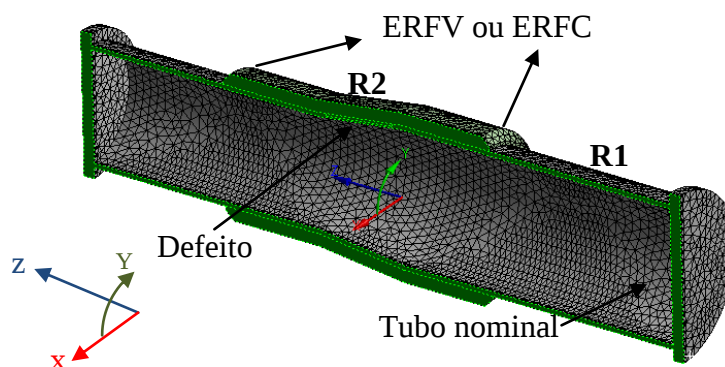


Figura 4.3 - Condições de contorno Re, simetria na seção verde em relação ao eixo X.

A Figura 4.4 apresenta valores para as tensões circunferenciais (compósito) e de von Mises (aço) calculadas pelo método de elementos finitos para três partes localizadas no espécime Re3 que teve sua região com defeito reforçada pelo compósito constituído de epóxi e fibra de vidro.

Os pontos se localizam na:

- Posição A: sobre a superfície externa do tubo de 12,75 in; nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.

- Posição B: sobre a superfície interna do reparo na conexão; nesta posição foi avaliada a tensão circunferencial.

- Posição C: sobre a superfície externa do defeito; nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.

Verifica-se na posição C que, sob uma pressão de 100 bar (Figura 4.4 - A*), a variação da tensão de von Mises é reduzida pelo efeito do reparo.

Quando o espécime atinge uma pressão de 267 bar a tensão de von Mises na posição A atinge o limite de resistência pelo critério de não convergência numérica (Figura 4.5), enquanto a tensão circunferencial na posição B é de 110 MPa e a tensão de von Mises na posição C é de 270 MPa, sendo estes valores inferiores aos seus limites de resistência.

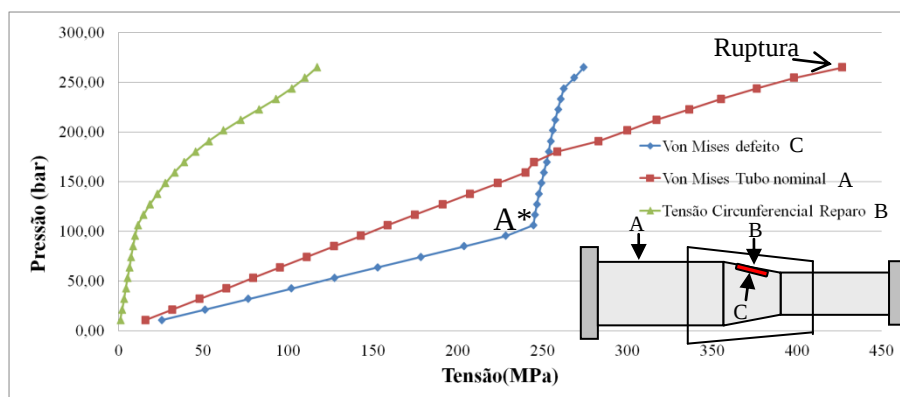


Figura 4.4 - Tensão circunferencial na posição B e tensões de von Mises nas posições A e C para o espécime Re3.

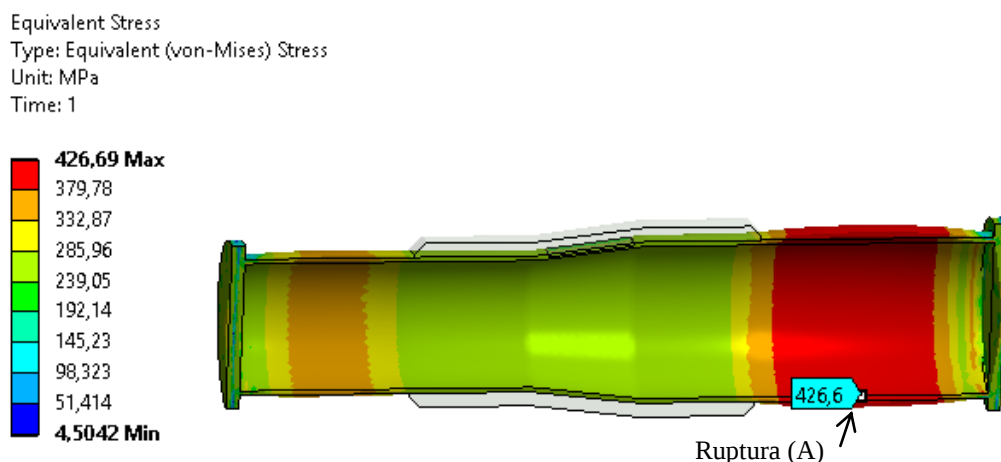


Figura 4.5 - Tensão de von Mises para o espécime Re3, a ruptura acontece a 267 bar e tensão de von Mises de 426 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 1 usado).

A Figura 4.6 apresenta valores para as tensões circunferenciais (compósito) e de von Mises (aço) calculadas pelo método de elementos finitos para três partes localizadas no espécime Re1 que teve sua região com defeito reforçado pelo compósito constituído de epóxi e fibra de carbono.

Os pontos se localizam na:

- Posição A: sobre a superfície externa do tubo de 12,75 in, nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.
- Posição B: sobre a superfície interna do reparo na conexão; nesta posição foi avaliada a tensão circunferencial.
- Posição C: sobre a superfície externa do defeito; nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.

Verifica-se na posição C que, sob uma pressão de 100 bar (Figura 4.6-A*), a variação da tensão de von Mises é reduzida pelo efeito do reparo.

Quando o espécime alcança uma pressão de 274 bar a tensão de von Mises na posição A atinge o limite de resistência pelo critério de não convergência numérica (Figura 4.7), enquanto a tensão circunferencial na posição B foi de 295 MPa e a tensão de von Mises na posição C foi de 255 MPa, sendo estes valores inferiores aos seus limites de resistência.

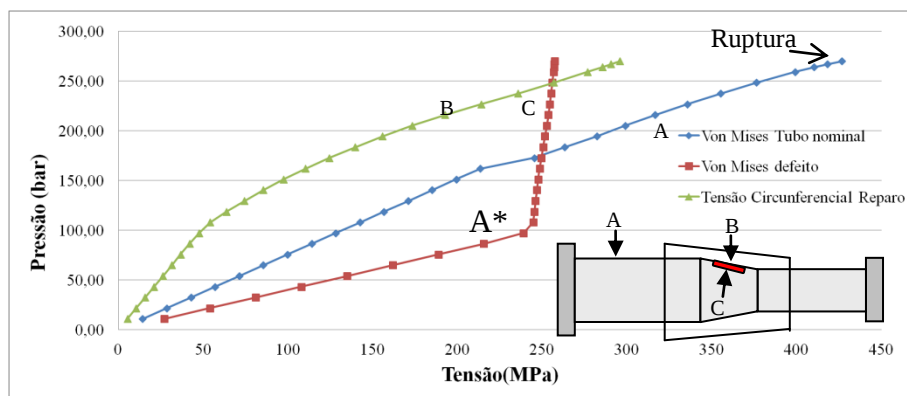


Figura 4.6 - Tensão circunferencial na posição B e tensões de von Mises nas posições A e C para o espécime Re1.

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1

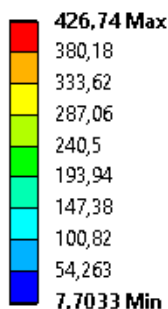


Figura 4.7 - Tensão de von Mises para o espécime Re1, a ruptura acontece a 274 bar e tensão de von Mises de 426 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 1 usado).

O espécime Re7 sem reparo foi simulado com dois tipos de materiais, os dois tubos com as propriedades do MAT 1 (Figura 3.2) e a conexão com as propriedades do material MAT 4 (Figura 3.6).

Este espécime foi simulado com defeito e sem reparo, tal como foi realmente ensaiado.

A Figura 4.8 apresenta valores para a tensão de von Mises calculadas pelo método de elementos finitos no espécime Re7 que teve sua região com defeito sem reparo.

Quando o espécime alcança uma pressão de 205 bar a tensão de von Mises na posição C atinge o limite de ruptura pelo critério de não convergência numérica

(Figura 4.9), enquanto a tensão de von Mises na posição A foi de 300 MPa, sendo este valor inferior ao seu limite de resistência (426 MPa).

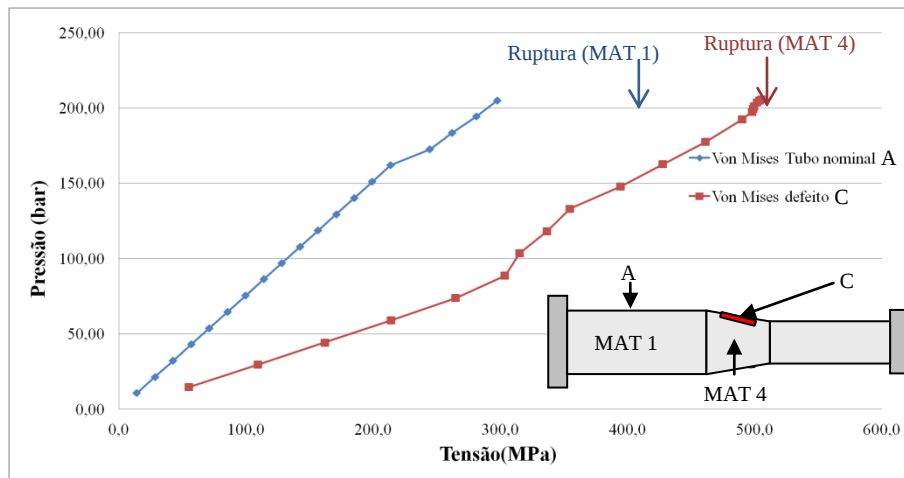


Figura 4.8 - Tensão de von Mises na posição A e B para o espécime Re7.

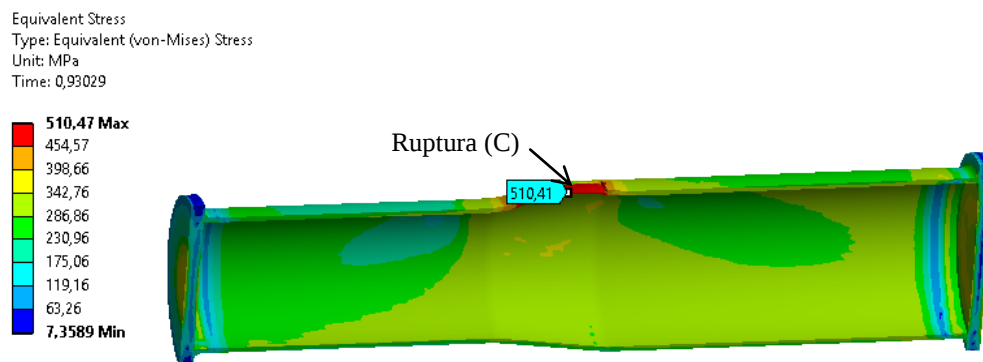


Figura 4.9 - Tensão de von Mises para o espécime Re7 a ruptura acontece a 205 bar e tensão de von Mises de 510 (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 4 usado).

4.3. Dutos tipo Tê

A Figura 4.10 apresenta a malha de elementos finitos adotada (ordem de 300 mil nós e 170 mil elementos) bem como as condições de contorno do modelo (simetria na seção verde em relação ao eixo X).

Os espécimes tubulares foram simulados com uma espessura de 9,6 mm no tubo 1 (ver Figura 4.10) e 9,3 mm de espessura no tubo 2 (ver Figura 4.10).

Para os reparos, as espessuras foram de 45 mm para o compósito ERFV e 18mm para o compósito EFRFC. Os espécimes foram simulados com defeitos tipo perda metálica na seção de união dos tubos 1 e 2 (ver Figura 4.10). Todos os espécimes simulados até a ruptura apresentaram diferentes espessuras remanescentes, assim:

- O espécime Tê2 com espessura remanescente de 3 mm no tubo 1 e 2,5 mm no tubo 2 (Figura 4.10).
- O espécime Tê7 com espessura remanescente de 2,9 mm no tubo 1 e 2,6 mm no tubo 2 (Figura 4.10).
- O espécime Tê4 com espessura remanescente de 3 mm no tubo 1 e 2,5 mm no tubo 2 (Figura 4.10).

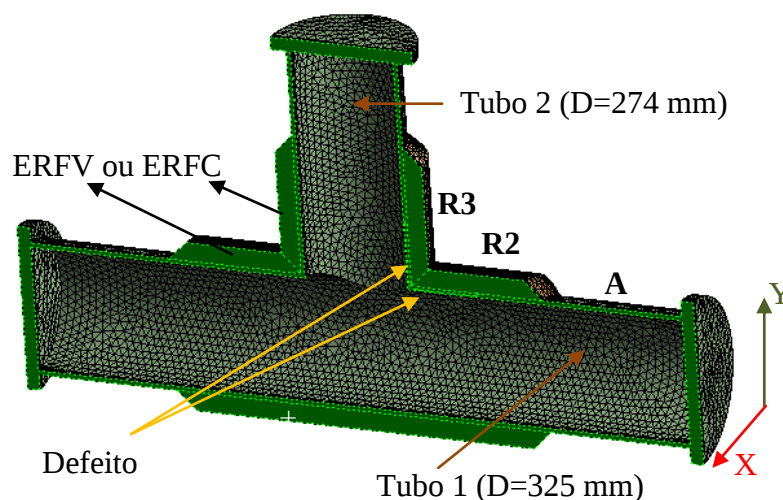


Figura 4.10 - Condições de contorno Te, com simetria na seção verde em relação ao eixo X.

Para cada espécime foram simulados 4 corpos. Os tubos foram simulados como um único corpo, o defeito foi simulado com as propriedades da resina epóxi de enchimento e o reparo foi dividido em duas seções: uma em torno da perna vertical (D= 274 mm) e outra em torno da perna horizontal (D= 325 mm), isto devido ao fato de não ser possível diferenciar a direção longitudinal e a circunferencial no material compósito.

A Figura 4.11 apresenta as coordenadas utilizadas na simulação de cada compósito. O reparo foi dividido em duas seções como segue:

- Compósito 1:simulado com o eixo de coordenadas 1.

- Compósito 2: simulado com o eixo de coordenadas 2.

Para as duas seções do reparo (compósito 1 e compósito 2) os eixos Z coincidiram com a direção longitudinal, os eixos Y com a direção circunferencial e os eixos X com a direção radial.

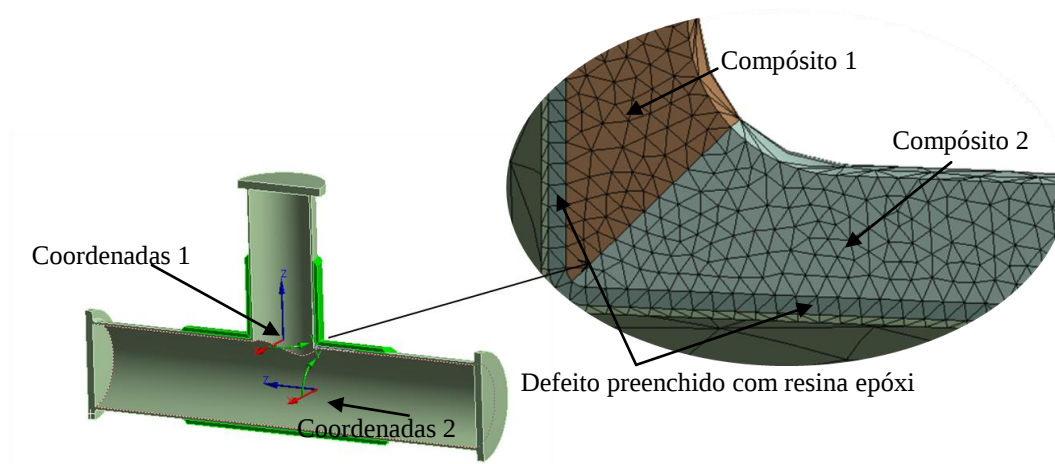


Figura 4.11 - Coordenadas utilizadas na simulação de cada reparo.

A Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresentam os valores para as deformações circunferenciais e tensões circunferenciais calculadas pelo método de elementos finitos para duas localizações no espécime Tê2 que teve sua região com defeito reforçado pelo compósito constituído de epóxi e fibra de carbono.

Os pontos se localizam na:

- Posição B: sobre a superfície interna do compósito 1 (Figura 4.11).
- Posição C: sobre a superfície interna do compósito 2 (Figura 4.11).

Quando o espécime alcança uma pressão de 237 bar a deformação circunferencial na posição C atinge seu limite de deformação, que é igual a 1,4% (Figura 4.12), enquanto a tensão circunferencial na posições B foi de 522 MPa e a tensão circunferencial na posição C foi de 545 Mpa (Figura 4.13), valores inferiores a seus limites de resistência.

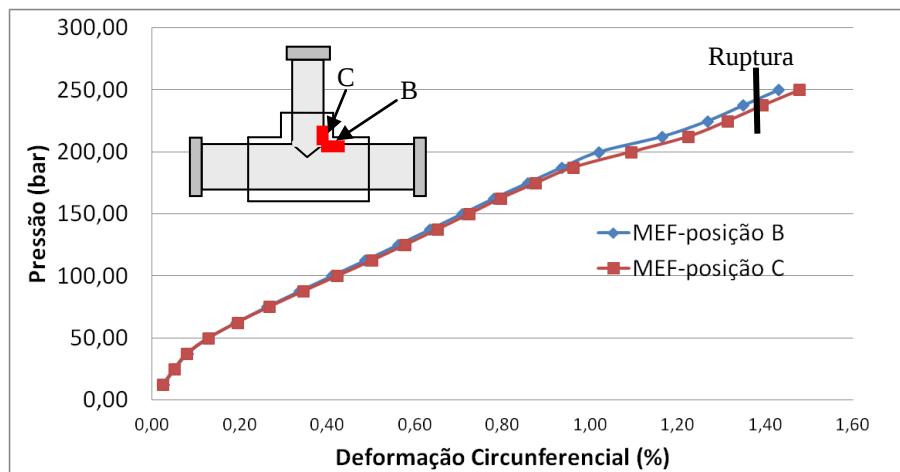


Figura 4.12 - Deformação circunferencial nas posições B e C para o espécime Tê2.

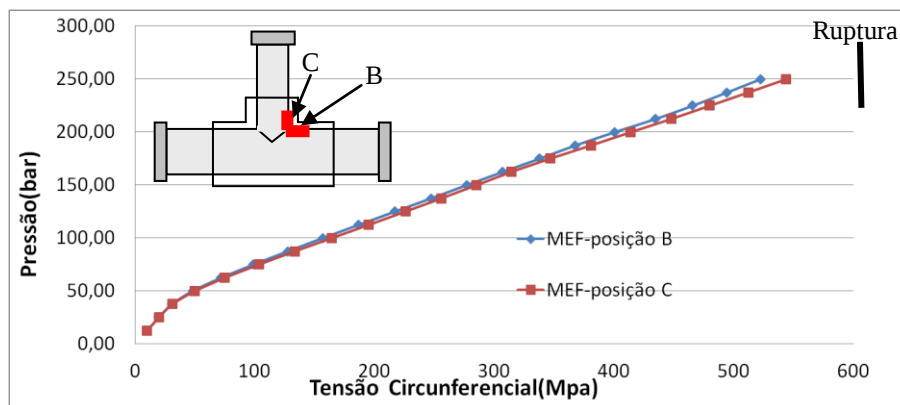


Figura 4.13 - Tensão circunferencial nas posições B e C, para o espécime Tê2.

A Figura 4.14 apresentada os valores de deformação circunferencial nas posições B e C para uma pressão de 237 bar, com valores máximos na posição C onde acontece a ruptura.

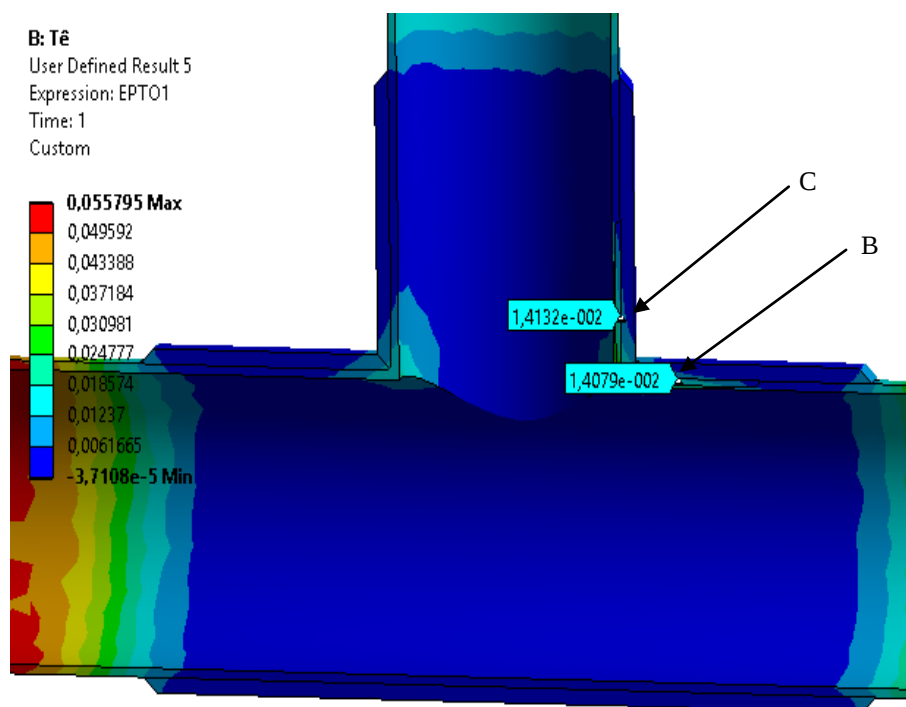


Figura 4.14 - Deformação circunferencial para o espécime Tê2 a ruptura acontece a 237 bar e deformação de 1,4% (correspondente ao limite de ruptura do compósito ERFC usado).

A Figura 4.15 apresenta valores para as tensões de von Mises calculadas pelo método de elementos finitos aplicado ao espécime Tê2. Na figura são destacadas três posições:

- Posição A: sobre a superfície externa do tubo 1 (D=325 mm).
- Posição D: sobre a superfície externa do defeito no tubo 1 (D=325 mm).
- Posição E: sobre a superfície externa do defeito no tubo 2 (D=274 mm).

Para uma pressão de 237 bar a tensão de von Mises na posição A foi de 381 MPa, a tensão de von Mises na posição D foi de 289 MPa e a tensão de von Mises para a posição E foi de 293 MPa, valores inferiores ao limite de resistência (426 MPa) do tubo de material MAT 1.

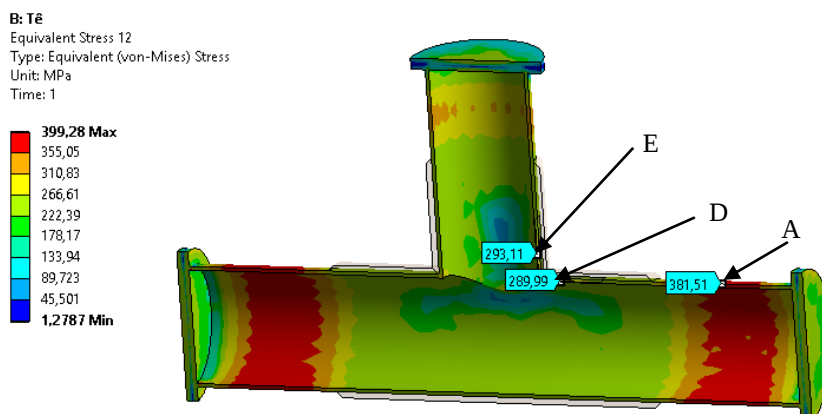


Figura 4.15 - Tensão de von Mises para o espécime Tê2 simulado sob uma pressão de 237bar.

A Figura 4.16 e a Figura 4.17 apresentam os valores para as deformações circunferenciais e tensões circunferenciais calculadas pelo método de elementos finitos para duas localizações no espécime Tê7 que teve sua região com defeito reforçado pelo compósito constituído de epóxi e fibra de vidro.

Os pontos se localizam na:

- Posição B: sobre a superfície interna do compósito 1 (Figura 4.11).
- Posição C: sobre a superfície interna do compósito 2 (Figura 4.11).

Quando o espécime alcança uma pressão de 236 bar a deformação circunferencial na posição C atinge seu limite de deformação, que é igual a 1,6% (Figura 4.16), enquanto a tensão circunferencial na posição B foi de 155 e a tensão circunferencial na posição C foi de 162 MPa (Figura 4.17), valores inferiores aos seus limites de resistência (233 MPa). O resultado de deformação de ruptura 1,6 % não corresponde à tensão de ruptura $S_u = 233$ MPa devido a que o módulo de elasticidade usado na simulação foi determinado a partir de ensaios DIC enquanto os valores de ruptura foram determinados a partir de um teste de tração (ver seção 4.1).

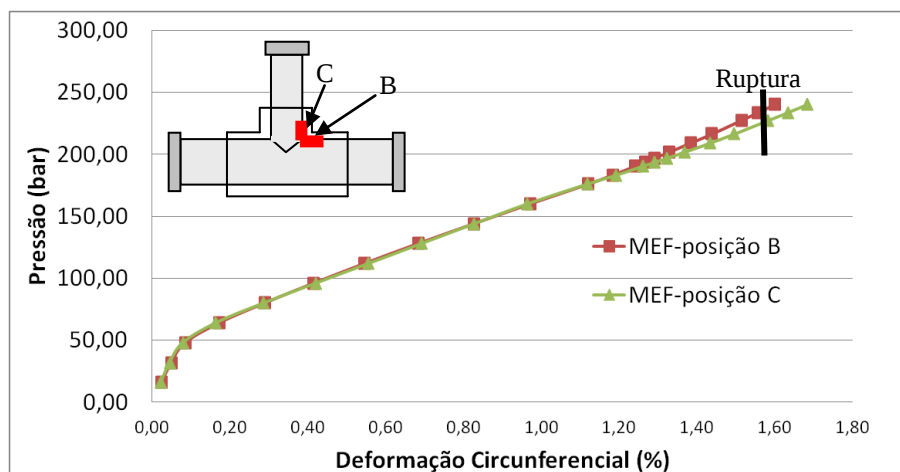


Figura 4.16 - Deformação circunferencial nas posições B e C para o espécime Tê7.

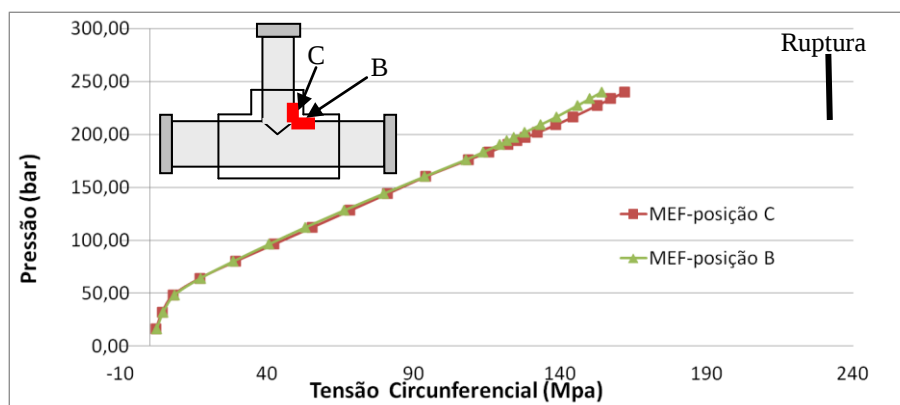


Figura 4.17 - Tensão circunferencial nas posições B e C, para o espécime Tê2.

A Figura 4.18 apresenta valores para as tensões de von Mises calculadas pelo método de elementos finitos do espécime Tê7, na figura são destacadas três posições:

- Posição A: sobre a superfície externa do tubo 1 (D=325 mm).
- Posição D: sobre a superfície externa do defeito no tubo 1 (D=325 mm).
- Posição E: sobre a superfície externa do defeito no tubo 2 (D=274 mm).

Para uma pressão de 240 bar a tensão de von Mises na posição A foi de 380 MPa, a tensão de von Mises na posição D foi de 352 MPa, e a tensão de von Mises para a posição E foi de 360 MPa, valores inferiores aos seus limites de resistência (426 MPa) do tubo de material MAT 1.

B: Tê7
 Equivalent Stress 12
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress

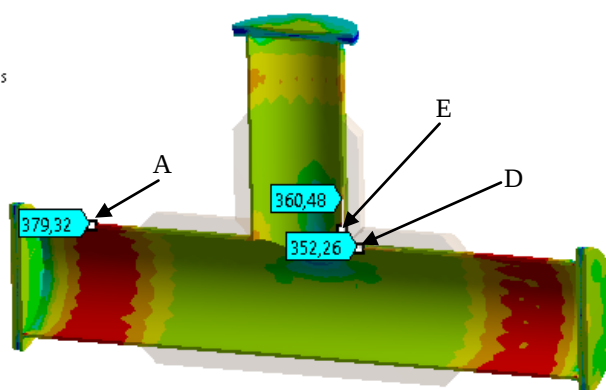
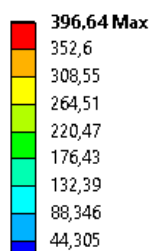


Figura 4.18 - Tensão de von Mises para o espécime Tê7 simulado sob uma pressão de 240 bar.

O espécime Tê4 foi simulado com defeito e sem reparo, tal como foi realmente ensaiado (Figura 4.19).

A Figura 4.19 apresenta valores para a tensão de von Mises calculadas pelo método de elementos finitos no espécime Tê4 que teve sua região com defeito sem reparo.

Quando o espécime alcança uma pressão de 97,5 bar a tensão de von Mises no defeito atinge o limite de resistência quase ao mesmo tempo nas posições D e E.

Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1

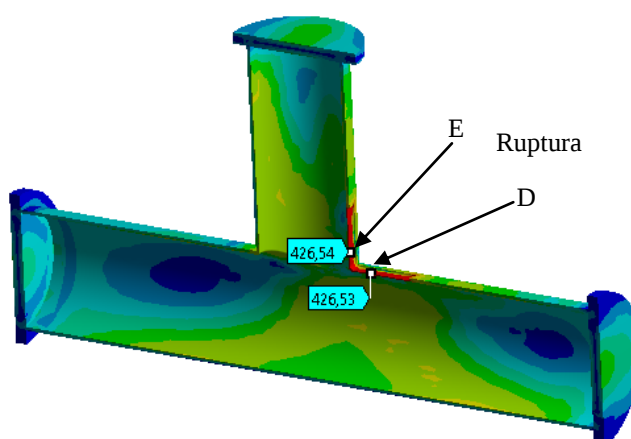
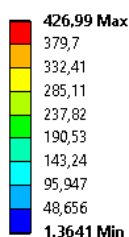


Figura 4.19 - Tensão de von Mises para o espécime Tê4, a ruptura acontece a 97,5 bar e tensão de von Mises de 426 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 1 usado).

4.4. Dutos curvados a frio

A Figura 4.20 apresenta a malha de elementos finitos adotada (ordem de 50 mil nós e 30 mil elementos) e as condições de contorno do modelo, simetria na seção verde (indicada por A) em relação ao eixo X e simetria na seção roxa (indicado por B) em relação ao eixo Z.

Os espécimes tubulares foram simulados com uma espessura de 9,5 mm e diâmetro externo de 322 mm.

Para os reparos, as espessuras foram de 18 mm para o compósito ERFV e 11 mm para o compósito EFRF. Os espécimes foram simulados com defeitos tipo perda metálica.

Os espécimes simulados até a ruptura apresentaram as seguintes espessuras remanescentes:

- O espécime CF7 com uma espessura remanescente de 2,1 mm.
- Os espécimes CF4 e CF5 com espessuras remanescentes de 2,5 mm.

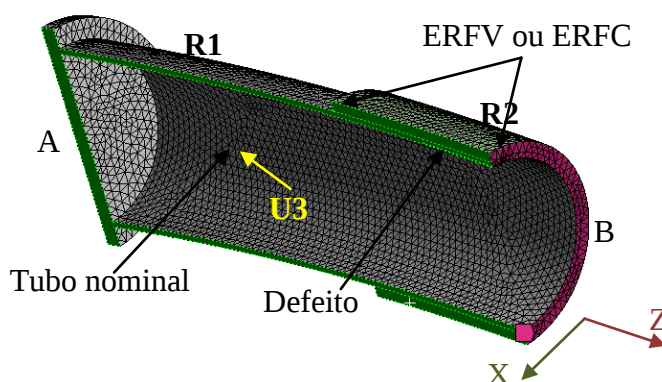


Figura 4.20 - Condições de contorno CF, simetria na seção verde em relação ao eixo X e simetria na seção roxa em relação ao eixo Z.

Os resultados experimentais mostraram que os espécimes apresentavam diferentes graus de ovalização, como será mostrado no Capítulo 6.

Em um duto com ovalização e diante a aplicação de pressão interna, a seção localizada no raio externo a zero grau (Figura 4.21) é submetida à flexão que induz tensões compressivas, uma vez que o duto tenta retornar ao seu formato original. Assim, foi necessário simular modelos de tubos com diferentes

ovalizações. As ovalizações foram definidas pelos valores de h onde h é o deslocamento sofrido nas posições de 90 e 0 graus após o curvamento do tubo (Figura 4.21). Nos espécimes simulados até a ruptura, foi utilizado um valor de h igual a 4 mm, a fim de representar satisfatoriamente as deformações na região elástica.

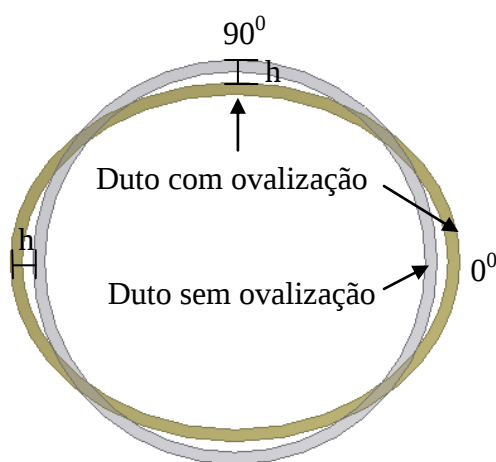


Figura 4.21-Duto com e sem ovalização.

A Figura 4.22 apresenta os resultados experimentais dos EREs do espécime CF5 (com defeito e sem reparo), com o ponto R1 localizado fora do defeito e o ponto U3 localizado a 90 graus de R1, como mostrado na Figura 4.20. As deformações negativas na posição U3 indicam uma ovalização no duto.

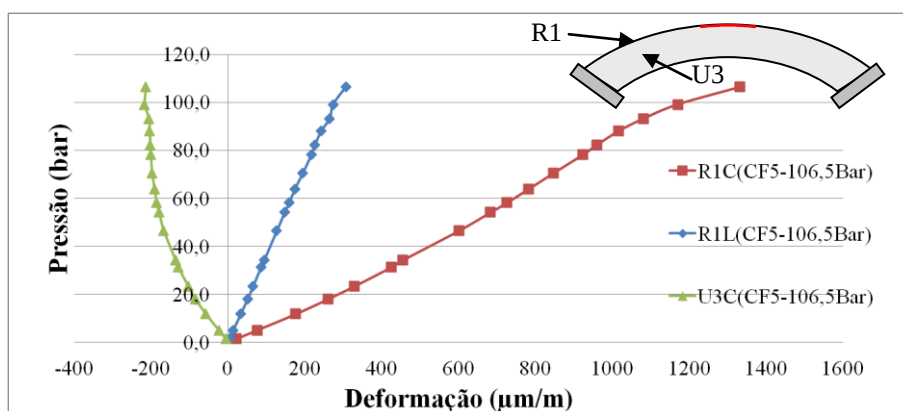


Figura 4.22 - Curva pressão - deformação longitudinal posição R1 e circunferencial na posição R1 e U3 testados experimentalmente (TPH) até a ruptura no espécime CF5.

A Figura 4.23 apresenta valores para as tensões circunferenciais (compósito) e de von Mises (aço) calculadas pelo método de elementos finitos para as três partes localizadas no espécime CF7 que teve sua região com defeito reforçado pelo compósito constituído de epóxi e fibra de vidro.

Os pontos se localizam na:

-Posição A: sobre a superfície externa do tubo a 90 graus de R1 (U3); nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.

-Posição B: sobre a superfície interna do reparo sobre o defeito; nesta posição foi avaliada a tensão circunferencial.

-Posição C: sobre a superfície externa do defeito; nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.

Verifica-se na posição C que, sob uma pressão de 100 bar (Figura 4.23-A*), a variação da tensão de von Mises é reduzida pelo efeito do reparo. Entretanto, após uma pressão de 150 bar, o reparo não é capaz de conter o aumento de esforços na região do defeito. Quando o duto atinge uma pressão de 309 bar a tensão de von Mises, na posição C, atinge o limite de resistência pelo critério de não convergência numérica (Figura 4.24), enquanto a tensão circunferencial no reparo (posição B) e a tensão de von Mises no tubo (posição A) são de 230 MPa e 475 MPa respectivamente. Embora tenha sido identificada a ruptura na posição C (defeito), a ruptura poderia ter acontecido também na posição B (reparo) por sua tensão circunferencial de 230 MPa estar perto de seu valor limite de resistência de 233 MPa.

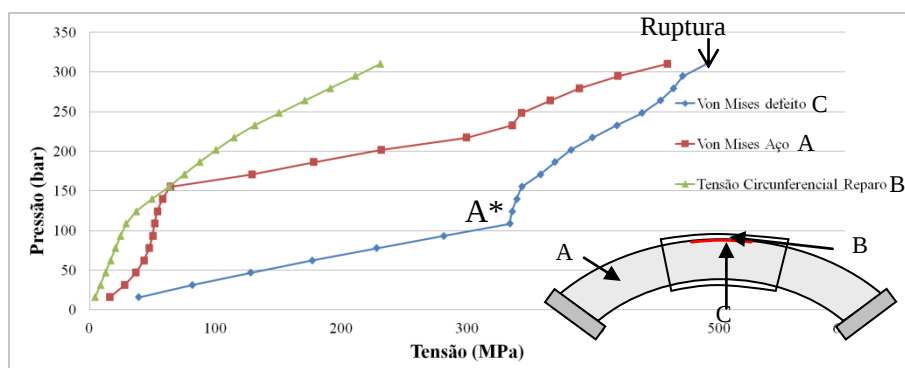


Figura 4.23 - Tensão circunferencial na posição B e tensões de von Mises nas posições A e C para o espécime CF7.

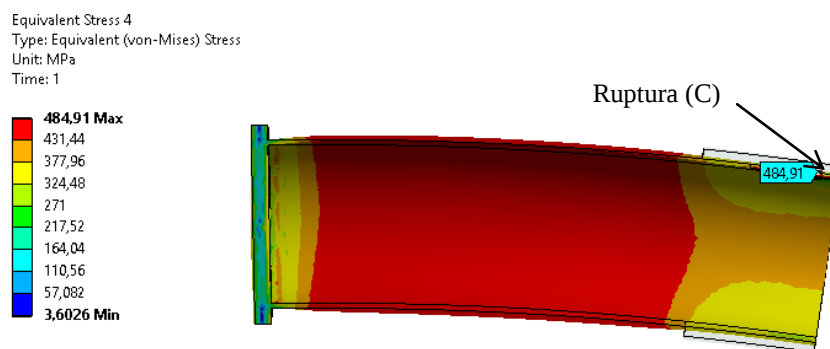


Figura 4.24 - Tensão de von Mises para o espécime CF7, a ruptura acontece a 309 bar e tensão de von Mises de 485 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 2 usado).

A Figura 4.25 apresenta valores para as tensões circunferenciais (compósito) e de von Mises (aço) calculadas pelo método de elementos finitos para as posições A, B e C no espécime CF4 que teve sua região com defeito reforçado pelo compósito constituído de epóxi e fibra de carbono.

No espécime CF4 a ação do reparo sobre o defeito é verificada a partir de uma pressão de 220 bar (Figura 4.25 - A*), enquanto no espécime CF7 (Figura 4.23 - A*) o efeito do reparo foi verificado a 100 bar, isto é devido ao fato do espécime CF4 ter uma espessura de defeito maior (2,5 mm) e um reparo de compósito (ERFC) com maior módulo de elasticidade. Quando o duto alcança uma pressão de 315 bar, a tensão de von Mises no tubo na posição A atinge o limite de resistência pelo critério de não convergência numérica (Figura 4.26), enquanto a tensão de von Mises no defeito e a tensão circunferencial no reparo são de 350 MPa e 310 MPa, respectivamente (Figura 4.25), sendo estes valores inferiores aos seus limites de resistência.

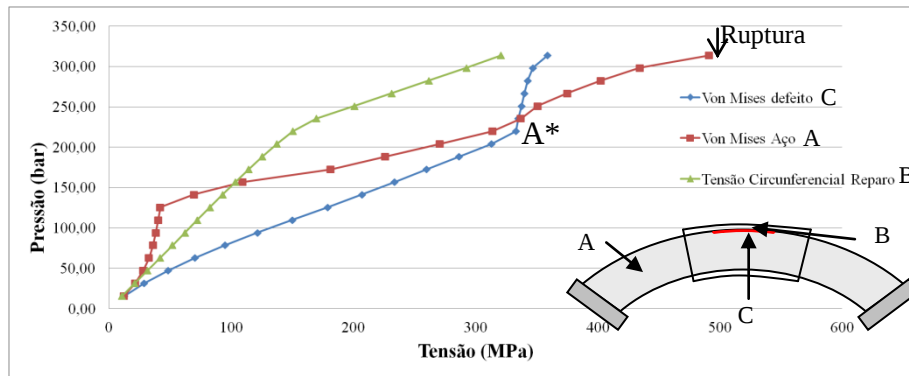


Figura 4.25 - Tensão circunferencial na posição B e tensões de von Mises nas posições A e C para o espécime CF4.

Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1

484,95 Max
431,42
377,88
324,34
270,81
217,27
163,74
110,2
56,664
3,1278 Min

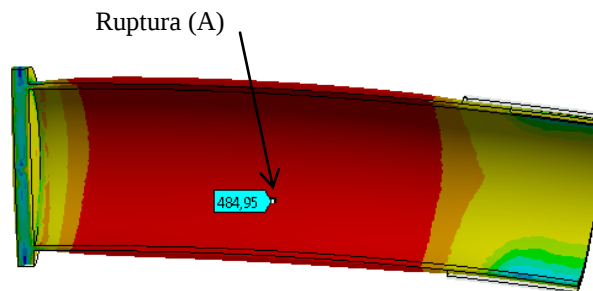


Figura 4.26 - Tensão de von Mises para o espécime CF4, a ruptura acontece a 315 bar e tensão de von Mises de 485 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 2 usado).

O espécime CF5 foi simulado com defeito e sem reparo, tal como foi realmente ensaiado.

A Figura 4.27 apresenta valores para a tensão de von Mises calculadas pelo método de elementos finitos no espécime CF5 que teve sua região com defeito sem reparo.

Quando o espécime CF5 atinge uma pressão de 105 bar a tensão de von Mises no defeito atinge o limite de resistência na posição C (Figura 4.27).

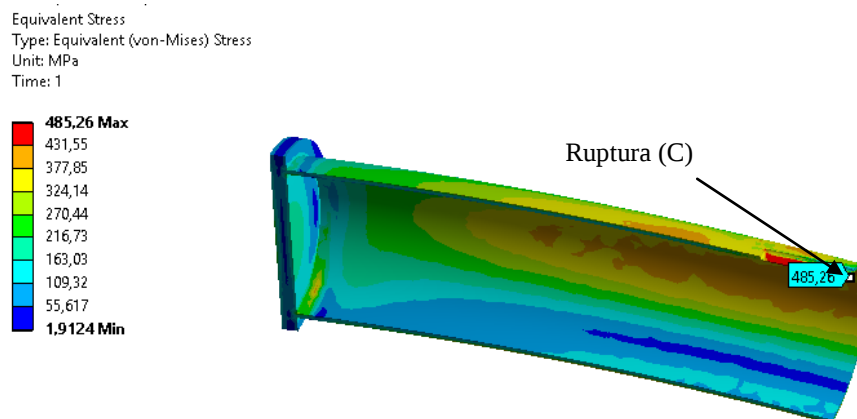


Figura 4.27 - Tensão de von Mises para o espécime CF5 quando acontece a ruptura sob uma pressão 105 bar.

4.5.

Dutos curvados a quente

A Figura 4.28 apresenta a malha de elementos finitos adotada (ordem de 60 mil nós e 35 mil elementos) bem como as condições de contorno do modelo, simetria na seção vermelha em relação ao eixo X e simetria na seção verde em relação ao eixo Z.

Os espécimes tubulares foram simulados com o perfil de espessuras apresentado na Figura 4.29. Estes valores foram obtidos a partir das medições de espessuras apresentado no apêndice A.

Para os reparos, as espessuras foram de 18 mm para ERFV e 11 mm para EFRF. Os espécimes foram simulados com defeitos tipo perda metálica. Todos os espécimes simulados até a ruptura apresentaram diferentes espessuras remanescentes, assim:

- O espécime CQ2 com espessura remanescente de 2 mm.
- O espécime CQ3 com espessura remanescente de 1,8 mm.
- O espécime CQ7 com espessura remanescente de 1,6 mm.

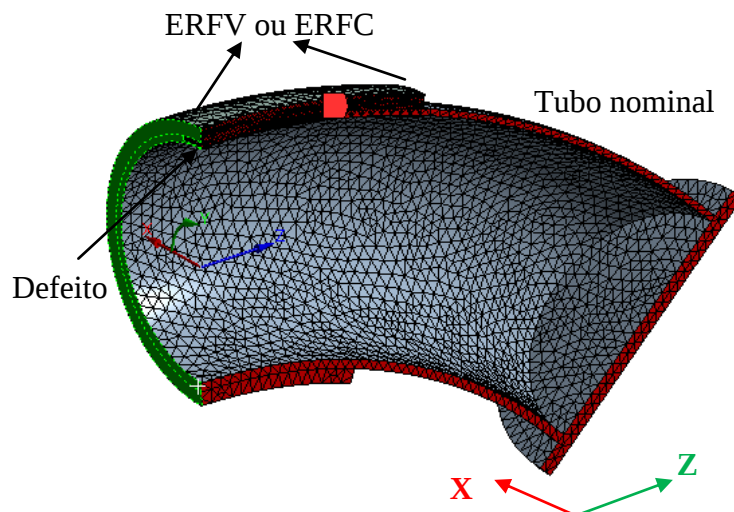


Figura 4.28 - Condições de contorno CQ, simetria na seção vermelha em relação ao eixo X e simetria na seção verde em relação ao eixo Z.

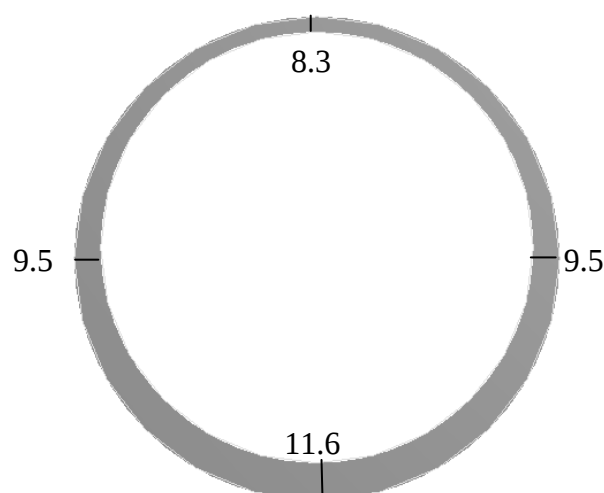


Figura 4.29 - Perfil de espessura nos espécimes curvos a quente.

A Figura 4.30 apresenta valores para as tensões circunferenciais (compósito) e de von Mises (aço) calculadas pelo método de elementos finitos para três partes localizadas no espécime CQ3 que teve sua região com defeito reforçado pelo compósito constituído de epóxi e fibra de vidro.

Os pontos se localizam na:

-Posição A: sobre a superfície externa do tubo e fora do compósito; nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.

-Posição B: sobre a superfície interna do reparo sobre o defeito; nesta posição foi avaliada a tensão circunferencial.

-Posição C: sobre a superfície externa do defeito; nesta posição foi avaliada a tensão de von Mises.

Sob uma pressão de 300 bar (Figura 4.31) a posição B atinge seu limite de resistência de 233 MPa (Tabela 4.2), enquanto a tensão de von Mises na posição A e B são de 550 MPa e 470 MPa respectivamente, sendo estes valores inferiores aos seus limites de resistência (616 MPa).

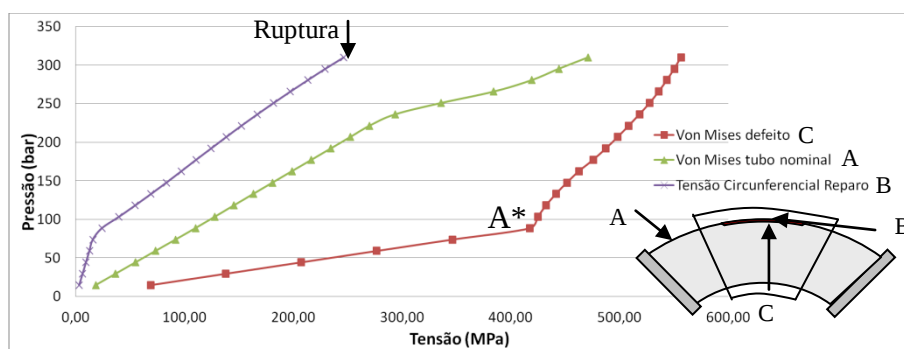


Figura 4.30 - Tensão circunferencial na posição B, tensão de von Mises nas posições A e C para o espécime CQ3.

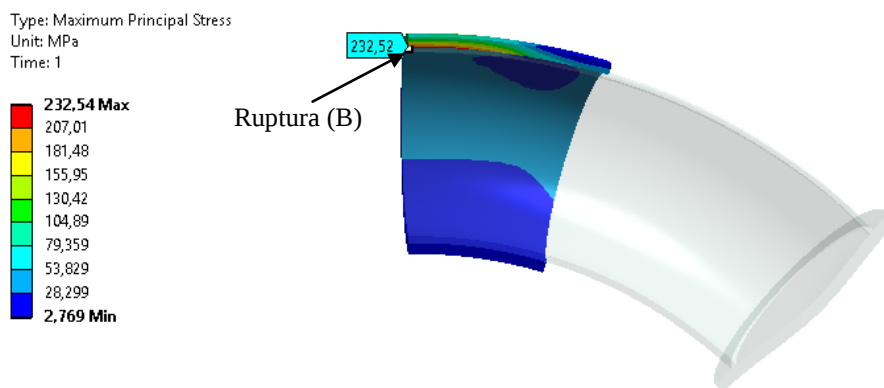


Figura 4.31 - Tensão circunferencial para o espécime CQ3, a ruptura acontece a 300 bar e tensão de circunferencial de 233 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 3 usado).

A Figura 4.32 apresenta valores para as tensões circunferenciais (compósito) e de von Mises (aço) calculadas pelo método de elementos finitos para as posições

A B e C no espécime CQ2 que teve sua região com defeito reforçado pelo compósito constituído de epóxi e fibra de carbono.

Verifica-se na posição C que, sob uma pressão de 160 bar (Figura 4.6 - A*), a variação da tensão de von Mises é reduzida pelo efeito do reparo.

Quando o espécime atinge uma pressão de 370 bar a tensão de von Mises na posição A atinge o limite de resistência pelo critério de não convergência numérica (Figura 4.33), enquanto a tensão circunferencial na posição B e tensão de von Mises na posição C são de 430 MPa e 445 MPa respectivamente, sendo estes valores inferiores aos seus limites de resistência.

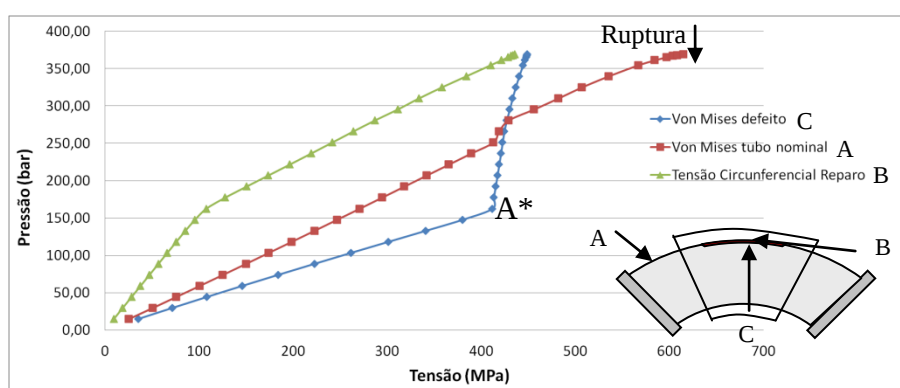


Figura 4.32 - Tensão circunferencial na posição B, tensão de von Mises nas posições A e C para o espécime CQ2.

A Figura 4.34 apresenta valores para a tensão de von Mises calculadas pelo método de elementos finitos no espécime CQ7 que teve sua região com defeito sem reparo.

Quando o espécime atinge uma pressão de 52 bar a tensão de von Mises no defeito atinge o limite de resistência.

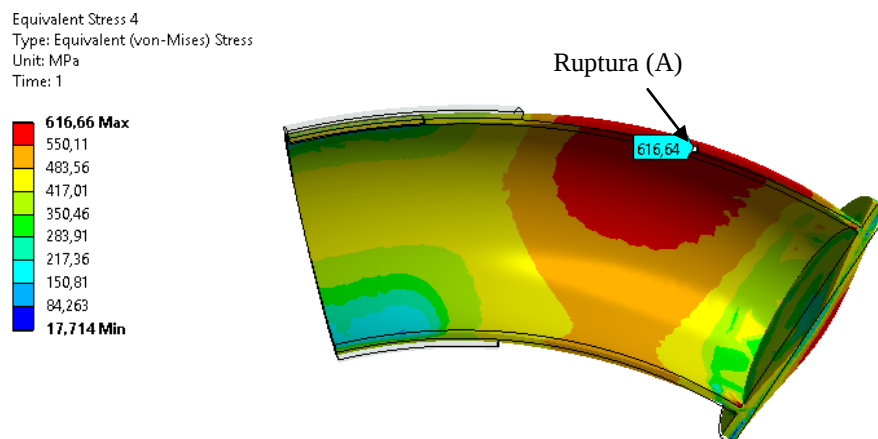


Figura 4.33 - Tensão de von Mises para o espécime CQ2, a ruptura acontece a 370 bar e tensão de von Mises de 616 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 3 usado).

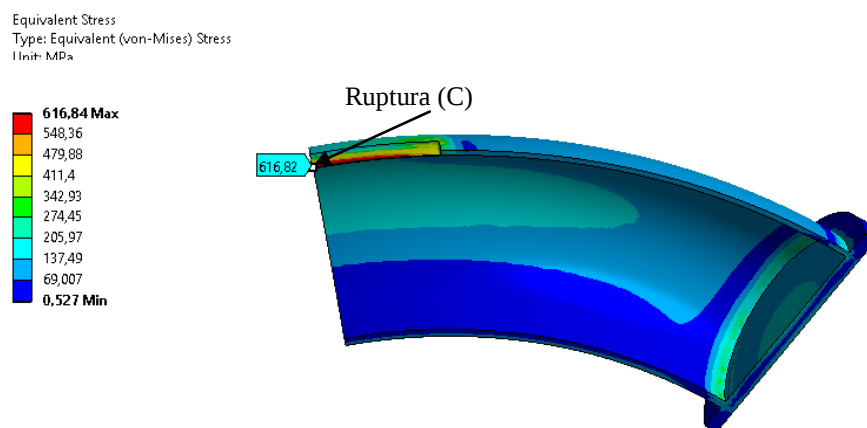


Figura 4.34 - Tensão de von Mises para o espécime CQ7, a ruptura acontece a 52 bar e tensão de von Mises de 616 MPa (correspondente ao limite de ruptura do material MAT 3 usado).