6 Comparação, avaliação e discussão dos resultados

Neste capítulo faz-se uma avaliação comparativa entre os resultados numéricos, analíticos e experimentais encontrados para cada geometria de espécime testado. São comparadas as deformações circunferenciais na região plástica para os modelos numéricos e experimentais (ERE), bem como suas pressões de ruptura. Finalmente são realizadas simulações numéricas e analíticas com variações de geometrias, espessuras de reparos e profundidade de defeitos para validação das equações analíticas propostas com a finalidade de serem usadas em situações futuras para a previsão das espessuras de reparos necessárias para o reforço de dutos com seus componentes que tiveram perda de espessura metálica.

6.1. Dutos com redução concêntrica

A Figura 6.1 apresenta os resultados encontrados para as deformações circunferenciais dos espécimes Re testados experimentalmente (ERE), bem como os resultados obtidos para estas deformações com o uso do modelo de elementos finitos e da equação analítica.

Os valores de deformação plotados no gráfico correspondem aos localizados na posição R1 nas regiões nominais dos tubos de maior diâmetro dos espécimes.

Os resultados são considerados satisfatórios, com exceção do espécime Re1 que apresenta menores deformações. Essa diferença pode ser atribuída a uma maior espessura (só foram realizadas duas medições de espessura neste tubo e longe da localização do extensômetro R1, ver apêndice A) ou ovalização no tubo (não foram colados mais extensômetros neste tubo que permitiram determinar se havia ou não ovalização).



Figura 6.1 - Deformação circunferencial ERE, MEF e equações analíticas na posição R1 sob pressão de 140 bar.

A Figura 6.2 e a Figura 6.3 apresentam comparações entre as tensões circunferenciais e de von Mises, atuantes nos pontos nominais (R1) dos espécimes e obtidos com modelos numéricos e equações analíticos (3.1.1 e 3.2.3) para carregamentos dentro da região de comportamento elástico do material. Verifica-se que as equações analíticas são bem representadas no modelo de elementos finitos na região elástica.



Figura 6.2 - Tensão circunferencial MEF e equações analíticas na posição R1 sob pressão de 140 bar.



Figura 6.3 - Tensão de von Mises MEF e equações analíticas na posição R1 sob pressão de 140 bar.

A Figura 6.4 e a Figura 6.5 apresentam curvas mostrando as variações de deformações circunferenciais que atuam em pontos centrais das superfícies externas dos reparos e sobre as regiões dos defeitos. As variações das deformações são causadas pela variação das pressões atuantes nos espécimes. As curvas mostradas, para efeito de comparações de resultados, se referem às soluções numéricas e experimentais.

No caso da Figura 6.4 verifica-se uma boa concordância entre as medições experimentais e os valores determinados numericamente para o espécime Re1 reparado com compósito de epóxi - fibra de carbono. No caso dos resultados mostrados na Figura 6.5 para o espécime Re3, reparado com compósito de epóxi - fibra de vidro, a concordância entre as curvas é apenas satisfatória.

As concordâncias boas e satisfatórias mostradas na Figura 6.4 e a Figura 6.5 indicam que a simulação numérica está adequada com relação a representar o comportamento dos espécimes experimentais, enquanto que discrepâncias menores ou maiores podem ser atribuídos às propriedades elásticas usadas para os materiais compósitos e à adesão entre as camadas de compósitos e as superfícies metálicas dos espécimes.



Figura 6.4 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito determinadas pelas soluções experimental e numérica para o espécime Re1 reparado com mantas de fibra de carbono.



Figura 6.5 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito determinadas pelas soluções experimentais e numérica para o espécime Re3 reparado com mantas de fibra de vidro.

A Figura 6.6 e a Figura 6.7 apresentam as variações das deformações circunferenciais com a pressão interna para pontos localizados em regiões nominais fora dos defeitos (R1), dos tubos com diâmetros maiores (12,75 in) dos espécimes Re1 e Re3. Estas deformações foram determinadas experimentalmente e numericamente.

Para o espécime Re3 o modelo numérico representa satisfatoriamente os resultados experimentais (ERE). O inicio do escoamento no material do tubo de

12,75 in se dá a uma pressão de 170 bar. No teste de pressão hidrostático o espécime atinge a ruptura sob uma pressão de 276,5 bar e no modelo elementos finitos sob uma pressão de 267 bar. Tanto no teste experimental como na solução analítica a ruptura acontece no tubo de 12,75 in (Figura 6.9)

A boa concordância destes resultados é resultante da boa adequação da solução numérica usada bem como pelo fato que esta solução usa uma curva tensão - deformação uniaxial levantada a partir de medições de tensões circunferenciais e longitudinais realizadas para os pontos R1 deste mesmo espécime Re3.



Figura 6.6 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do tubo de 12,75 in determinadas pelas soluções experimental e numérica do espécime Re3 reparado com mantas de fibra de vidro.

Para o espécime Re1 (Figura 6.7), os resultados experimentais apresentam uma pequena diferença com os obtidos no modelo de elementos finitos. Este resultado era esperado já que o mesmo espécime tinha apresentado deformações menores na região elástica (Figura 6.1). Também deve-se notar que a curva tensão - deformação usada para este espécime foi determinada para o tubo Re3.

No teste experimental a ruptura acontece sob uma pressão de 284 bar e no modelo numérico (pelo critério de não convergência) a 274 bar. Tanto no teste experimental como na solução numérica a ruptura acontece no tubo de 12,75 in (Figura 6.10).



Figura 6.7 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do tubo de 12,75 in determinadas pelas soluções experimental e numérica do espécime Re1 reparado com mantas de fibra de carbono.

A Figura 6.8 apresenta as curvas pressão - deformações circunferenciais no ponto localizado no centro do defeito, determinadas pela solução experimental (ERE) e numérica (elementos finitos) para o espécime Re7 sem reparo testado até a ruptura. Este espécime é bem representado tanto na região elástica como na plástica. No modelo numérico, bem como no experimental, a ruptura ocorre no defeito, a 205 bar e 215 bar respectivamente (Figura 6.11) Deve-se notar que a curva tensão deformação para o tubo cônico, que proporciona a redução do diâmetro, foi levantada indiretamente a partir dos resultados encontrados para o tubo API 5L Grau B com diâmetro D= 12,75 in do espécime Re3 e dados levantados com o extensômetro circunferencial R2C deste espécime Re7. O levantamento desta curva foi comentado na seção 3.2.



Figura 6.8-Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do defeito determinadas pelas soluções experimental e numérica do espécime Re7 sem reparo.

A Figura 6.9, a Figura 6.10 e a Figura 6.11 apresenta um resumo das posições de ruptura para os espécimes Re3, Re1 e Re7.

A Tabela 6.1 mostra uma comparação dos resultados de pressão de ruptura determinados para estes espécimes.



Figura 6.9 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime Re3 reparado com compósito ERFV.



Figura 6.10 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime Re1 reparado com compósito ERFC.



Figura 6.11 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime Re7 sem reparo.

	Posição de ruptura		Pressão de ruptura (bar)		Critério de	
Espécime	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico	ruptura	
	(TPH)	(MEF)	(TPH)	(MEF)	(MEF)	
Do2	Tubo	Tubo	204 7	274	Não	
кез	D= 12,75 in	D= 12,75 in	204,7	274	convergência	
Po1	Tubo Tubo 270 F		267	Não		
KEI	D= 12,75 in	D= 12,75 in	270,5	207	convergência	
Do7	Centro	Centro	214 7	205	Não	
ne7	do rebaixo	do rebaixo	214,7	205	convergência	

Tabela 6.1 - Pressões e posições de ruptura dos espécimes Re3, Re1 eRe7 obtidos a partir de modelos numéricos e resultados experimentais.

6.2. Dutos tipo Tê

A Figura 6.12 apresenta os resultados obtidos para a deformação circunferencial atuante em pontos nominais (ponto R1) dos espécimes tipo Tê testados experimentalmente (ERE), bem como os resultados obtidos por meio do modelo de elementos finitos e da equação analítica (equação 3.1.4). Os resultados são considerados satisfatórios.



Figura 6.12 - Deformação circunferencial ERE, MEF e equações analíticas na posição R1 sobre o tubo de 12,75 in sob pressão de 140 bar.

A Figura 6.13 e a Figura 6.14 apresentam comparações entre a tensão circunferencial e a tensão de von Mises determinadas para modelos numéricos e analíticos. Verifica-se que as equações analíticas (equação 3.1.1 e 3.2.3) são bem representadas pelo modelo de elementos finitos na região elástica.



Figura 6.13 - Tensão circunferencial MEF e equações analíticas na posição R1 sobre o tubo de 12,75 in.



Figura 6.14 - Tensão de von Mises mediante MEF e equações analíticas na posição R1 sobre o tubo de 12,75 in.

A Figura 6.15 apresenta resultados de deformações circunferenciais para pontos da superfície externa do reparo sobre a região central do defeito, posições R2 e R3, determinados pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (elementos finitos) para o espécime Tê2 reparado com manta de fibra de carbono.

A curva experimental na posição R2 (tubo de 12,75 in) é bem representada pelo modelo de elementos finitos.

Para a posição R3 a curva experimental apresenta diferenças de resultados com o modelo de elementos finitos. Na parte inicial e até uma pressão de 50 bar os resultados podem ser considerados aceitáveis. Entre 50 e 150 bar os resultados experimentais (ERE) apresentam valores de deformação maiores em relação aos obtidos no modelo de elementos finitos. Este comportamento discrepante pode ser devido ao fato de que perto do defeito, a manta fora colada de forma não uniforme, com ângulos de até 45 graus, isto gerando um comportamento misto da fibra na direção circunferencial, o qual, não é avaliado no modelo de elementos finitos.

Na posição R3, após atingir a pressão de 175 bar, os resultados experimentais apresentaram uma queda de deformação.

O espécime atinge a ruptura por deformação circunferencial na superfície interna do reparo sob uma pressão de 237 bar na posição R3 no modelo de elementos finitos e nos resultados experimentais (Capítulo 4).



Figura 6.15 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito nas posições R2 e R3, determinadas pelas soluções experimentais e numéricas para o espécime Tê2 reparado com mantas de fibra de carbono.

A Figura 6.16 apresenta a curva da variação da pressão e deformação circunferencial no tubo na posição R1, para o espécime Tê2, determinada pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (MEF). A curva tensão - deformação uniaxial usada para o modelo numérico está apresentada na Figura 3.2 e foi levantada a partir dos resultados de pressão hidrostáticas do espécime com redução concêntrica Re3. O modelo de elementos finitos representa satisfatoriamente os resultados experimentais. O tubo inicia o escoamento sob uma pressão de 170 bar.

A Figura 6.17 e a Figura 6.18 apresentam as curvas pressão - deformações circunferenciais e longitudinais para pontos da superfície externa do reparo sobre a região central do defeito (R2 e R3), determinadas pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (elementos finitos) levadas a termo para o espécime Tê7 reparado com manta de fibra de vidro.

Na Figura 6.17 podem-se observar maiores deformações na direção longitudinal. O modelo de elementos finitos apresenta um comportamento similar com maiores deformações na direção longitudinal e menores valores de deformação na direção circunferencial.



Figura 6.16 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do tubo de 12,75 in determinadas pelas soluções experimental e numérica do espécime Tê2 reparado com mantas de fibra de carbono.



Figura 6.17 - Curvas pressão - deformações circunferenciais e longitudinais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito na posição R2, determinadas pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (elementos finitos) para o espécime Tê7 reparado com mantas de fibra de vidro.

Similarmente, na Figura 6.18 pode-se notar que na posição R3, tubo de menor diâmetro, a deformação atuante na direção longitudinal apresenta maiores valores do que a deformação na direção circunferencial. As comparações entre resultados obtidos com o modelo de elementos finitos e os resultados experimentais para as duas direções (circunferencial e longitudinal), são satisfatórias no sentido de que as tendências numéricas para estes resultados são as mesmas.



Figura 6.18 - Curvas Pressão - Deformações circunferenciais e longitudinais determinadas para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito na posição R3, determinadas pelas soluções experimentais (ERE) e numérica (elementos finitos) para o espécime Tê7 reparado com manta de fibra de vidro.

Usualmente tubos com paredes finas sob pressão interna apresentam maiores tensões na direção circunferencial, necessitando por isto maior resistência nesta direção.

Esta aparente contradição é explicada pelo fato que os dados mostrados nas Figura 6.17 e Figura 6.18 se referem às porções mais externas do reparo. De fato, como mostrado na Figura 6.19, as deformações circunferenciais no reparo em pontos junto à proximidade da parede do tubo (superfície interna) são bem maiores (ordem de 9 vezes) que as deformações longitudinais.

A Figura 6.19 apresenta os resultados que mostram as variações das deformações circunferencial e longitudinal ao longo da espessura do reparo executado para o espécime Tê7, determinada pelo modelo de elementos finitos para a seção transversal do reparo na posição R2, sob uma pressão de 240 bar. A ordenada zero (0) no eixo da espessura indica a superfície interna do reparo, que está em contato com a superfície nominal do tubo. Este local é o ponto de contato entre a manta de reforço e o preenchimento de resina epóxi que é colocado no defeito.

Observa-se na Figura 6.19 que a deformação circunferencial na parte interna do reparo (ordenada 0) é maior que a deformação longitudinal. Com o aumento da ordenada a deformação circunferencial diminui até atingir um valor negativo na superfície externa do reparo. Na direção longitudinal a mudança na deformação não é tão significativa ao longo da espessura. Deve-se notar, que os valores de deformações medidos ou calculados, apresentados na Figura 6.17 e a Figura 6.18, mostram as deformações nas posições externa do reparo (50 mm).

O espécime Tê7 atinge a ruptura sob uma pressão de 236 bar na superfície interna do reparo na posição R3 para resultados numéricos e experimentais (Capítulo 4).



Figura 6.19 - Curva variação das deformações circunferenciais e longitudinais determinadas pelo modelo de elementos finitos para a espessura de reparo na posição R2 no espécime Tê7 sob uma pressão de 240 bar.

A Figura 6.20 apresenta a curva tensão deformação circunferencial no tubo na posição R1, para o espécime Tê7, determinada pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (MEF). O modelo de elementos finitos representa satisfatoriamente os resultados experimentais. Sob uma pressão de 170 bar o tubo inicia o escoamento.

A Figura 6.21 e a Figura 6.22 apresentam as curvas pressão - deformações circunferenciais no centro dos defeitos (em ambos tubos) nas posições R2 e R3, determinadas pelas soluções experimental (ERE) e numérica (elementos finitos) para o espécime Tê4 testado até a ruptura sem reparo. As comparações entre as curvas apresentam resultados satisfatórios. No modelo numérico e na solução experimental as pressões de ruptura ocorrem no defeito (R3), a 97,5 e 95,6 bar respectivamente.



Figura 6.20 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do tubo de 12,75 in determinadas pelas soluções experimental e numérica do espécime Tê7 reparado com manta de fibra de vidro.



Figura 6.21 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do defeito na posição R3 determinadas pelas soluções experimental e numérica no espécime Tê4 sem reparo.



Figura 6.22 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do defeito na posição R2 determinadas pelas soluções experimental e numérica no espécime Tê4 sem reparo.

A Figura 6.23, a Figura 6.24 e a Figura 6.25 apresentam um resumo das posições de ruptura para os espécimes Tê2, Tê7 e Tê4.

A Tabela 6.2 mostra uma comparação dos resultados de pressão de ruptura determinados para estes espécimes. Nos espécimes reparados, a ruptura acontece na superfície interna do compósito e não no rebaixo devido a que a tensão de von Mises sobre o defeito atinge valores máximos 290 MPa para o espécime Tê2 (Figura 4.15) e de 360 MPa para o espécime Tê7 (Figura 4.18) valores inferiores a suas tensões de ruptura (Su= 426 MPa).

	Posição de	ruptura	Pressão de ruptura (bar)		Critério	
Espécime	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico	de ruptura	
	(TPH)	(MEF)	(TPH)	(MEF)	(MEF)	
Tê 4	Centro do rebaixo	Centro do rebaixo	95,6	97,5	Tensão de	
	(R3)	(R3 e R2)			von mises	
	Superfície	Superfície		236		
Tâ 7	interna	interna	244.4		c	
107	do reparo	do reparo	244,4		cmax	
	(R2 e R3)	(R2 e R3)				
	Superfície	Superfície				
Tê2	Interna	Interna	236	237	e	
	do reparo	do reparo	230	237	Cmax	
	(R2 e R3)	(R2 e R3)				

Tabela 6.2 - Pressões e posições de ruptura dos espécimes Tê4, Tê7 eTê2 obtidos a partir de modelos numéricos e resultados experimentais.



Figura 6.23 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime Tê2 reparado com compósito ERFC.



Figura 6.24 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime Tê7 reparado com compósito ERFV.



Figura 6.25 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime Tê4 sem reparo.

6.3. Dutos curvados a frio

A Figura 6.26 apresenta os resultados de deformações circunferenciais medidos para os espécimes curvados a frio e testados experimentalmente, bem como os resultados obtidos com o modelo de elementos finitos e com a equação analítica (equação 3.1.2 e 3.1.4). Os resultados experimentais para os espécimes 1, 6, 4, 7 apresentam comportamentos semelhantes até uma pressão de 100 bar. Em todos os casos os valores de deformações medidos nos experimentos são maiores que os resultados encontrados com modelo de elementos finitos e uma equação analítica.



Figura 6.26 - Deformação circunferencial ERE, MEF e equações Analíticas na posição R1 sobre o tubo sob pressão de 140 bar.

Credita-se estas diferenças de deformações circunferenciais à ovalização dos dutos geradas no processo de curvamento a frio. Este comportamento será descrito e comentado adiante.

A Figura 6.27 - A apresenta as mudanças geométricas que experimenta um duto após de ter sido curvado e ovalizado. A 90° o duto apresenta uma redução de diâmetro, enquanto a 0° o diâmetro é aumentado.

A Figura 6.27 - B apresenta uma estimativa qualitativa de tensões circunferenciais para um duto ovalado. Quando este duto é submetido a uma pressurização interna, a região localizada no raio externo a 90° é submetida a uma flexão que gera tensões trativas nos pontos da superfície externa, enquanto que pontos na superfície interna são submetidos à compressão, uma vez que o duto tenta retornar ao seu formato circular. Para a posição a 0° a distribuição de tensões é inversa, a flexão induz compressão no raio externo e tração no raio interno.

Verificações experimentais e numéricas foram feitas usando-se o espécime CF5. Neste espécime foi colado um ERE circunferencial na posição U3 a 0° (Figura 6.27 - A), constatando-se medições negativas para a deformação circunferencial. A partir deste resultado foram elaborados modelos de elementos finitos onde procuram-se variar o comprimento h (Figura 6.27), que define a ovalização da seção.



Figura 6.27 - Duto com e sem ovalização (A), estado de tensões a $90^0 e 0^0$ (B).

A Figura 6.28 apresenta os resultados de deformação medidos pelos EREs e determinados pelo MEF para uma ovalização h1 = h2 = 4 mm. Os resultados numéricos se comportam bem para a deformação circunferencial e longitudinal na posição R1 (90°). Para a posição U3 os resultados de deformação circunferencial são considerados aceitáveis.



Figura 6.28 - Deformação circunferencial (C), longitudinal (L) fora do defeito no TPH e MEF (h= 4 mm) para o espécime CF5.

Foi realizada outra simulação para o espécime CF5 com h1=4 mm e h2=6 mm. A Figura 6.29 apresenta os resultados desta simulação. Os resultados de



Figura 6.29 - Deformação circunferencial (C), longitudinal (L) no tubo fora do defeito determinadas pelas soluções experimental (ERE) e numérica (elementos finitos) com h1= 4 mm, h2= 6 mm para o espécime CF5.

A partir destes resultados foram realizadas simulações com diferentes valores de h para poder representar de maneira satisfatória as deformações que ocorreram nas regiões elásticas de cada espécime testado.

A Figura 6.30 apresenta os resultados destas simulações e comparações entre deformações circunferenciais medidas e calculadas pelo modelo de elementos finitos para a posição R1. Os espécimes CF1, CF6, CF4, CF7 foram simulados com uma ovalização h= 4 mm, o espécime CF3 foi simulado com uma ovalização h= 8 mm e o espécime CF2 foi simulado com uma ovalização h= 18 mm. As comparações experimentais entre as deformação experimentais e resultados numéricos para os espécimes foi considerada satisfatória, dadas as proximidades de resultados experimentais e numéricos, que podem ser observados na curva mostrada na Figura 6.30.



Figura 6.30 - Curvas pressão - deformações circunferenciais no tubo fora do reparo determinadas pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (elementos finitos) com h=4, 8, 18 mm na região elástica.

A Figura 6.31 apresenta as variações de deformações circunferenciais em pontos da superfície externa do reparo sobre a região central do defeito, determinadas pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (elementos finitos) para os espécimes CF4 e CF7 reparados com mantas de fibra de carbono e vidro respectivamente.

Para o espécime CF4 a comparação dos resultados experimentais (ERE) com o modelo de elementos finitos é considerada aceitável.

Para o espécime CF7, sob pressões inferiores a 180 bar, os resultados experimentais apresentam valores menores de deformação e sob pressões superiores a 220 bar o comportamento é inverso, tendo maiores deformações os resultados experimentais.

Deve-se levar em conta que o modelo de elementos finitos considera o compósito como um só corpo de igual espessura e que tem aderência total ao corpo metálico da conexão, o que pode gerar diferenças consideráveis entre as soluções uma vez que carregamentos e descarregamentos (elásticos) podem gerar descolamentos entre estes materiais.



Figura 6.31 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito determinadas pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (elementos finitos) para os espécimes CF4 e CF7.

A Figura 6.32 e a Figura 6.33 apresentam variações das deformações circunferenciais para a região fora do defeito, determinadas pelas soluções experimentais (ERE) e numéricas (elementos finitos) para os espécimes CF4 e CF7.

Para o espécime CF7 os resultados dos ERE são bem representados até uma pressão de 250 bar. Sob pressões superiores o modelo numérico apresenta valores inferiores de deformação. Estas diferenças podem ser devidas à curva tensão-deformação empregada, que foi construída a partir dos resultados de deformação do espécime CF4.

No modelo numérico, o espécime CF7 atinge a ruptura sob uma pressão de 309 bar e no teste de pressão hidrostático sob uma pressão de 308,5 bar. Tanto no modelo numérico como no TPH a ruptura acontece no defeito (Figura 6.35).

Para o espécime CF4 a comparação das curvas de deformação é considerada satisfatória. No modelo numérico, o espécime CF4 atinge a ruptura sob uma pressão de 315 bar e no teste de pressão hidrostático sob uma pressão de 320 bar. Tanto no modelo numérico como no TPH a ruptura acontece fora do defeito, na posição U3 (Figura 6.36).



Figura 6.32 - Deformação circunferencial (MEF e ERE circunferencial) no espécime CF7 na região fora do defeito até a ruptura.



Figura 6.33 - Deformação circunferencial (MEF e ERE circunferencial) no espécime CF4 na região fora do defeito até a ruptura.

A Figura 6.34 apresenta variações das deformações circunferenciais no centro do defeito, determinadas pelas soluções experimental (ERE) e numérica (elementos finitos) para o espécime CF5 testado até a ruptura sem reparo. No modelo numérico bem como no experimental a ruptura acontece no defeito, a 105 e 106,5 bar respectivamente (Figura 6.37).



Figura 6.34 - Deformação circunferencial (MEF e ERE circunferencial) do espécime CF5 no defeito até a ruptura.

A Figura 6.35, a Figura 6.36 e a Figura 6.37 apresentam um resumo das posições de ruptura para os espécimes CF7, CF4 e CF5.

A Tabela 6.3 mostra uma comparação dos resultados de pressão de ruptura determinados para estes espécimes.



Figura 6.35 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime CF7 reparado com compósito ERFV.



Figura 6.36 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime CF4 reparado com compósito ERFC.



Figura 6.37 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime CF5 sem reparo.

	Posição de ruptura		Pressão de ruptura (bar)		Critério de
Espécime	Experimental (TPH)	Numérico (MEF)	Experimental (TPH)	Numérico (MEF)	ruptura (MEF)
CF7	Centro do rebaixo	Centro do rebaixo	308,5	309	Tensão de von Mises
CF4	Tubo na posição U3	Tubo na posição U3	320	315	Não convergência
CF5	Centro do rebaixo	Centro do rebaixo	106,5	105	Não convergência

Tabela 6.3 - Pressões e posições de ruptura dos espécimes Tê4, Tê7 eTê2 obtidos a partir de modelos numéricos e resultados experimentais.

6.4. Dutos curvados a quente

A Figura 6.38 apresenta os resultados de deformações circunferenciais dos espécimes curvados a quente testados experimentalmente (ERE), bem como os resultados obtidos no modelo de elementos finitos e na equação analítica (equação 3.1.3 e 3.1.4). Os resultados são considerados satisfatórios.



Figura 6.38 - Deformação circunferencial ERE, MEF e equações analíticas na posição R1 sobre o tubo nominal.

A Figura 6.39 e a Figura 6.40 apresentam as variações das tensões circunferencial e de von Mises, para modelos numéricos e analíticos. Verifica-se que a equação analítica (equação 3.1.3) é bem representada no modelo de elementos finitos na região elástica.



Figura 6.39 - Tensão circunferencial mediante MEF e equações analíticas na posição R1 sobre o tubo nominal.



Figura 6.40 - Tensão de von Mises mediante MEF e equações analíticas na posição R1 sobre o tubo nominal.

A Figura 6.41 e a Figura 6.42 apresentam as variações das deformações circunferenciais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito, determinadas pelas soluções experimental (ERE) e numérica (elementos finitos) para os espécimes CQ3 e CQ2 reparados com mantas de fibra de vidro e fibra de carbono respectivamente. Para as duas figuras a comparação entre resultados experimentais (ERE) e numéricos é considerado aceitável.



Figura 6.41 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito determinadas pelas soluções experimental e numérica para o espécime CQ3 reparado com mantas de fibra de vidro.



Figura 6.42 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a superfície externa do reparo sobre a região central do defeito determinadas pelas soluções experimental e numérica para o espécime CQ2 reparado com mantas de fibra de carbono.

A Figura 6.43 e a Figura 6.44 apresentam as variações das deformações circunferenciais para a região fora do defeito, determinadas pelas soluções experimental (ERE) e numérica (elementos finitos) para o espécime CQ3 e CQ2.

Para espécime CQ3 o modelo numérico representa satisfatoriamente os resultados experimentais (ERE), iniciando o escoamento sob uma pressão de 260 bar. No modelo de elementos finitos a ruptura acontece quando a tensão circunferencial no raio interno do reparo atinge seu limite de resistência sob uma

pressão de 300 bar. No teste experimental (ERE) a ruptura acontece no defeito a 298 bar sem ruptura do reparo (Figura 6.46). Embora as pressões de ruptura sejam semelhantes as falhas se localizaram em regiões diferentes. Esta diferença pode ter acontecido por uma falta de aderência entre os três materiais (aço - epóxi - reparo) hipótese que não é considerada no modelo numérico.



Figura 6.43 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do tubo nominal (R1), determinadas pelas soluções experimental e numérica para o espécime CQ3 reparado com mantas de fibra de vidro.

Os resultados experimentais para deformações circunferenciais são bem representados pelo modelo numérico no espécime CQ2 (Figura 6.44). No modelo numérico (MEF), bem como no experimental (ERE) as rupturas acontece no tubo nominal (R1) sob uma pressão de 370 e 374 bar respectivamente (Figura 6.47).



Figura 6.44 - Curvas pressão - deformações circunferenciais determinadas para a região central do tubo nominal (R1), determinadas pelas soluções experimental e numérica para o espécime CQ2 reparado com mantas de fibra de carbono.

A Figura 6.45 apresenta a variação das deformações circunferenciais no centro do defeito, determinadas pelas soluções experimental (ERE) e numérica (elementos finitos) para o espécime CQ7 testado até a ruptura sem reparo. Os resultados para este espécime são considerados satisfatórios. No modelo numérico bem como no experimental a ruptura acontece no defeito, a 52 e 50 bar respectivamente (Figura 6. 48).



Figura 6.45 - Curvas pressão - deformações circunferenciais para a região central do defeito determinadas pelas soluções experimental e numérica do espécime CQ7 sem reparo.

A Figura 6.46, a Figura 6.47 e a Figura 6. 48 apresentam um resumo das posições de ruptura dos espécimes CQ3, CQ2 e CQ7 obtidos por modelos de elementos finitos e resultados experimentais (TPH).

A Tabela 6.4 mostra uma comparação dos resultados de pressão de ruptura determinados para estes espécimes.



Figura 6.46 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime CQ3 reparado com compósito ERFV.



Figura 6.47 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime CQ2 reparado com compósito ERFC.



Figura 6. 48 - Comparações de rupturas entre o modelo de elementos finitos e o resultado experimental para o espécime CQ7 sem reparo.

	Posição de ruptura		Pressão de ruptura (bar)		Critério de	
Espécime	Experimental (TPH)	Numérico (MEF)	Experimental (TPH)	Numérico (MEF)	ruptura	
CQ3	Possivelmente no centro do rebaixo	Superfície interna do reparo (R2)	298	300	Tensão máxima	
CQ2	Tubo na posição R2	Tubo na posição R2	374	369	Não convergência	
CQ7	Centro do rebaixo	Centro do rebaixo	50	52	Não convergência	

Tabela 6.4 - Pressões e posições de ruptura dos espécimes CQ3, CQ2 eCQ7 obtidos a partir de modelos numéricos e resultados experimentais.

6.5. Fatores de resistência remanescente

A partir dos resultados obtidos e de outras simulações, são calculados os fatores de resistência remanescente de cada duto testado até a ruptura.

A Tabela 6.5 apresenta a comparação dos fatores de resistência remanescente de cada tipo de espécime testado, calculados com a equação 2.5.3.1 onde:

td: espessura do defeito

tr: espessura do reparo

LRDC: Carga limite ou de colapso plástico do componente com defeito e reparado.

RSFR: Fator de resistência remanescente do espécime com reparo (LRDC/LUC).

Na Tabela 6.5 são apresentadas as posições de ruptura para cada espécime avaliado, os pontos são localizados na:

- posição A: sobre a superfície externa do tubo nominal de D=12,75 in

- posição B: sobre a superfície interna do reparo dos espécimes CF

- posição D: sobre a superfície interna do defeito, no tubo nominal de D=12,75 in

-Posição C: sobre a superfície interna do defeito, no tubo nominal de D=10,75 in

			LUC	LDC	LRDC			
	td	tr	MEF	MEF	MEF			Ruptura
Espécime	(mm)	(mm)	(bar)	(bar)	(bar)	RSF	RSFR	(TPH)
Re1-ERFC	3	11	258	145	274	0,56	1,06	Posição A
Re3-ERFV	4	25	258	194	267	0,75	1,03	Posição A
Tê2-ERFC	2,6	16	189	101	237	0,53	1,25	Posição D, E
Tê7-ERFV	2,5	45	189	97	236	0,51	1,25	Posição D, E
CF4-ERFC	2,5	11	313	104	315	0,33	1,01	Posição A
CF7-ERFV	2,1	18	313	87	309	0,28	0,99	Posição B
CQ2-ERFC	2	11	352	65	369	0,18	1,05	Posição A
CQ3-ERFV	1,8	18	352	59	300	0,17	0,85	Posição B

Tabela 6.5 - Comparação de fatores de resistência remanescente com esem reparo.

Os resultados obtidos na Tabela 6.5 mostram que o reparo de mantas de fibra de carbono (ERFC) consegue restabelecer completamente a resistência de todos os espécimes estudados por obter valores de RSFR > 1. O reparo de fibra de vidro (ERFV) não consegue restabelecer completamente a resistência do espécime CF obtendo um valor de RSFR= 0.85, entretanto os resultados obtidos de RSFR para o reparo ERFV mostram que também é uma boa alternativa de reparo para componentes de dutos com perda de espessura externa.

Com base nos cálculos de RSFR pode-se concluir que os compósitos de ERFV e ERFC conseguem reestabelecer completamente a resistência para os componentes de dutos em redução concêntrica, tipo Tê, e curvados a quente. Embora as rupturas dos espécimes tipo Tê fossem localizadas na posição do defeito, deve se levar em consideração que eles também atingiriam à ruptura nesta posição caso não apresentassem defeitos tipo perda metálica. Para espécimes curvados a frio o compósito de ERFV se mostrou inferior por obter um valor de RSFR < 1, enquanto o compósito ERFC foi melhor para este tipo de espécime com RSF= 1.

Comparando a eficácia destes compostos com base nas posições de ruptura pode-se concluir que o reparo feito a partir de mantas reforçadas por fibra de carbono foi melhor, com exceção do espécime tipo Tê o compósito de ERFC manteve a resistência no defeito (sem ruptura nesta posição) para os espécimes Re, CF, CQ até a ruptura acontecer fora do defeito sobre o tubo nominal, em quanto o compósito ERFV só conseguiu manter a resistência do defeito para o espécime Re, nos outros espécimes a ruptura aconteceu sobre o defeito.

6.6. Espécimes simulados com variação de parâmetros.

Apresenta-se a seguir várias simulações realizadas em cada tipo de duto analisado. A espessura de reparo ERFV ou ERFC é determinada para um valor específico de deformação circunferencial na superfície do defeito.

São simulados defeitos com dimensões e localizações semelhantes aos estudados no capítulo 3. Os resultados do modelo de elementos finitos são comparados com uma equação analítica (3.1.9).

Em todas as simulações foram utilizadas as propriedades do tubo de 12,75 in do espécime Re (MAT 1, Figura 3.2), com um valor de Sy= 244 MPa e de Su= 426 MPa (Tabela 4.2). No modelo numérico foi utilizando uma curva tensão deformação multilinear (Tabela C.5). Para a equação analítica foi utilizado uma curva tensão - deformação bilinear com módulo de encruamento de 2GPa (E_H) obtido a partir da linearização da região plástica do material MAT-1 (Figura 3.2).

A Figura 6.49, a Figura 6.50 e Figura 6.51 apresentam as curvas espessura de reparo - deformação circunferencial, simuladas com espessuras remanescentes na região do defeito iguais a 2, 4 e 6mm respectivamente, para um espécime com redução concêntrica e diâmetros de 325 e 275 mm ($D_{med}=300$).

Para uma pressão de ruptura de 25MPa e defeito com 2mm de espessura remanescente é necessário um reparo de ERFC de 14mm e 70mm de ERFV, para obter uma deformação circunferencial de 0,5% sobre o defeito, assumindo a mesma deformação sobre o reparo (Figura 6.49).

A equação analítica representa satisfatoriamente os resultados de espessura de reparo e deformação circunferencial, obtidos mediante o modelo de elementos finitos, nas três espessuras dos defeitos simulados.



Figura 6.49 - Deformações máximas atuantes no espécime em redução concêntrica na conexão sobre o defeito de espessura remanescentes de 2 mm, diâmetro médio de 300 mm e espessura inicial de 9,7 mm sob uma pressão de 25 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.



Figura 6.50 - Deformações máximas atuantes no espécime em redução concêntrica sobre o defeito de espessura remanescentes de 4 mm, diâmetro médio de 300 mm e espessura inicial de 9,7 mm sob uma pressão de 25 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.



Figura 6.51 - Deformações máximas atuantes no espécime em redução concêntrica sobre o defeito de espessura remanescentes de 6 mm, diâmetro médio de 300 mm e espessura inicial de 9,7 mm sob uma pressão de 25 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.

Para o espécime tipo Tê foi inicialmente realizada uma simulação para determinar a pressão de ruptura do espécime sem defeito, obtendo-se uma pressão de 20 MPa. Para este espécime foram realizadas simulações onde defeitos com espessuras remanescentes de 4 mm e 6 mm (Figura 6.52, Figura 6.53) foram usados. Cada espécime tipo Tê foi simulado com diâmetros de 323 mm e 273 mm e defeitos localizados na região de união dos dois tubos conforme mostrado na Figura 1.1.

A Figura 6.52 apresenta a curva espessura de reparo - deformação circunferencial com espessura de defeito de 4 mm. Os resultados da equação analítica são considerados aceitáveis uma vez que se comparam satisfatoriamente com os resultados alcançados com os modelos de elementos finitos.



Figura 6.52 - Deformações máximas atuantes no espécime Tipo Tê sobre o defeito de espessura remanescentes de 4 mm, diâmetro de 323 mm e espessura inicial de 9,7 mm sob uma pressão de 20 MPa. O material compósito de reparo é uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.

Para um defeito de 6 mm (Figura 6.53) e reparado com ERFC os resultados das equação analíticas e modelos numéricos são satisfatórios, enquanto a equação analítica para o reparo ERFV é mais conservadora para deformações maiores que 1% e menos conservadora para deformações inferiores a 1%.



Figura 6.53 - Deformações máximas atuantes no espécime Tipo Tê sobre o defeito de espessura remanescentes de 4 mm, diâmetro de 323 mm e espessura inicial de 9,7 mm sob uma pressão de 25 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.

A Figura 6.54, a Figura 6.55 e a Figura 6.56 apresentam as curvas espessura de reparo - deformação circunferencial com espessuras remanescentes na região do defeito iguais a 2, 4 e 6mm respectivamente, para um espécime curvado a frio com diâmetro de 322mm, simulados com uma pressão interna de ruptura de 25MPa.

Em todas as espessuras de defeito simulado o reparo ERFC é bem representado pela equação analítica, já para o reparo ERFV os valores de espessura do compósito são consideravelmente menores na equação analítica, apresentando a maior diferença na espessura remanescente de defeito de 2mm. Estas diferenças podem ser atribuídas ao fato de os compósitos ERFV precisar maiores espessuras de reparo. A equação analítica empregada, considera as deformações no reparo e defeito semelhantes, para valores de espessura grandes a hipótese inicial não pode ser cumprida. A norma ISO 24817 [5] recomenda não utilizar espessuras de reparos maiores a D/6 quando seus valores são calculados por meio de equações analíticas.



Figura 6.54 - Deformações máximas atuantes no espécime curvado a frio sobre o defeito de espessura remanescentes de 2 mm, diâmetro de 322 mm e espessura inicial de 9,4 mm sob uma pressão de 25 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.



Figura 6.55 - Deformações máximas atuantes no espécime curvado a crio sobre o defeito de espessura remanescentes de 4 mm, diâmetro de 322 mm e espessura inicial de 9,4 mm sob uma pressão de 25 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.



Figura 6.56 - Deformações máximas atuantes no espécime curvado a frio sobre o defeito de espessura remanescentes de 6 mm, diâmetro de 322 mm e espessura inicial de 9,4 mm sob uma pressão de 25 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.

A Figura 6.57, a Figura 6.58 e a Figura 6.59 apresentam as curvas espessura de reparo - deformação circunferencial com espessuras remanescentes na região do defeito iguais a 2, 4 e 6 mm respectivamente, para um espécime curvado a quente com diâmetro de 323 mm, simulados com uma pressão interna de ruptura de 24 MPa.

A equação analítica apresenta resultados aceitáveis para o reparo ERFC em todas as espessuras de defeito simulados, enquanto a equação analítica no reparo ERFV apresenta maiores diferenças com a redução de espessura de defeito.



Figura 6.57 - Deformações máximas atuantes no espécime curvado a quente sobre o defeito de espessura remanescentes de 2 mm, diâmetro de 323 mm e espessura inicial de 9,6 mm sob uma pressão de 24 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.



Figura 6.58 - Deformações máximas atuantes no espécime curvado a quente sobre o defeito de espessura remanescentes de 6 mm, diâmetro de 323 mm e espessura inicial de 9,6 mm sob uma pressão de 24 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.



Figura 6.59 - Deformações máximas atuantes no espécime curvado a quente sobre o defeito de espessura remanescentes de 6mm, diâmetro de 323 mm e espessura inicial de 9,6 mm sob uma pressão de 24 MPa. Os materiais compósitos dos reparos são uma manta de resina epóxi reforçada por fibra de vidro e outra por fibra de carbono com propriedades elásticas dadas na Tabela 4.2.

6.7. Comparação entre as espessuras de reparo determinados mediante normas e a equação analítica desenvolvida

As normas ASME PCC2 [16] e ISO 24817 [5] apresentam equações idênticas para determinar a espessura de reparo na direção circunferencial em dutos retos, As equações das normas [5, 16] são dadas pela equação 6.1:

$$t_{min} = \frac{1}{\varepsilon_c E_c} \left(\frac{P_{eq}D}{2} - st_s \right)$$

$$6.1$$

onde E_c é o módulo de elasticidade do reparo na direção circunferencial, *s* é o SMYS do duto e t_s a espessura remanescente, esta equação é utilizada para dutos retos.

A Figura 6.60 apresenta as equações utilizadas na determinação dos fatores de incremento das espessuras de reparo ($f_{th,stress}$) para componentes de dutos com redução concêntrica, curvados e tipo Tê. A equação 6.2 apresenta o cálculo de espessuras de reparos para componentes de dutos a partir da espessura de reparo de um duto reto:

$$t_{reparo,componente} = t_{min} * f_{th}$$

Componentes de duto	Fator de espessura de reparo	Descrição
Dutos curvados	1,2	
Dutos tipo Tê	$1,4\left(\frac{1}{2}\left(\frac{D_b}{t_b}\right)^2\frac{t}{D}\right)^{0,25}$	Valor mínimo= 1,2 Valor máximo= 3 D= diâmetro externo do tubo principal (mm) t= espessura do tubo principal (mm) D_b = diâmetro externo do tubo secundário (mm) t_b =espessura do tubo principal (mm)
Dutos em redução concêntrica	$1 + 0,064 \left(1 - \frac{D_r^2}{D^2}\right)$	 D= diâmetro externo do tubo principal D_r= diâmetro externo da redução
Diagrama componente tipo Tê		
Diagrama componente com redução concêntrica	dø	ØDr



A seguir a equação desenvolvida neste trabalho:

$$t_{R} = \frac{P_{u}.D_{m}.F}{2.\varepsilon.E_{R}} - \frac{1}{\varepsilon.E_{R}} [\varepsilon_{y}.E + (\varepsilon - \varepsilon_{y}).E_{H}].t^{*}$$
6.3

o fator F é determinado para cada tipo de componente estudado (ver capitulo 3).

A Tabela 6.6 apresenta os valores necessários para determinar as espessuras de reparo mediante a equação desenvolvida e as encontradas nas normas [5, 16].

6.2

E _R =E _C (MPa)	40400
D ₁ (mm)	325
D ₂ (mm)-para espécimes Re e Tê	275
t _{nom} (9,6mm)	9,6
t*= t _s (4mm)	4
E _h (MPa)	2000
P _{eq} =P _u	$S_u*2*t_{nom}/(D_1)$
E (MPa)	200000
ε _γ (m/m)	SMYS/E
s=SMYS (MPa)	244
R (mm), raio de curvatura CQ	1000
R (mm), raio de curvatura CF	6300

Tabela 6.6 - Dados utilizados no cálculo de espessuras de reparos em dutos com redução concêntrica, tipo Tê e curvados.

As Tabelas 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 apresentam resultados de espessuras de reparos calculados mediante as normas [16,5], a equação desenvolvida [8] e modelos de elementos finitos, para os espécimes com redução concêntrica, curvados a quente, curvados a frio e tipo Tê. As equações 6.1 e 6.3 se diferenciam de duas formas: a equação 6.3 leva em consideração o encruamento da região plástica (E_h); os fatores de concentração de tensões utilizados para cada equação são diferentes.

Os resultados de espessura obtidos mostraram valores mais conservadores para a equação 6.1 [16,5] para os espécimes Re, CF e CQ. Esta diferença é devida principalmente ao tipo de fator (F, f_{th}) utilizado em cada equação. No caso dos espécimes curvados a norma [5] utiliza um único valor $f_{th} = 1,2$, enquanto na equação desenvolvida foi utilizada um fator F que correlaciona as dimensões do componente como o diâmetro e raio de curvatura. Para o espécime em redução concêntrica foi utilizado um fator $D_m=(D_{max}+D_{min})/2$. Para os espécimes tipo Tê foram encontrados valores maiores (ordem de 3 vezes) com a equação desenvolvida. Neste caso, para a equação 6.1 foi usado um valor de $f_{th}= 2,6$, enquanto na equação 6.2 foi utilizado um valor de F= 4,7 que se traduz em um aumento da espessura de reparo. Esta diferença de valores pode ser devida ao fato de que o valor de F=4,7 utilizado na equação desenvolvida, representa um fator de concentração de tensões próximo à seção de união dos dois tubos (com defeito) e o valor $f_{th}=2,6$ pode representar a concentração de tensões para uma seção levemente deslocada desta seção.

ε (m/m)	Modelo de elementos finitos (mm)	Equação desenvolvida (mm)	ASME PCC2 ISO 24817 (mm)
0,014120123	4	4,8	5,6
0,009710692	6	7,0	8,1
0,007426291	8	9,3	10,6
0,006077669	10	11,4	13,0

Tabela 6.7 - Comparação de espessuras de reparo calculados por as normas ASME PCC2, ISO 24817 e a equação desenvolvida para um duto com redução concêntrica reparado com ERFC, sob pressão de 25,4 MPa.

C C	Modelo de	Equação	ASME PCC2
ع (س/m)	elementos	desenvolvida	ISO 24817
(11/11)	finitos	(mm)	(mm)
0,0095528	5	6,5	11,8
0,00541228	10	11,6	20,8
0,00423495	15	14,8	26,6
0,0034198	20	18,4	33,0

Tabela 6.8 - Comparação de espessuras de reparo calculados por as normas ASME PCC2, ISO 24817, a equação desenvolvida e modelo de elementos finitos para um duto curvado a quente reparado com ERFC, sob pressão de 23,5 MPa.

	Modelo de	Equação	ASME PCC2
ε (m/m)	elementos	desenvolvida	ISO 24817
	finitos	(mm)	(mm)
0,01491792	5	4,4	6,1
0,00623922	10	10,8	14,6
0,00451244	12	15,0	20,2

Tabela 6.9 - Comparação de espessuras de reparo calculados por as normas ASME PCC2, ISO 24817, a equação desenvolvida e modelo de elementos finitos para um duto curvado a frio reparado com ERFC, sob pressão de 25 MPa.

6	Modelo de	Equação	ASME PCC2
ع (س/س)	elementos	desenvolvida	ISO 24817
(11711)	finitos	(mm)	(mm)
0,01015155	20	30,2	13,3
0,00788153	30	38,9	17,2
0,00636694	40	48,2	21,2
0,00481388	60	63,8	28,1

Tabela 6.10 - Comparação de espessuras de reparo calculados por as normas ASME PCC2, ISO 24817, a equação desenvolvida e modelo de elementos finitos para um duto tipo Tê reparado com ERFC, sob pressão de 19 MPa.

As Tabelas 6.7, 6.8, e 6.9 apresentaram valores de espessura de reparo mais conservadores para a equação das normas [5, 16] comparado com a equação desenvolvida. Assim tendo como padrão os valores de espessura obtidos nos modelos de elementos finitos, a equação desenvolvida apresentou valores mais próximos aos obtidos nos modelos de elementos finitos para os espécimes curvados a frio, curvados a quente e em redução concêntrica.