

## 3

### Modelagem Numérica

Com a finalidade de compreender e otimizar o comportamento do duto reparado e propor modelos numéricos que melhor o representem, foi utilizado o método dos elementos finitos como ferramenta de simulação.

#### 3.1

##### Introdução

A modelagem pelos elementos finitos se inicia pela discretização de uma dada geometria em um número finito de elementos. Esta discretização permite a resolução do problema impondo um sistema de equações, que é aplicável a quase qualquer estrutura por mais complicada que esta seja, mediante um grande número de operações de natureza repetitiva que pode ser adaptada a uma programação numérica para ser resolvida por um computador. Para cada elemento obtido da discretização acha-se uma matriz de rigidez que relaciona as forças com as deformações; logo se procede à montagem da matriz de rigidez total para a estrutura. Em geral, dado que o método de cálculo mediante elementos finitos é um procedimento aproximado, a precisão requerida aumenta diretamente com o número de elementos usados. É recomendável, em alguns casos, utilizar mais de uma discretização, com a finalidade de comparar e obter melhores resultados.

As cargas externas aplicadas à estrutura se substituem por sistemas de forças equivalentes concentradas nos nós. Os processos numéricos vão desde análises lineares até complicadas análises não lineares. Estes são necessários para aplicações onde se precisa estudar a falha do componente após a ocorrência do escoamento. Nas análises não lineares se utilizam métodos incrementais e iterativos com o objetivo de reduzir ao máximo a diferença entre as forças internas e externas nos elementos para que elas fiquem dentro de intervalos aceitáveis. Quando isso acontece, uma próxima etapa de incremento de carga é realizada, e neste contexto existem métodos de convergência numérica tais como o de Newton-Raphson ou o método de comprimento de arco.

Todo programa de elementos finitos segue três etapas para o cálculo [18]:

**Pré-processamento**, o qual tem o objetivo de discretizar a geometria do modelo mediante nós e elementos.

**Solução** é a parte interna do processo onde se resolvem os sistemas de equações a partir dos dados introduzidos, o qual inclui a formação das matrizes de rigidez dos elementos finitos, montagem da matriz de rigidez, aplicação das condições de contorno, cálculo dos deslocamentos e cálculo de tensões.

**Pós-processamento**, onde os resultados são analisados e mostrados.

Neste trabalho foi utilizado o programa comercial Ansys 10.0. Alguns modelos foram analisados até a ruptura, necessitando então a inclusão de análises não lineares. Isto aumentou de maneira considerável o trabalho computacional. Desta forma, foi necessária a criação de modelos distintos para que fossem obtidos resultados aceitáveis. Os modelos criados agrupam-se em modelos planos 2D, axissimétricos e modelos 3D.

A modelagem 2D usando o estado plano de deformações possibilita a análise de situações elasto-plásticas na região dos defeitos, onde a deformação longitudinal é desprezível quando comparada à deformação circunferencial.

A modelagem 3D possibilita a obtenção do comportamento das tensões e deformações em um estado triaxial, mas devido ao peso computacional que acontece quando os elementos atingem estados elasto-plásticos, pode ser necessário utilizar simetrias e discretizações algumas grosseiras.

A modelagem axissimétrica é útil para determinar o efeito que tem os extremos do reparo com relação à concentração de tensões na parede de duto.

## 3.2

### Especificações para a Análise Não Linear

#### 3.2.1

##### Análise Incremental não Linear

Devido ao estudo da ruptura do modelo é importante a boa aplicação dos incrementos de carga, já que quando a pressão aplicada tem o valor próximo da pressão que produz a ruptura, estes incrementos devem ser muito pequenos para tentar lograr a convergência. Para que aconteça o equilíbrio num corpo, o vetor das forças externas deve ser equilibrado pelo vetor das forças internas da estrutura num instante de tempo  $t$ , o que é representado pela equação [19]:

$${}^tR - {}^tF = 0$$

Uma análise incremental deve obter a solução da condição de equilíbrio num instante  $t + \Delta t$  a partir da solução conhecida no instante  $t$ , procurando assim  ${}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F = 0$ . Este pode ser representado pela igualdade dos incrementos das forças externas acontecidas nos instantes  $t$  e  $t + \Delta t$ , e o vetor incremento das forças internas originadas pelo incremento das forças externas

$$\Delta R = \Delta F$$

Então a matriz de rigidez  $K$ , correspondente às condições geométricas e ao material da estrutura no instante  $t$ , é utilizada para avaliar o vetor do incremento das forças internas ( $\Delta F$ ) com o vetor incremento dos deslocamentos ( $U$ ), no instante  $t$ :

$${}^t K.U \cong {}^{t+\Delta t} R - {}^t F$$

A equação anterior é a condição de equilíbrio que se procura para o instante  $t + \Delta t$ , no entanto, devido a não linearidade da matriz  ${}^t K$ , é necessário utilizar-se um processo iterativo para garantir-se a verificação da condição de equilíbrio no instante  $t + \Delta t$ . Desta forma, a representação da equação de equilíbrio na iteração (k-1) fornece:

$${}^{t+\Delta t} K^{(k-1)} U^{(k)} \cong {}^{t+\Delta t} R - {}^t F^{(k-1)} \quad k=1,2,\dots,n$$

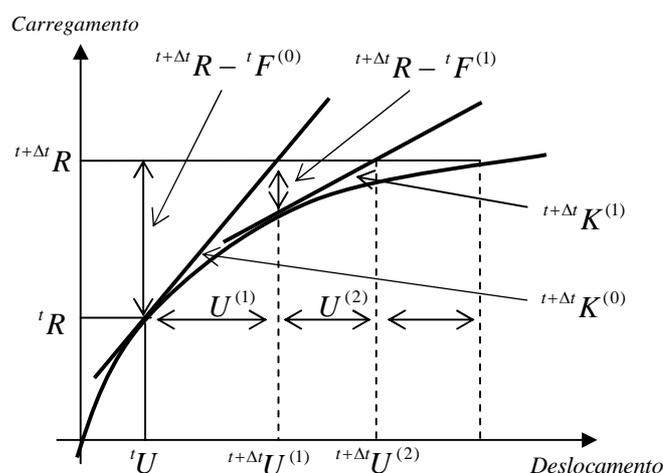


Figura 3.1 Método de Newton-Raphson [19].

Entre os métodos utilizados pelo programa Ansys para a obtenção da verificação da condição de equilíbrio na solução dos problemas não lineares, encontra-se o método iterativo de Newton-Raphson. Nesta aproximação, a carga é subdividida em incrementos, que podem ser aplicados sobre vários passos de carga. Antes de cada solução, o método de Newton-Raphson compara a diferença do vetor de carga, que é a diferença entre as forças internas (cargas que correspondem às tensões do elemento), e as cargas aplicadas. O programa realiza uma solução linear, usando a

diferença de cargas, e comprova sua convergência. Se a convergência não é alcançada, o vetor de diferença de carga é novamente avaliado, a matriz rigidez é atualizada, e a nova solução é obtida, este processo iterativo continua até a convergência [20].

O programa conta com ferramentas que fazem mais eficaz o trabalho de procurar a convergência, tais como “linha de procura”, “passo de carga automático”, e “bisseção”, os quais podem ser ativados se o usuário achar conveniente. Se a convergência não é alcançada, então o programa tenta resolver com um menor incremento de carga.

Em algumas análises estáticas não lineares em que é utilizado o método de Newton-Raphson, a matriz de rigidez pode chegar a ser não única, provocando sérios problemas de convergência. Nestes casos o programa permite ativar uma alternativa para a iteração, que é o método de Comprimento de Arco, o qual faz com que as iterações de equilíbrio do método Newton-Raphson convirjam ao longo de um arco, ajudando a prevenir a divergência, já que trabalha controlando a energia de deformação, evitando as soluções biunívocas [20].

A análise não linear tem três níveis de operações:

- O primeiro nível consiste em que o usuário do programa defina explicitamente os passos de carga sobre um intervalo de tempo, assumindo que as cargas variam linearmente dentro dos passos de carga.
- Dentro de cada passo de carga, o operador pode fazer que o programa realize várias soluções (sub-passos ou tempo de passo) para aplicar a carga gradualmente.
- Em cada sub-passo, o programa pode realizar um número de iterações de equilíbrio para obter a convergência.

### 3.2.2

#### Não Linearidades nos Dutos

As não linearidades estudadas são:

- Não linearidade geométrica, que ocorre quando se trabalha com grandes deslocamentos.
- Não linearidade do material, que ocorre quando o comportamento do material é não linear elástico ou elástico linear e plástico.

Foi feito um estudo simples da influência que tem a inclusão da não linearidade geométrica na análise numérica em dutos com pressão interna. Para este foram feitos dois modelos de dutos sem defeito que trabalha com deformação plana. No primeiro é incluída a não linearidade geométrica e a não linearidade do material. No segundo modelo, apenas se trabalha com a não linearidade do material. Ambos simulam um duto de 76,2mm de diâmetro e 2mm de parede, através do estado plano de deformações. Modelos que trabalham com grandes deslocamentos, próximo a ruptura do modelo, experimentam diminuição da espessura da parede, que também acontece no corpo de prova num teste a tração, onde a área da sua seção transversal diminui consideravelmente. Então, o modelo que inclui grandes deslocamentos trabalha com a curva real tensão vs deformação do material. A curva real considera a redução de área do material, já que utiliza a área real no cálculo da tensão, (a curva de engenharia não considera esta diminuição da área ao calcular a tensão com a área inicial do corpo de prova). Porém, a modelagem que não considera grandes deslocamentos trabalha com a curva de engenharia do material.

Para relacionar a curva de engenharia com a curva real se utilizam as equações:

$$\sigma_v = \sigma(1 + e) \qquad \varepsilon = \ln(e + 1)$$

Sendo “ $e$ ” a deformação de engenharia. Em ambos modelos se trabalha com a curva bilinear (elasto-plástica de encruamento linear), como se mostra mais adiante,

na figura 3.5. A resistência a tração ( $S_u$ ) na curva de engenharia é de 456 MPa (tabela 3.1), e na curva real é 547.2 MPa. Nos modelos se considera a ruptura quando o primeiro elemento alcança sua resistência a tração.

Na maioria das equações teóricas se utiliza os dados da curva de engenharia, pelo que se faz também a comparação com os valores obtidos da equação  $\sigma_c = PD/2t$  que considera a falha quando  $\sigma_c = S_u$ , segundo o critério de Tresca, pelo que se espera uma pressão de ruptura menor que a pressão de ruptura obtida mediante os elementos finitos usando pequenos deslocamentos (numericamente se fez o análise segundo o critério de Mises), já que o critério de Tresca é mais conservativo que o critério de Mises (neste exemplo, tem uma diferencia de aproximadamente 1MPa). O comportamento dos modelos são mostrados na figura 3.2.

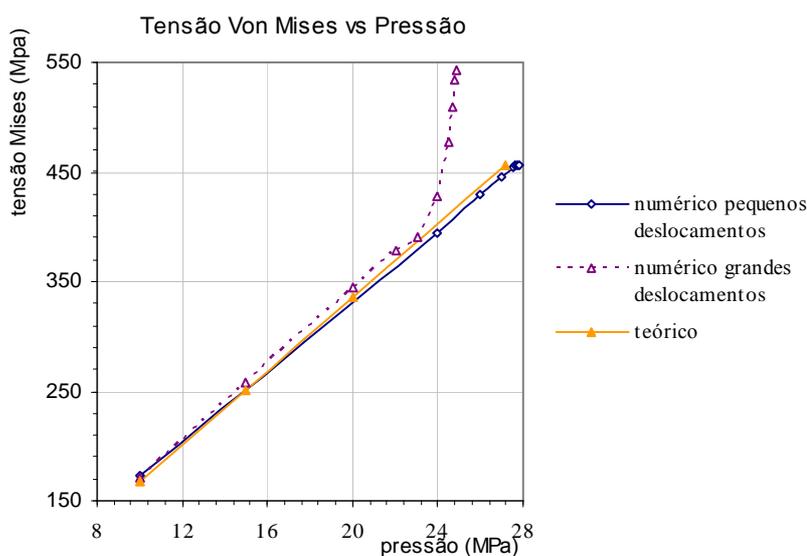


Figura 3.2 – Não linearidades no duto sem defeito

Na figura se pode ver que os comportamentos são similares até um ponto perto da pressão de ruptura, onde o modelo com grandes deslocamentos experimenta uma diminuição acentuada da parede do duto e a tensão aumenta consideravelmente com cada pequeno incremento de pressão.

As semelhanças mostradas para as pressões de ruptura e para o comportamento predito pelo modelo que não inclui grandes deslocamentos e pela equação teórica são importantes para a continuação deste trabalho. Observa-se na figura 3.2 que ambas modelagens apresentam resultados semelhantes (com uma diferença nas pressões de ruptura de 0.4 MPa). Assim resolveu-se trabalhar com os dados da curva de engenharia do material, e pequenos deslocamentos para se facilitar a modelagem analítica que será desenvolvida no capítulo 4.

A diferença entre as pressões de ruptura entre as duas modelagens numéricas da figura 3.2, pode depender de vários fatores, como o aumento de diâmetro, entre outros, que pelas limitações deste trabalho não serão estudados.

### 3.3

#### **Descrição da Modelagem Numérica**

Nesta seção apresenta-se uma descrição do processo de modelagem utilizado no programa.

#### **Tipo de Elemento Utilizado**

A escolha dos elementos é feita de acordo com o tipo de análise a realizar e a geometria do modelo.

Para os modelos 2D os elementos devem ter as seguintes características:

- Deformação plana, conseguindo assim melhor aproximação com a realidade na ruptura, porque na região do defeito as deformações longitudinais são

pequenas, podendo ser desprezíveis quando comparadas às deformações circunferenciais.

- Possibilidade de plastificação
- Possibilidade de suportar grandes deformações

Dois tipos de elementos apresentam estas características:

1. Elemento de quatro nós e dois graus de liberdade por nó: sua variante triangular é recomendada para modelos que têm malhas regulares.

2. Elemento de oito nós com dois graus de liberdade por nó: tem bom comportamento na sua variante triangular e é bom para modelos com malhas regulares e irregulares.

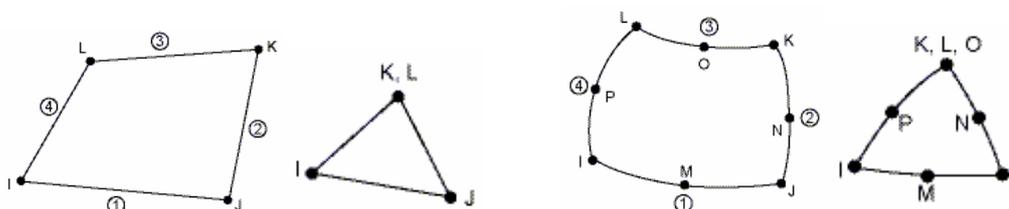


Figura 3.3 - Elementos 2D [20].

Para os modelos planos desenvolvidos, os quais apresentam malhas regulares, utilizou-se o elemento de quatro nós que representa menor trabalho computacional. O programa Ansys tem os elementos Plane 42 e Plane 182 com estas características, sendo o segundo mais indicado para aplicações em materiais incompressíveis. O elemento utilizado foi o Plane 42.

Para o modelo 3D pode-se utilizar:

1. Elemento de oito nós e três graus de liberdade por nó: tem variante prismática e tetraédrica. As malhas com tetraedros não são muito recomendáveis para este tipo de elemento, sendo bom para modelos com malhas regulares.

2. Elemento de vinte nós com três graus de liberdade por nó: tem variante prismática, piramidal e tetraédrica. Este elemento é bom para modelos com malhas irregulares.

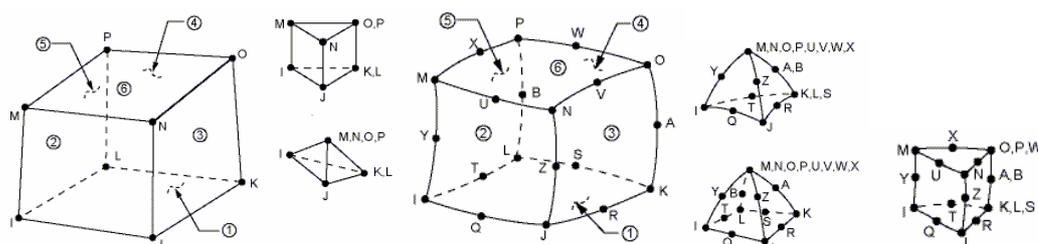


Figura 3.4 – Elementos 3D [20]

Resolveu-se usar o primeiro tipo de elemento trabalhando com malhas regulares. No Ansys foi escolhido o elemento Solid 95.

Para o modelo axissimétrico foi utilizado o mesmo elemento dos modelos 2D.

## Materiais

A definição das propriedades dos materiais para a modelagem por elementos finitos é feita segundo o tipo de análise que se pretende fazer. Na maioria dos modelos desenvolvidos se utiliza a curva de engenharia do material (fato que será sustentado mais adiante), a qual é simplificada em: (i) uma curva de engenharia bilinear (com encruamento linear), e (ii) uma curva de engenharia multilinear.

São utilizadas as propriedades de dois tipos de tubos e dois tipos de chapas. No primeiro conjunto tubo-chapa, trabalha-se com a curva bilinear. Para o segundo conjunto tubo-chapa foram feitos ensaios de tração para determinar as propriedades mecânicas dos materiais (Apêndice B).

As curvas bilineares são obtidas prolongando a reta elástica com inclinação  $E$ , e a reta plástica com inclinação  $E'$ , como se mostra na figura 3.5.

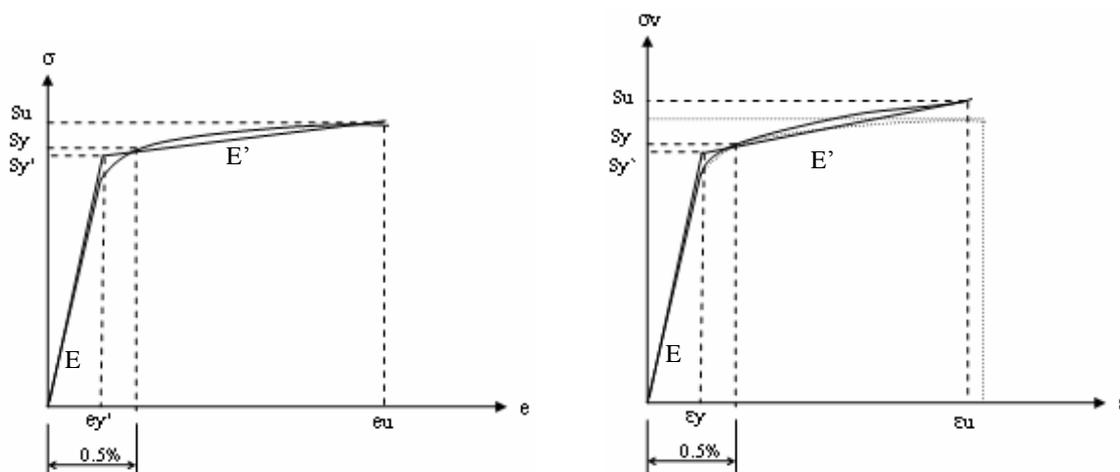


Figura 3.5 – Curvas bilineares tensão vs deformação de engenharia e real

Apresentam-se os dados dos materiais utilizados:

Tabela 3.1 –Propriedades mecânicas do duto e chapa 1 (Apêndice B e referencia [21])

	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)	E (GPa)
Duto	387	456	0.19	20	200
Camada metálica	175.8	279	0.088	36	200
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36	4.7

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 – bilinear (Apêndice B e referencia [21])

	Sy' (MPa)	Su (MPa)	ey' (%)	eu (%)	E (GPa)
Duto	262	310	0.131	34	200
Camada metálica	176.2	295	0.08	35	200
Adesivo	42.3	42.3	0.9	36	4.7

Os coeficientes de Poisson foram  $\mu=0.29$  para todos os aços e  $\mu=0.35$  para o adesivo. As propriedades do adesivo foram obtidas do catálogo do fabricante [21].

### Duto e chapa 2, multilinear

Utiliza-se uma curva multilinear com a maior quantidade de pontos na região elasto-plástica, que se estende entre o limite de proporcionalidade até o limite ao escoamento. Isto foi feito para permitir uma melhor comparação com os resultados

experimentais, pois nesta região se apresentam grandes variações da tensão com um pequeno incremento da deformação. O módulo de elasticidade dos aços foi considerado com valor  $E=200\text{GPa}$  e no adesivo foi  $E=4.7\text{GPa}$

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 (multilinear)

Ponto	Duto		Camada metálica	
	e (%)	$\sigma$ (MPa)	e (%)	$\sigma$ (MPa)
1	0.0475	95	0.05	100
2	0.0742	148,4	0.139	140.55
3	0.109	219.73	0.34	171.18
4	0.127	228.92	0.5	177.66
5	0.173	242.53	2.8	220
6	0.253	253.28	4.3	240
7	0.321	257.19	13	280
8	0.4	260.12	26	295
9	0.5	262.64	35	295
10	3.57	280	-	-
11	17	310	-	-
12	34	310	-	-

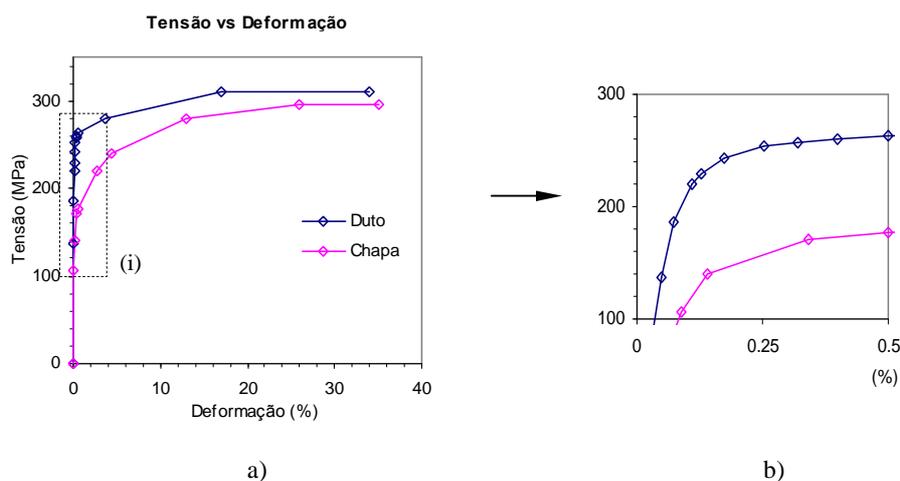


Figura 3.6 - Curva multilinear tensão vs deformação e ampliação da região (i)

## Modelagem

Na modelagem de uma estrutura que tem vários componentes, se deve prestar atenção ao tipo de união que vão ter os componentes. Os componentes modelados são: duto, camadas metálicas e adesivo, os quais no modelo foram colados,

trabalhando como um só corpo com distintas propriedades, fato que tem que ser corroborado pelos testes experimentais. Tal hipótese foi feita porque se considera que não existe deslizamento entre os componentes no funcionamento normal desta aplicação. Caso aconteça o deslizamento, este será considerado quando o adesivo tiver atingido seu limite de ruptura ao cisalhamento, originando assim a falha do modelo.

Na modelagem do defeito não se considera a influência da concentração das tensões causada pela mudança abrupta da geometria entre as regiões sem defeito e com defeito. Segundo os resultados de Jorge L. C. Diniz [10], a concentração de tensões não tem relevância quando se trata de uma análise onde se estuda o colapso plástico da região do defeito.

Nas figuras 3.7 e 3.8 apresentam-se as dimensões dos modelos 2D (com os dois tipos de geometrias de defeito) e axissimétrico respectivamente.

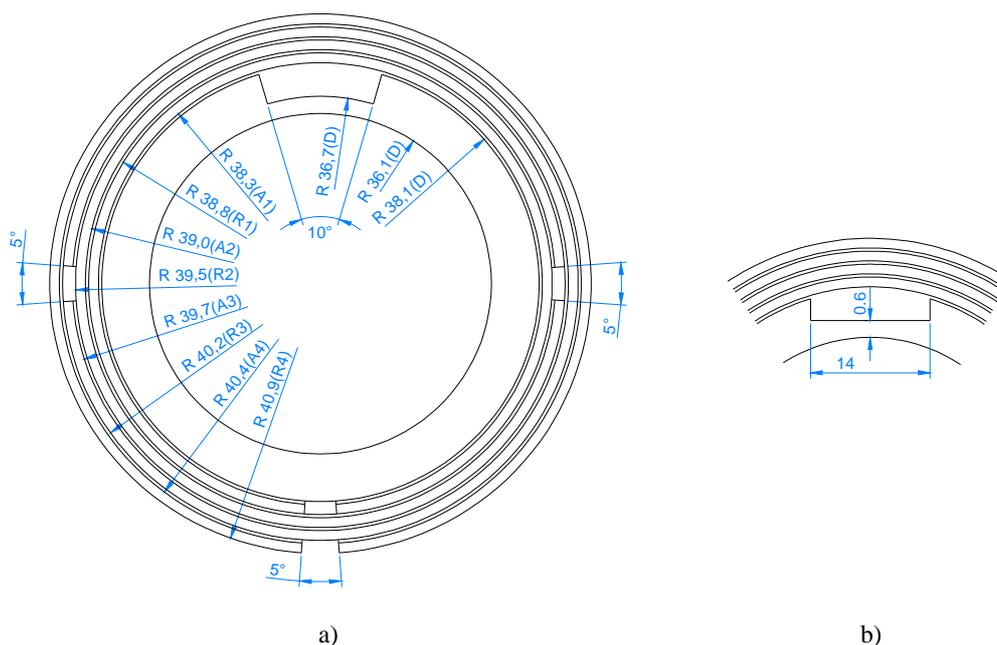


Figura 3.7 – Dimensões na modelagem 2D

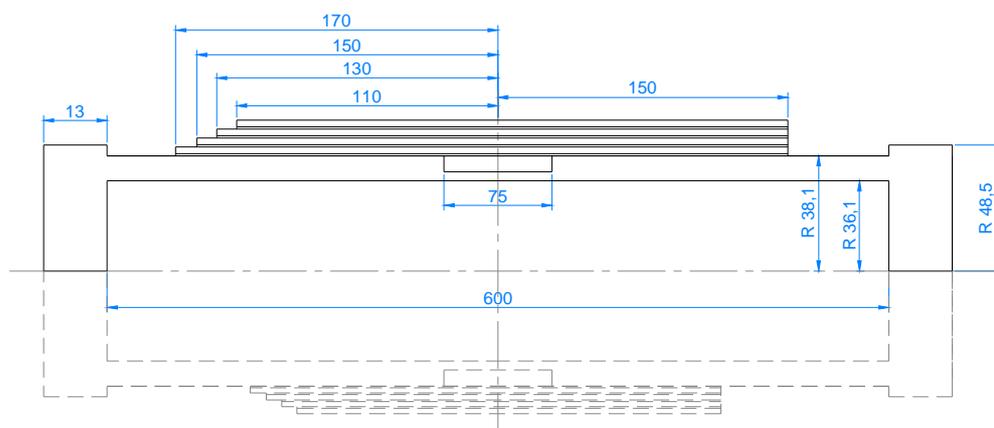
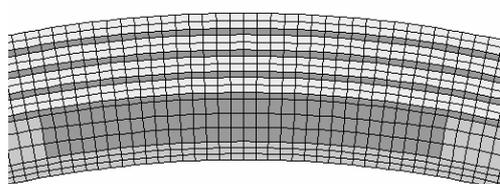


Figura 3.8 – Dimensões na modelagem axisimétrica

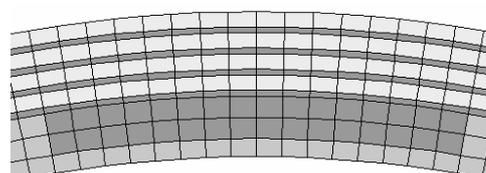
Um modelo 3D foi feito com as dimensões dos modelos anteriores, considerando simetria transversal, na metade do defeito e considerando uma terminação escalonada do reparo, a qual foi modelada elasticamente. No outro modelo 3D, não foram modeladas as interrupções das camadas metálicas, e modelou-se  $\frac{1}{4}$  do duto (simetria longitudinal e simetria transversal), considerando-se uma terminação do reparo sem escalonamento. Este modelo trabalha elasto-plásticamente.

### Malha

As malhas devem ser feitas o mais homogeneamente possível. No caso da simulação de cilindros, se recomenda usar três elementos na parede do duto [10]. Então, no modelo 2D foram testados dois tipos de malhas, com 10 440 e 3 190 elementos respectivamente, como se mostra na figura 3.9.



Modelo 2D-A



Modelo 2D-B

Figura 3.9 – Malhas testadas.

Os resultados mostraram que não existiu nenhuma diferença entre os resultados obtidos nos dois modelos, ambos apresentam a mesma convergência quando se tenta alcançar seu limite de ruptura, mesmo quando os modelos apresentam um ou dois elementos na região do defeito.

### Condições de Contorno

Para o modelo 2D foram utilizadas duas restrições de deslocamento como indicado na figura 3.10.

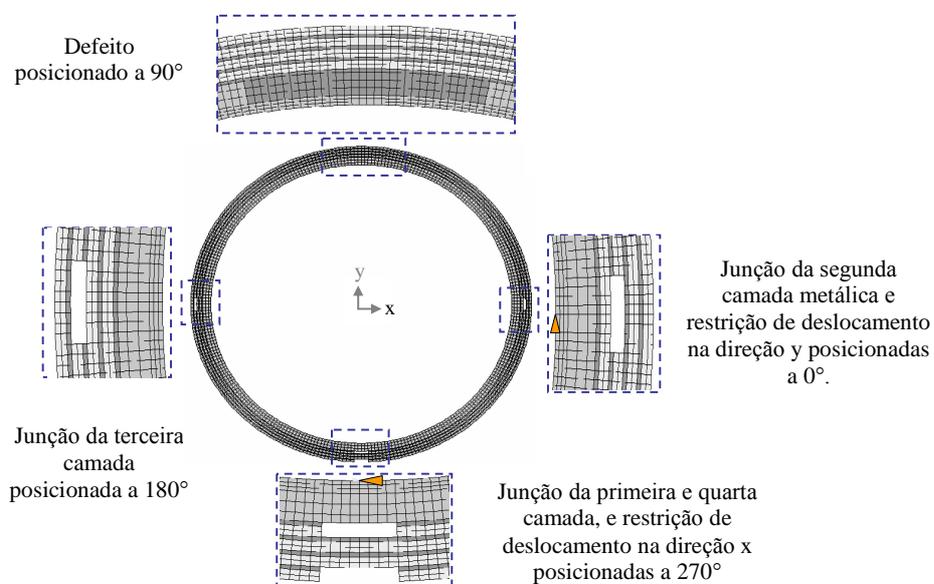


Figura 3.10 – Detalhes da modelagem 2D

As restrições impostas ao modelo 3D se mostram na figura 3.11. A tensão axial imposta é proporcional à pressão interna, e é aplicada para simular o tampo [10].

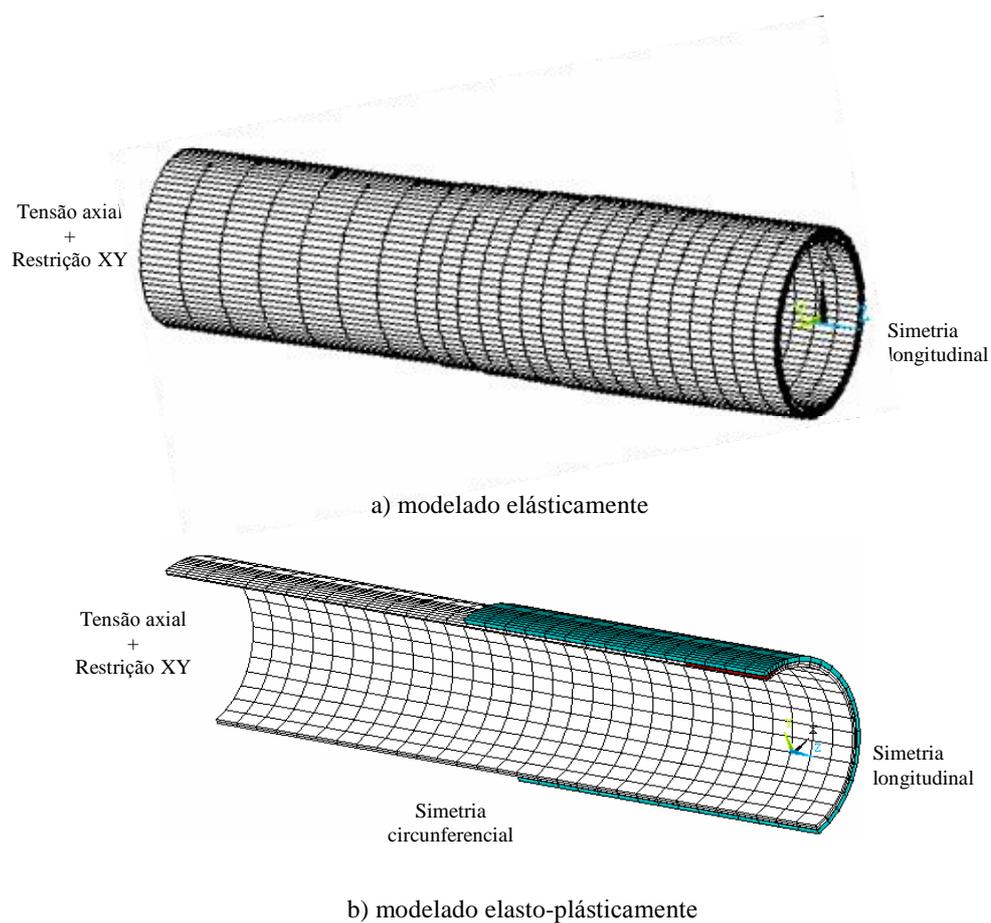


Figura 3.11 – Detalhes na modelagem 3D.

Para o modelo axissimétrico se colocam duas restrições no meio da parede do duto na direção longitudinal do mesmo, e simetria BC (opção do Ansys para modelos axisimétricos) nos tampos do duto.

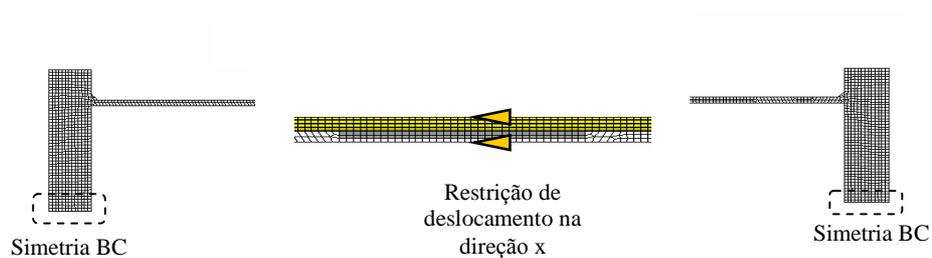


Figura 3.12 – Detalhes na modelagem axisimétrica.

## Aplicação do carregamento e controle da solução

Mediante o “controle da solução” se pode aplicar a pressão interna nos modelos com comportamento elasto-plástico de forma apropriada para conseguir a convergência. Cada carga aplicada foi dividida em 30 passos, e cada passo foi dividido em 1000 sub passos, com a opção de tempo ativada para que o programa não faça todos os passos caso não seja necessário. Este também foi programado para fazer até 1000 iterações em cada sub passo para tentar convergir. Isto se traduz em termos de saltos ou incrementos de pressão ( $\Delta P$ ) na região elasto-plástica e na região próxima á ruptura. Com a opção de tempo desativada  $\Delta P = P/30000$ , já com a opção de tempo ativada,  $\Delta P$  é ainda menor.

### 3.4

#### Análise dos Resultados Numéricos

##### 3.4.1

#### Distribuição das Tensões em um Duto com Reparo

A distribuição das tensões é bastante irregular devido à geometria complexa e ao uso dos distintos materiais no reparo. Assim, o estudo é feito identificando as regiões mais solicitadas onde à integridade estrutural do duto pode estar afetada, ou para que se possa otimizar o trabalho de reparo. Na figura 3.13 se identificam tais regiões, as quais vão ser posteriormente estudadas utilizando modelos simplificados.

A região mais importante neste estudo é a região do defeito, onde as tensões equivalentes apresentam valores altos. Nos extremos das camadas metálicas, perto das junções circunferenciais, os valores das tensões circunferenciais são pequenos, devido ao comprimento de sobreposição que não é o suficiente para que o adesivo transmita a carga à camada metálica. Porém, é onde o adesivo apresenta as maiores

tensões cisalhantes. Outra região importante é a extremidade longitudinal do reparo, onde pode ocorrer concentração de tensões.

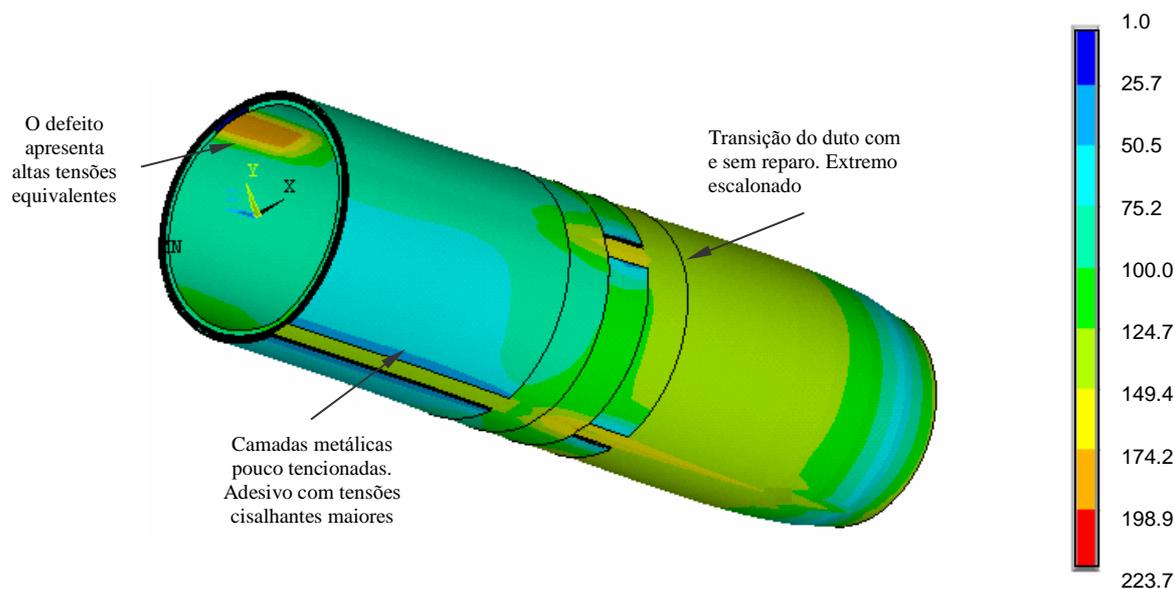


Figura 3.13 – Duto carregado, modelo linear 3D (escala de tensões Von Mises em MPa).

### 3.4.2

#### Estudo da Tensão Circunferencial

Nas figuras 3.14 e 3.15 se identificam regiões que dependem do comportamento elástico ou plástico que ocorre em cada uma das camadas, sejam camadas do reparo, do adesivo ou do tubo com defeito. Os dados das tensões mostradas foram coletados em pontos dos componentes sobre a posição radial do centro do defeito. Esta modelagem é feita com dados dos materiais mostrados na tabela 3.1, as dimensões se mostram na figura 3.7 e a análise é feita considerando deformação plana.

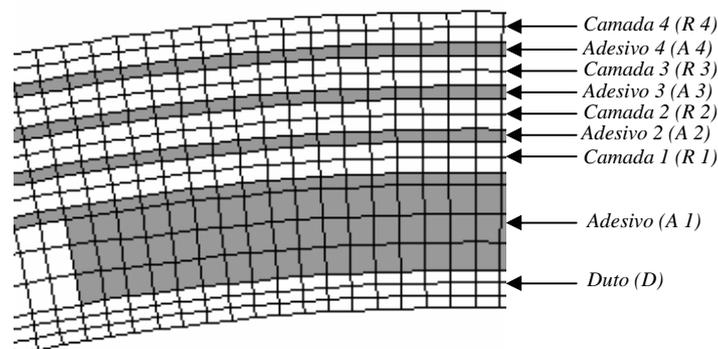


Figura 3.14 – Componente da modelagem numérica.

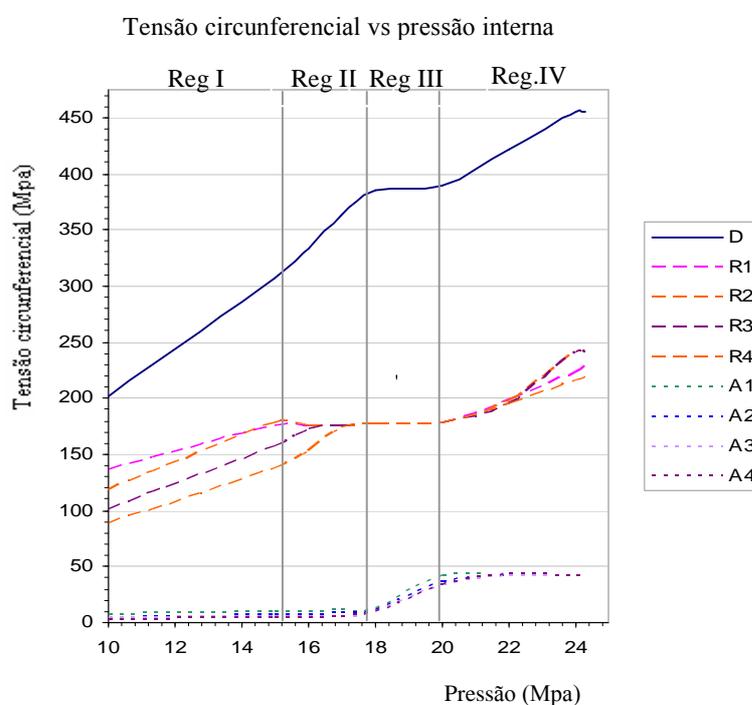


Figura 3.15 – Regiões do comportamento.

As quatro regiões do comportamento mostradas na figura 3.15 são:

- Região I: Nesta região o duto e os componentes do reparo trabalham no regime elástico, entendendo-se desde uma pressão interna igual a zero até uma pressão na qual o primeiro dos componentes atinge seu limite ao escoamento (no caso, a lâmina de reparo mais interna). O aporte de carga de cada

componente é proporcional a seu módulo de elasticidade. Em consequência, o adesivo tem aporte de carga desprezível.

- Região II: Inicia-se a plastificação sucessiva das camadas metálicas, onde seu aporte de incremento de carga diminui consideravelmente. Os incrementos de pressão são resistidos pelo aumento da tensão que ocorre no material do tubo na região do defeito. Os aportes de carga nas lâminas são muito pequenos e dependem do pequeno encruamento do seu material. Esta região se estende desde o início da plastificação dos reparos até o início da plastificação do duto.
- Região III: Inicia-se a plastificação do duto, e com as camadas metálicas já plastificadas, aumenta o aporte de carga no adesivo, o qual tem módulo de elasticidade maior que o módulo com que trabalham o duto e as camadas metálicas na região plástica (encruamento). A região III vai desde a plastificação do duto até a plastificação do adesivo.
- Região IV: Local em que o duto e os componentes do reparo trabalham no regime plástico. Esta região se estende até a ruptura de algum componente do conjunto. Considera-se a falha do modelo quando algum componente atingiu sua tensão de ruptura.

Na figura 3.16 mostra-se a plastificação sucessiva dos componentes do reparo na região do defeito.

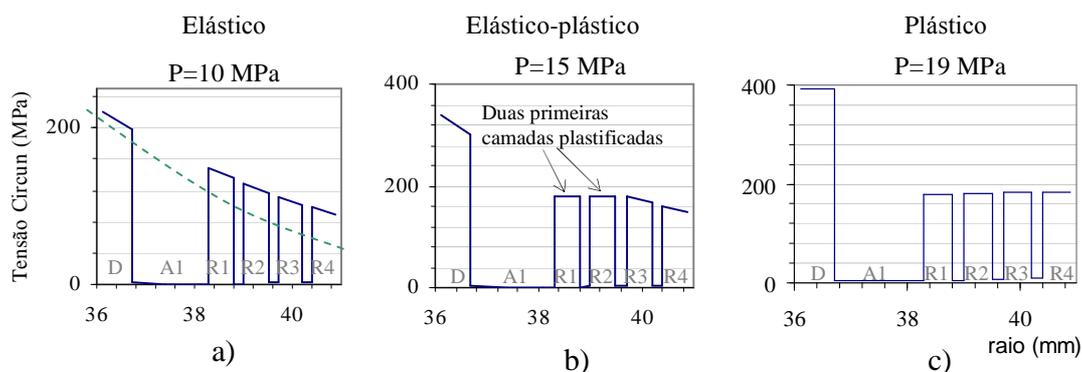


Figura 3.16 – Transição elasto-plástica na região do defeito

Na figura 3.16.a se apresenta a distribuição das tensões circunferenciais que ocorrem nas paredes do duto, das camadas metálicas e do adesivo. Verifica-se comportamento similar à distribuição de tensões de um duto de parede espessa mostrada na curva verde pontilhada. Isto que indica que o componente se comporta como um único corpo com propriedades distintas a um duto de parede espessa de um único material. Este comportamento foi útil na dedução da modelagem matemática.

Nas figuras 3.16.b e 3.16.c as camadas metálicas vão se plastificando, até que todo o componente trabalhe no regime plástico.

### 3.4.3

#### Comportamento das Tensões com a Variação de Parâmetros nos Modelos Numéricos

O comportamento que pode ter o duto com reparo usando multicamadas metálicas coladas pode depender de vários fatores. Nesta seção se faz a análise de modelos que têm quatro camadas metálicas de 0.5mm no reparo através da variação dos seguintes parâmetros:

- Diferentes profundidades de defeito
- Diferentes materiais no reparo
- Diferentes geometrias de defeito

### 3.4.3.1

#### Diferentes Profundidades de Defeito

Neste item se modela uma profundidade de defeito de 0,6mm (onde  $C=0,7$  em defeitos longos sem a influência das paredes, definido na seção 2.1.2), com as mesmas propriedades do modelo anteriormente estudado ( $C=0,3$ ) para quatro camadas no reparo. A figura 3.17 mostra, esquematicamente, os dois defeitos modelados.

Os resultados apresentados na figura 3.18 mostram que os comportamentos são similares, podendo-se identificar as regiões descritas para o modelo com profundidade de 1,4mm. O modelo com profundidade de defeito igual a 0.6mm suporta pressões muito maiores do que a capacidade de um duto novo (33.5MPa e 24MPa respectivamente), devido ao super-dimensionamento da espessura do reparo em relação à pequena profundidade do defeito. A análise é feita considerando deformação plana, com as propriedades indicadas na tabela 3.1 e na figura 3.7.

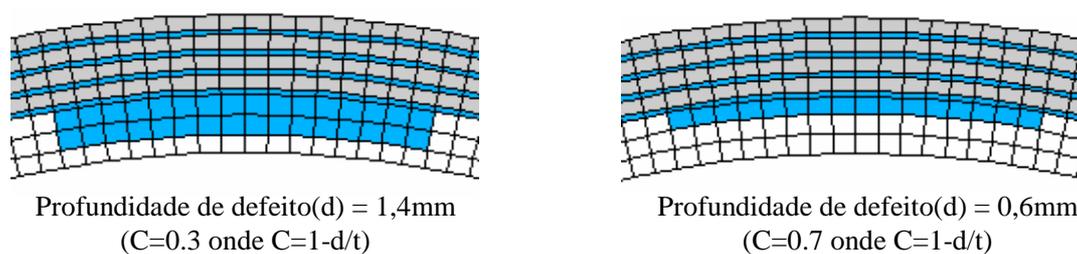


Figura 3.17 – Modelos com diferente profundidade de defeito.

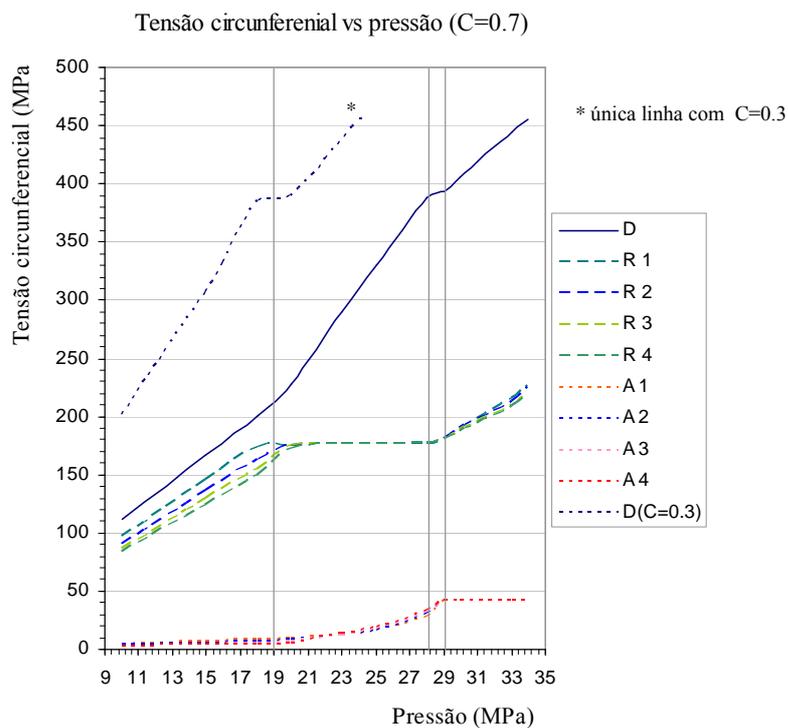


Figura 3.18 – Comportamento das tensões para o modelo com C=0.7 e sua comparação com o modelo de C=0.3.

### 3.4.3.2

#### Diferentes Materiais de Reparo

Neste item se muda o material utilizado nas camadas metálicas e se mantém o mesmo material e geometria para o duto (figura 3.7).

Propriedades Mecânicas	$S_y$ (MPa)	$S_u$ (MPa)	$e_u$ (%)
Reparo, modelo anterior	175,8	279	36
Reparo, novo modelo	387	456	20

Na figura 3.19 se apresentam as curvas para a tensão circunferencial vs pressão interna do modelo com o novo material no reparo. Deve-se notar que no modelo, o

duto e o novo reparo são constituídos de materiais com propriedades mecânicas idênticas.

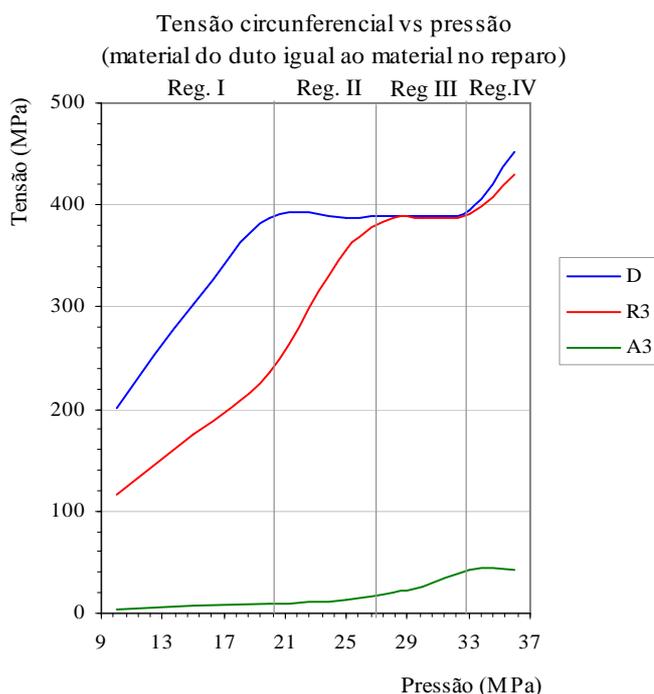


Figura 3.19 – Comportamento das tensões num reparo com as mesmas propriedades mecânicas que o duto (na figura é indicado comportamento da terceira camada metálica e terceira camada de adesivo que tem comportamento equivalente às outras camadas respectivamente).

Através da figura 3.19 se identificam quatro regiões similares às definidas anteriormente, com variações nos seus limites, mas com as mesmas tendências apresentadas, as quais são:

- Região I: O duto e o reparo apresentam aportes de carga proporcionais ao incremento da pressão, até que o duto atinge seu limite de escoamento.
- Região II: Quase toda à suportação da carga   feito pelas camadas metálicas, já que o duto trabalha no regime plástico, até que, também, o reparo atingia seu limite de escoamento.

- Região III: Com o reparo e o duto plastificado a suportação de carga é feito pelo adesivo que rapidamente plastifica.
- Região IV: O duto e o reparo encruam até que ocorre a ruptura.

### 3.4.3.3

#### Diferentes Geometrias de Defeito

Nesta seção se estudará o efeito da variação da geometria transversal do defeito (figura 3.20) em relação ao comportamento do modelo já estudado. As três geometrias do defeito têm a mesma profundidade máxima e o mesmo comprimento circunferencial. Além do defeito, todas as outras propriedades dos modelos são iguais. A análise é feita com estado plano de deformações.

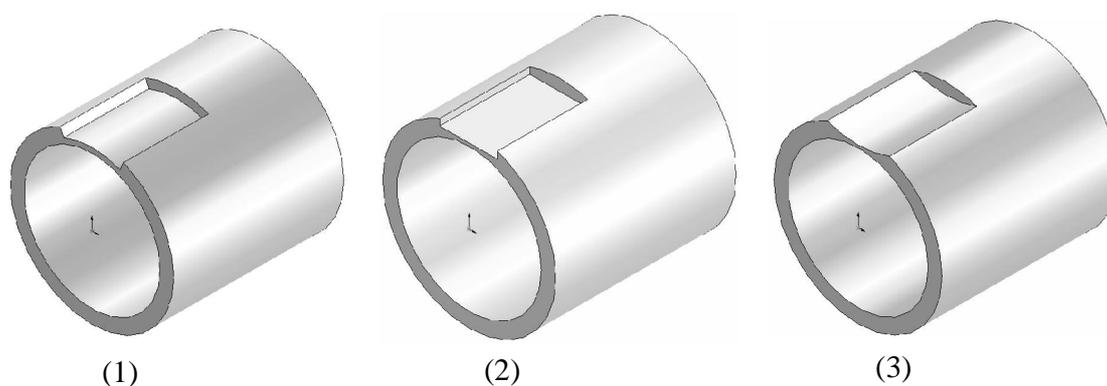


Figura 3.20 – Geometrias transversais dos defeitos estudados.

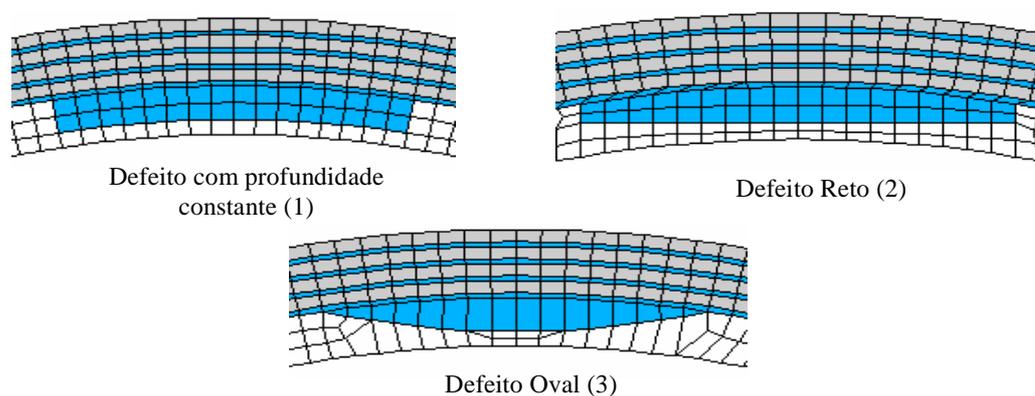


Figura 3.21 – Discretização dos modelos reparados com diferentes geometrias transversais do defeito.

Na figura 3.22 se mostra o comportamento dos modelos no gráfico tensão circunferencial vs pressão. Os três modelos têm comportamentos similares, nas quatro regiões estudadas. As tendências das curvas são as mesmas, mas os valores das tensões mostram pequena discordância, sobretudo, para o modelo com defeito oval no regime elástico. Os valores das tensões convergem quase a uma mesma pressão no seu limite de escoamento, a partir do qual os três modelos têm valores similares da pressão de ruptura.

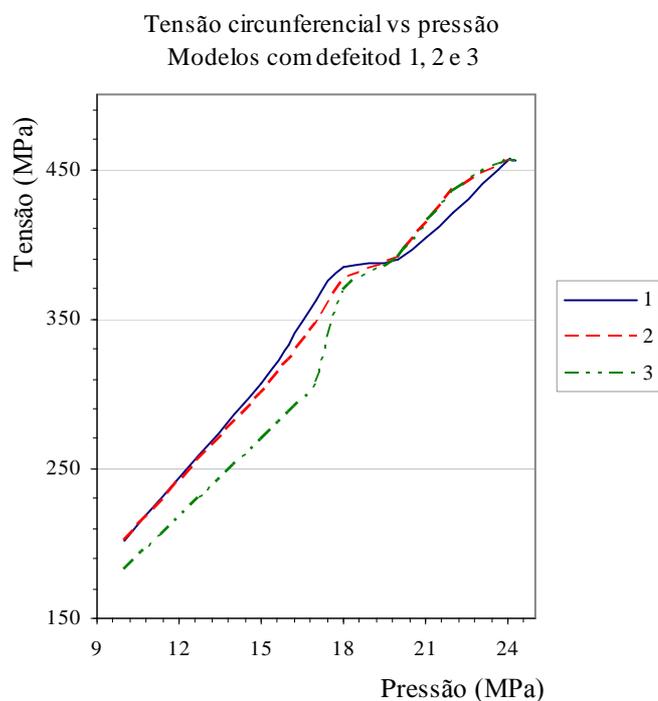


Figura 3.22 – Comportamento das tensões para os três tipos de defeito.

### 3.4.4

#### Modelo Simplificado

O objetivo deste estudo é facilitar a obtenção do modelo matemático, para o qual mostra-se o comportamento do duto com reparo quando este é modelado com uma camada metálica equivalente a soma das quatro camadas metálicas presentes no reparo.

O modelo consta de: o do duto com defeito, a primeira camada de adesivo, e uma camada metálica sem junção circunferencial, como se mostra na figura 3.23.a.

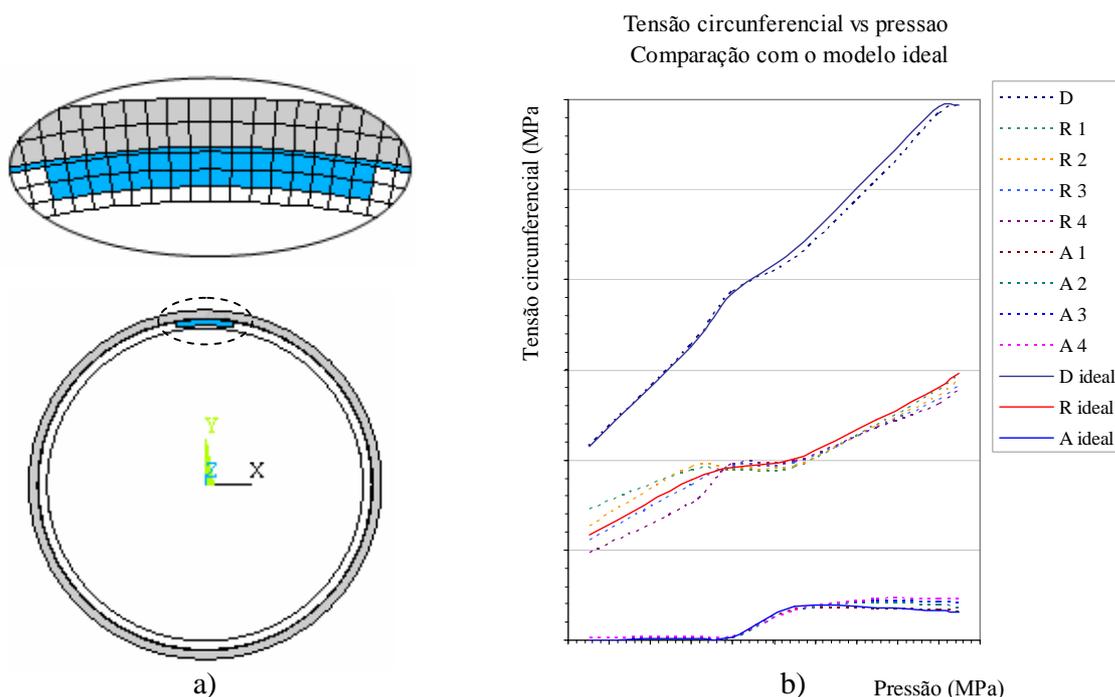


Figura 3.23 – Modelo simplificado.

Na figura 3.23.b apresenta os comportamentos do modelo simplificado e do modelo com todas as camadas metálicas, apresentando comportamentos similares. Isto se deve ao fato de que o adesivo permite o trabalho conjunto das camadas como se estas formassem um só corpo sem a influência das junções.

### 3.4.5

#### Varição do Número de Camadas Metálicas no Reparo

O reparo projetado deve ter a quantidade de camadas metálicas necessárias para garantir a integridade estrutural do duto. Faz-se a análise do desempenho do duto com reparo de uma a quatro camadas metálicas, mediante o gráfico tensão vs pressão, onde também se indica a tensão presente num duto novo sem defeito como parâmetro

de comparação. Para a análise se considera um estado plano de deformações, com pequenos deslocamentos e as propriedades indicadas na tabela 3.2 e na figura 2.7.

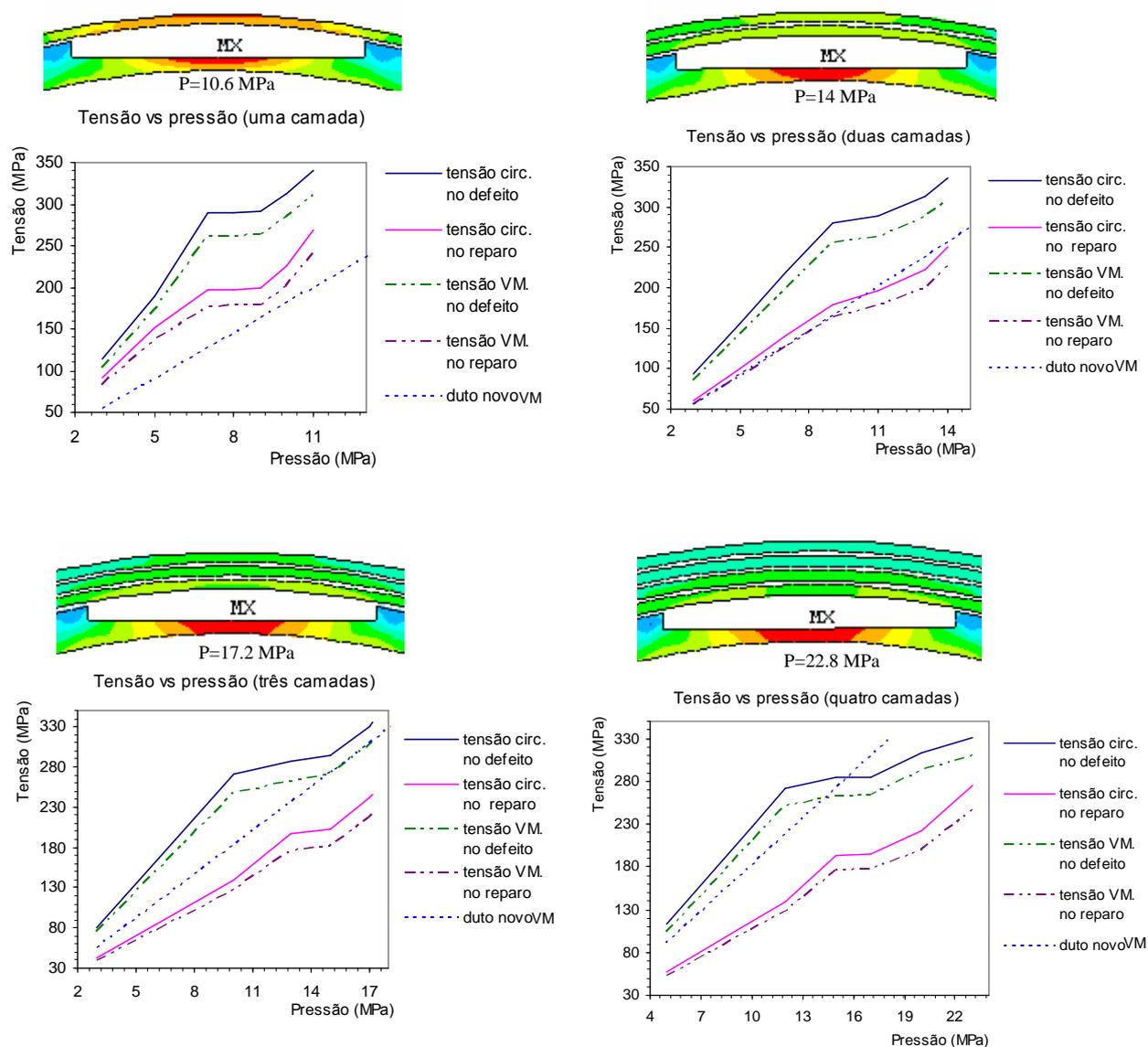


Figura 3.24 – Comportamentos nos modelos de uma, duas, três e quatro camadas com igual espessura de chapa no reparo.

O desempenho de cada modelo é achado por comparação com as tensões presentes no duto sem defeito (e sem reparo).

- O modelo com uma camada metálica falha no defeito com pressão interna de 10.6 MPa. Este reparo é insuficiente, apresentando tensões no defeito sempre maiores que as presentes na região nominal. Este modelo apresenta um comportamento similar ao mostrado na figura 3.15, onde a camada metálica plastifica antes que o duto na região do defeito.
- O modelo com duas camadas falha no defeito com uma pressão aplicada de 14 MPa, e neste caso também a espessura de reparo é pouca para evitar as grandes tensões no defeito. Neste modelo as camadas metálicas e o duto na região de defeito plastificam a uma mesma pressão interna.
- No modelo de três camadas a falha acontece no defeito com pressão interna de 17.2 MPa, mas com uma pequena diferença entre as pressões de ruptura com o duto sem defeito (a falha poderia ocorrer no tubo fora do reparo). No gráfico se pode ver que as tensões no defeito e as tensões na região sem defeito são similares, para pressões perto da pressão de ruptura. O modelo apresenta um comportamento similar ao mostrado na figura 3.18, onde o duto na região do defeito plastifica antes que as camadas metálicas (nas camadas metálicas se considerando um valor médio de tensão).
- O duto com quatro camadas é o único em que a falha acontece na região do tubo sem reparo (região nominal), com pressão interna de 18.6 MPa, já que o defeito reparado só falha com 22.8 MPa de pressão interna. Em todos os casos se considera falha quando o primeiro elemento atinge a tensão de ruptura. Neste modelo, a região do defeito do duto plastifica antes que as camadas metálicas.

É importante notar que o conceito do RFS - Fator de Resistência Remanescente (seção 2.1.4) é insuficiente para comparar o reparo de três e o reparo de quatro camadas, podendo indicar para ambos um RFS próximo a 1, já que só se compara a resistência a falha.

### 3.4.6

#### Estudo da Espessura das Camadas no Reparo

Para analisar a espessura ideal de camadas metálicas no reparo foram testados modelos com 2, 3, 4, 5 e 6 camadas metálicas, como mostrado na figura 3.25. Em todos os casos as camadas metálicas somam uma espessura equivalente de dois milímetros. A figura 3.24 indica a posição das junções circunferenciais das camadas metálicas. A primeira junção fica a  $180^\circ$  do defeito, e as subsequentes ficam a  $90^\circ$  da anterior no sentido anti-horário, sem que fique alguma junção acima do defeito (isto é, a  $90^\circ$  no círculo trigonométrico clássico).

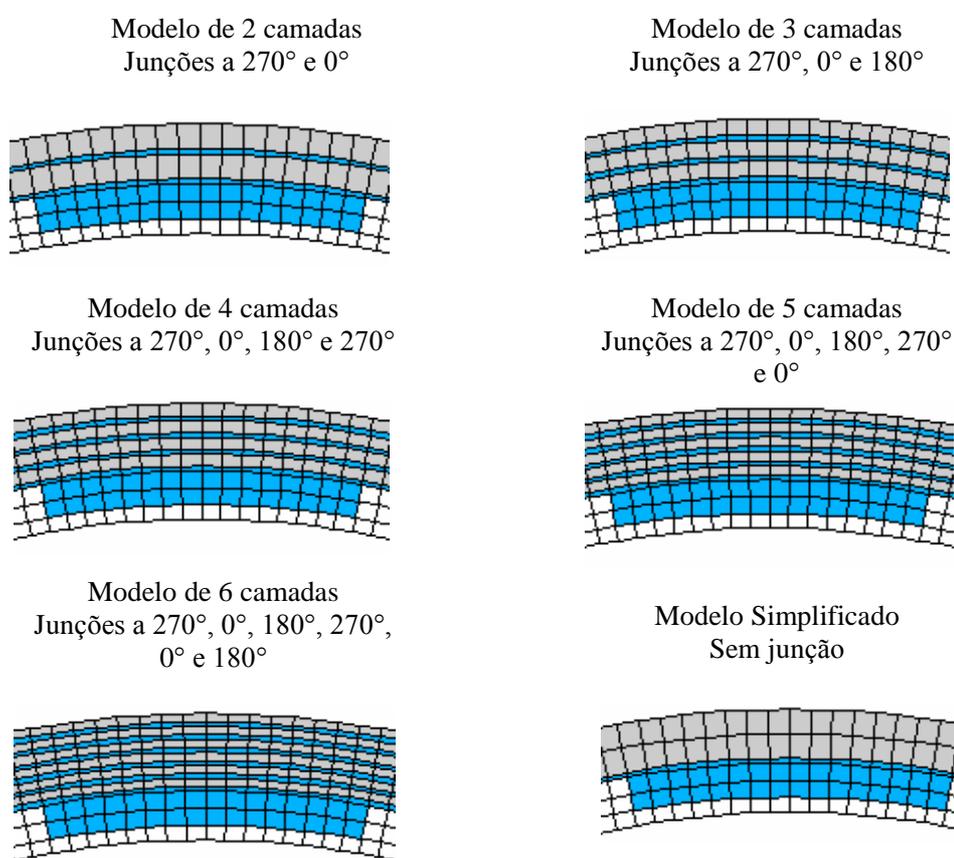


Figura 3.25 – Modelos com diferentes espessuras das camadas metálicas, com a mesma espessura equivalente de reparo em todos os modelos.

Os resultados são comparados com os resultados do modelo simplificado, o qual é considerado como o de melhor performance no controle da tensão circunferencial no defeito. O estudo da melhor espessura é feito considerando unicamente a tensão circunferencial. O estudo é feito com pressões menores que à pressão de ruptura, estando próximas à pressão de escoamento, onde as tendências das curvas são mais claras que na região plástica.

Na figura 3.26 se apresentam os resultados das tensões circunferências na região do defeito para os diferentes reparos.

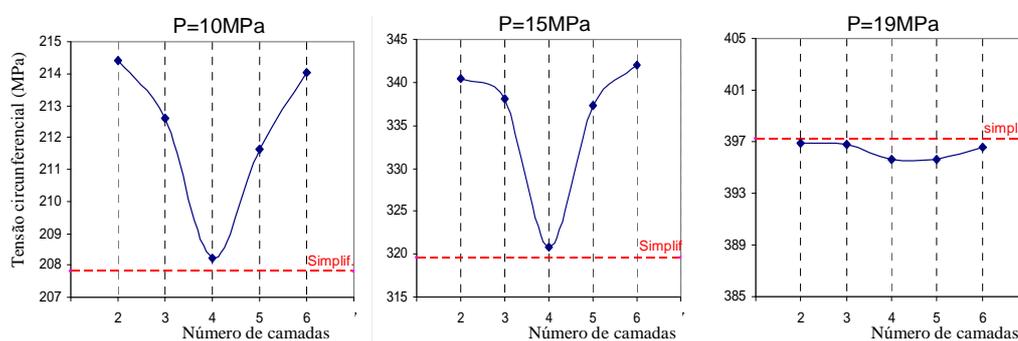


Figura 3.26 – Tensões circunferências no defeito

Pode-se observar que o reparo que tem performance mais próxima ao modelo simplificado é o duto de quatro camadas metálicas. Este comportamento foi atribuído a dois fenômenos:

- O primeiro relaciona-se com a distribuição de tensões que se apresenta em todo cilindro de parede espessa, onde na medida que alguma camada metálica fique mais afastada da parede do duto, esta suporta menos carga.
- O segundo considera o efeito que tem as junções, estas podem originar deslocamentos irregulares nas paredes do duto quando usa-se reparos com poucas camadas.

O estudo mais detalhado é mostrado no Apêndice C, mas a diferença de tensões é pequena entre cada modelo reparado, e o efeito da espessura de cada chapa metálica pode ser considerada desprezível, segundo as tensões apresentadas no defeito.

### 3.4.7

#### Estudo das Deformações no Duto Reparado

Nesta seção se mostram os resultados das deformações que o duto apresenta na região do defeito, sendo comparadas com as deformações que ocorrem na região nominal. Os resultados são obtidos do modelo 3D, com uma camada equivalente de reparo (2mm de espessura) e com uma curva multilinear para o material, cujos valores foram mostrados na tabela 3.3. O modelo considera pequenos deslocamentos e a geometria pode ser tirada das figuras 3.7 e 3.8. O modelo carregado pode ser visto na figura 3.27.

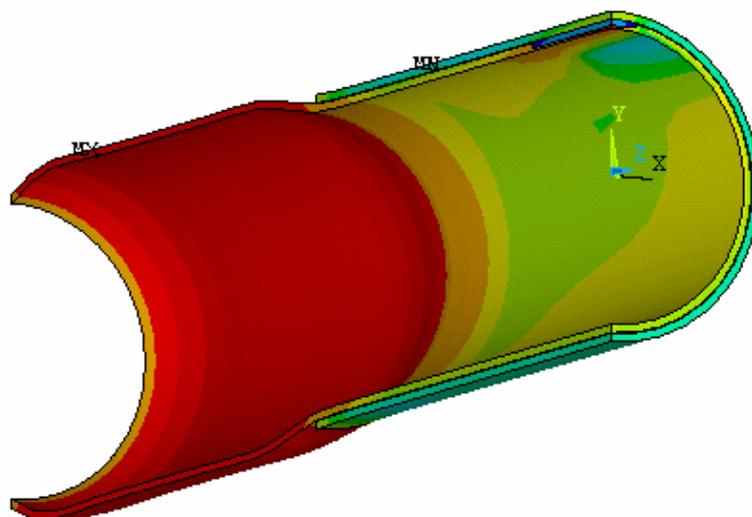


Figura 3.27 – Deformações globais no modelo 3D de  $\frac{1}{4}$  de simetria.

Os valores das deformações são mostrados a seguir na figura 3.28.

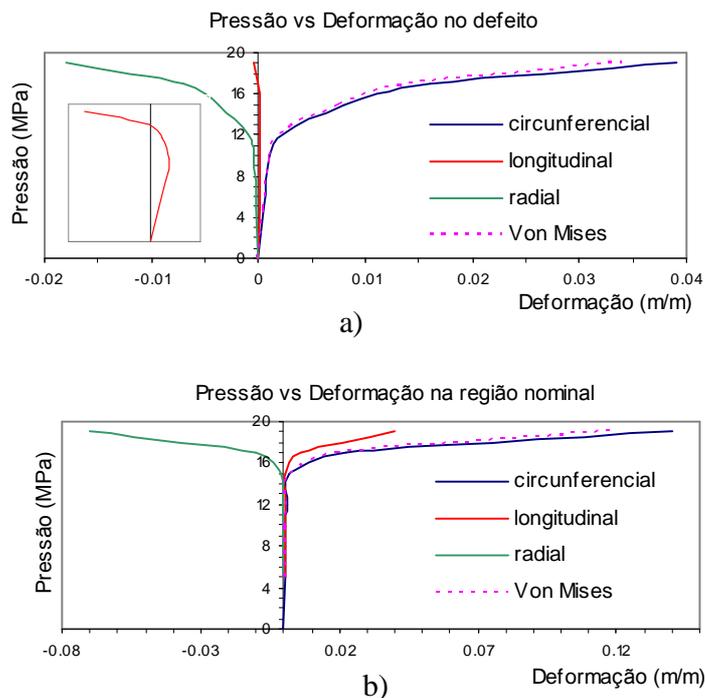


Figura 3.28 – Deformações no defeito e fora do reparo no modelo 3D de  $\frac{1}{4}$  de simetria.

O resultados mostrados nas figuras 3.27 e 3.28 mostram que as deformações longitudinais no defeito podem ser consideradas desprezíveis, porque seus valores são pequenos em relação às deformações circunferenciais. As deformações radiais aumentam consideravelmente na região plástica, enquanto que fora do reparo, na região nominal, as deformações longitudinais não são desprezíveis tendo valores relevantes.

Pode-se apreciar dois comportamentos elasto-plásticos muito diferentes para o duto com reparo e para o duto novo sem reparo. O duto reparado perde a linearidade (limite de proporcionalidade) a uma pressão aproximada de 10 MPa e o duto novo perde a linearidade a aproximadamente 13MPa. Entretanto, o incremento das deformações elasto-plásticas para cada incremento de pressão é menor no duto reparado, comparado ao forte incremento das deformações que experimenta o duto novo ao incremento da pressão. Este comportamento é devido a plastificação sucessiva de cada componente do duto reparado.

A falha do modelo acontece na região nominal, já que em pressões próximas à ruptura (pressão de ruptura igual a 19MPa), as deformações na região nominal são maiores do que na região reparada.

### 3.4.8

#### Estudo da Tensão Cisalhante no Adesivo

Para o estudo do cortante no adesivo identificam-se regiões mais solicitadas e considera-se o estudo feito na seção 2.3, onde se discutiu a distribuição das tensões e o critério de ruptura de uma junta colada simples. O modelo tem as mesmas propriedades que a modelagem anterior.

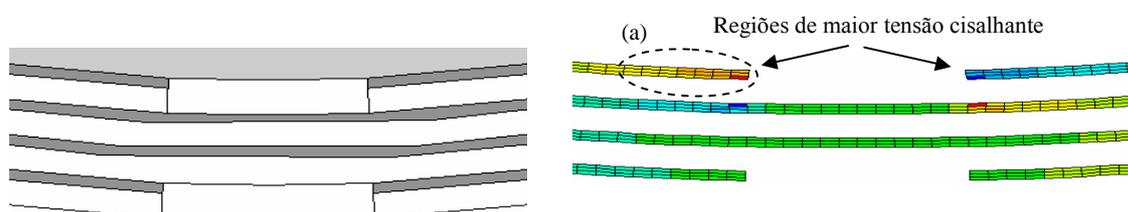


Figura 3.29 – Tensões cisalhantes no adesivo.

Na figura 3.30 mostram-se as tensões cisalhantes que se apresentam na primeira camada de adesivo (camada de adesivo mais solicitada). Pode-se ver o comportamento elasto-plástico da junta, com uma tensão cisalhante máxima de 18.4 MPa que rapidamente diminui até 3,5 MPa na maioria dos elementos no perímetro do tubo. No adesivo da primeira camada observo-se um valor de tensão cisalhante médio, muito menor do que pode suportar, (a resistência ao cisalhamento do adesivo é de 15 MPa, testado a 23°C [21]), isto devido ao grande comprimento de sobreposição desta junta colada.

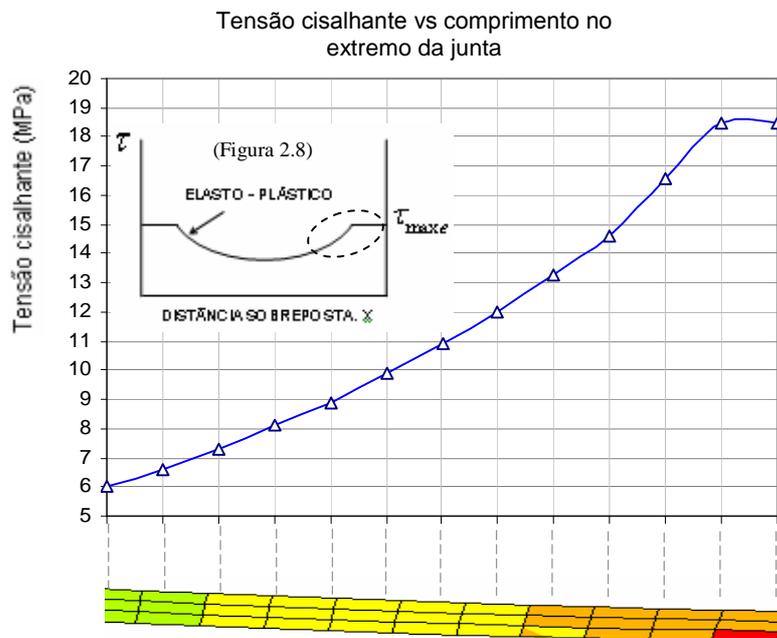


Figura 3.30 – Distribuição das tensões cisalhantes na primeira camada de adesivo.

### 3.4.9

#### Estudo das Terminações das Camadas Metálicas

Para tentar evitar a concentração de tensões no duto causada pela terminação longitudinal abrupta dos reparos, propõe-se uma terminação escalonada das camadas metálicas. Nesta seção estuda-se a terminação escalonada das camadas sendo esta comparada com a terminação abrupta, e procura-se determinar qual é a mais conveniente. Recomenda-se um estudo posterior usando grandes deslocamentos na sua modelagem, onde podem-se obter diferenças maiores nos resultados, principalmente no cálculo dos deslocamentos radiais.

Na figura 3.31 pode-se ver como se distribuem as tensões equivalentes e as deformações circunferenciais nas paredes do duto com relação aos dois tipos de acabamento das camadas de reparo, obtidas mediante um modelo axissimétrico carregado com uma pressão de 24 MPa (pressão de ruptura), e com as propriedades

indicadas na tabela 3.1 e figura 3.7. Na tabela 3.4 se mostra como variam as tensões e os deslocamentos ao incrementar a pressão interna aplicada

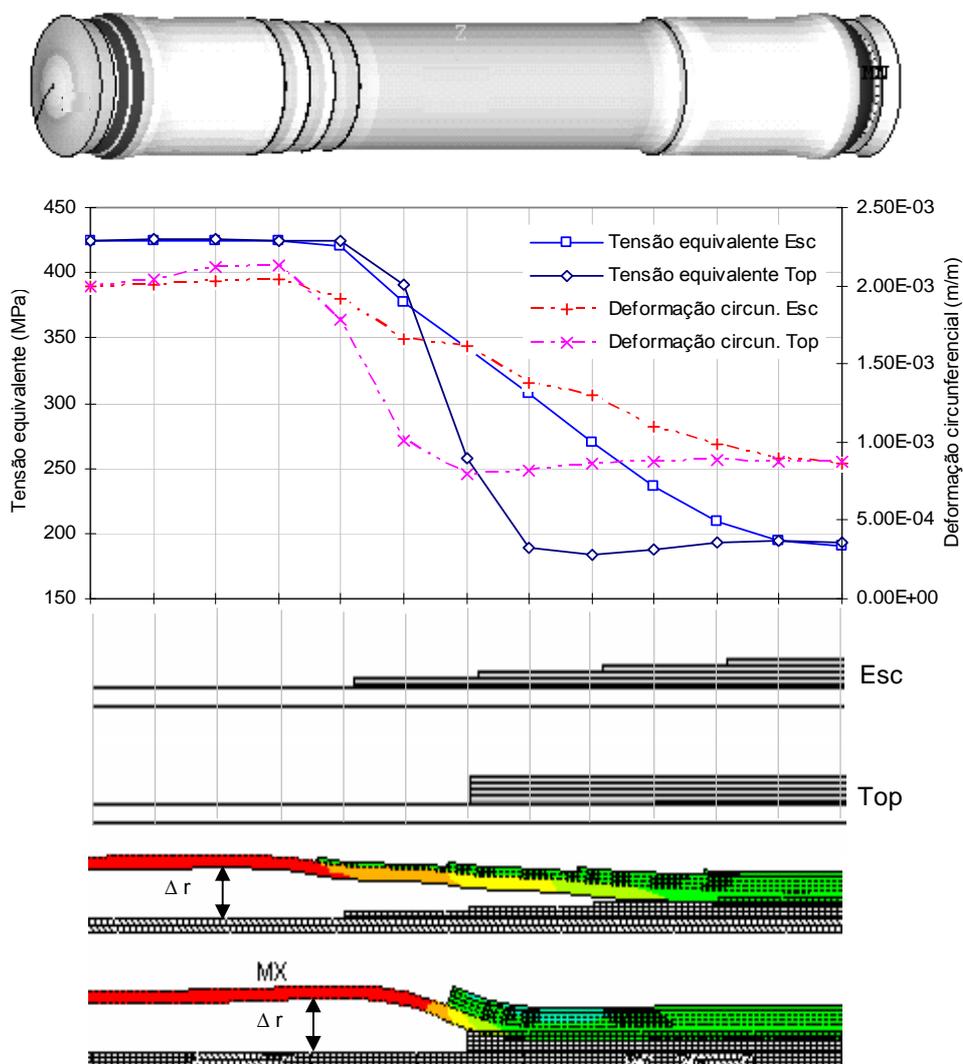


Figura 3.31 – Distribuição de tensões ao longo da parede do duto.

Tabela 3.4 – Tensões e deslocamentos radiais

Pressao (MPa)	$\Delta$ raio Esc (mm)	$\Delta$ raio Top (mm)	$\sigma$ equiv. Esc (MPa)	$\sigma$ equiv. Top (MPa)
10	0,0296	0,0298	170,6	170,8
15	0,044	0,045	255,8	256,9
22	0,068	0,069	387,7	390
24	1,66	1,663	402,7	402,9

A figura 3.31 e tabela 3.4 mostram que não existe diferença relevante entre as máximas tensões equivalentes e os deslocamentos radiais ( $\Delta r$ ) entre ambas terminações. Mas, a deformação circunferencial máxima na terminação abrupta é um pouco maior (100  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) que no caso da terminação escalonada, e é onde se origina a falha. Porém, como esta diferença é pequena, a determinação da melhor terminação vai ser confirmada com os testes experimentais.

### 3.4.10

#### Discussão dos Resultados Numéricos

Na determinação de um modelo numérico eficaz, se deve ter em conta a influência das possíveis simplificações ou suposições feitas na modelagem.

#### “Grandes Deslocamentos x Pequenos Deslocamentos”

Na seção 3.2.2 se estudou a importância do trabalho com as não linearidades nos modelos de elementos finitos e sua relação com a curva tensão vs deformação dos materiais introduzidos no programa. Encontra-se diferença entre os comportamentos só quando as pressões são próximas a pressão de ruptura. Na figura 3.32 se mostram os resultados das tensões na região do defeito para um modelo de deformação plana que considera grandes e pequenos deslocamentos, e que trabalha com as propriedades indicadas na tabela 3.1 e na figura 3.7.

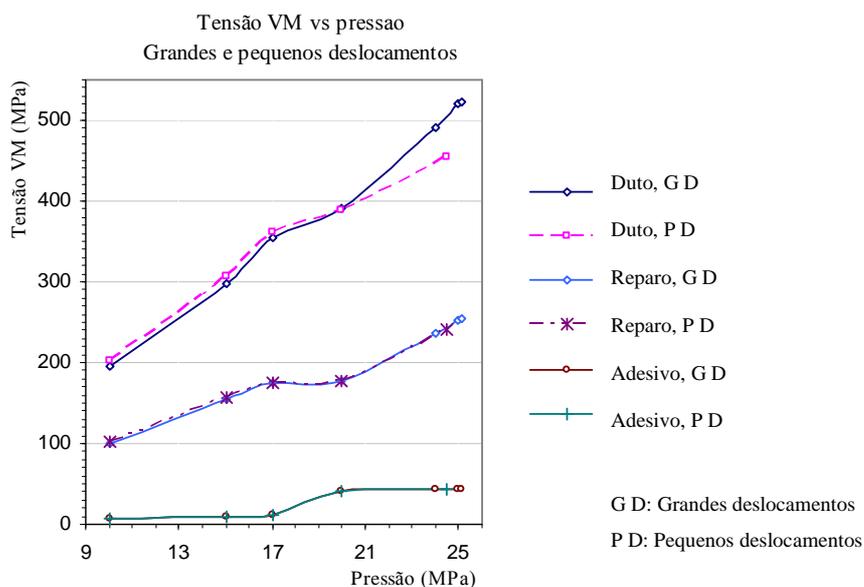


Figura 3.32 – Comparação do uso da não linearidade geométrica no duto.

Pode-se ver a pequena diferença dos comportamentos e as pressões de ruptura (diferença de 0.5MPa na pressão de ruptura entre os dois modelos). Uma diferença não tão pequena foi encontrada no estudo feito para o duto sem defeito, seção 3.2.2 (diferença de 2.7MPa).

Num duto sem defeito, a intensa redução de espessura ou estricção vai acompanhada com o aumento do diâmetro. Já num duto com defeito (dependendo da espessura remanescente de parede no defeito) a estricção da região do defeito vai acompanhada com o abaulamento desta região. Num duto com defeito reparado, esta estricção é limitada pelo reparo, fato que se utiliza para justificar a possibilidade de se trabalhar com pequenos deslocamentos e com a curva de engenharia do material na maioria dos modelos de dutos com reparo (para modelar a estricção é recomendável a utilização de grandes deslocamentos).

Uma modelagem analítica, a partir dos dados numéricos aqui apresentados e que não considera estas não linearidades, foi desenvolvida e é apresentada no próximo capítulo.

### “Curvas Bilineares x Curvas Multilineares e modelos 2D x modelos 3D”

A maior parte dos resultados mostrados da seção 3.4.2 a 3.4.6, foram obtidos incluindo simplificações na sua modelagem, utilizando deformação plana e trabalhando com curvas bilineares para os materiais.

È feito um análise comparativo para determinar a influência que tem utilizar modelos 2D de deformação plana, e modelos 3D, que trabalham com dados dos materiais em curvas bilineares e curvas multilineares. Os resultados mostrados na figuras 3.33 correspondem ao duto de quatro camadas no reparo.

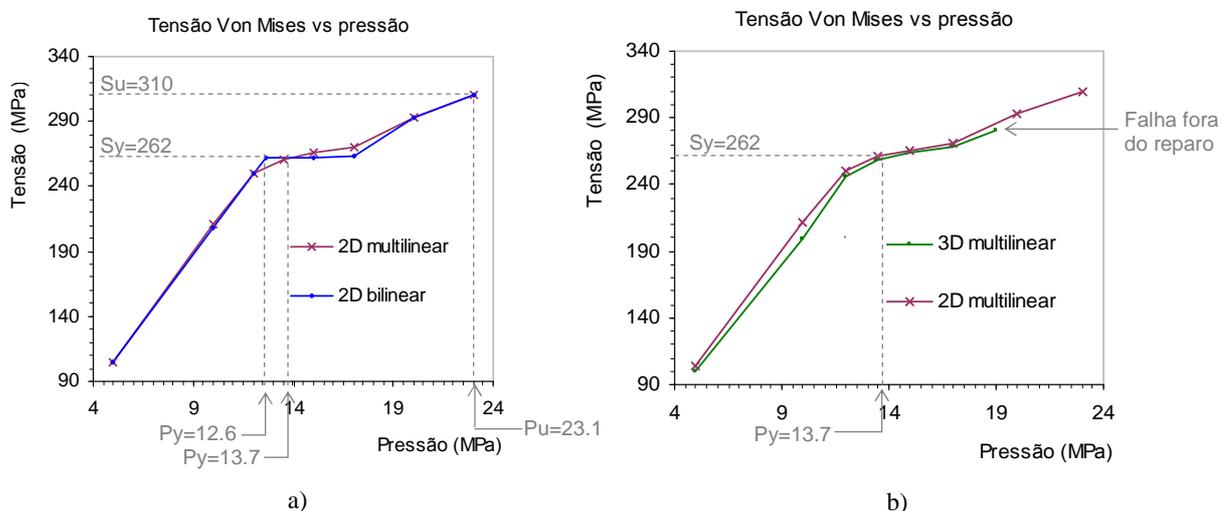


Figura 3.33 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilineares e bilineares.

Na figura 3.33.b, pode-se ver que os comportamentos dos modelos 2D de deformação plana e os modelos 3D são similares, ambos atingindo seu limite de escoamento sob a mesma pressão. A modelagem 3D mostra que o tubo falha fora do reparo. Então, a pressão de ruptura não pode ser comparada com o modelo 2D (isto só acontece no caso do modelo de quatro camadas, já que, é o único que rompe fora do reparo).

Na figura 3.33.a, são considerados os efeitos de se trabalhar com curvas bilineares e multilineares nos modelos 2D de deformação plana. Os comportamentos

apresentados são similares, com iguais pressões de ruptura. A diferença quando se deseja comparar as pressões que provocam a tensão de escoamento. Esta diferença se deve ao tipo de construção da curva bilinear do material, como pode se ver na figura 3.34, onde “m” e “n” representam os valores das deformações de escoamento para as curvas bilinear e multilinear respectivamente. A pressão que origina “m” vai ser menor a pressão que origine “n”, observação que se terá em conta ao comparar pressões que provocam a tensão de escoamento.

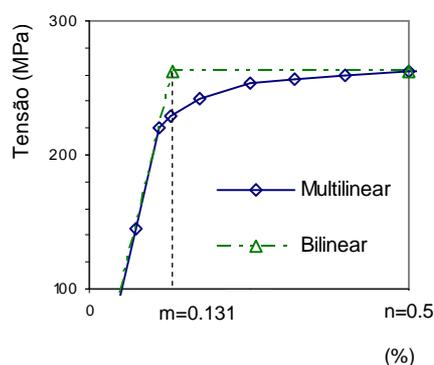


Figura 3.34 – Comparação dos materiais bilineares e multilineares.

Na figura 3.34, pode-se ver que a maior quantidade de pontos utilizados para discretizar a curva multilinear do material, que se estende desde o limite de proporcionalidade do material, até 0.5% de deformação; desta forma se obtém melhores resultados na região elasto-plástica.

Na figura 3.35 se mostra a comparação dos modelos no gráfico pressão vs deformação, onde se pode ver a discordância de resultados na região perto do escoamento.

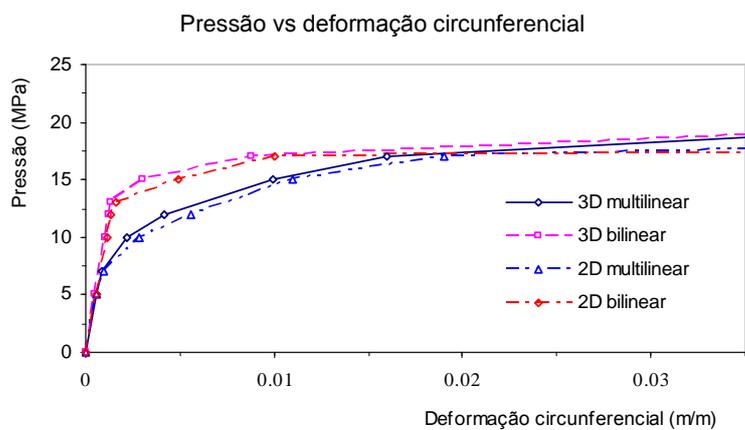


Figura 3.35 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilíneares e bilineares.

Pode-se concluir que para situações onde se requer um estudo bem detalhado do comportamento do duto, é necessário utilizar curvas multilíneas, mas, para situações de engenharia pode-se trabalhar com curvas bilineares, porque a pressão de ruptura do duto calculada com a modelagem bilinear é muito semelhante à obtida com a modelagem multilinear.