



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS E DUTOS COM DEFEITO EXTERNO E CORDÃO
DE SOLDA LONGITUDINAL**

Marcelo Sicri Mourelle

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientadores:

Gilberto Bruno Ellwanger

Breno Pinheiro Jacob

Rio de Janeiro
Dezembro de 2010



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE DUTOS COM DEFEITO EXTERNO E CORDÃO
DE SOLDA LONGITUDINAL**

Marcelo Sicri Mourelle

PROJETO DE FINAL DE CURSO APRESENTADO AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA APLICADA E ESTRUTURAS DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Prof. Roberto Fernandes de Oliveira, D.Sc.

Mourelle, Marcelo Sicri

Análise por Elementos Finitos de Dutos com Defeito Externo e Cordão de Solda Longitudinal / Marcelo Sicri Mourelle. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2010.

X, 50 p.: Il.; 29,7cm.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger e Breno Pinheiro Jacob.

Projeto de Graduação - UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2010

Referencias Bibliográficas: p. 49-50.

1. Análise por Elementos Finitos 2.Dutos Corroidos. 3. Pressão de Colapso. 4.Testes Experimentais. 5.Cordao de Solda. I. Ellwanger, Gilberto Bruno. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Análise por Elementos Finitos de Dutos com Defeito Externo e Cordão de Solda Longitudinal

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Análise Por Elementos Finitos De Dutos Com Defeito Externo E Cordão De Solda Longitudinal

Marcelo Sicri Mourelle

Dezembro/2010

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger e Breno Pinheiro Jacob

Curso: Engenharia Civil

Dutos são utilizados como o meio mais eficiente, seguro, e econômico para o transporte de hidrocarbonetos. Portanto, a segurança operacional dos dutos é de preocupação para todas as companhias de petróleo, devido ao imenso dano econômico e sócio-ambiental que um acidente com um duto, causado pela ocorrência de defeitos devido à corrosão, moedas, e outros, pode causar. O método de elementos finitos (MEF), usado nas simulações numéricas, demonstrou ser uma ferramenta poderosa para prognosticar e analisar o comportamento estrutural de dutos, em particular, dutos com defeitos de corrosão.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta gráfica computacional para análises de modelos reais introduzidos num ambiente virtual com base em parâmetros, e propriedades dos materiais componentes, modelados com elementos finitos para a simulação numérica de dutos com defeitos de corrosão.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF PIPELINES WITH EXTERNAL DEFECTS AND LONGITUDINAL WEALD BEAD

Marcelo Sicri Mourelle

December/2010

Advisor: Gilberto Bruno Ellwanger e Breno Pinheiro Jacob

Course: Civil Engineering

Pipelines are used as the most efficient, safe, and economical for transportation of hydrocarbons. Therefore, the operational safety of pipelines is of concern to all oil companies, due to the immense economic and social-environmental damage that an accident involving a pipeline, caused by the occurrence of defects due to corrosion, dents, and others may cause. The finite element method (FEM), used in numerical simulations, has proved a powerful tool to analyze and predict the structural behavior of pipelines, especially pipelines with corrosion defects.

The aim of this paper is to present a graphical computational tool for analysis of real models introduced in a virtual environment based on parameters, components and material properties, modeled with finite elements for numerical simulation of pipelines with corrosion defects.

Keywords: Finite Elements Analysis, Corroded Pipelines, Collapse Pressure, Weald Bead.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar deixo um agradecimento a minha família pelo apoio dado em todos os momentos da minha vida acadêmica, sempre doando muito amor, e a ajuda necessária em toda a trajetória, para que fosse possível concluir esse sonho.

Gostaria de agradecer também ao professor Breno Pinheiro Jacob, que foi o responsável pelo início da minha carreira profissional no LAMCSO/COPPE, onde tive um aprendizado que considero tão importante quanto as aulas, e também me permitiu utilizar um dos trabalhos realizados em seu laboratório como base para este projeto.

Aos professores Gilberto Bruno Ellwanger e Roberto Fernandes de Oliveira pela orientação no projeto e acadêmica, e pela fundamental contribuição na minha formação.

Agradeço aos amigos de faculdade pela ajuda nos estudos, e por tornarem momentos chatos, e de tensão, em bons momentos.

E especialmente ao meu PAI, que apesar de não estar mais entre nós, esteve comigo em todos os momentos difíceis nos últimos seis anos, e tenho certeza que ficaria muito orgulhoso de me ver chegar aonde cheguei.

ÍNDICE

1	MOTIVAÇÃO	10
1.1	- OBJETIVO	11
1.2	- ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	11
2	- SOLDAGEM DE DUTOS.....	12
2.1	- CORROSÃO EM DUTOS	15
2.2	- MECANISMOS DE CORROSÃO	15
2.3	- TIPOS DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA	16
2.4	- TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE DUTOS COM CORROSÃO.....	18
3	- DESCRIÇÃO	19
3.1	- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	19
3.2	- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	23
3.3	- GENERALIDADES DAS MALHAS	27
3.4	- CONDIÇÕES DE CONTORNO	28
3.5	- EXTENSÃO DAS MALHAS NA DIREÇÃO LONGITUDINAL (C_7).....	29
3.6	- VISUALIZAÇÃO DAS MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS.....	30
3.7	- DETALHES DA MALHA DO MODELO ET1	31
3.8	- DETALHES DA MALHA DO MODELO ET2	32
3.9	- ESTRATÉGIA DE ANÁLISE.....	33
3.10	- CRITÉRIOS DE RUPTURA ESTRUTURAL	37
4	- SUMÁRIO DOS RESULTADOS.....	37
4.1	- CURVAS PRESSÃO X DESLOCAMENTO	37
4.2	- TABELAS COM RESULTADOS RELEVANTES	38
4.3	RESULTADOS DETALHADOS	39
	• <i>Resultados ET1</i>	41
	• <i>Resultados ET2</i>	45
5	- APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE RUPTURA.....	48
5.1	- CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	49
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
	APÊNDICE A: PLANILHAS DE RESULTADOS.....	52
A.1	- TABELA DE RESULTADOS DO MODELO ET1	52
A.2	- TABELA DE RESULTADOS DO MODELO ET2	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Indicadores e metas da malha dutoviária para o ano 2012. [1]	10
<u>Figura 2.1</u> – Tubos confeccionados sem costura.....	13
<u>Figura 2.2</u> – Produção de duto por soldagem de resistência elétrica.....	14
Figura 2.3 – Duto submetido ao processo de soldagem dupla DSAW. [5]	15
Figura 2.4 - Ciclo dos metais em processo de corrosão. [6]	16
Figura 2.5 - Formas de Corrosão. [7]	17
Figura 2.6 – Exemplo Esquemático de um Pig. [8].....	18
Figura 2.7 - Exemplo de Pig Ultra-Sônico para inspeção de dutos. [8]	19
Figura 3.1 – Corte Transversal na Região do Defeito. [9].....	20
Figura 3.2 – Defeitos dos espécimes ET1 e ET2 (A – Corte, B – Vista Superior). [9].....	21
Figura 3.3 – Dimensões da seção transversal do cordão de solda na região do defeito. [9].....	21
Figura 3.4 - ET1, Curva tensão - deformação do Metal Base. [9]	24
Figura 3.5 - ET1, Curva tensão - deformação do Metal de Solda. [9].....	25
Figura 3.6 – ET2, Curva tensão - deformação do Metal Base. [9].....	26
Figura 3.7 – ET2, Curva tensão - deformação do Metal de Solda. [9].....	27
Figura 3.8 – Sólidos hexaédricos utilizados pelo Ansys. [10]	28
Figura 3.9 - Sistema global de coordenadas e condições de contorno dos modelos sólidos.	29
Figura 3.10 – Dimensão longitudinal do modelo de elementos finitos, com simetria nos planos xy e xz	30
Figura 3.11 – ET1, Malha de elementos finitos.	31
Figura 3.12 – ET1, Detalhe da região do defeito.	31
Figura 3.13 – ET1, Detalhe da Malha na Região do Cordão de Solda.....	32
Figura 3.14 – ET2, Malha de elementos finitos.	32
Figura 3.15 – ET2, Detalhe da região do defeito.	33
Figura 3.16 – ET2, Detalhe da Malha na Região do Cordão de Solda.....	33
Figura 4.1 - Curva Pressão x Deslocamento radial do ponto central do defeito	38
Figura 4.2 – ET1, Detalhe do mapa de tensões início do escoamento.	41
Figura 4.3 – ET1, Detalhe do mapa de tensões, pressão de ruptura.....	41
Figura 4.4 – ET1, Detalhe do mapa de tensões no cordão de solda, pressão de ruptura.....	42
Figura 4.5 – ET1, Perspectiva do modelo, pressão de ruptura.....	42
Figura 4.6 – ET1, Perspectiva do duto completo, pressão de ruptura.	43
Figura 4.7 – ET1, Detalhe do mapa de tensões juntamente com a malha, pressão de ruptura.	43
Figura 4.8 – ET1, Deformação no momento de ruptura. Fator de escala (10:1).....	44
Figura 4.9 – ET2, Detalhe do mapa de tensões início do escoamento.	45
Figura 4.10 – ET2, Detalhe do mapa de tensões, pressão de ruptura.....	45

Figura 4.11 – ET2, Detalhe do mapa de tensões no cordão de solda, pressão de ruptura.	46
Figura 4.12 – ET2, Perspectiva do modelo, pressão de ruptura.	46
Figura 4.13 – ET2, Perspectiva do duto completo, pressão de ruptura.	47
Figura 4.14 – ET2, Detalhe do mapa de tensões juntamente com a malha, pressão de ruptura. ..	47
Figura 4.15 – ET2, Deformação no momento de ruptura. Fator de escala (10:1).	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensões dos Espécimes Tubulares (valores reais)	23
Tabela 3.2– Dimensões dos Defeitos.....	23
Tabela 3.3 – ET1, Curva Tensão \times Deformação do Metal Base	24
Tabela 3.4– ET1, Curva Tensão \times Deformação do Metal de Solda.	25
Tabela 3.5 – ET2, Curva Tensão \times Deformação do Metal Base	26
Tabela 3.6 – ET2, Curva Tensão \times Deformação do Metal de Solda	27
Tabela 4.1– Resultados para ET1 e ET2.....	39

NOMENCLATURA

D_e : Diâmetro Externo

p_f : Pressão de ruptura do material

p_{fesp} : Pressão de ruptura esperada

σ_{eqvlin} : Tensão de Von Mises correspondente a pressão unitária

ε_{yeld} : Deformação resultante da tensão de escoamento

ε_{ult}^* : Deformação última verdadeira

σ_{yeld} : Tensão de escoamento

σ_{ult}^* : Tensão última verdadeira

C_i : Extensão da malha na direção longitudinal

d: Profundidade

Δp_i : incremento de pressão interna

Δp_{min} : incremento de pressão interna

E: Módulo de elasticidade longitudinal

ℓ : Largura

L: Comprimento

p: Pressão interna aplicada no sentido radi

p_0 : pressão interna radial inicial igual a zero
 p_i : pressão interna radial a ser aplicada a cada passo de carga i
 p_L : Pressão externa aplicada no sentido longitudinal
 p_{lin} : Pressão interna radial unitária
 p_u : Pressão de ruptura do metal base sem defeito
 p_{yield} : pressão interna radial que dá início à tensão de escoamento
 r : Raio de adoçamento na direção longitudinal
 R : Raio de adoçamento na direção radial
 σ_{ult} : Tensão última de engenharia do material
 t^* : Espessura remanescente
 t : Espessura

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 MOTIVAÇÃO

Com a descoberta de novos campos petrolíferos em alto mar e em lâminas d'água cada vez mais profundas, o aumento da utilização de dutos submarinos e terrestres será inevitável, como mostrado na Figura 1.1. Portanto, a importância do estudo dos efeitos da corrosão na avaliação estrutural de dutos, se faz cada vez mais presente nesse setor petrolífero.

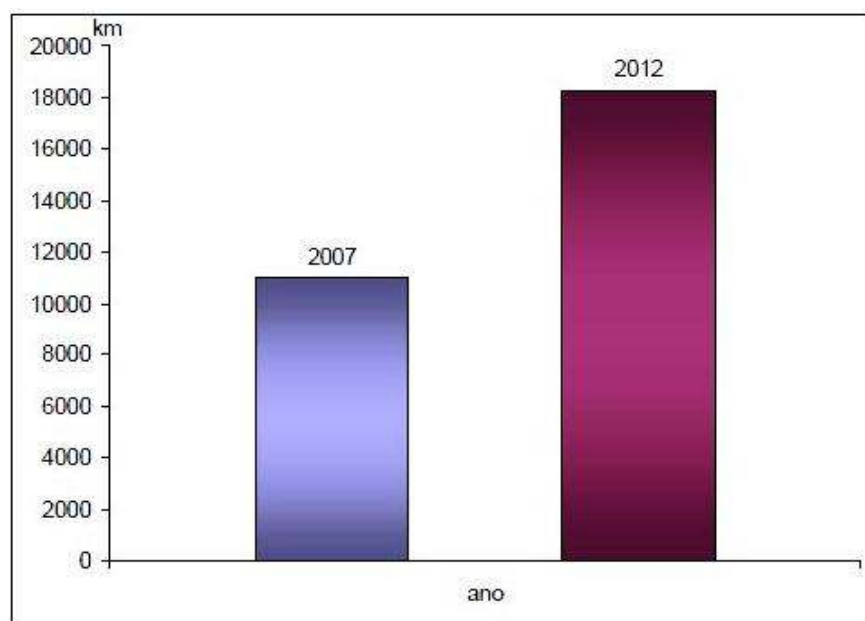


Figura 1.1 – Indicadores e metas da malha dutoviária para o ano 2012. [1]

Dutos com corrosão podem trabalhar perfeitamente desde que estejam dentro de suas limitações estruturais. Uma análise mais detalhada das linhas deve ser realizada periodicamente, para se evitar possibilidades de paradas de produção devido a acidentes.

A avaliação da segurança de dutos com defeitos de corrosão é normalmente realizada por meio de métodos empíricos ou semi-empíricos, tais como o método B31G da ASME [2], que apesar de ser o mais utilizado, é também o que apresenta resultados mais conservadores na avaliação de dutos, podendo ser anti-econômico, e ainda avalia dutos submetidos apenas à pressão interna. Foi posteriormente alterado [3] com a implementação do método 085DL, que é menos conservativo, mas ainda assim com pressões máximas recomendadas abaixo das pressões

de falha, e apresentando resultados contra a segurança para defeitos longos e profundos. Por esta razão, o mesmo foi modificado [3] para criar o RPA ou 085DL modificado. Através de diversos ensaios experimentais e análises numéricas surge o DNV RP-F101[4], que além da pressão interna, admite tensões de compressão longitudinais, e apresenta resultados mais realísticos que os demais. No entanto, o uso desses métodos implica em graves simplificações na geometria dos defeitos, o que resulta em resultados mais conservadores.

A simulação computacional, baseada no método dos elementos finitos, permite uma representação muito mais realística dos defeitos e, além disso, produz resultados mais precisos que os encontrados pelos métodos empíricos e resultados mais rápidos e econômicos que os obtidos através de experimentos em laboratório.

Devido a essa vantagem do método dos elementos finitos, é que surgiu a motivação da elaboração de um modelo computacional de duto que incluísse o cordão de solda longitudinal oriundo do processo de construção. A influência desse elemento em conjunto com problemas de corrosão ainda é pouco conhecida na prática, já que por motivos de simplificações geométricas, os modelos normalmente não consideram a existência do filete de solda, e nem da interação entre metal base e metal de solda.

1.1 - OBJETIVO

Tendo em vista o exposto acima, o objetivo deste trabalho consiste em exemplificar uma metodologia de avaliação do comportamento de ruptura de dutos com defeitos de corrosão empregando o Método dos Elementos Finitos.

Para geração dos modelos com a representação do cordão de solda e do defeito externo causado por corrosão, foi utilizado o programa de análise estrutural por elementos finitos ANSYS. E serão apresentados os resultados das análises não-lineares de ruptura sob ação de pressão interna gradualmente aplicada.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No Capítulo 2, é feita uma abordagem do conceito fundamental de sistemas dutoviários e suas aplicações. Além disso, são apresentadas as principais formas de desgaste associada à geração de problemas de corrosão, e também alguns dos métodos construtivos onde são aplicadas soldas longitudinais.

No Capítulo 3 são descritos os procedimentos realizados para o desenvolvimento da análise não linear, juntamente com a estratégia empregada. Serão detalhadas as malhas de elementos finitos geradas sobre os espécimes tubulares, e por fim serão apresentados os critérios de ruptura estrutural utilizados para o andamento do estudo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados detalhados obtidos pelas simulações numéricas dos modelos gerados pelo software utilizado.

O Capítulo 5 aponta as conclusões obtidas com a execução deste trabalho.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS

2 - SOLDAGEM DE DUTOS

Uma pequena introdução à produção e à especificação da tubulação de aço será descrita nesse capítulo [5]**Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Para entender a produção de tubos de aço, devemos começar pelo início da produção de aços base. A maior parte da produção de aço é composta por produtos fabricados a partir de quatro formas básicas de aço primário bruto: lingotes, tarugos, blocos e chapas. Estas formas podem ser produzidas em larga escala e são facilmente re-aquecidas, extrudadas, espremidas, ou reformadas em muitas outras configurações, de forma a se transformar em praticamente todos os produtos de aço usados hoje.

Um tubo de aço é produzido a partir de duas dessas formas básicas de aço, o tarugo redondo, e a chapa. O tarugo é uma barra redonda de aço sólido, usado para produzir muitos outros produtos derivados, tais como tubos sem costura. Os outros tipos de tubos de aço são produzidos a partir de chapas, que são sólidos blocos retangulares. As chapas são reaquecidas e transformadas em placas e bobinas.

Estes quatro métodos, descritos a seguir, são os mais utilizados para produzir tubos de aço: Cordão de solda, Solda de resistência elétrica, Sem emenda, e Solda dupla de arco submerso.

Cordão De Solda: Um dos processos para a produção de tubos é a Fusão da Solda, também chamado de "Solda Contínua" e é produzido em tamanhos de 1/8" a 4-1/2".

Sucessivas bobinas de aço são soldadas de ponta a ponta para formar um cordão contínuo de aço. O cordão de aço é alimentado por uma niveladora, e em seguida, introduzido em um forno a gás onde é aquecido até a temperatura necessária para a formatação e fusão. Os rolos formados ao sair do forno, formam um “skelp” (um pedaço, ou tira de metal produzido com uma espessura apropriada, largura e configuração de ponta, a partir do qual um tubo ou tubulação é feita).

As bordas do skelp são então firmemente pressionadas juntas por rolos para obter uma solda falsificada (o calor do skelp, combinado com a pressão exercida pelos rolos, formam a solda). Nenhum metal é adicionado na operação. O dimensionamento final dos tubos os deixa com as dimensões exigidas.

Tubos Sem Costura (SMLS): Tubos sem costura, ou Seamless Pipe (SMLS), são feitos quando o aço deriva de um bloco sólido de forma redonda cilíndrica, chamado de “billet”. Este é aquecido e, em seguida, empurrado, ou puxado (ao ser girado rapidamente) sobre um mandril com um ponto de piercing colocado no centro do bloco. Essa atividade produz um tubo oco ou “shell”.



2.1 – Tubos confeccionados sem costura

O tubo é então terminado até que se obtenha o tamanho e a espessura desejados (como o tubo é formado em uma forma aquecida, ele é normalizado e deve ter um padrão consistente de aço celular em toda sua circunferência). Tubos sem costura são feitos nos tamanhos de 1/8" a 26" e são amplamente utilizados na construção civil, indústrias químicas, e petroquímicas. Está disponível na espessura de parede, para produtos químicos pesados, e é adequado para bobinamento, manilhas e filamentos. É, no entanto, caro, escasso e não está disponível em comprimentos longos.

Solda De Resistência Elétrica (ERW): O processamento do tubo com soldagem por resistência elétrica, Electric Resistance Welded (ERW), começa como uma placa enrolada de aço, com espessura e largura adequada, para formar um tubo que está em conformidade com as suas especificações.

O tubo de ERW é formado a frio. A chapa passa através de uma série de rolos que, gradualmente, dão a forma de um tubo cilíndrico, até que as bordas da placa se juntem. Então, uma carga elétrica é aplicada nos pontos adequados para aquecer as extremidades; assim elas podem ser soldadas.



2.2 – Produção de duto por soldagem de resistência elétrica

Este tubo é um produto com alta velocidade de produção, que pode ser feito em comprimentos contínuos de até 115", produzido com espessuras e dimensões uniformes, e em larga escala. Contudo exige uma tonelagem mínima para se configurar um tamanho específico e, por vezes, o processo pode ser demorado.

Duplo Arco De Solda Submerso (DSAW): O tubo de Solda de Arco Submerso (SAW) deriva seu nome do processo em que a solda está submersa em um fluido. enquanto a soldagem é realizada. O fluido protege o aço na área de solda de todas as impurezas existentes no ar quando aquecido a altas temperaturas.

Quando dois cordões de solda são re-alinhados, um na parte interna, e outro pela parte externa do tubo, mas em processos de soldagem separados, fica configurado o Duplo Arco de Solda Submerso.

Estes são três tipos mais comuns de tubos produzidos pelo processo DSAW:



Figura 2.3 – Duto submetido ao processo de soldagem dupla DSAW. [5]

2.1 - CORROSÃO EM DUTOS

Neste item será abordado o conceito fundamental de corrosão metálica, ou seja, corrosão em materiais metálicos. Além disso, serão apresentadas as formas de desgaste associada à corrosão, as técnicas de ampliação da resistência à corrosão, as técnicas de inspeção e monitoramento de dutos com corrosão e os métodos empíricos e semi-empíricos utilizados para avaliação da integridade estrutural de dutos com corrosão.

2.2 - MECANISMOS DE CORROSÃO

A corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associados a esforços mecânicos. Portanto, a corrosão é uma importante forma de deterioração que prejudica a integridade dos dutos.

Nos processos de corrosão, os metais reagem com os elementos não-metálicos presentes no meio, particularmente o oxigênio e o enxofre, produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Desta forma, conclui-se que a corrosão corresponde ao inverso dos processos metalúrgicos, como mostrado na Figura 2.4.

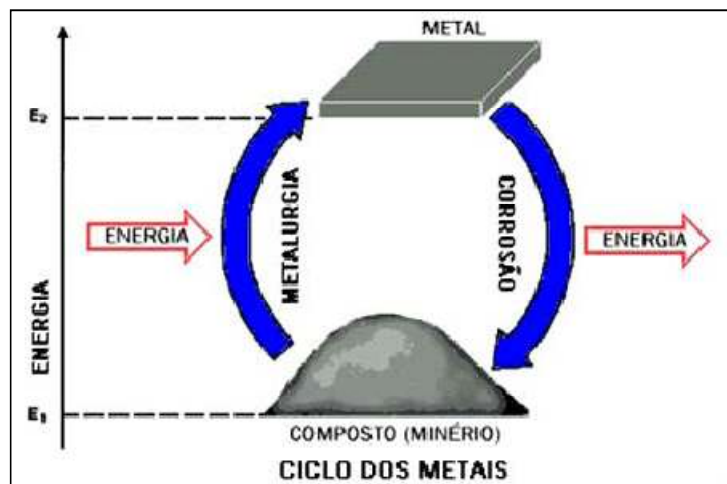


Figura 2.4 - Ciclo dos metais em processo de corrosão. [6]

Dependendo do tipo de ação do meio corrosivo sobre o material, os processos corrosivos podem ser classificados em dois grandes grupos: corrosão eletroquímica e corrosão química.

A corrosão eletroquímica é um processo que ocorre na presença de água líquida, enquanto a corrosão química é um processo que se realiza na ausência de água. Portanto, de acordo com o que foi explicado anteriormente, conclui-se que corrosão eletroquímica é o processo de corrosão mais freqüente em dutos.

Como exemplo de corrosão eletroquímica, podemos citar o caso de dutos imersos em água salgada (eletrólito). Nesse exemplo, o ferro, por possuir um potencial de redução superior aos outros elementos do duto, por exemplo, o cobre, perde elétrons. Seus átomos Fe transformam-se em íons Fe^{+2} que são atraídos para a solução de água salgada; com isso o duto vai sendo corroído [7].

2.3 - TIPOS DE CORROSÃO ELETROQUÍMICA

A forma de desgaste é muito importante nos processos corrosivos, deste modo é comum caracterizar processos corrosivos pela própria morfologia da perda de material.

Os principais processos corrosivos associados à forma de desgaste são:

A Corrosão uniforme, Corrosão por placas, Corrosão alveolar, Corrosão por pite, Corrosão Intergranular ou Intercristalina, e Corrosão Transgranular ou Transcristalina.

- **Corrosão Uniforme**

Quando o processo de corrosão ocorre de modo aproximadamente uniforme em toda a superfície atacada.

- **Corrosão por Placas**

Quando os produtos de corrosão formam-se em placas que se desprendem progressivamente. Essa corrosão ocorre em grandes extensões da superfície metálica, mas não de forma generalizada, de modo a formar placas corroídas de profundidade constante.

- **Corrosão Alveolar**

Quando o desgaste provocado pela corrosão se dá sob forma localizada, com aspecto de crateras. Essas crateras são caracterizadas por apresentar fundo arredondado e profundidade menor que o seu comprimento.

- **Corrosão por Pite**

Quando o desgaste provocado pela corrosão se dá de forma muito localizada e de alta intensidade, geralmente com profundidade maior que o seu diâmetro.

- **Corrosão Intergranular ou Intercristalina**

Quando o ataque se manifesta no contorno dos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos.

- **Corrosão Transgranular ou Transcristalina**

Quando o fenômeno se manifesta sob a forma de trincas que se propagam pelo interior dos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos.

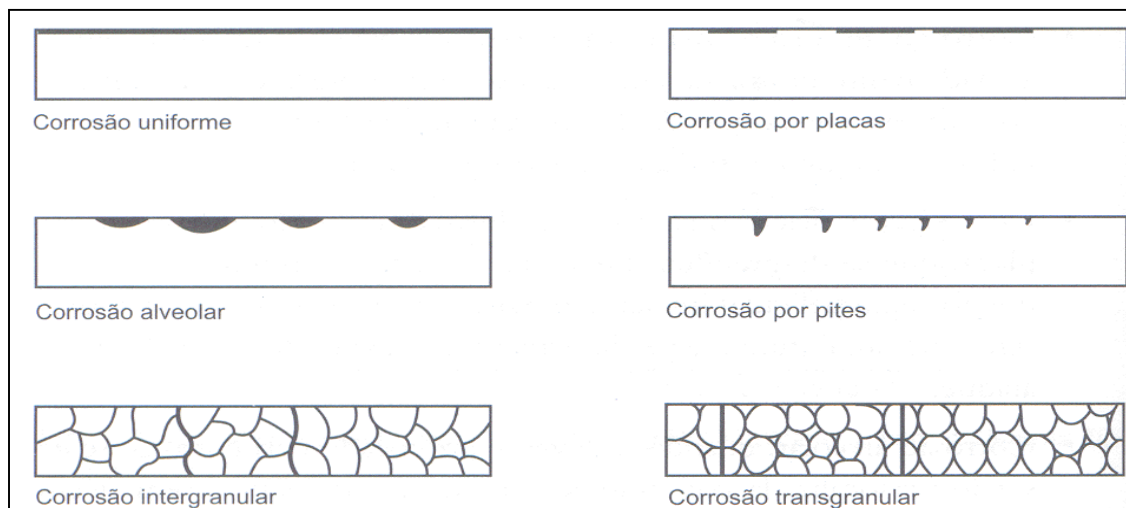


Figura 2.5 - Formas de Corrosão. [7]

2.4 - TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE DUTOS COM CORROSÃO

Existem inúmeras técnicas de inspeção e monitoramento de dutos com corrosão que aumentam a segurança e eficiência do sistema e minimizam potenciais fontes de acidentes e interrupções da linha. Essas técnicas incluem uma grande variedade de medidas que traduzem a condição atual da integridade do duto, permitindo identificar, localizar e mapear possíveis defeitos no duto antes que se transformem em vazamentos ou causem grandes acidentes.

Os Pigs são dispositivos muito utilizados para fazer o monitoramento de dutos com defeitos. Eles são colocados no interior da tubulação e são impulsionados pela pressão do fluido que está sendo bombeado, como mostrado na Figura 2.6. A estrutura mecânica é composta por uma cápsula cilíndrica apoiada entre dois suportes de borracha. Dentro da cápsula estão os circuitos eletrônicos e as baterias do Pig. Os suportes de borracha mantêm a cápsula centralizada na tubulação.

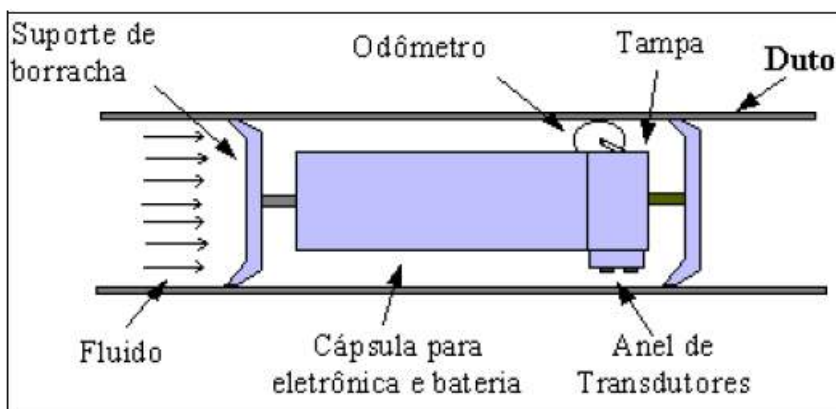


Figura 2.6 – Exemplo Esquemático de um Pig. [8]Erro! Fonte de referência não encontrada.

Os Pigs se diferem devido a sua finalidade. O tipo de Pig mais comum para a inspeção de defeitos de corrosão é o de perda de espessura que utiliza a técnica de medição por meio de ultrassom. Esse Pig é capaz de detectar e dimensionar pontos em que há redução da espessura de parede do duto. A informação da localização desses defeitos é transmitida com boa precisão por esses Pigs. A Figura 2.7 ilustra um exemplo desses Pigs ultra-sônicos que possuem uma grande quantidade de cabeçotes que fazem a medição direta da espessura do duto. [8]



Figura 2.7 - Exemplo de Pig Ultra-Sônico para inspeção de dutos. [8]

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

3 - DESCRIÇÃO

Os objetivos gerais deste trabalho incorporam o estudo do comportamento de ruptura de dutos com defeitos de corrosão empregando o Método dos Elementos Finitos. Na geração dos modelos para o presente projeto, será considerada a representação do cordão de solda longitudinal empregado na fabricação do duto.

As atividades deste projeto tratam especificamente da geração de modelos e execução de análises para dois espécimes tubulares (referidos como ET-1 e ET-2) de dutos com defeitos de corrosão. Neste ciclo de análise, os modelos consideram a representação geométrica e física do cordão de solda.

O presente trabalho trata da geração de modelos de elementos finitos para os espécimes com a representação do cordão de solda, e apresenta os resultados de análises não-lineares de ruptura sob ação de pressão interna.

3.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Como descrito na Introdução, nesta etapa do projeto, serão gerados modelos e efetuadas análises para dois espécimes tubulares (denominados ET1 e ET12) de dutos com defeitos de corrosão, incluindo a representação do cordão de solda longitudinal empregado na fabricação do duto, como indicado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Corte Transversal na Região do Defeito. [9]

Os espécimes reais foram confeccionados visando a execução de ensaios em laboratório, a partir de segmentos de duto retirados de operação, feitos de aço API 5L X46. O fechamento dos espécimes foi realizado pela soldagem de tampos toro-esféricos (*caps*) em suas extremidades.

Ambos os ETs têm 2 m de comprimento, com valores nominais para o diâmetro externo D_e e espessura t iguais a 457.2 mm e 6.35 mm, respectivamente. Cada um deles apresenta um defeito de corrosão longitudinal (que nos modelos reais foram gerados artificialmente por um processo de eletro-erosão na parede exterior), em uma posição equidistante dos *caps*. O defeito engloba a solda longitudinal, a zona termicamente afetada, e o metal de base. O eixo longitudinal do defeito e o eixo da solda longitudinal são coincidentes.

Os ETs distinguem-se entre si pelo comprimento longitudinal do defeito. Considera-se que o defeito de ambos os ETs tem os mesmos valores nominais de largura circunferencial e profundidade (embora, como será visto adiante, a profundidade real varia um pouco de um espécime para outro). A Figura 3.2 ilustra a distribuição geométrica do defeito sobre o duto planificado, apresentando suas principais dimensões (profundidade d , espessura remanescente t^* , comprimento L e largura l). Apresenta também os raios de concordância (ou "adoçamento") das bordas dos defeitos nas direções radial e circunferencial do duto, respectivamente R e r . Já a Figura 3.3 ilustra as dimensões da seção transversal do cordão de solda na região do defeito.

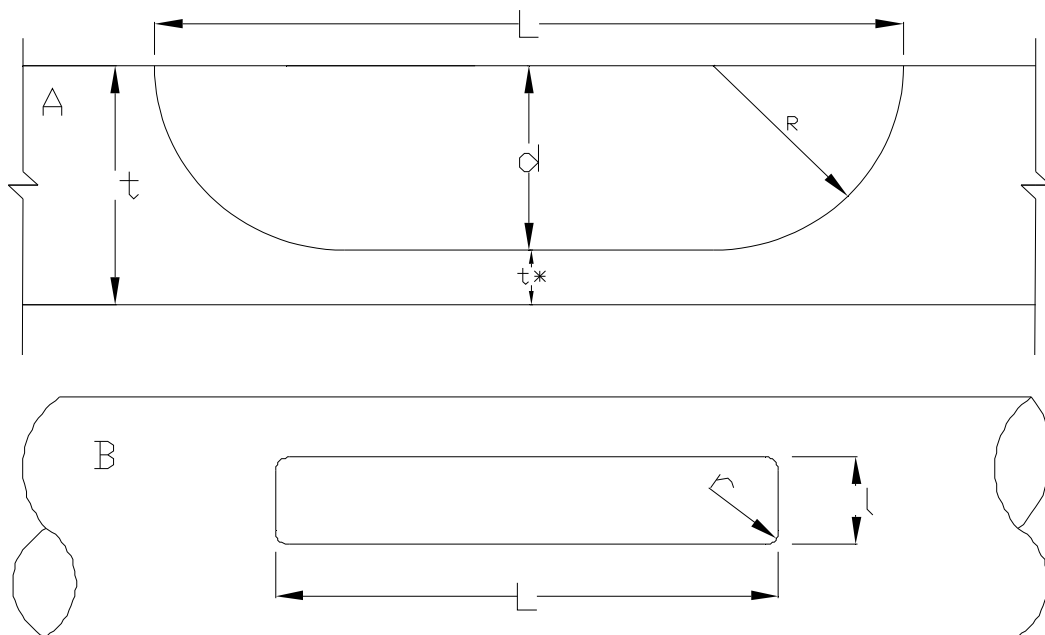


Figura 3.2 – Defeitos dos espécimes ET1 e ET2 (A – Corte, B – Vista Superior). [9]

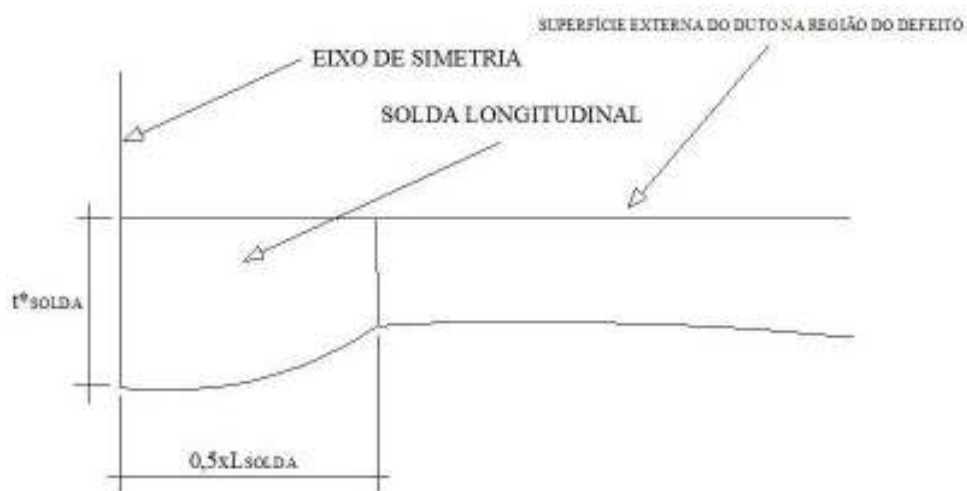


Figura 3.3 – Dimensões da seção transversal do cordão de solda na região do defeito. [9]

A

Tabela 3.1 apresenta os valores reais para as principais dimensões dos dois espécimes, incluindo as dimensões da seção transversal do cordão de solda na região do defeito. As características geométricas dos defeitos encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Dimensões dos Espécimes Tubulares (valores reais). [9]

Espécime	D_e <i>Diâmetro Externo</i> (mm)	t <i>Espessura</i> (mm)	t^* <i>Espessura do Cordão de Solda</i> (mm)	ℓ <i>Largura do Cordão de Solda</i> (mm)
ET1	457.8	6.4	3.3	15.0
ET2	457.5	6.5	3.5	11.0

Tabela 3.2– Dimensões dos Defeitos.[9]

Espécime	t <i>Espessura Íntegra</i> (mm)	t^* <i>Espessura Remanescente</i> (mm)	d <i>Profundidade</i> (mm)	L <i>Comprimento Longitudinal</i> (mm)	ℓ <i>Largura circunferencial</i> (mm)	R <i>Raio de Adoçamento, radial</i> (mm)	r <i>Raio de Adoçamento, circunferencial</i> (mm)
ET1	6.4	2.09	4.31	180.0	64.0	4.31	10
ET2	6.5	2.04	4.46	240.0	64.0	4.46	10

3.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Os espécimes tubulares reais (ET's) foram confeccionados em aço estruturado tipo API 5L X46, a partir de segmentos de um duto retirado de operação. As características físicas relevantes são as relacionadas a seguir:

E	Módulo de elasticidade longitudinal
σ_{yield}	Tensão de escoamento
ε_{yield}	Deformação correspondente à tensão σ_{yield}
σ_{ult}^*	Tensão última verdadeira
ε_{ult}^*	Deformação última verdadeira

Os valores para estes parâmetros foram obtidos em ensaios experimentais, e serão apresentados a seguir, respectivamente para o metal base e o metal de solda dos espécimes ET1 e ET2.

Apresentam-se também as curvas tensão–deformação completas determinadas para cada caso, com base em resultados de ensaios de tração uniaxial de corpos de prova.

- **ET1 – Metal Base**

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yield} = 350 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{yield} = 0.001750$$

$$\sigma_{ult}^* = 511.399 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ult}^* = 0.123000$$

Tabela 3.3 – ET1, Curva Tensão x Deformação do Metal Base. [9]

Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)
0.000000	0.00
0.001750	350.000
0.015777	400.000
0.023291	420.000
0.034148	440.000
0.049594	460.000
0.071253	480.000
0.115564	507.729
0.123000	511.399
0.246804	554.000

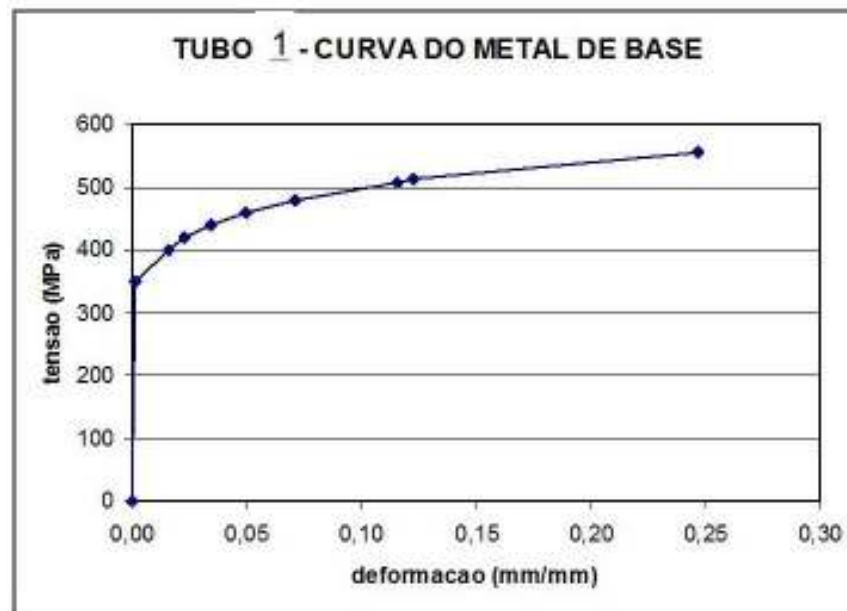


Figura 3.4 - ET1, Curva tensão - deformação do Metal Base. [9]

- **ET1 – Metal de Solda**

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yield} = 379 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ult}^* = 592.614 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{yield} = 0.001895$$

$$\varepsilon_{ult}^* = 0.125000$$

Tabela 3.4– ET1, Curva Tensão x Deformação do Metal de Solda. [9]

Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)
0.000000	0.00
0.001895	379.000
0.020219	440.000
0.026275	460.000
0.033913	480.000
0.043462	500.000
0.055299	520.000
0.069858	540.000
0.087632	560.000
0.109183	580.000
0.125000	592.614
0.158261	615.201
0.327771	690.000

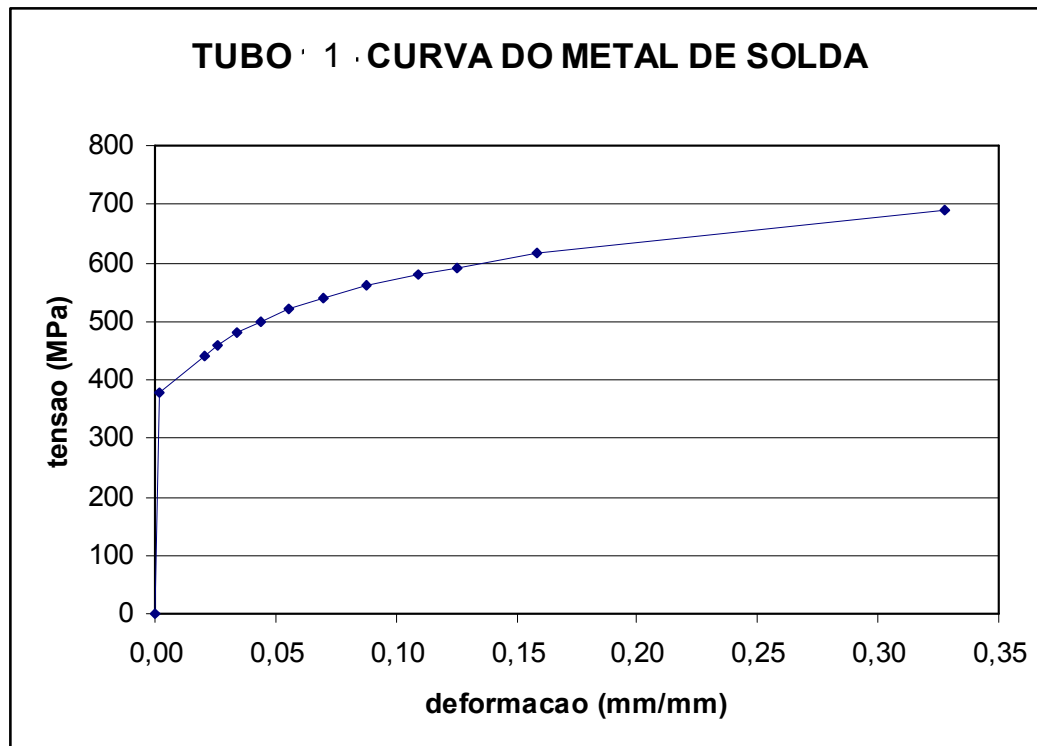


Figura 3.5 - ET1, Curva tensão - deformação do Metal de Solda. [9]

- ET2 – Metal Base**

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yield} = 299 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{yield} = 0.001495$$

$$\sigma_{ult}^* = 543.876 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ult}^* = 0.165$$

Tabela 3.5 – ET2, Curva Tensão x Deformação do Metal Base. [9]

Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)
0.000000	0.00
0.001495	299.000
0.015547	360.000
0.027819	400.000
0.036671	420.000
0.047865	440.000
0.061877	460.000
0.079252	480.000
0.113002	510.000
0.165000	543.876
0.169424	546.320
0.341602	615.000

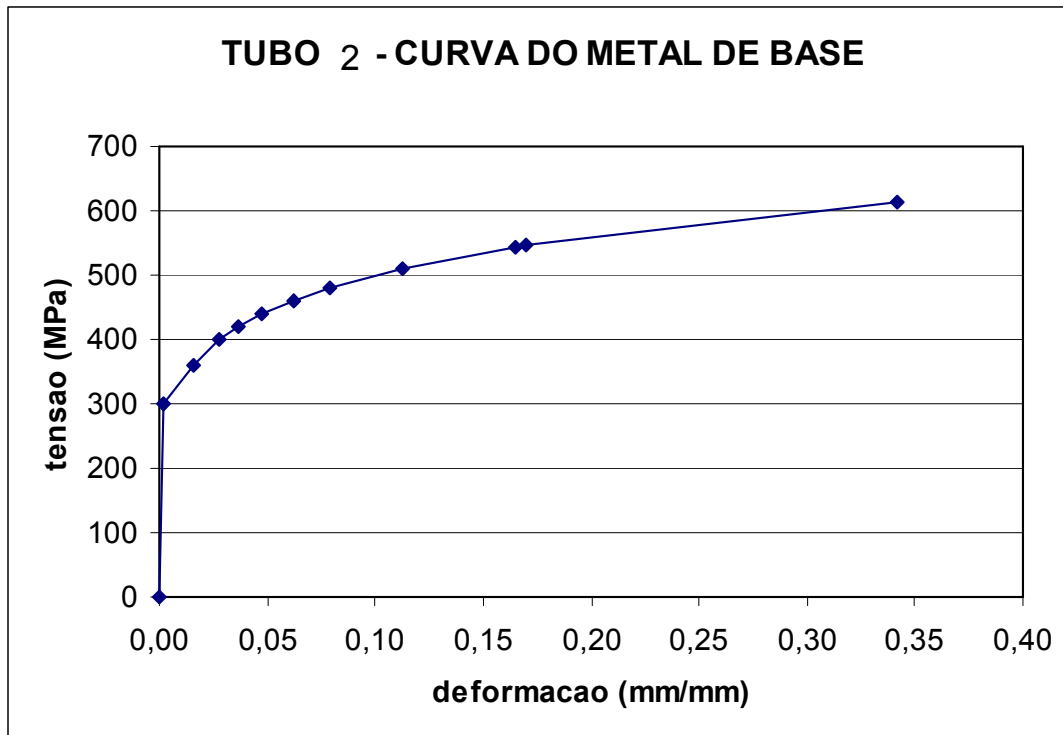


Figura 3.6 – ET2, Curva tensão - deformação do Metal Base. [9]

- **ET2 – Metal de Solda**

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{yield} = 387 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{yield} = 0.001935$$

$$\sigma_{ult}^* = 581.094 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ult}^* = 0.1130$$

Tabela 3.6 – ET2, Curva Tensão x Deformação do Metal de Solda. [9]

Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)
0.000000	0.00
0.001935	387.000
0.023874	460.000
0.031429	480.000
0.041091	500.000
0.053333	520.000
0.068710	540.000
0.087868	560.000
0.113000	581.094
0.145961	603.261
0.294374	668.000

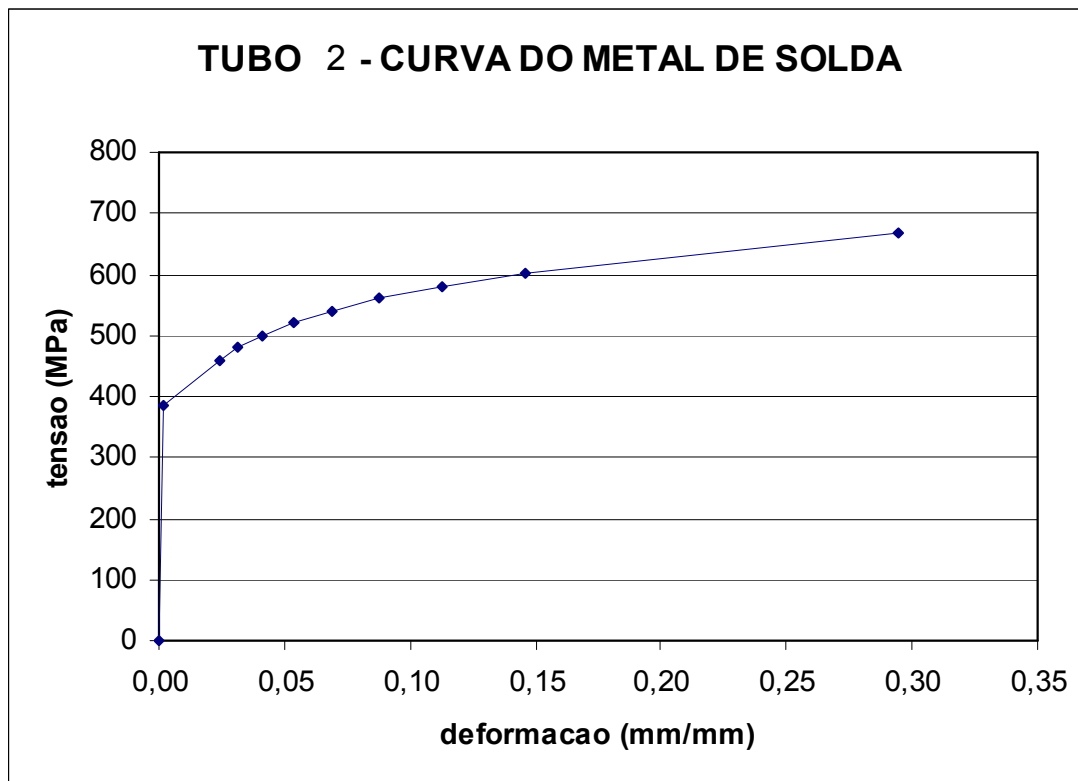


Figura 3.7 – ET2, Curva tensão - deformação do Metal de Solda. [9]

3.3 - GENERALIDADES DAS MALHAS

Para a análise não-linear de ruptura dos dutos com defeitos de corrosão, foram gerados modelos de Elementos Finitos, utilizando-se elementos sólidos hexaédricos de 8 nós disponíveis na biblioteca do programa Ansys [10]. Esses elementos possuem oito nós, com três graus de

liberdade (translação nas direções x , y e z). Permitem a definição de equações constitutivas não-lineares elasto-plásticas, e são também capazes de sofrer grandes deslocamentos.

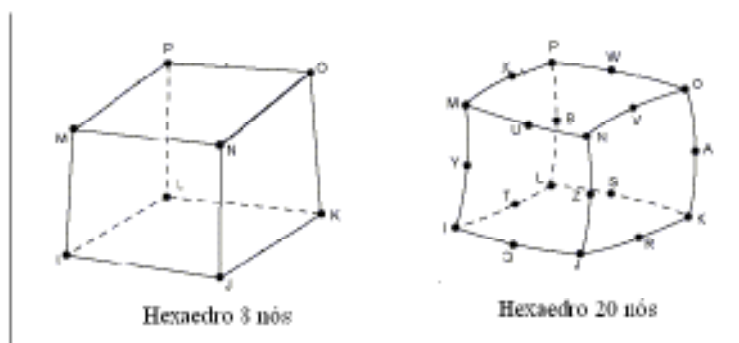


Figura 3.8 – Sólidos hexaédricos utilizados pelo Ansys. [10]

Para a construção de todos os modelos, procurou-se gerar, tanto quanto possível, malhas não muito pesadas, de forma a minimizar o tempo na modelagem e de processamento das análises. Esta estratégia de modelagem visou otimizar a geração e análise dos modelos.

3.4 - CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como mencionado anteriormente, os modelos considerados apresentam apenas um defeito, distinguindo-se entre si pelo comprimento do defeito (L). Desta forma, ambos apresentam simetria em relação ao plano xy , que corta os espécimes tubulares transversalmente passando pelo centro do defeito, e ao plano xz , que os corta longitudinalmente passando pelo centro do defeito dividindo-os em duas calhas.

A existência de planos de simetria permite a modelação de apenas um quarto dos espécimes, desde que sejam levadas em conta as devidas condições de contorno e de simetria, ilustradas na Figura 3.9. Estas condições são idênticas para todos os modelos.

Como essas condições de simetria não impõem nenhuma restrição ao deslocamento na direção x , o modelo numérico torna-se hipostático nesta direção, inviabilizando a análise. Daí a necessidade da criação de alguma restrição para se evitar hipostaticidade, interferindo-se o menos possível no resultado da análise.

A solução adotada foi considerar o deslocamento nulo nesta direção em cada um dos nós situados sobre a superfície externa do espécime na borda a 180 graus da borda em que se encontra o defeito.

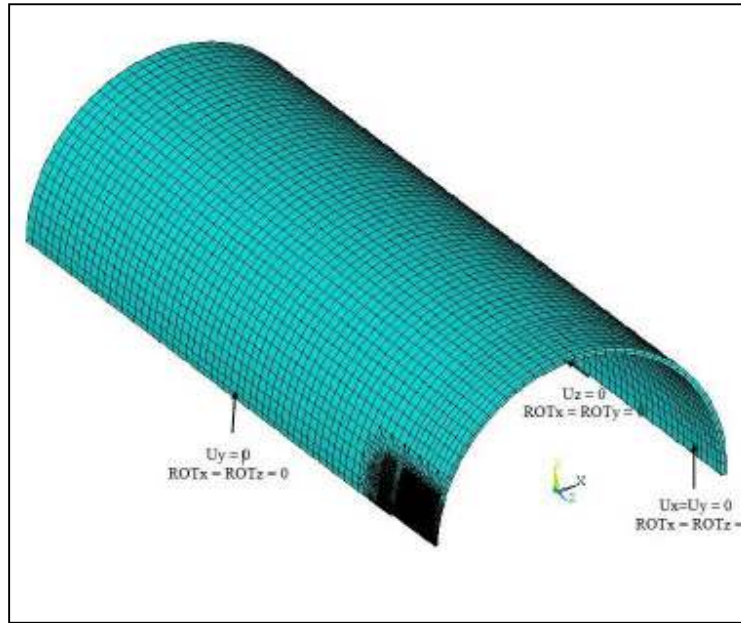


Figura 3.9 - Sistema global de coordenadas e condições de contorno dos modelos sólidos.

3.5 - EXTENSÃO DAS MALHAS NA DIREÇÃO LONGITUDINAL (C_T)

A geração dos modelos de elementos finitos, considerando apenas um quarto do espécime tubular devido à presença de simetrias como descrito no item anterior, é efetuada para uma extensão na direção longitudinal (C_l) determinada pela seguinte equação, em função do comprimento longitudinal do defeito L e do diâmetro externo do tubo D_e :

$$C_l = \frac{L}{2} + 2 \cdot D_e$$

A Figura 3.10 ilustra a extensão da malha assim determinada.

Já que os modelos considerados nesta etapa diferem entre si apenas pelo comprimento do defeito, as malhas foram geradas diminuindo-se ou acrescentando-se novas faixas semicircunferenciais de elementos no extremo mais próximo ao defeito, até ser alcançada a metade do comprimento do defeito. Como este decréscimo ou acréscimo não foi descontado no outro extremo do duto, cada modelo, portanto, possui um valor diferente para a extensão na direção longitudinal (C_l).

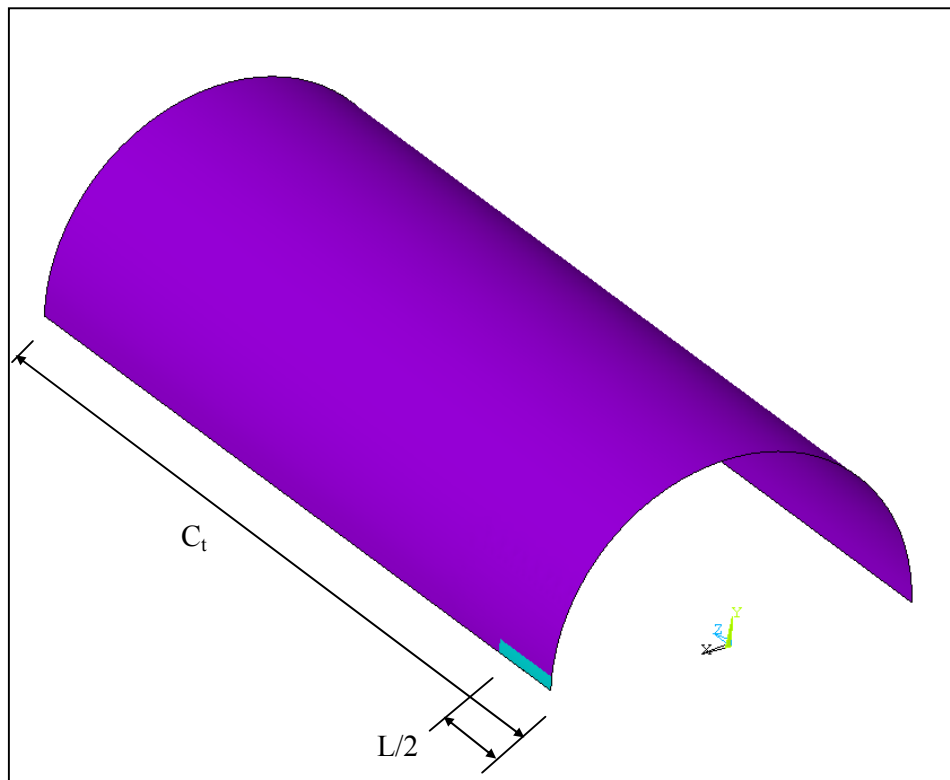


Figura 3.10 – Dimensão longitudinal do modelo de elementos finitos, com simetria nos planos xy e xz .

3.6 - VISUALIZAÇÃO DAS MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS

As Figuras apresentadas a seguir ilustram as malhas de elementos finitos geradas para os espécimes ET1 e ET2.

Para cada malha, apresenta-se uma vista completa em perspectiva, e outras duas com ampliações próximas à região dos defeitos.

3.7 - DETALHES DA MALHA DO MODELO ET1

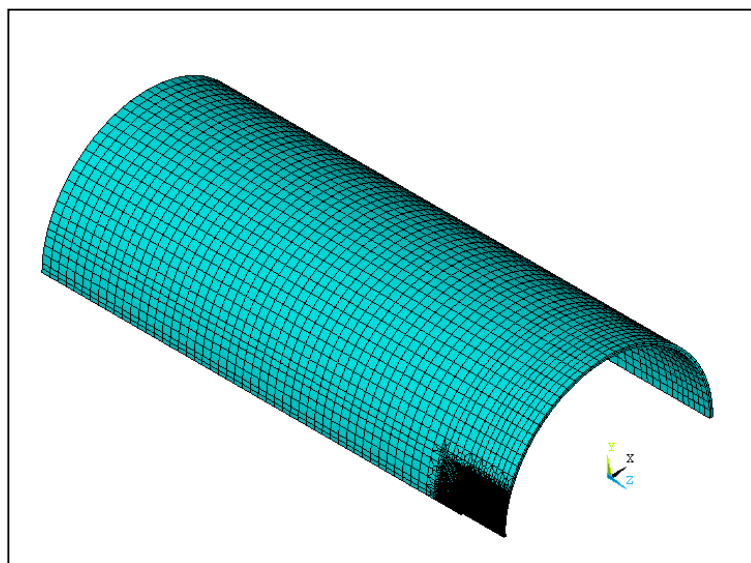


Figura 3.11 – ET1, Malha de elementos finitos.

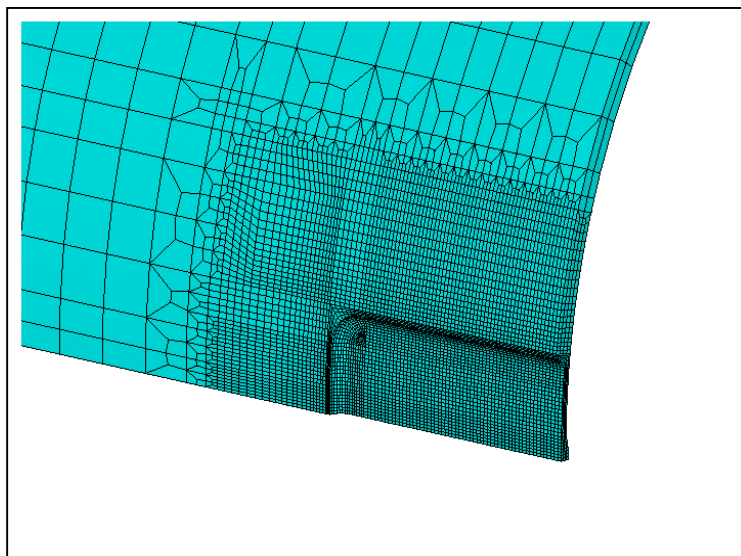


Figura 3.12 – ET1, Detalhe da região do defeito.

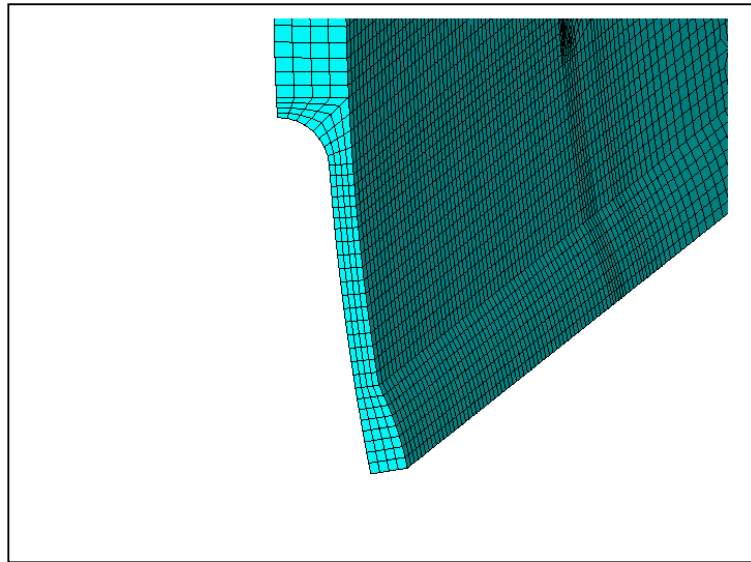


Figura 3.13 – ET1, Detalhe da Malha na Região do Cordão de Solda.

3.8 - DETALHES DA MALHA DO MODELO ET2

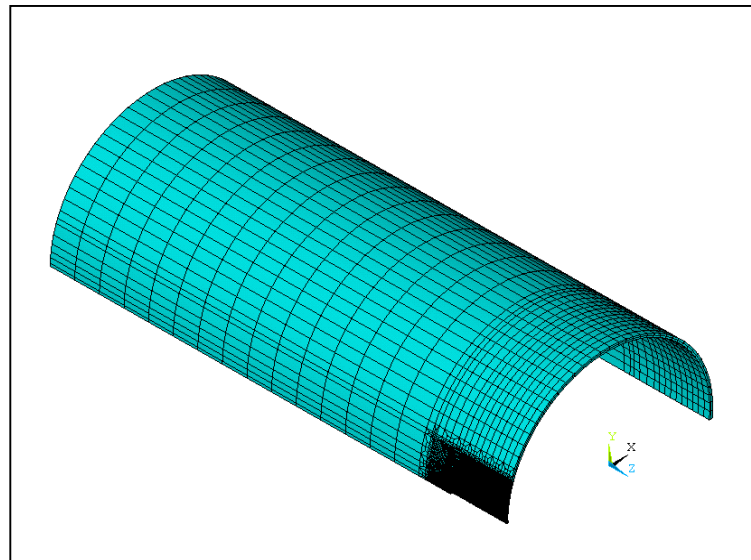


Figura 3.14 – ET2, Malha de elementos finitos.

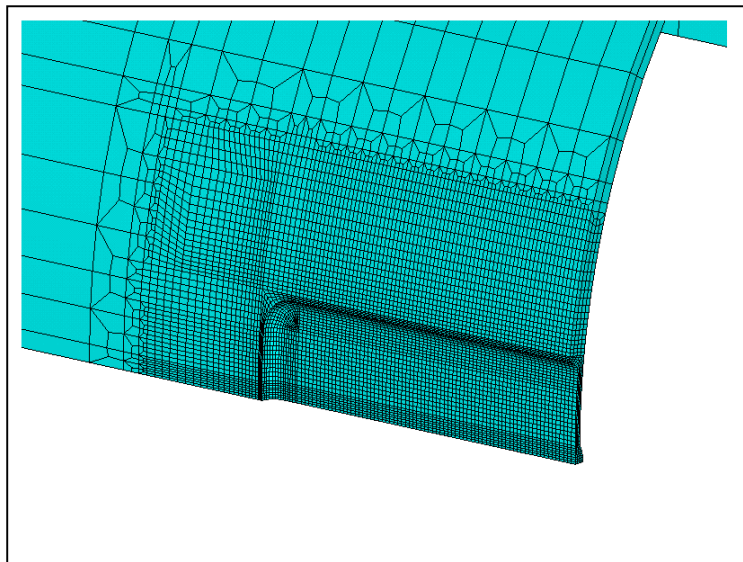


Figura 3.15 – ET2, Detalhe da região do defeito.

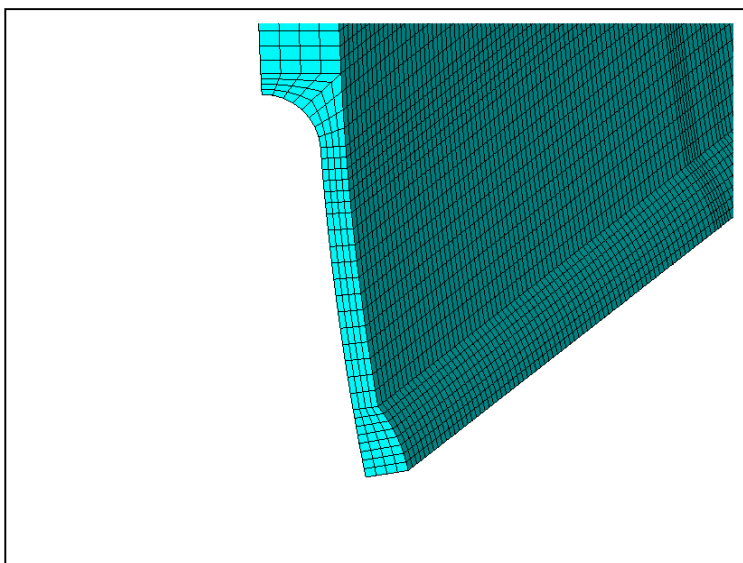


Figura 3.16 – ET2, Detalhe da Malha na Região do Cordão de Solda.

3.9 - ESTRATÉGIA DE ANÁLISE

Tomando-se os modelos de Elementos Finitos descritos na seção anterior, são realizadas análises não-lineares aplicando-se um carregamento de pressão interna. Este carregamento é decomposto em dois tipos de carga:

- A pressão interna p propriamente dita, aplicada perpendicularmente à superfície dos elementos na parede interna do tubo, e

- Uma carga de extremidade que gera uma força longitudinal de tração. Esta carga é aplicada na extremidade do modelo, na direção longitudinal, como uma pressão p_L determinada de modo a representar a força transmitida pela pressão atuante nos tampos planos usados na vedação dos ET's reais.

Onde,

$$p_L = \frac{p_l}{D_e}$$

As análises são realizadas usando a opção de processamento em modo *batch* do ANSYS.

O carregamento, constituído pela pressão interna p e pela carga de extremidade, é aplicado incrementalmente, de acordo com o procedimento de análise apresentado nos parágrafos a seguir, até o ET atingir a ruptura de acordo com os critérios de ruptura especificados a seguir.

Cada passo de carga (*load step*) é dividido em 4 sub-passos (*substeps*). Dentro de cada passo, especifica-se uma variação linear do incremento de carga.

Como se trata de análises de colapso não-lineares, onde o objetivo é exatamente definir o valor da carga ou pressão de ruptura, não é possível determinar *a priori* os valores de pressão a serem aplicados em cada passo de carga para que os resultados obtidos sejam confiáveis. Uma solução para isto seria ativar o recurso do ANSYS que determina automaticamente o valor dos incrementos de carga (*automatic time step*).

No entanto, optou-se por realizar a análise usando o recurso de SAVE/RESTART, e a partir da investigação dos resultados dos passos concluídos, determinar o valor da pressão para os próximos passos, segundo um conjunto de regras definidas a seguir.

Inicialmente, é realizada uma análise elástica linear geométrica do espécime, submetido a uma pressão p_{lin} de valor unitário, para determinação de $(\sigma_{eqv})_{lin}$, o valor máximo da tensão de von Mises correspondente a esta pressão. Considerando-se que o modelo usado nesta etapa é linear, determina-se o valor aproximado da pressão p_{yield} de início de escoamento da seguinte forma [9][11]:

$$p_{yield} = \sigma_{yield} \frac{p_{lin}}{(\sigma_{eqv})_{lin}} \quad (1)$$

onde σ_{yield} é a tensão de escoamento do material.

A partir do valor assim obtido para p_{yield} , o valor da pressão p_i a ser aplicada em cada passo de carga da análise não-linear geométrica e física. Que é determinada pela seguinte equação:

$$p_i = p_{i-1} + \Delta p_i \quad (2)$$

onde,

$$p_0 = 0$$

$$\Delta p_i = \frac{1}{4} p_{yield}, \text{ para } i = 1, 2, 3, 4$$

Para a primeira estimativa, tem-se:

$$\Delta p_5 = 0.5 \Delta p_4$$

$$\Delta p_i = \Delta p_{i-1}; \text{ para } i > 5 \quad (3)$$

Assim, nos primeiros quatro passos de carga, espera-se que todos os pontos do espécime tubular permaneçam no regime elástico. O início da plastificação pode ocorrer, ou não, no passo de carga 5, dependendo do grau de precisão da estimativa feita para o valor de p_{yield} .

A partir do passo de carga 6, a pressão p_i determinada por meio das equações 2 e 3 é na realidade uma primeira estimativa que pode ser revista, seja porque a convergência não foi alcançada em um dos sub-passos, ou porque o valor do incremento máximo de deformação plástica PSINC (*maximum plastic strain increment*) foi muito grande em um dos sub-passos.

Para lidar com as diversas situações que podem ocorrer em cada passo de carga, ao longo do processo de aplicação incremental da pressão, são empregadas as seguintes regras:

Regra 1

Na determinação dos valores de p_i e Δp_i , não devem ser feitos arredondamentos. Estes valores devem ser escritos com 2 casas decimais (desprezando-se as demais casas) quando a pressão de ruptura esperada $(p_f)_{esp}$ for maior ou igual a 10MPa e com 3 casas decimais (desprezando-se as demais casas) quando a pressão de ruptura esperada (p_f) for menor que 10MPa. A pressão de ruptura esperada $(p_f)_{esp}$ pode ser considerada igual à pressão de ruptura determinada no ensaio de laboratório do ET. Caso este ensaio não tenha sido realizado, calcula-se o valor da pressão de ruptura esperada $(p_f)_{esp}$ usando a equação de um método empírico para avaliação de dutos corroídos.

Regra 2

Caso a análise tenha sido interrompida por falta de convergência no sub-passo 1 ou 2, o passo de carga deve ser repetido aplicando-se uma pressão igual à pressão do passo de carga anterior p_{i-1} mais um incremento de pressão Δp_i igual à metade do incremento que havia sido usado.

Regra 3

Caso a análise tenha sido interrompida por falta de convergência no sub-passo 3 ou 4, o passo de carga deve ser repetido aplicando-se a pressão que havia sido aplicada no sub-passo imediatamente anterior.

Regra 4

Caso o valor do incremento máximo de deformação plástica tenha sido maior que 0,0025, em um dos sub-passos de um passo de carga, este passo deve ser repetido aplicando-se uma pressão menor, determinada usando os critérios das Regras 2 e 3.

Regra 5

Caso o critério de ruptura tenha sido atingido ou ultrapassado, a análise deve ser interrompida.

Regra 6

Caso o valor do incremento de pressão Δp_i , determinado aplicando-se as Regras 2, 3 e 4, fique menor que Δp_{min} , sendo Δp_{min} igual ao menor dos valores dentre 0,01 MPa e 0,001 $(p_f)_{esp}$, a análise deve ser interrompida pois, do ponto de vista de um problema de engenharia, incrementos de pressão menores que este valor são desprezíveis.

Como será descrito adiante, para acompanhar a execução da análise utiliza-se uma tabela com as seguintes colunas: número do passo de carga (*load step*), pressão p_i no passo, incremento de pressão Δp_i no passo, pressão no sub-passo (*substep*), quantidade de iterações no subpasso, tensão equivalente máxima no sub-passo e incremento máximo de deformação plástica PSINC no sub-passo.

3.10 - CRITÉRIOS DE RUPTURA ESTRUTURAL

A ruptura de um duto corroído pode ser definida como o instante em que a sua estanqueidade é perdida, ou seja, o instante em que começa a ocorrer vazamento (de líquido ou gás) através de uma descontinuidade (rasgo, fissura ou trinca) surgida na região do defeito.

Em simulações numéricas que utilizam modelos baseados na Mecânica do Contínuo, como as apresentadas no presente relatório, não há como representar o surgimento de descontinuidades no material. Por este motivo, torna-se necessário estabelecer um critério para detectar ao longo da análise a proximidade de um estado de ruptura. Desta forma, para as análises com os modelos apresentados no presente Relatório, foram adotados dois critérios de ruptura especificados pela Petrobras, um global e outro local, conforme descrito a seguir.

- O critério global estabelece que quando o algoritmo de solução do problema não-linear deixa de convergir, mesmo para incrementos de carga muito pequenos como os especificados na Regra 6 do item anterior, fica caracterizado um estado de ruptura.
- O critério local estabelece que o duto atingiu um estado de ruptura quando a tensão de von Mises em um ponto qualquer do defeito atinge a tensão última verdadeira do material.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4 - SUMÁRIO DOS RESULTADOS

Para cada modelo ilustrado no capítulo III, foram efetuadas análises não-lineares de ruptura sob pressão interna, de acordo com o procedimento apresentado na seção anterior. Nesta seção, apresenta-se um sumário dos resultados obtidos em termos de gráficos e tabelas com parâmetros relevantes.

4.1 - CURVAS PRESSÃO X DESLOCAMENTO

Inicialmente, a figura a seguir apresenta as curvas pressão \times deslocamento radial (translação na direção x) do nó de simetria, localizado no ponto de interseção dos eixos de simetria. Este nó apresenta o maior deslocamento radial em cada modelo. Cada ponto destas curvas representa um substep salvo na análise.

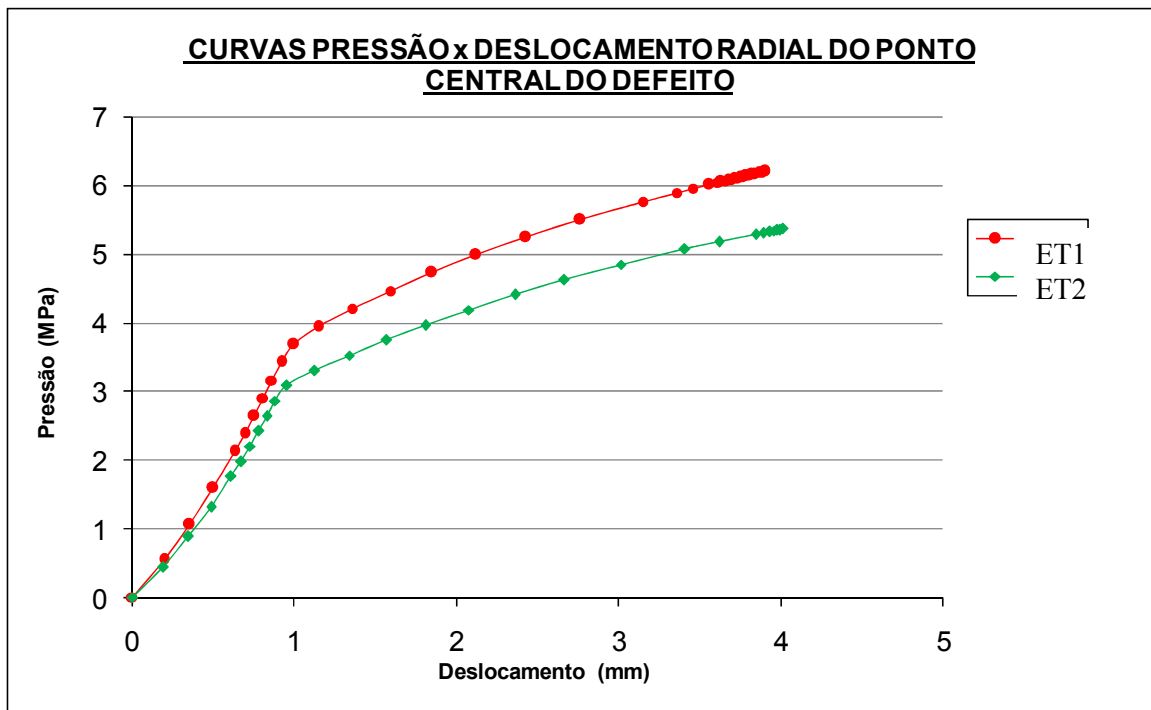


Figura 4.1 - Curva Pressão x Deslocamento radial do ponto central do defeito

4.2 - TABELAS COM RESULTADOS RELEVANTES

Na Tabela a seguir, apresenta-se um resumo dos parâmetros e resultados mais relevantes para os modelos ET1 e ET2:

- $(\sigma_{eqv})_{lin}$, o valor máximo da tensão de von Mises correspondente a uma pressão p_{lin} , de valor unitário, aplicada no passo da análise linear, de acordo com a estratégia descrita anteriormente.
- σ_{ult} tensão última de engenharia do material base.
- p_{yield} , a estimativa da pressão de início de escoamento, calculada a partir de $(\sigma_{eqv})_{lin}$, pela *Equação 1* do item 3.9.
- p_f , o último valor de pressão fornecido pela análise de Elementos Finitos, correspondente ao critério de ruptura considerado.
- p_u , pressão de ruptura do metal base do duto sem defeito p_u , determinada pela seguinte expressão:

$$p_u = \frac{2t}{D_e - t} \sigma_{ult}.$$

- Razão p_f / p_u (pressão correspondente ao critério de ruptura / pressão de ruptura do duto sem defeito p_u). Esta razão permite avaliar a influência do comprimento do defeito na resistência do duto corroído.

Tabela 4.1– Resultados para ET1 e ET2

Modelo	L <i>Comprimento Longitudinal do Defeito (mm)</i>	t <i>Espessura Inteira (mm)</i>	(σ_{eqv})_{lin} (MPa)	σ_{ult} (MPa)	p_{yield} (MPa)	p_f (MPa)	p_u (MPa)	$\frac{p_f}{p_u}$
ET1	180	6.4	162.41	511.40	2.12	6.19	14.5	0.43
ET2	240	6.5	168.04	543.88	1.76	5.35	15.7	0.34

4.3 RESULTADOS DETALHADOS

No Apêndice A, encontram-se as planilhas correspondentes às análises dos modelos ET1 e ET2, apresentando, para cada passo de carga, o valor da pressão interna aplicada, o incremento de carga em cada sub-passo, bem como a quantidade de iterações de cálculo efetuadas pelo programa para se alcançar convergência da solução.

Nesta Seção, apresentam-se resultados detalhados em termos de figuras que ilustram o comportamento do duto em diferentes fases da análise (início de escoamento do duto, configuração deformada na ruptura, etc.).

Os resultados detalhados são apresentados na seguinte seqüência:

- Detalhe do mapa de tensões de von Mises, na região do defeito, correspondente ao menor incremento de carga que promove escoamento do duto. Em outras palavras, o mapa de tensões correspondente ao incremento de carga imediatamente superior ao valor da tensão de proporcionalidade;
- Detalhe do mapa de tensões de von Mises na região do defeito, correspondente ao incremento de carga que promove a ruptura estrutural do duto;
- Detalhe do mapa de tensões de von Mises na região do cordão de solda, correspondente ao incremento de carga que promove a ruptura estrutural;
- Perspectiva do modelo, mostrando o mapa de tensões de von Mises à pressão de ruptura e os respectivos valores (legenda e contornos);
- Perspectiva do duto completo, mostrando o mapa de tensões de von Mises correspondente à pressão de ruptura;

- f)** Detalhe do mapa de tensões de von Mises na região do defeito, para o modelo completo, correspondente à pressão de ruptura, juntamente com a malha;
- g)** Configuração deformada correspondente ao momento de ruptura, afetada por um fator de escala (10:1) para facilitar a visualização, junto com as configurações originais dos dutos.

- **Resultados ET1**

a)

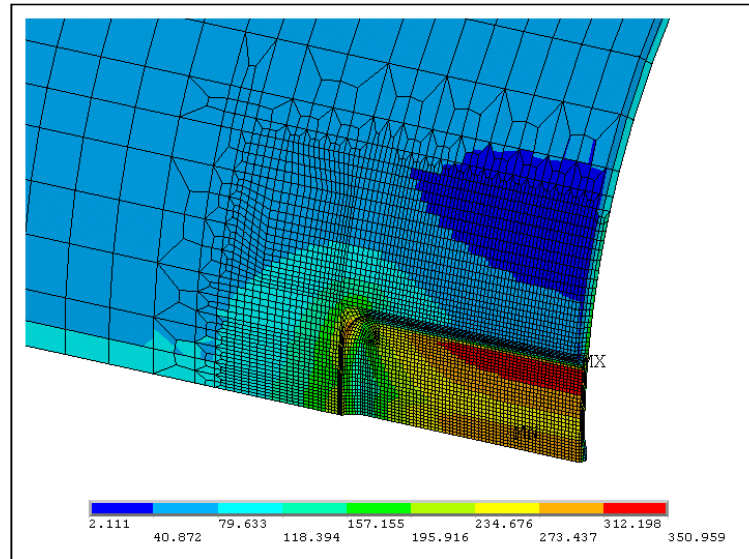


Figura 4.2 – ET1, Detalhe do mapa de tensões início do escoamento.

b)

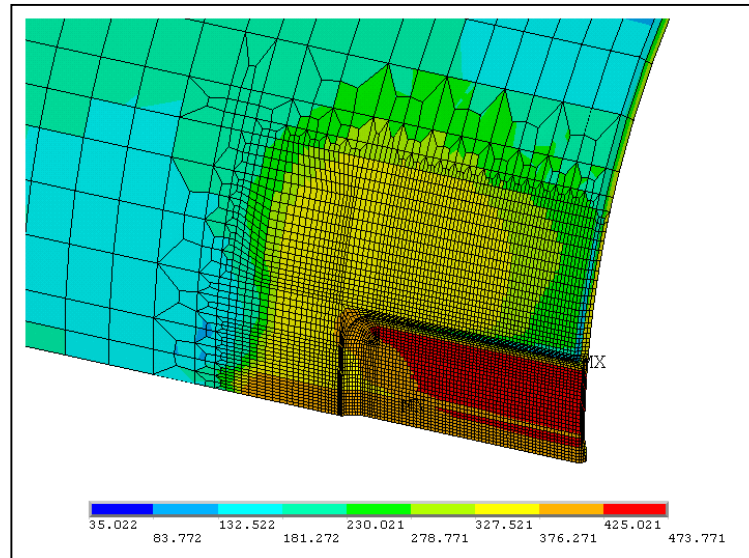


Figura 4.3 – ET1, Detalhe do mapa de tensões, pressão de ruptura.

c)

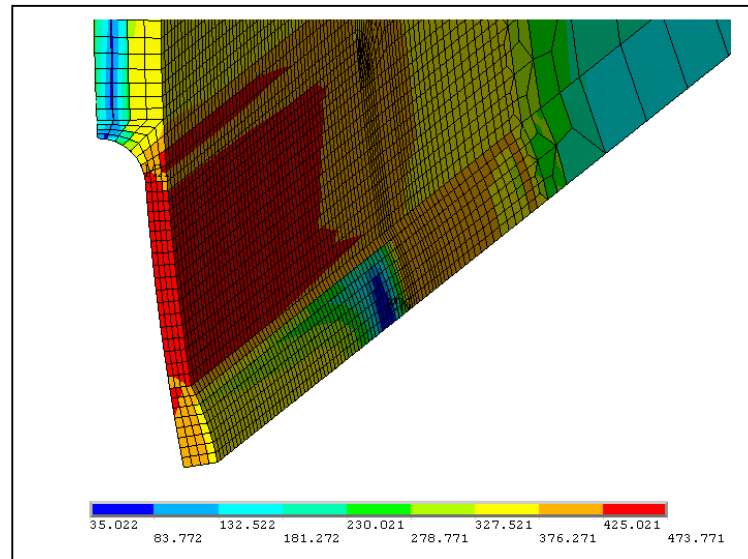


Figura 4.4 – ET1, Detalhe do mapa de tensões no cordão de solda, pressão de ruptura.

d)

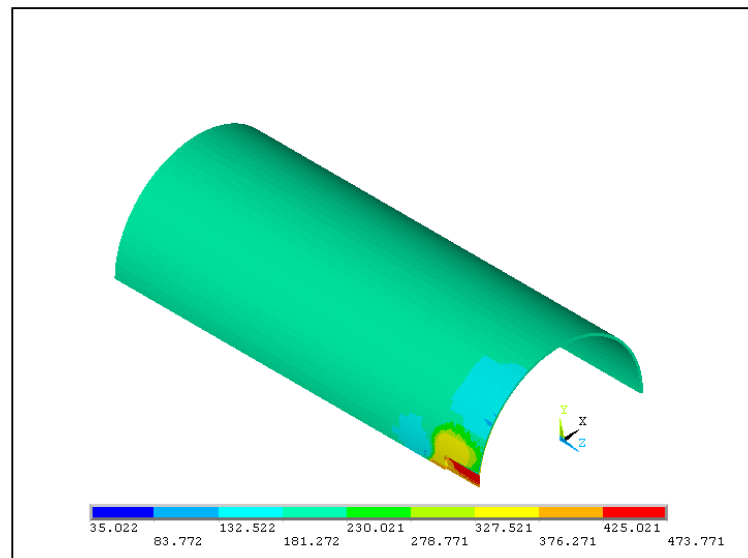


Figura 4.5 – ET1, Perspectiva do modelo, pressão de ruptura.

e)

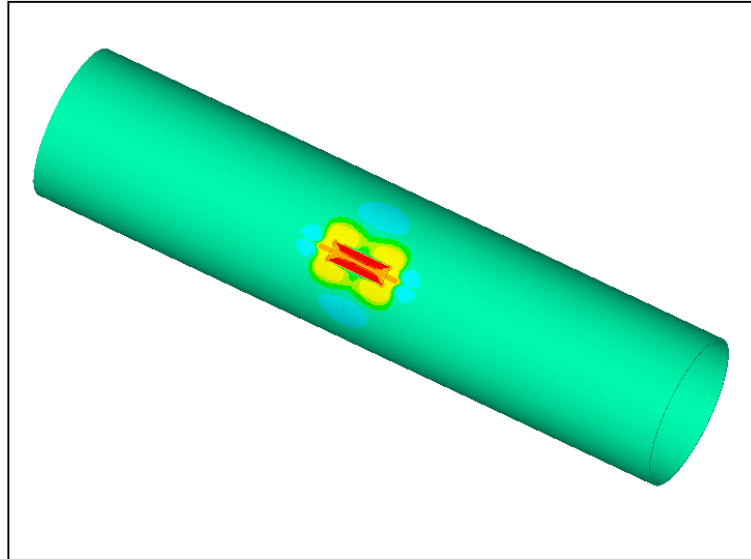


Figura 4.6 – ET1, Perspectiva do duto completo, pressão de ruptura.

f)

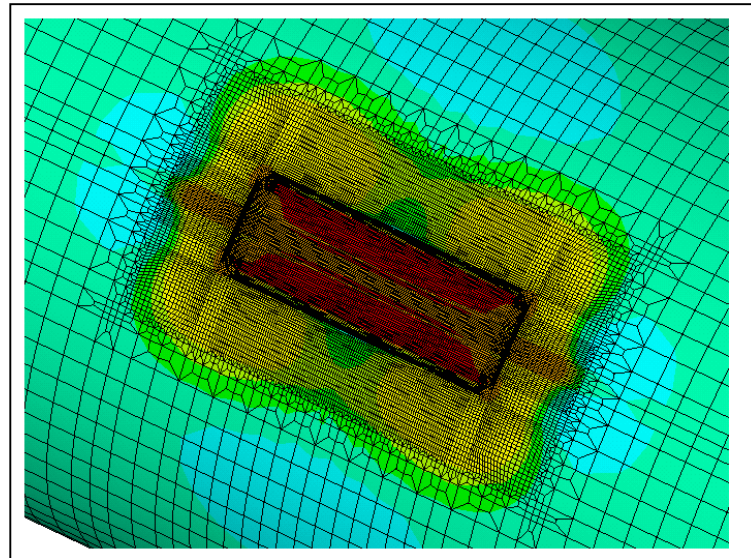


Figura 4.7 – ET1, Detalhe do mapa de tensões juntamente com a malha, pressão de ruptura.

g)

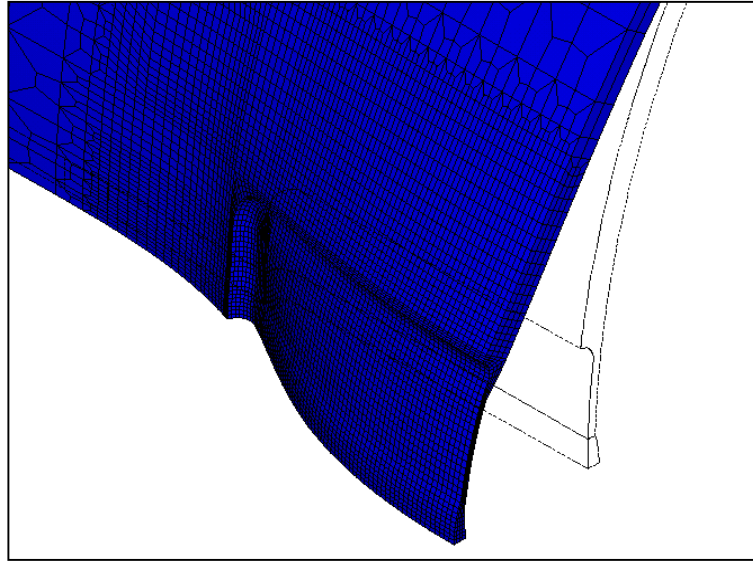


Figura 4.8 – ET1, Deformação no momento de ruptura. Fator de escala (10:1).

- Resultados ET2

a)

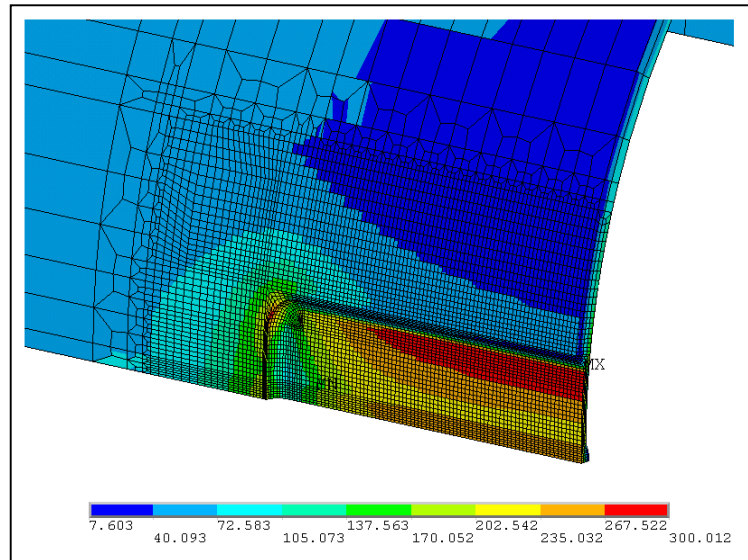


Figura 4.9 – ET2, Detalhe do mapa de tensões início do escoamento.

b)

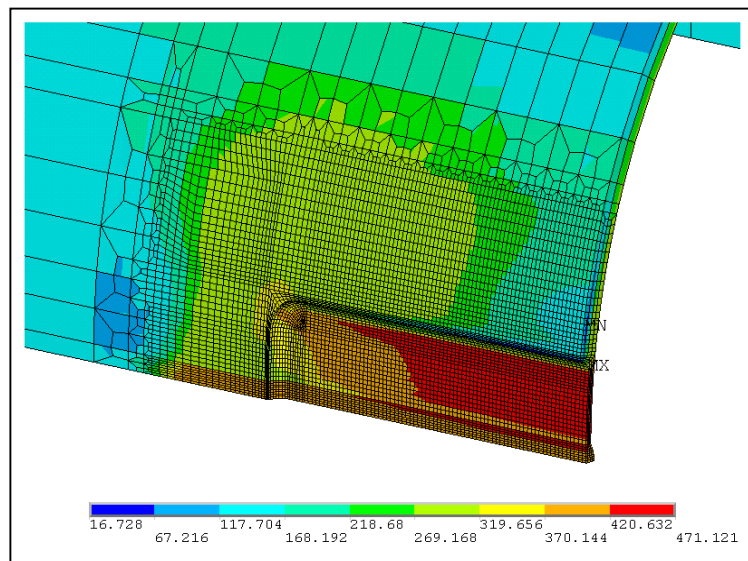


Figura 4.10 – ET2, Detalhe do mapa de tensões, pressão de ruptura.

c)

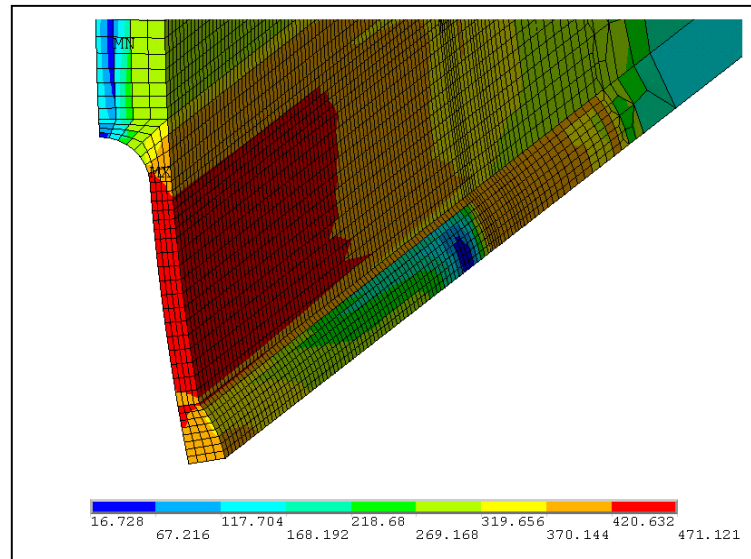


Figura 4.11 – ET2, Detalhe do mapa de tensões no cordão de solda, pressão de ruptura.

d)

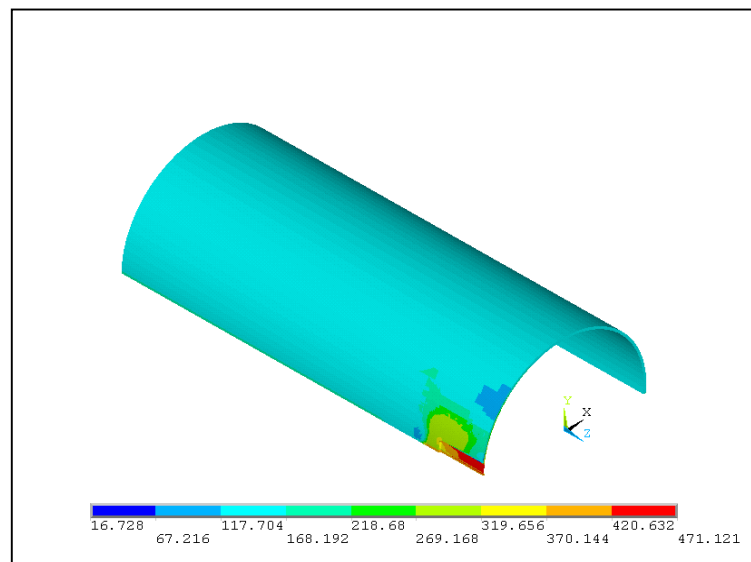


Figura 4.12 – ET2, Perspectiva do modelo, pressão de ruptura.

e)

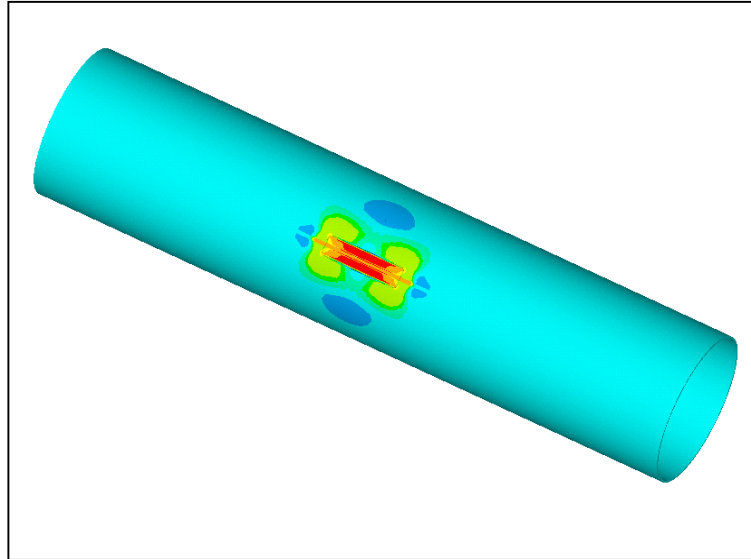


Figura 4.13 – ET2, Perspectiva do duto completo, pressão de ruptura.

f)

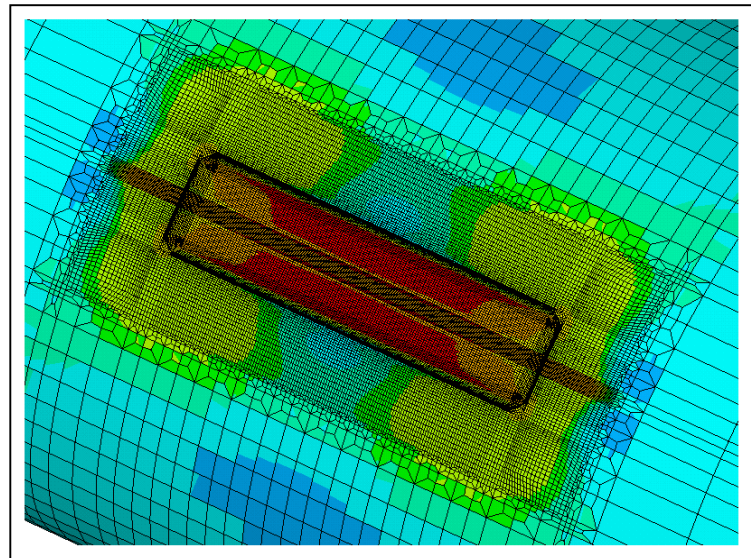


Figura 4.14 – ET2, Detalhe do mapa de tensões juntamente com a malha, pressão de ruptura.

g)

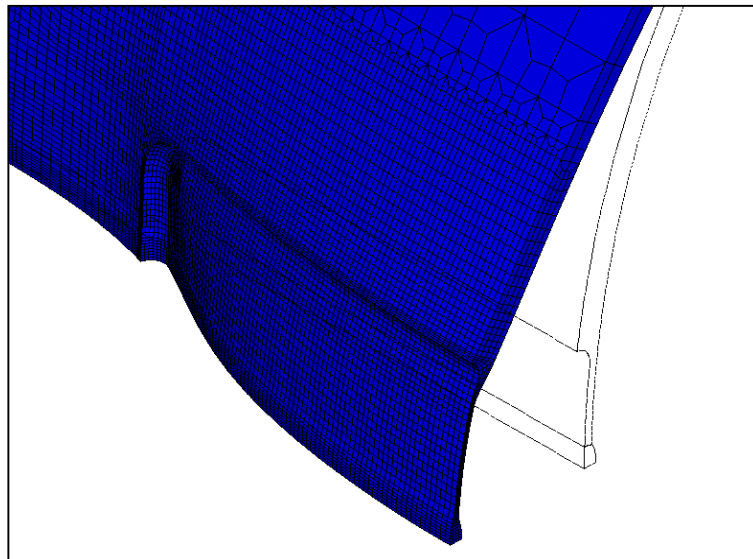


Figura 4.15 – ET2, Deformação no momento de ruptura. Fator de escala (10:1).

CAPÍTULO 5

COMENTÁRIOS FINAIS

5 - APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE RUPTURA

Recordando-se o que foi exposto anteriormente, a estratégia de análise emprega regras que tratam a falta de convergência no procedimento de solução do problema não-linear. Em particular, as regras 2, 3 e 6 estabelecem que quando a convergência não é alcançada em algum sub-step, o valor do incremento de pressão é reduzido para um valor definido de acordo com o sub-step onde aconteceu a falta de convergência. Este processo continua até que a convergência seja alcançada, ou até que o incremento de pressão atinja um limite mínimo estabelecido pela regra 6, abaixo do qual se tornaria desprezível a ponto de não influenciar no resultado. Neste caso, estaria configurada a ruptura estrutural do duto, de acordo com o critério global estabelecido no item 3.10.

No modelo ET1, a análise foi interrompida duas vezes nos sub-steps 1 ou 2 (aplicando-se portanto a regra 2, reduzindo o incremento de pressão pela metade de seu valor), e três vezes por falta de convergência nos sub-steps 3 ou 4 (aplicando-se a regra 3), até que a análise foi encerrada pela regra 6.

No ET2, por três vezes ocorreram falhas de convergência nos substeps 1 ou 2 (aplicando-se a regra 2), e duas vezes nos substeps 3 ou 4, até que o incremento atingiu o limite mínimo estabelecido pela regra 6.

Com isto, as análises dos modelos ET1 e ET2 foram interrompidas pelo critério de ruptura global estabelecido no item 3.10, ao atingirem 43% e 34% da pressão de ruptura do duto sem defeito, respectivamente, como indicado na Tabela 4.1.

5.1 – CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal idéia deste trabalho foi exemplificar a metodologia de utilização do Método dos Elementos Finitos aplicada com os recursos computacionais mais utilizados no mercado atualmente. Para isso, foi introduzido o estudo de um caso específico baseado em um projeto de pesquisa para avaliação de alguns casos reais de dutos corroídos retirados de operação.

Com esse objetivo foram gerados, com ajuda do programa ANSYS, modelos de dutos que simulam com fidelidade todas as características dos elementos reais. A partir desses modelos foram elaboradas malhas de elementos finitos, com sólidos hexaédricos.

Tais malhas foram dispostas sobre os modelos sólidos de forma a priorizar as regiões consideradas críticas, ou seja, nas áreas onde era esperado que fossem atingidas tensões mais altas (região do defeito) a malha apresenta um maior refinamento. E conforme afasta-se do defeito são feitas transições para diminuir a quantidade de elementos, deixar a malha mais leve, e reduzir o tempo de análise.

Foram realizadas análises não-lineares de ruptura sob ação de pressão interna, de modo a entender a influência do defeito gerado por corrosão sobre o cordão de solda presente.

Tomando-se os resultados apresentados, em termos de tensões e pressões de ruptura, pode-se então perceber que o comportamento dos espécimes tubulares submetidos ao carregamento interno, foi similar aos dutos reais nos quais foram baseados. Apresentando tensões de ruptura muito próximas das obtidas nos resultados empíricos.

Esse resultado valida os modelos, e o método de análise utilizado, e mostra que o processo de análise computacional é altamente confiável se aplicado corretamente.

A sugestão para continuidade desse trabalho seria a implementação de pits de corrosão internos nos modelos analisados, de modo a simular o desgaste natural dos dutos. Para realizar

essa simulação, será necessário um refinamento muito maior da malha de elementos finitos na região dos Pits, o que levaria a um tempo de processamento de dados muito maior.

A realização de estudos paramétricos também poderia gerar resultados interessantes para essa pesquisa, uma vez que mantendo todos os parâmetros iguais, e variando apenas o comprimento longitudinal do defeito externo, poderíamos ter uma noção mais clara da influencia deste na integridade estrutural dos dutos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Produção de Óleo e Gás, TRANSPETRO, Disponível em: <http://www.transpetro.com.br/TranspetroSite/appmanager/transpPortal.html>, Consultado em Novembro de 2009.
- [2] SME B31G - Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, Junho de 2009.
- [3] SQUARCIO, R.M.F.; NETO, A.C. - “Análise da Confiabilidade de Oleodutos Corroídos Utilizando o Método de Monte Carlo”, PPGMNE/CESEC Universidade Federal do Paraná - Centro Politécnico, Curitiba, Paraná, Julho de 2008.
- [4] DNV-RP-F101 - Corroded Pipelines, Outubro de 2004.
- [5] BUCKLAND, B. - “An Introduction Into the Production and Specification of Steel Pipe”, Pile Driver, November 2005.
- [6] Ciclo de Corrosão dos Metais, UNIVATES, Disponível em: <http://ensino.univates.br/>>, Consultado em Agosto de 2009.
- [7] LAERCE, P.N., Fundamentos de Resistência a Corrosão. 1 ed. Rio de Janeiro. Interciencia, 2007.
- [8] Technical Enquiries, PIGGING PRODUCTS & SERV. ASS., Disponível em: <http://www.ppsa-online.com/about-pigs.php>, Consultado em Agosto de 2010.
- [9] MOURELLE, M.S.; SILVA, D.C.; JACOB, B.P., “Análises por Elementos Finitos de Dutos com Defeitos de Corrosão na Solda Longitudinal, Relatório Técnico 2: Segundo Ciclo de Análises, ET15 e ET16”, Relatório LAMCSO para o projeto COPPETEC PEC-8916, Rio de Janeiro, Junho de 2008.
- [10] Documentation Manuals, ANSYS, Disponível em: <http://www.ansys.com/services/ss-documentation.asp>, Consultado em Setembro de 2009.

- [11] PEREIRA, A.C.P.; PEREIRA, L.C, e JACOB, B.P., “Análises por Elementos Finitos de Dutos com Defeitos Longitudinais Curtos, Relatório Técnico 1: Validação dos Modelos de Elementos Finitos”, Relatório LAMCSO para o projeto COPPETEC PEC-5861, Rio de Janeiro, Setembro de 2005.

APÊNDICE A: PLANILHAS DE RESULTADOS

A.1 - Tabela de Resultados do Modelo ET1

LOAD STEP	p_i	Δp_i	p no SUBSTEP	ITER.	$\sigma_{eqv.}(MPa)$	PSINC
1	0.53	0.53	0.1325	5	84.349	
			0.2650	6		
			0.3975	6		
			0.5300	6		
2	1.06	0.53	0.6625	6	166.175	
			0.7950	6		
			0.9275	6		
			1.0600	7		
3	1.59	0.53	1.1925	7	251.153	
			1.3250	7		
			1.4575	7		
			1.5900	7		
4	2.12	0.53	1.7225	7	336.116	
			1.8550	7		
			1.9875	7		
			2.1200	7		
5	2.38	0.26	2.1850	6	350.959	-
			2.2500	6		0.00006231
			2.3150	6		0.00010350
			2.3800	6		0.00010540
6	2.64	0.26	2.4450	6	352.881	0.00010530
			2.5100	6		0.00013340
			2.5750	6		0.00015730
			2.6400	6		0.00018980
7	2.90	0.26	2.7050	5	359.287	0.00021430
			2.7700	5		0.00021140
			2.8350	4		0.00028980
			2.9000	5		0.00028320
8	3.16	0.26	2.9650	5	379.085	0.00032490
			3.0300	6		0.00037370
			3.0950	6		0.00044060
			3.1600	6		0.00045890
9	3.42	0.26	3.2250	6	379.743	0.00047600
			3.2900	6		0.00049480
			3.3550	6		0.00049340
			3.4200	6		0.00050920
10	3.68	0.26	3.4850	6	380.744	0.00053700
			3.5500	6		0.00051150
			3.6150	6		0.00051240
			3.6800	6		0.00054070

LOAD STEP	p_i	Δp_i	p no SUBSTEP	ITER.	$\sigma_{eqv.}(MPa)$	PSINC
11	3.94	0.26	3.7450	6	381.997	0.00055910
			3.8100	6		0.00064030
			3.8750	7		0.00067550
			3.9400	7		0.00068720
12	4.20	0.26	4.0050	7	390.171	0.00080590
			4.0700	7		0.00090160
			4.1350	7		0.00094950
			4.2000	7		0.00091920
13	4.46	0.26	4.2650	8	402.939	0.00088290
			4.3300	8		0.00093690
			4.3950	8		0.00096670
			4.4600	8		0.00103200
14	4.72	0.26	4.5250	8	415.428	0.00106700
			4.5900	8		0.00115600
			4.6550	8		0.00119700
			4.7200	8		0.00120900
15	4.98	0.26	4.7850	8	426.471	0.00123300
			4.8500	8		0.00129300
			4.9150	8		0.00132100
			4.9800	8		0.00132900
16	5.24	0.26	5.0450	8	437.309	0.00137700
			5.1100	8		0.00142800
			5.1750	8		0.00148400
			5.2400	8		0.00154100
17	5.50	0.26	5.3050	8	446.985	0.00162700
			5.3700	8		0.00170200
			5.4350	8		0.00169600
			5.5000	8		0.00178300
18	5.76	0.26	5.5650	8	457.548	0.00188700
			5.6300	8		0.00198000
			5.6950	8		0.00207600
			5.7600	8		0.00216200
19u	6.02	0.26	5.8250	8	-	0.00227200
			5.8900	8		0.00231900
			5.9550	50		unconverged
			6.0200	-		-
19	5.89	0.13	5.7925	8	462.512	0.00112600
			5.8250	8		0.00114400
			5.8575	8		0.00116200
			5.8900	8		0.00116300
20u	6.02	0.13	5.9225	8	-	0.00116200
			5.9550	8		0.00117500
			5.9875	50		unconverged
			6.0200	-		-

LOAD STEP	p_i	Δp_i	p no SUBSTEP	ITER.	$\sigma_{eqv.}(MPa)$	PSINC
20	5.95	0.06	5.9050	7	464.490	0.00053710
			5.9200	7		0.00053650
			5.9350	7		0.00053480
			5.9500	7		0.00054440
21	6.01	0.06	5.9650	7	466.624	0.00056360
			5.9800	7		0.00057310
			5.9950	8		0.00058010
			6.0100	7		0.00058300
22u	6.07	0.06	6.0250	7	-	0.00059190
			6.0400	7		unconverged
			6.0550	50		-
			6.0700	-		
22	6.04	0.03	6.0175	7	467.730	0.00029450
			6.0250	7		0.00029730
			6.0325	7		0.00029940
			6.0400	7		0.00030100
23u	6.07	0.03	6.0475	7	-	0.00030290
			6.0550	7		0.00030460
			6.0625	7		0.00030630
			6.0700	50		unconverged
23	6.05	0.01	6.0425	6	468.105	0.00010220
			6.0450	6		0.00010110
			6.0475	6		0.00010170
			6.0500	6		0.00010100
24	6.06	0.01	6.0525	6	468.483	0.00010190
			6.0550	6		0.00010150
			6.0575	6		0.00010210
			6.0600	6		0.00010190
25	6.07	0.01	6.0625	6	468.864	0.00010240
			6.0650	6		0.00010250
			6.0675	6		0.00010290
			6.0700	6		0.00010290
26	6.08	0.01	6.0725	6	469.247	0.00010310
			6.0750	6		0.00010310
			6.0775	6		0.00010340
			6.0800	6		0.00010350
27	6.09	0.01	6.0825	6	469.633	0.00010370
			6.0850	6		0.00010380
			6.0875	6		0.00010400
			6.0900	6		0.00010410
28	6.10	0.01	6.0925	6	470.021	0.00010440
			6.0950	6		0.00010450
			6.0975	6		0.00010480
			6.1000	6		0.00010490

LOAD STEP	p_i	Δp_i	p no SUBSTEP	ITER.	$\sigma_{eqv.}(MPa)$	PSINC
29	6.11	0.01	6.1025	6	470.411	0.00010510
			6.1050	6		0.00010510
			6.1075	6		0.00010530
			6.1100	6		0.00010540
30	6.12	0.01	6.1125	6	470.806	0.00010580
			6.1150	6		0.00010620
			6.1175	6		0.00010640
			6.1200	6		0.00010660
31	6.13	0.01	6.1225	6	471.203	0.00010680
			6.1250	6		0.00010700
			6.1275	6		0.00010730
			6.1300	6		0.00010750
32	6.14	0.01	6.1325	6	471.604	0.00010780
			6.1350	6		0.00010800
			6.1375	6		0.00010820
			6.1400	6		0.00010840
33	6.15	0.01	6.1425	6	472.009	0.00010870
			6.1450	6		0.00010880
			6.1475	6		0.00010910
			6.1500	6		0.00010920
34	6.16	0.01	6.1525	6	472.416	0.00010950
			6.1550	6		0.00010950
			6.1575	6		0.00010980
			6.1600	6		0.00010990
35	6.17	0.01	6.1625	6	472.827	0.00011030
			6.1650	6		0.00011060
			6.1675	6		0.00011300
			6.1700	6		0.00011300
36	6.18	0.01	6.1725	6	473.243	0.00011200
			6.1750	6		0.00011160
			6.1775	6		0.00011260
			6.1800	6		0.00011190
37	6.19	0.01	6.1825	6	473.661	0.00011330
			6.1850	6		0.00011410
			6.1875	6		0.00011600
			6.1900	6		0.00011920
38	6.20	0.01	6.1925	50	473.771	unconverged
			6.1950	-		-
			6.1975	-		-
			6.2000	-		-

A.2 - TABELA DE RESULTADOS DO MODELO ET2

LOAD STEP	p_i	Δp_i	p no SUBSTEP	ITER.	$\sigma_{eqv.}(MPa)$	PSINC
1	0.44	0.44	0.1100	6	71.663	
			0.2200	6		
			0.3300	6		
			0.4400	6		
2	0.88	0.44	0.5500	6	142.364	
			0.6600	6		
			0.7700	6		
			0.8800	6		
3	1.32	0.44	0.9900	7	214.368	
			1.1000	7		
			1.2100	7		
			1.3200	7		
4	1.76	0.44	1.4300	7	286.771	
			1.5400	7		
			1.6500	7		
			1.7600	7		
5	1.98	0.22	1.8150	6	300.012	-
			1.8700	6		0.00005279
			1.9250	6		0.00009202
			1.9800	6		0.00008872
6	2.20	0.22	2.0350	6	302.085	0.00008879
			2.0900	5		0.00012450
			2.1450	5		0.00013520
			2.2000	5		0.00017380
7	2.42	0.22	2.2550	5	309.999	0.00019180
			2.3100	6		0.00019420
			2.3650	6		0.00026920
			2.4200	6		0.00025990
8	2.64	0.22	2.4750	6	330.817	0.00031220
			2.5300	6		0.00035650
			2.5850	7		0.00040930
			2.6400	7		0.00043620
9	2.86	0.22	2.6950	7	349.684	0.00043010
			2.7500	7		0.00044640
			2.8050	7		0.00045640
			2.8600	7		0.00045650

LOAD STEP	p_i	Δp_i	p no SUBSTEP	ITER.	$\sigma_{eqv.}(MPa)$	PSINC
10	3.08	0.22	2.9150	7	376.269	0.00046670
			2.9700	7		0.00045220
			3.0250	6		0.00056510
			3.0800	6		0.00063370
11	3.30	0.22	3.1350	6	387.305	0.00072520
			3.1900	7		0.00074400
			3.2450	7		0.00079010
			3.3000	7		0.00092200
12	3.52	0.22	3.3550	7	390.406	0.00104600
			3.4100	8		0.00109700
			3.4650	8		0.00109000
			3.5200	8		0.00107500
13	3.74	0.22	3.5750	8	394.413	0.00108200
			3.6300	8		0.00109500
			3.6850	8		0.00114400
			3.7400	8		0.00119100
14	3.96	0.22	3.7950	8	405.464	0.00124100
			3.8500	8		0.00126800
			3.9050	8		0.00127700
			3.9600	8		0.00130200
15	4.18	0.22	4.0150	8	413.293	0.00129100
			4.0700	8		0.00123000
			4.1250	8		0.00119800
			4.1800	8		0.00125700
16	4.40	0.22	4.2350	8	422.136	0.00133300
			4.2900	8		0.00142300
			4.3450	8		0.00149900
			4.4000	8		0.00158200
17	4.62	0.22	4.4550	8	431.442	0.00164300
			4.5100	8		0.00172900
			4.5650	8		0.00185300
			4.6200	8		0.00190400
18	4.84	0.22	4.6750	8	442.079	0.00186800
			4.7300	8		0.00184500
			4.7850	8		0.00185500
			4.8400	8		0.00197800
19	5.06	0.22	4.8950	8	454.478	0.00209800
			4.9500	8		0.00218500
			5.0050	8		0.00218200
			5.0600	18		0.00217400

LOAD STEP	p_i	Δp_i	p no SUBSTEP	ITER.	$\sigma_{eqv.}(MPa)$	PSINC
20u	5.28	0.22	5.1150	50	-	unconverged
			5.1700	-		-
			5.2250	-		-
			5.2800	-		-
20	5.17	0.11	5.0875	8	460.896	0.00111600
			5.1150	8		0.00113900
			5.1425	8		0.00116300
			5.1700	8		0.00119700
21	5.28	0.11	5.1975	8	466.821	0.00123500
			5.2250	8		0.00126900
			5.2525	8		0.00129100
			5.2800	8		0.00132300
22u	5.39	0.11	5.3075	8	-	0.00136200
			5.3350	50		unconverged
			5.3625	-		-
			5.3900	-		-
22uu	5.33	0.05	5.2925	8	-	0.00072500
			5.3050	8		0.00088900
			5.3175	8		0.00092100
			5.3300	50		unconverged
22	5.30	0.02	5.2850	7	467.939	0.00024120
			5.2900	7		0.00024140
			5.2950	7		0.00024170
			5.3000	7		0.00024130
23	5.32	0.02	5.3050	7	469.050	0.00024090
			5.3100	7		0.00024050
			5.3150	7		0.00024040
			5.3200	7		0.00024040
24u	5.34	0.02	5.3250	7	-	0.00024050
			5.3300	50		unconverged
			5.3350	-		-
			5.3400	-		-
24	5.33	0.01	5.3225	6	469.604	0.00012930
			5.3250	6		0.00011970
			5.3275	6		0.00012640
			5.3300	6		0.00011980
25	5.34	0.01	5.3325	6	470.155	0.00012560
			5.3350	6		0.00011980
			5.3375	6		0.00012550
			5.3400	6		0.00012010
26	5.35	0.01	5.3425	6	470.707	0.00012660
			5.3450	7		0.00012030
			5.3475	7		0.00012040
			5.3500	7		0.00012050
27	5.36	0.01	5.3525	7	471.121	0.00012050
			5.3550	7		0.00012060
			5.3575	50		unconverged