



**IB-NDT**

Nondestructive Evaluation  
www.ibndt.com

Brasil

■ 2017 ■

# AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

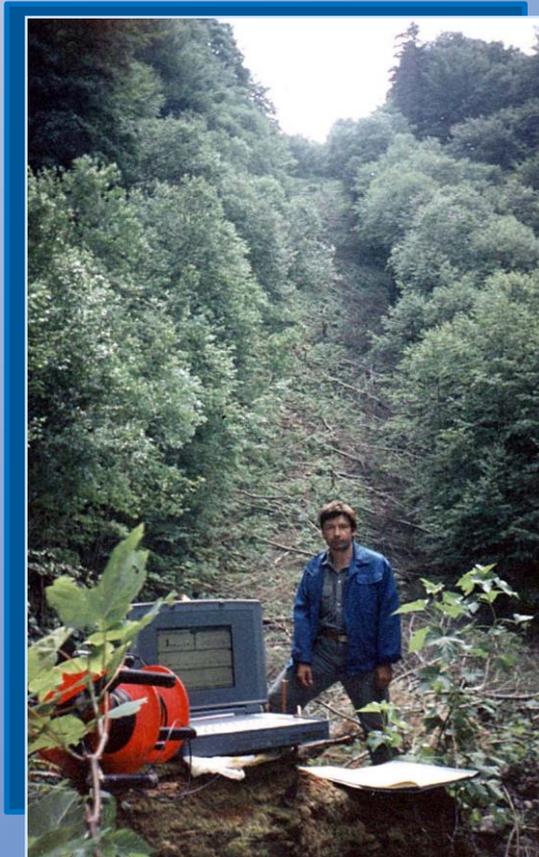




**IB-NDT**  
Nondestructive Evaluation  
www.ibndt.com

**AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E  
MINERODUTOS**

# **AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS**





**A IB-NDT possui amplo escopo de fornecimento para dutos ou minerodutos, são eles:**

- a) Inspeção com ultrassom automatizado (Phased Array ou TOFD em soldas durante a montagem, inspeções periódicas ou “em serviço”;
- b) Medição de espessura residual e mapeamento de corrosão com Ultrassom C-scan Phased Array;
- c) Inspeção não intrusiva do programa SIIDE - Sistema Integrado de Inspeções em Dutos Enterrados;
- d) Emissão acústica em dutos enterrados ou submersos;
- e) Inspeção através da MMM-Nanoend – Memória Magnética do Metal;
- f) Medições de tensões através de “Strain Gages” com ou sem fio
- g) Inspeção em revestimento através de PCM+A-Frame;
- h) Análise de falha;
- i) Medição de taxa de corrosão;
- j) Geoposicionamento;
- k) Venda de sistemas de monitoramento “on line” para vazamentos, deslocamento de solo e invasão de área de segurança;



# **CASO DE ANÁLISE DE FALHA EM DUTO ENTERRADO**

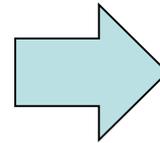
Realização de análise de falha em duto enterrado contemplando análise metalúrgica da falha, cálculo de análise da resistência mecânica residual, através da API 579 (níveis I e II) e análise numérica por elementos finitos.

## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

As amostras foram recebidas conforme indicado nas figuras abaixo



Detalhe do externo mostrando que a fratura ocorreu a cerca de 8 mm do cordão de solda e pontos de corrosão localizada (seta) na margem do cordão de solda

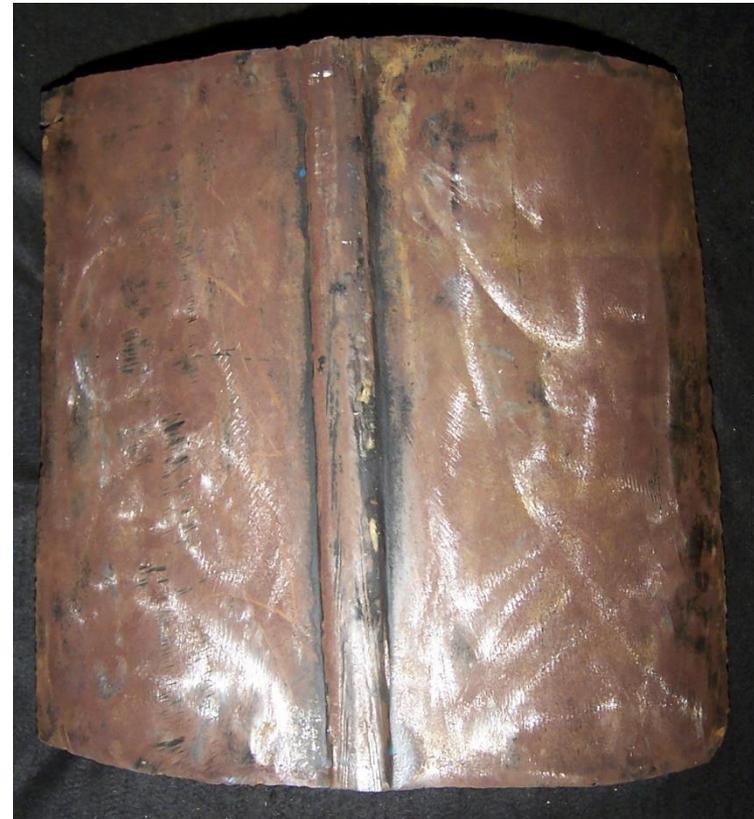


## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

As figuras abaixo indicam o aspecto interno e externo do tubo evidenciando corrosão interna localizada em ambas as margens do cordão de solda longitudinal.



Aspecto interno



Aspecto externo



## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

Foi realizado a caracterização Metalúrgicas do material do tubo – Aço ao carbono-Manganês, com adições de nióbio com composição química e propriedades mecânicas que atendem aos requisitos estabelecidos para tubos do tipo API 5L X60. Abaixo o resultado dos ensaios realizados.

ENSAIOS MECÂNICOS				
Material	Tensão limite de escoamento (MPa)	Tensão limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)
Tubo	466	579	30	71,5
API 5L X60	413 mín.	517 mín.	18 mín.	-

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM PESO)							
Material	C	Si	Mn	Nb	V	P	S
TUBO	0,16	0,30	1,42	0,041	0,005	0,020	0,007
API 5LX60	0,26 máx.	Não especificado	1,35 máx.	0,005 min.*	0,02 mín.*	0,04 máx.	0,05 máx.

## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

Aspecto macroscópico do trecho de tubulação 1 – Fratura a cerca de 8mm do cordão de solda longitudinal e pontos de corrosão localizada na margem do cordão.



Os detalhes acima evidenciam os pontos de corrosão localizados adjacentes ao cordão de solda, mas fora da Zona Termicamente Afetada (ZTA)

## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

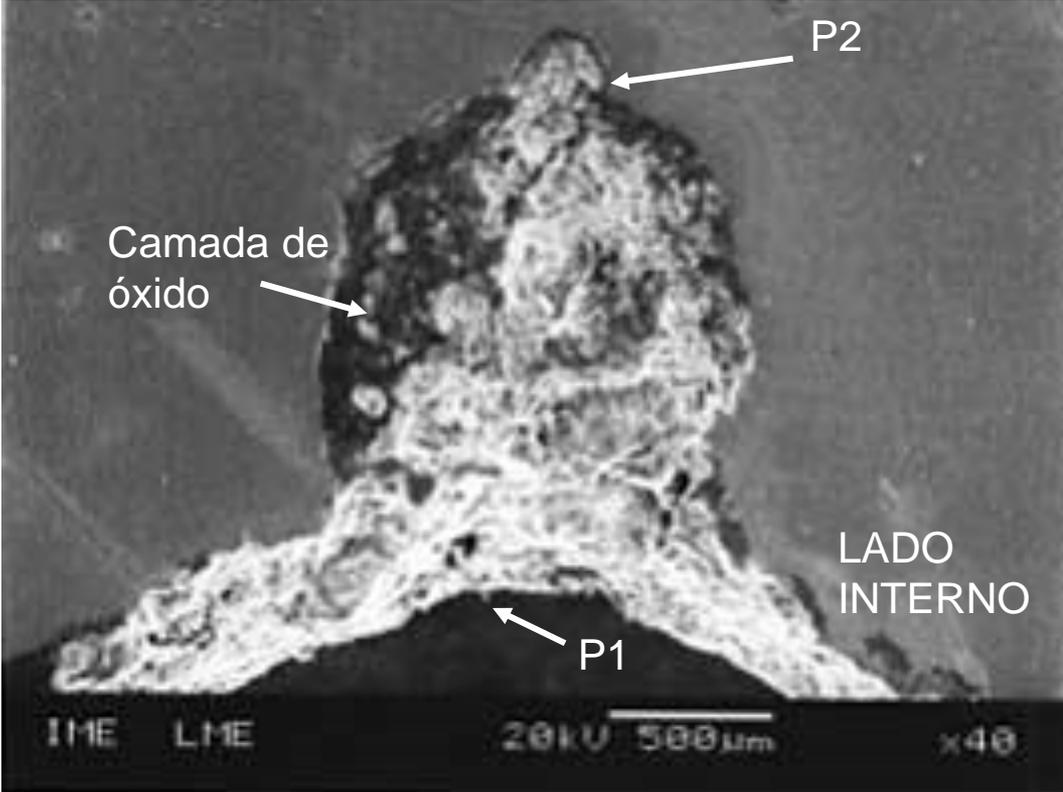
Características metalográficas do trecho de tubulação 1 – Cordão de solda em um único passe (Arco Submerso) pontos de corrosão localizada na margem do cordão fora da ZTA, associados à ruptura e do lado que não rompeu.



**Microestrutura associada aos pontos de corrosão localizada – ferrita + perlita com tamanho de grão similar ao metal de base, indicando que a corrosão está ocorrendo fora da ZTA. Microscopia Ótica. Ataque Nital 2%.**

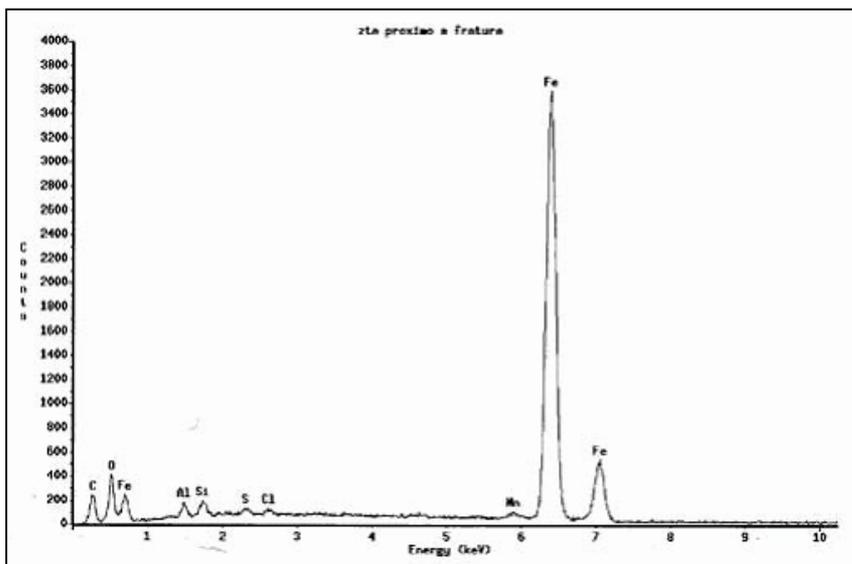
# AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

Foi realizada análise por MEV (Microscópio eletrônico de varredura) das regiões que apresentam pontos localizados de corrosão. Estas análises revelaram a presença de uma camada de óxido aderida ao interior do tubo, mesmo após de intensa limpeza .

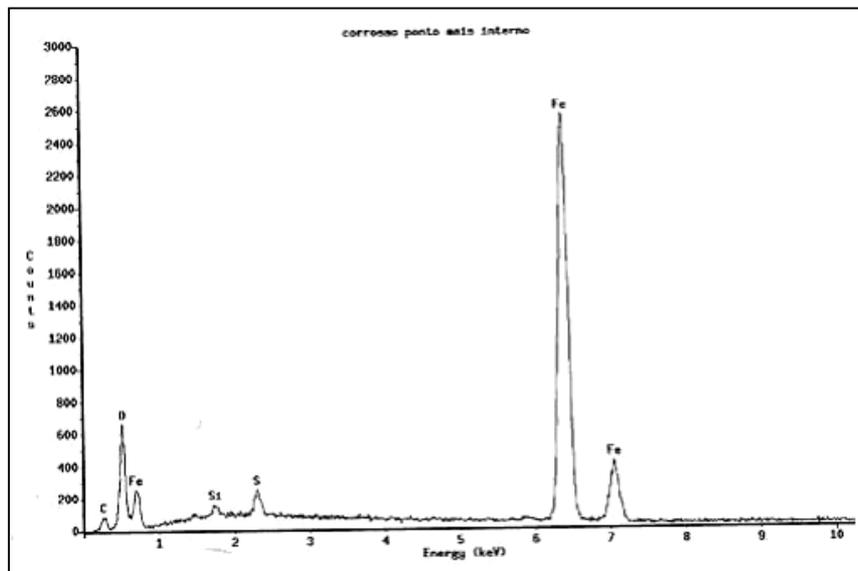


## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

Nos pontos 1 e 2 identificados na figura anterior foi realizado microanálise por EDS (Espectroscopia por dispersão de energia) dos óxidos existentes nos pontos de corrosão localizada. Como resultado identificamos a presença de enxofre no fundo, próximo ao aço. Típico de corrosão sob depósito com atividade de bactérias.



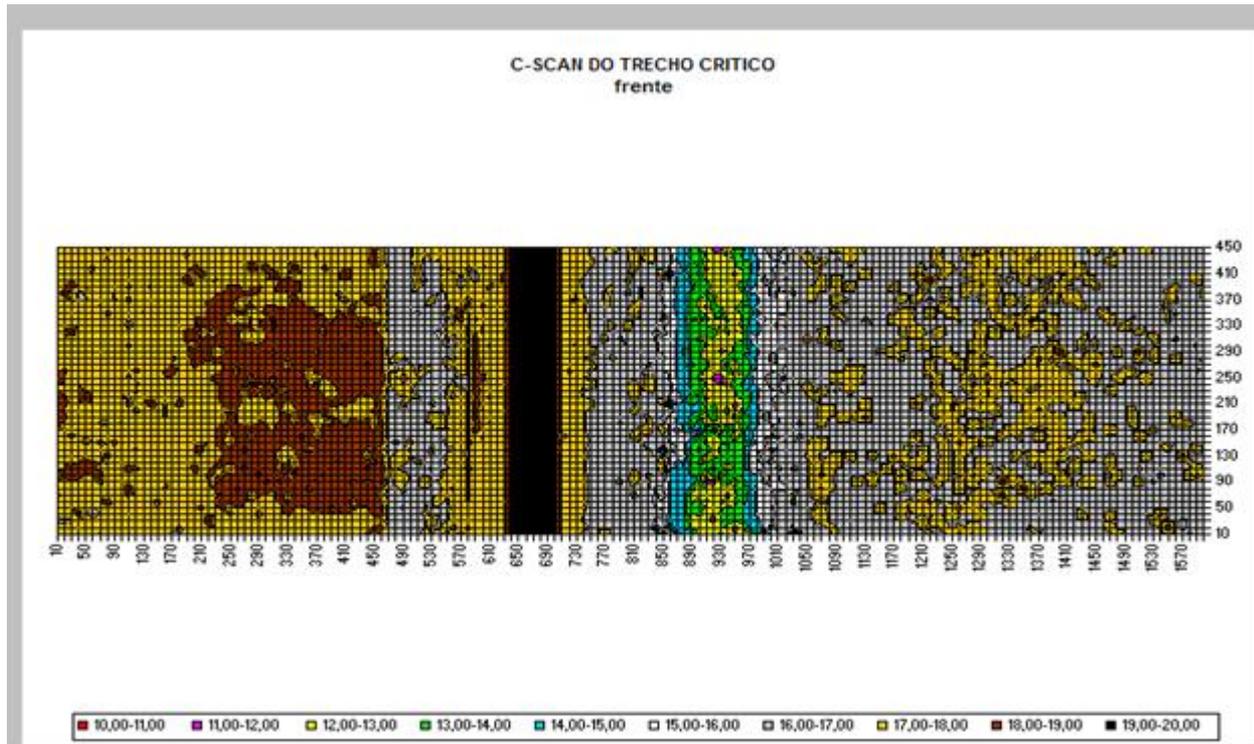
Ponto 1: Presença de elementos do aço como ferro e manganês, além de enxofre, cloro e alumínio



Ponto 2: Presença de elementos do aço como ferro e manganês.  
Pico elevado de enxofre (S)

## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

Foi realizado ensaio de medição de espessura através de malha de pontos dos trechos indicados pelo cliente para realização de análise da resistência mecânica residual, através da API 579 (níveis I e II) e análise numérica por elementos finitos.

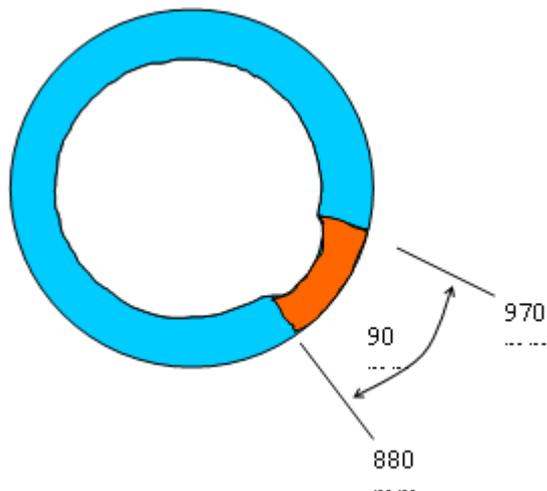


## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

### RESULTADOS DA ANÁLISE PELO NÍVEL 1 DO API 579 – CONDIÇÃO DE PROJETO

A menor espessura detectada pelo C-Scan foi de 11,14 mm na região de maior perda de espessura, compreendida entre as posições 880 mm e 970 mm (90 mm de extensão circunferencial) versus 440 mm de comprimento longitudinal. Na figura 2 é mostrada esquematicamente uma seção transversal do duto contendo a extensão circunferencial da perda de espessura.

Para o nível 1 de avaliação, foi considerada a espessura de 11,2 mm para a região indicada pela cor vermelha na figura 2 e de 16 mm para a região indicada pela cor azul.

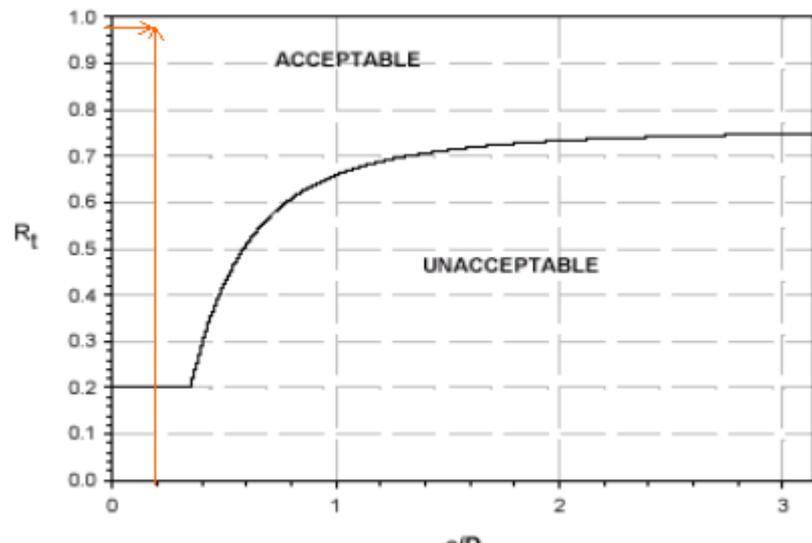


**com os valores  $\lambda$  e  $R_t$  calculados em (iv) para saber se a perda de espessura é aceitável ou não. Como o ponto  $(\lambda, R_t) = (7,6; 0,96)$  se encontra acima da curva, a perda de espessura medida é aceitável pelo nível 1 de avaliação para a condição de projeto.**

# AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

## VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA TENSÃO LONGITUDINAL

Utiliza-se o mesmo  $R_t$  calculado anteriormente juntamente com o valor de  $c/D$  na figura abaixo, onde  $c$  é a extensão circunferencial do defeito e  $D$  é o diâmetro interno. Como  $R_t = 0,96$  e  $c/D = 0,19$ , percebe-se que a situação é aceitável também em relação ao efeito da tensão longitudinal.



**Avaliação pelo nível 1 do API 579 da extensão circunferencial do defeito**



## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

RESULTADOS DA ANÁLISE PELO NÍVEL 2 DO API 579 – PARA PRESSÃO DE OPERAÇÃO SOLICITADA (168 Kgf/cm<sup>2</sup>).

Por meio da análise do nível 1 de avaliação do API 579, que considera, de forma conservativa, apenas a menor espessura medida, foi possível provar que o defeito existente é aceitável para as condições de operação atual e a pressão de operação solicitada. No entanto, será mostrado a seguir a metodologia do nível 2 de avaliação do API 579, que, diferentemente do nível 1, leva em conta a distribuição das mínimas espessuras medidas.

Foram consideradas 22 seções, começando pela seção central com 20 mm de comprimento e terminando na seção mais externa com 440 mm de comprimento. O tamanho dessas seções é representado em tabelas por meio da variável  $s_i$ . A variável  $A_i$  representa a área perdida pela corrosão de cada seção  $i$ , abaixo da espessura requerida. A variável  $A_{i0}$  é a área de metal que deveria existir com base na espessura requerida. Os parâmetros  $\lambda$ ,  $M_t$  e RSF são, respectivamente, o fator geométrico da casco dado por  $\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{Dt_{min}}}$ , o fator de Folias ( $M_t$ ) e o fator de resistência remanescente (RSF)

$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{Dt_{min}}}$$



## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

RESULTADOS DA ANÁLISE PELO NÍVEL 2 DO API 579 – PARA PRESSÃO DE OPERAÇÃO SOLICITADA (168 Kgf/cm<sup>2</sup>).

Como o menor RSF calculado foi de 0,979 que é maior que o mínimo recomendado de 0,9, tem-se que, também pelo nível 2 de avaliação do API 579, o duto pode resistir à pressão de abertura da PSV (168 kgf/cm<sup>2</sup>).

A diferença entre os valores de RSF do nível 1 (0,926) e do nível 2 (0,979) deve-se à simplificação inerente ao primeiro nível de avaliação.



## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

### ANÁLISE NUMÉRICA DO TRECHO CRÍTICO 01

O modelo foi gerado em três dimensões e utilizou-se simetria, tendo sido gerado metade da circunferência do duto com um comprimento de 200,00 mm.

O carregamento de pressão interna foi aplicado em passos discutidos em item adiante. Para simular o duto sob carregamento nas condições de enterrado foram aplicadas restrições aos deslocamentos longitudinais de todos os pontos do modelo. Desta forma as deformações longitudinais dos pontos do modelo foram iguais a zero.

O modelo foi construído em duas etapas. A primeira corresponde à região não corroída e a segunda corresponde à região corroída. Na primeira utilizou-se a espessura média da parte não corroída com o cuidado de não considerar a sobre espessura correspondente ao cordão de solda, conforme figura 01 deste relatório. A região corroída foi construída através da união de pequenos setores de cilindro, com o perímetro externo de 10 mm, correspondente à resolução do C-Scan.

Nos dados recebidos, oriundos do levantamento de espessuras por C-Scan, observou-se que a perda de espessura por corrosão é relativamente uniforme. Desta forma decidiu-se aplicar-se espessuras constantes para as geratrizes da região corroída. Foram construídos dois modelos que diferiram quanto às espessuras adotadas. O primeiro modelo usou espessuras médias calculadas para as geratrizes da região corroída. O segundo modelo usou as espessuras mínimas para cada uma das geratrizes.

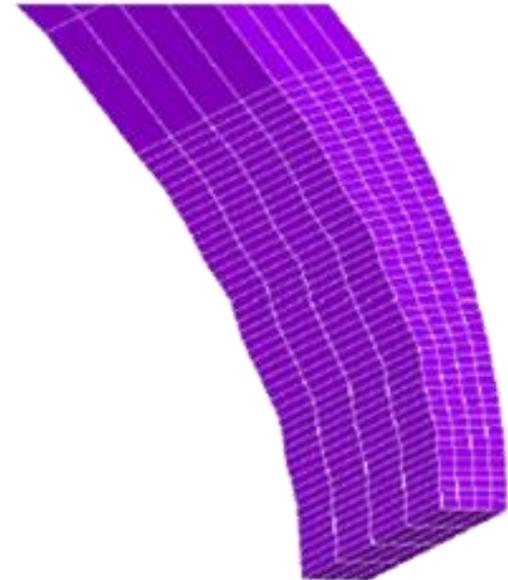
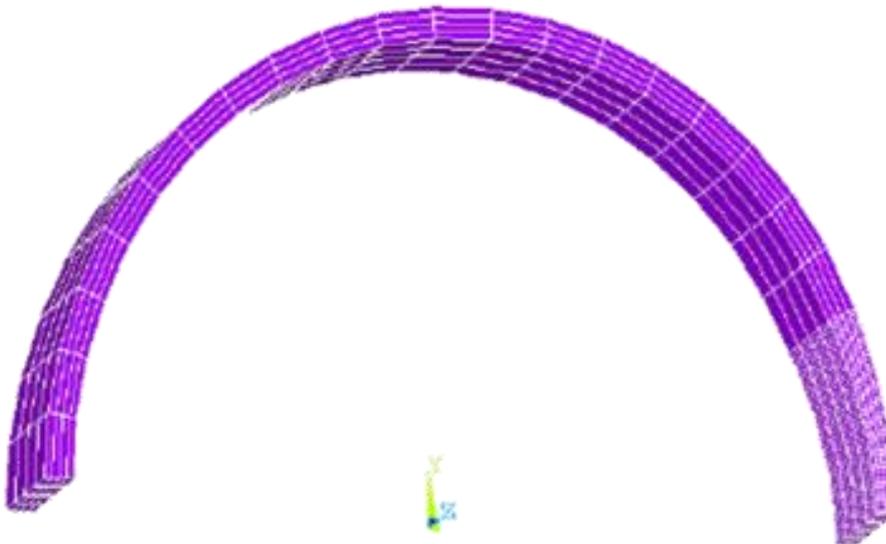


## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

### MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A malha de elementos finitos utilizou elementos sólidos, com oito nós e três graus de liberdade por nó. Respeitando-se a relação de aspecto do elemento e usando a boa prática de engenharia para modelos geométricos para análise numérica, a densidade adotada de elementos foi a seguinte:

- 4 elementos na espessura
- 4 elementos no comprimento
- Tangencialmente foram utilizados duas densidades: elementos com  $\pm 2.50$  mm de largura na região corroída e  $\pm 34,00$  mm na região não corroída.





## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

### SOLUÇÃO INCREMENTAL

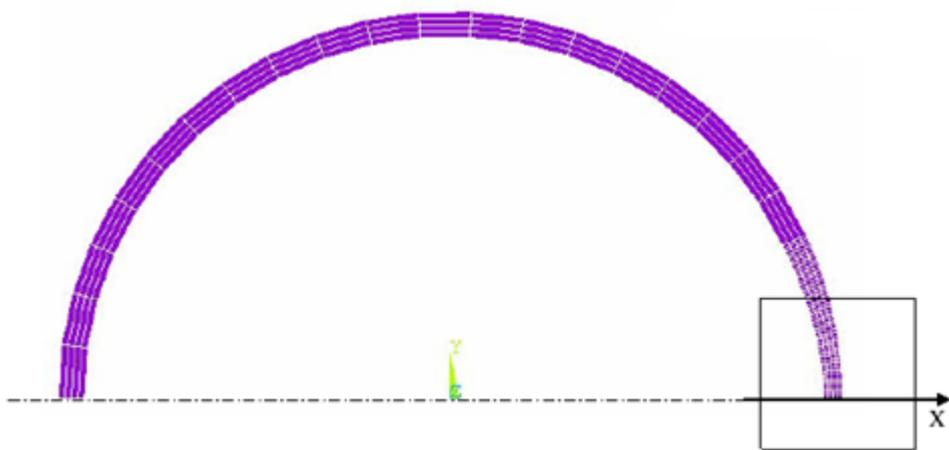
Uma solução é dita incremental, quando o carregamento imposto ao componente é feito de forma gradual e se faz necessária quando há variação de propriedades mecânicas ao longo da análise. Na presente análise foram utilizados três passos de carregamento de pressão interna:

- i. Carregamento de 0 a 10 MPa, essa é a solução elástica.
- ii. Carregamento de 10 a 20 MPa, ocorrência do escoamento e aumento das deformações plásticas, divididas em incrementos de 0.1 MPa
- iii. Carregamento de 20MPa até a pressão de ruptura, escoamento generalizado da seção mais solicitada, dividida em incrementos de 0.001 MPa.

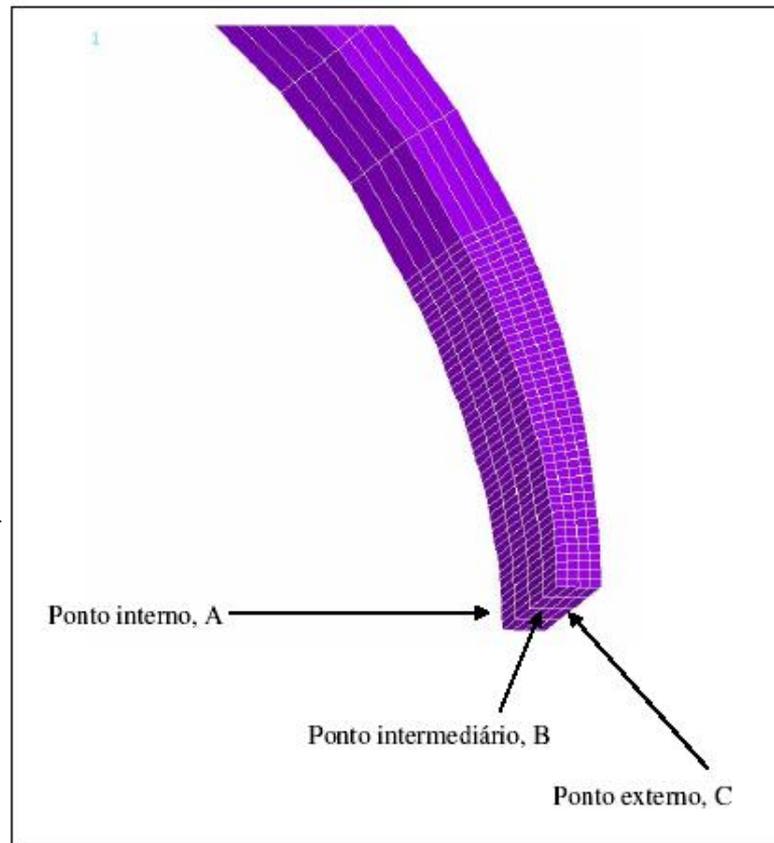
Pressões limites para o duto de aço API 5L X60 em MPa				
Modelo	Pressão para ponto mais solicitado atingir o limite elástico	Pressão para ponto mais solicitado atingir o limite de escoamento real	Pressão para ponto mais solicitado atingir o limite de ruptura real	Pressão para a solução numérica tornar-se instável
<b>Espessura MÍNIMA igual a 11,4 mm</b>	17,0	22,3	27,9	32,4



# AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

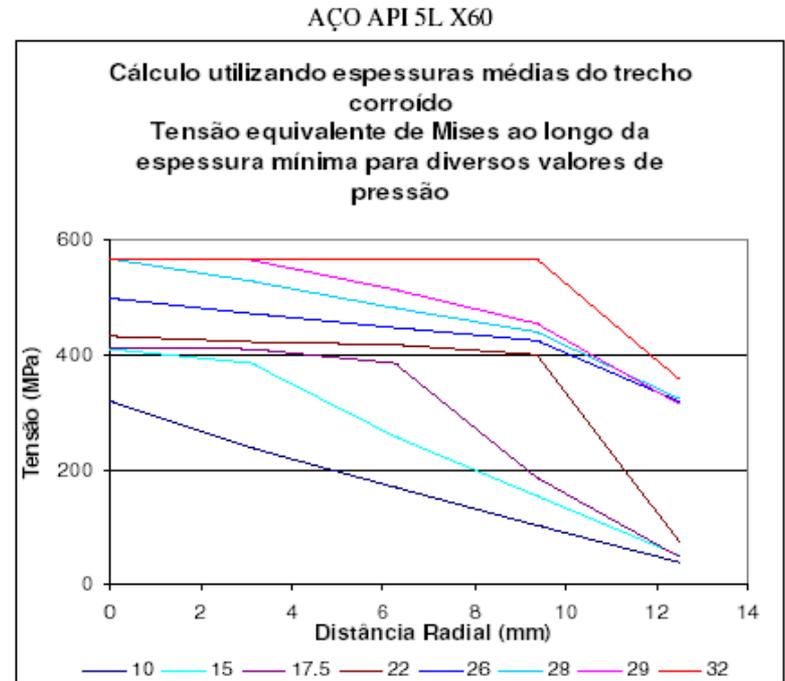
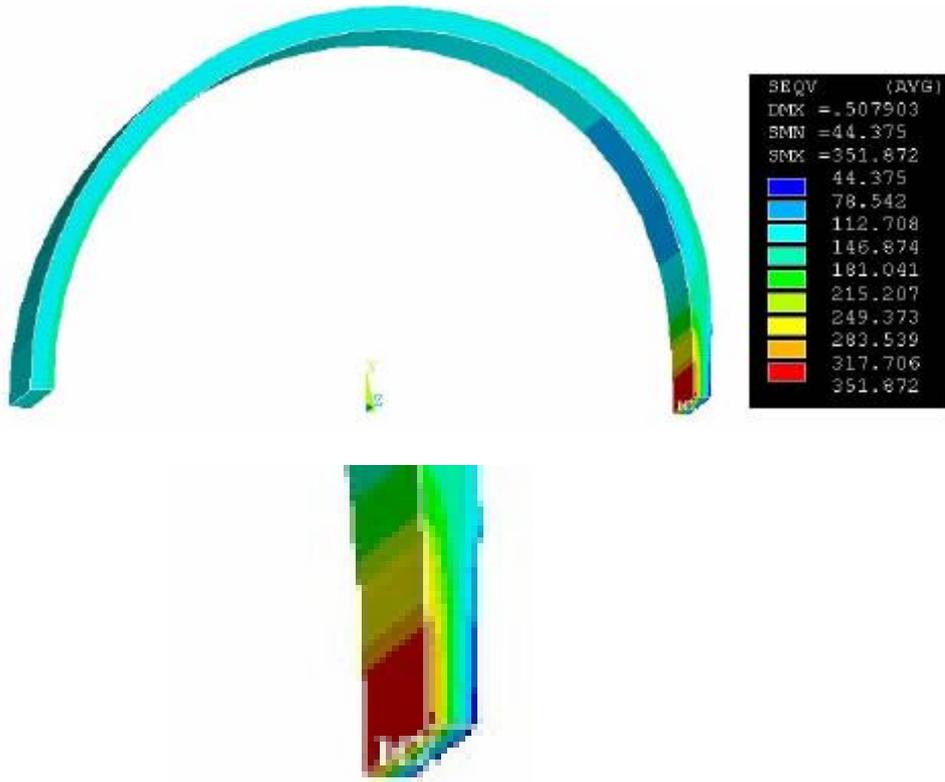


Vista Frontal do duto com refino da malha na posição 6 horas

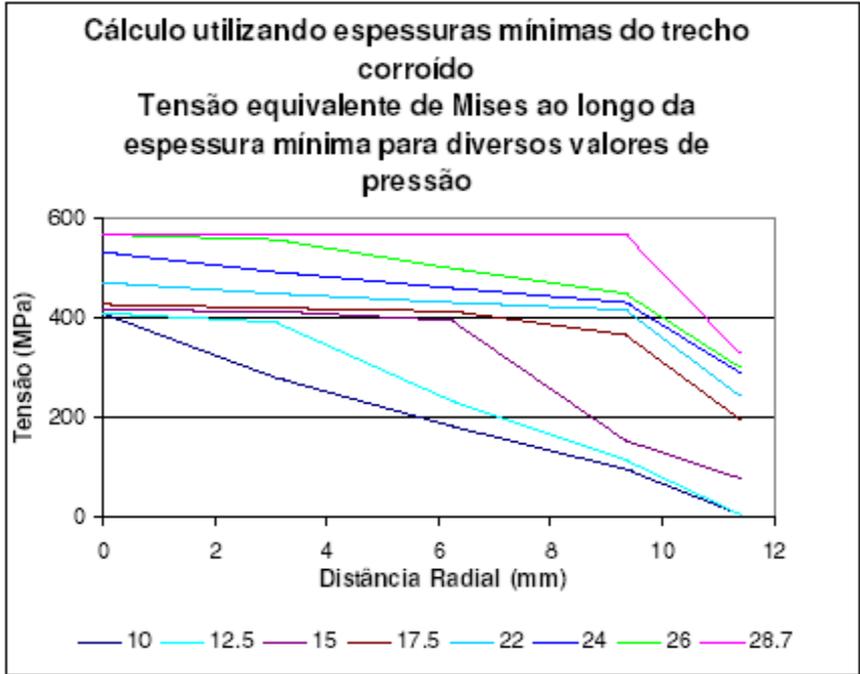
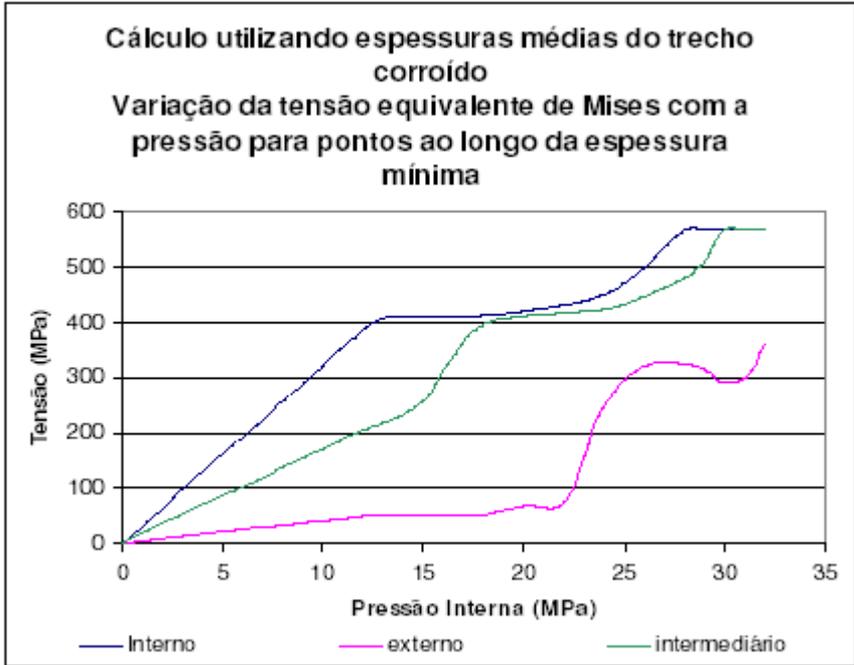


# AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

RESULTADO: DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES EQUIVALENTES DE MISES PARA UMA PRESSÃO DE 10 MPa – REGIME ELÁSTICO. O escoamento (0,5% de deformação total) inicial no ponto A para pressão de 15.1 Mpa.



# AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS





## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS E MINERODUTOS

### CONCLUSÃO:

O tubo foi fabricado em aço ao carbono-Manganês, com adições de Nióbio com composição química e propriedades mecânicas que atendem aos requisitos estabelecidos para tubos do tipo API 5L X60;

Não foi observada qualquer característica metalúrgica do material que pudesse estar diretamente associada à falha.

Estes resultados indicam que a ruptura do Mineroduto ocorreu por perda de seção localizada, próximo ao cordão de solda longitudinal. Esta perda de seção foi provocada por corrosão sob depósito (oriundo de precipitação a partir da polpa de minérios). A presença de enxofre no interior do depósitos indica a atividade de bactérias, que acidificam o meio localizadamente, favorecendo a rápida degradação do material.

Com base nos níveis 1 e 2 de avaliação do API 579 e na avaliação por elementos finitos, pode-se concluir que a perda de espessura mensurado próximo a região de falha e em outros indicados pelo Cliente, através de C-Scan, é aceitável tanto para as condições de operação atual quanto para a condição de operação solicitada (168 Kgf/cm<sup>2</sup>), os dados e análise realizada são válidos para o trecho mensurado com C-scan.

Os valores aprovados, para o trecho mensurado, estão no limite da condição de resistência do duto, recomenda-se um acompanhamento efetivo da perda de espessura neste trecho.

Não foi escopo deste trabalho a determinação da campanha máxima para o trecho

**Contatos:**

**Serra-ES**

**Tel: +55 27 3348-0370**

**[contato@ibndt.com](mailto:contato@ibndt.com)**

**Comercial:**

**Fábio Cerqueira**

**Cel.: 27 981820950**

**[fabio@ibndt.com](mailto:fabio@ibndt.com)**

**Técnico:**

**Igor Kozyrev**

**Cel.: 27 981827255**

**[igor@ibndt.com](mailto:igor@ibndt.com)**

**Obrigado!**