

8 Referências bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **RP 1111**: Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design). 1999.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 5L**: Specification for Line Pipe. 43. ed. 2004.

BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea Pipelines and Risers**. 1. ed. Elsevier, 2005.

BRITISH STANDARDS INSTITUTE. **BS 8010**: Code of Practice for Pipeline – Part 3. Pipeline Subsea: Design, Construction and Installation. 1993.

COLLBERG, L.; LEVOLD, E.; MORK, K.; VITALI, L.; TORSELETTI, E., **Background to the local buckling limit state in DNV-OS-F101**. Documento interno DNV. 2007.

DASSAULT SISTÈMES. **Manual ABAQUS 6.6.3**.

DET NORSKE VERITAS. **Offshore Standard DNV OS-F101**. 2000.

DET NORSKE VERITAS. **DNV-RP-108**: Fracture control for pipeline installation methods introducing cyclic plastic strains. 2006.

DOWLING, N. **Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. Prentice-Hall International, 1993.

HAUCH, S.; BAI, Y. **Bending Moment Capacity of Groove Corroded Pipes**, American Bureau of Shipping Houston, Texas, ISOPE-2000-YB-003. USA. 2000.

JOHNSON, W.; MELLOR, P. B. **Engineering Plasticity**. 2. ed. Van Nostrand Reinhold, 1975.

KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. **Mechanics of offshore pipelines – Volume I: Buckling and Collapse**. 1. ed. Elsevier, 2007.

MARTINEZ, M.; BROWN, G. **Evolution of pipe properties during Reel-lay process: Experimental characterization and Finite Element modeling**. OMAE2005-67074. 2005.

PALMER, A.; KING, R. **Subsea Pipeline Engineering**. 1. ed. PenWell, 2004.

TIVELLI, M.; CUMINO, G.; IZQUIERDO, A.; ANELLI, E. **Effect of plastic deformation pattern typical of reel laying on the in-service mechanical performance of pipes and girth welds**. Rio Pipeline Conference & Exposition, IBP1008_05. 2005.

TORSELLETTI, E.; VITALI, L.; BRUSCHI, R. **Design criteria vs. line pipe requirements for offshore pipelines**. Publicação sem referências.

SUPERB. **Buckling and Collapse Limit State**. 1996.

9 APÊNDICE I – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem localizada utilizando a DNV OS-F101 (2000)

DNV OS-F101 - Flambagem local - Deslocamento Controlado

1. Introdução

Os cálculos a seguir são apresentados para o cálculo das deformações permitidas pela DNV (2000) para o critério de flambagem localizada com deslocamento controlado

2. Dados de entrada:

2.1. Dados de entrada dos dutos

DE := 12.75in Diâmetro externo do duto
t := 17.5mm Espessura de parede do duto
tc := 85mm Espessura do revestimento
 $\frac{DE}{t} = 18.506$

2.2. Dados de entrada do material

Propriedades do material do duto, DNV (2000), Seção 12 H101:
API 5L X-60: SMYS := 414·MPa SMTS := 517·MPa E := 207·GPa

2.3.Dados de entrada da embarcação

Diâmetro do carretel: D_{car} := 18m Raio do aligner: R_{align} := 9m

2.4. DnV safety classes, factors and parameters

Classe de locação, distância <500m de atividades humanas, ref. Tabela 2-2: 2
Classe de segurança para instalação, ref. Tabela 2-3 e Seção 12 K100: Baixa
Fator de de carga, ref. Tabela 5-6 (combinação de carregamento "a"): $\gamma_F := 1.2$
Fator de condição do efeito de carga, ref. Tabela 5-7 (Suportado por superfície rígida continuamente): $\gamma_C := 0.82$
Fator de resistência a deformação, tabela 5-8: $\gamma_\epsilon := 2.1$

3. Metodologia

Verificação do enrolamento de acordo com a Seção 5 D507, para $p_e = p_i = 0$ MPa.

3.1. Verificação da deformação longitudinal compressiva devido ao enrolamento:

A máxima razão de escoamento permitida de acordo com a requisição suplementar P da Seção 6 D300:

$$\alpha_h := 0.92$$

A espessura de parede para ser utilizada nestes cálculos é o valor nominal sem efeitos de corrosão, ref. Seção 5 C302.

$$t_2 := t \quad (\text{para instalação})$$

Fator de garganta de solda, Seção 12 F900, na forma algébrica:

$$\alpha_{gw} := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{DE}{t} < 20 \\ \left[1 - \frac{1 - 0.6}{60 - 20} \left(\frac{DE}{t} - 20 \right) \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha_{gw} = 1$$

Deformação característica de acordo com D507 (sem pressão diferencial):

$$\epsilon_c := 0.78 \cdot \left(\frac{t}{DE} - 0.01 \right) \cdot \alpha_h^{-1.5} \cdot \alpha_{gw}$$

Deformação longitudinal analítica devido ao enrolamento:

$$\epsilon_{\text{analítico}} := \frac{DE}{D_{\text{car}} + DE + 2 \cdot t_c}$$

Deformação de projeto, Seção 5 D507:
(Fatores de acordo com Seção 5 D204, eq. 5.12)

$$\epsilon_d := \frac{\epsilon_c}{\gamma_\epsilon}$$

Deformação admissível. Analítico deve ser menor que este valor.

$$\epsilon_{\text{adm}} := \frac{\epsilon_d}{\gamma_F \gamma_C}$$

Fator de Utilização da deformação compressível permitida:

$$FU_{\text{car}} := \frac{\epsilon_{\text{analítico}}}{\epsilon_{\text{adm}}}$$

4. Resultados

$DE = 323.85 \cdot mm$	Diâmetro externo nominal do duto
$t = 17.5 \cdot mm$	Espessura nominal da parede do duto
$\frac{DE}{t} = 18.506$	
$\epsilon_c = 3.893 \cdot \%$	Deformação característica DNV
$\epsilon_{analítico} = 1.751 \cdot \%$	Deformação longitudinal analítica
$\epsilon_{adm} = 1.884 \cdot \%$	Deformação admissível da DNV
$FU_{car} = 92.96 \cdot \%$	Fator de Utilização

10 APÊNDICE II – Cálculo das deformações admissíveis sob efeito de flambagem utilizando os critérios da API RP 1111 (1999)

API RP 1111 - Cálculo da deformação sob efeitos de flexão pura aplicada ao processo de enrolamento

Dados de entrada:

$DE := 12.75\text{m}$ Diâmetro externo nominal $DE = 323.85\text{mm}$

$t := 17.5\text{mm}$ Espessura

$D_{\max} := 327\text{mm}$ Diâmetro Máximo (valor proveniente do modelo de enrolamento 3D)

$D_{\min} := 319.7\text{mm}$ Diâmetro mínimo (valor proveniente do modelo de enrolamento 3D)

$D_{\text{car}} := 18\text{m}$ Diâmetro do carretel

Cálculo da ovalização:

$$\delta_o := \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}$$

$\delta_o = 1.129\%$ Ovalização

Cálculo do fator de redução de colapso:

$$g\delta := (1 + 20\delta_o)^{-1}$$

$g\delta = 0.816$

Cálculo da deformação de flambagem sob flexão pura:

$$\varepsilon_b := \frac{t}{2 \cdot DE}$$

$\varepsilon_b = 2.702\%$

Cálculo da deformação analítica quando um duto é flexionado sob o carretel:

$$\varepsilon_{\text{analítico}} := \frac{DE}{DE + D_{\text{car}}}$$

$\varepsilon_{\text{analítico}} = 1.767\%$

Avaliação do critério:

$$\frac{\varepsilon_{\text{admAPI}}}{\varepsilon_b} \leq g\delta \text{ Critério para resistência a carregamentos de flexão}$$

Logo:

$$\varepsilon_{admAPI} := \varepsilon_b \cdot g \delta$$

$$\varepsilon_{admAPI} = 2.204 \%$$

Cálculo do Fator de segurança:

$$FS := \frac{\varepsilon_{admAPI}}{\varepsilon_{analítico}}$$

$$FS = 1.247$$

No entanto, a API sugere que para evitar flambagem a relação seguinte deve ser obedecida

$$\varepsilon_{admAPI} \geq f_2 \cdot \varepsilon_{analítico}$$

Onde f_2 é o fator de segurança para efeitos de flexão. A API sugere que seja utilizado para f_2 o valor de 2. No entanto, f_2 pode ser menor para cálculos de enrolamento em dutos.

$$f_2 := 2$$

Reorganizando a equação acima, têm-se a seguinte relação:

$$\varepsilon_{analítico} \leq \frac{\varepsilon_{admAPI}}{f_2}$$

$$\frac{\varepsilon_{admAPI}}{f_2} = 1.102 \%$$

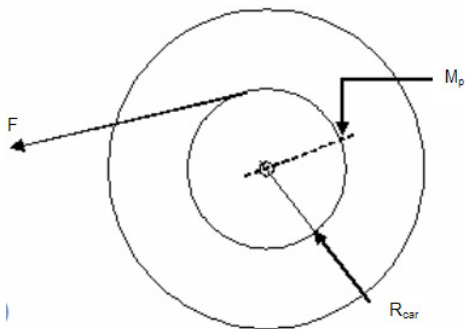
Um valor menor que o analítico, e portanto este duto não estaria aprovado pela API, porém questionável pela própria abertura da API

No entanto, no mercado vêm sendo adotado para f_2 o valor de 1, já que o valor igual a 2 estaria considerando os efeitos dinâmicos de lançamento. No processo de enrolamento, não existe razão para utilização deste. Portanto, o valor a ser considerado deve ser de $\varepsilon_{adm}=2.204\%$, neste caso.

11 APÊNDICE III – Cálculo da mínima carga para enrolamento (“back tension”)

Cálculo da mínima carga para enrolamento

A figura abaixo apresenta uma representação simplificada do enrolamento de um duto



Unidade:

$t_{on} := 10000N$

Dados de entrada:

Diâmetro Externo: $DE := 12.75in$

Espessura de parede: $t := 17.5mm$

Raio do carretel: $r_{car} := 9m$

Dados de material:

Mínima Tensão de Escoamento Especificada: $SMYS := 414MPa$

Tolerância do SMYS: $SMYS_{tol} := 120MPa$

Máximo valor de SMYS: $SMYS_{max} := SMYS + SMYS_{tol}$

$SMYS_{max} = 534MPa$

Cálculo do módulo de seção plástico:

Diâmetro Interno: $DI := DE - 2 \cdot t$ $DI = 288.85mm$

Máximo valor de espessura de parede (+18%): $t_{max} := 1.18t$ $t_{max} = 20.65mm$

Máximo diâmetro externo: $D_{maxtol} := DI + 2 \cdot t_{max}$ $D_{maxtol} = 330.15mm$

Momento de Inércia do duto:

$$I := \pi \cdot \frac{\left(\frac{D_{\text{maxtol}}}{2}\right)^4 - \left(\frac{DI}{2}\right)^4}{4}$$

$$I = 2,415 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

Distância da linha de centro do duto a fibra mais externa:

$$c := \frac{D_{\text{maxtol}}}{2} \quad c = 165,075 \text{ mm}$$

Módulo de seção plástica:

$$Z := \frac{I}{c} \quad Z = 1,463 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Cálculo do Momento Plástico:

Momento Plástico:

$$M_p := SMYS_{\text{max}} \cdot Z$$

$$M_p = 781,18 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Cálculo da mínima carga requerida para o enrolamento:

Carga Mínima:

$$F_{\text{min}} := \frac{M_p}{r_{\text{car}}}$$

$$F_{\text{min}} = 86,798 \text{ kN}$$

$$F_{\text{min}} = 8,68 \text{ ton}$$

12 APÊNDICE IV – Cálculo do limite da zona elástica ao longo da seção de um duto sob esforços de flexão

Cálculo do limite da região elástica em um duto submetido à esforços de flexão

Dados de entrada:

Diâmetro Externo do duto:	$DE := 12.75 \text{ in}$
Diâmetro do carretel:	$D_{\text{car}} := 18 \text{ m}$
Limite de Escoamento:	$S_y := 414 \text{ MPa}$
Módulo de Elasticidade:	$E := 207 \text{ GPa}$

Cálculo do raio de curvatura da linha neutra:

Raio externo do duto:	$r_{\text{ext}} := \frac{DE}{2}$	$r_{\text{ext}} = 161.925 \text{ mm}$
Raio de curvatura da linha neutra:	$r_{\text{LN}} := r_{\text{ext}} + \frac{D_{\text{car}}}{2}$	$r_{\text{LN}} = 9.162 \times 10^3 \text{ mm}$
Raio de curvatura plástico:	$r_{\text{plast}} := r_{\text{LN}}$	

Cálculo da deformação de escoamento:

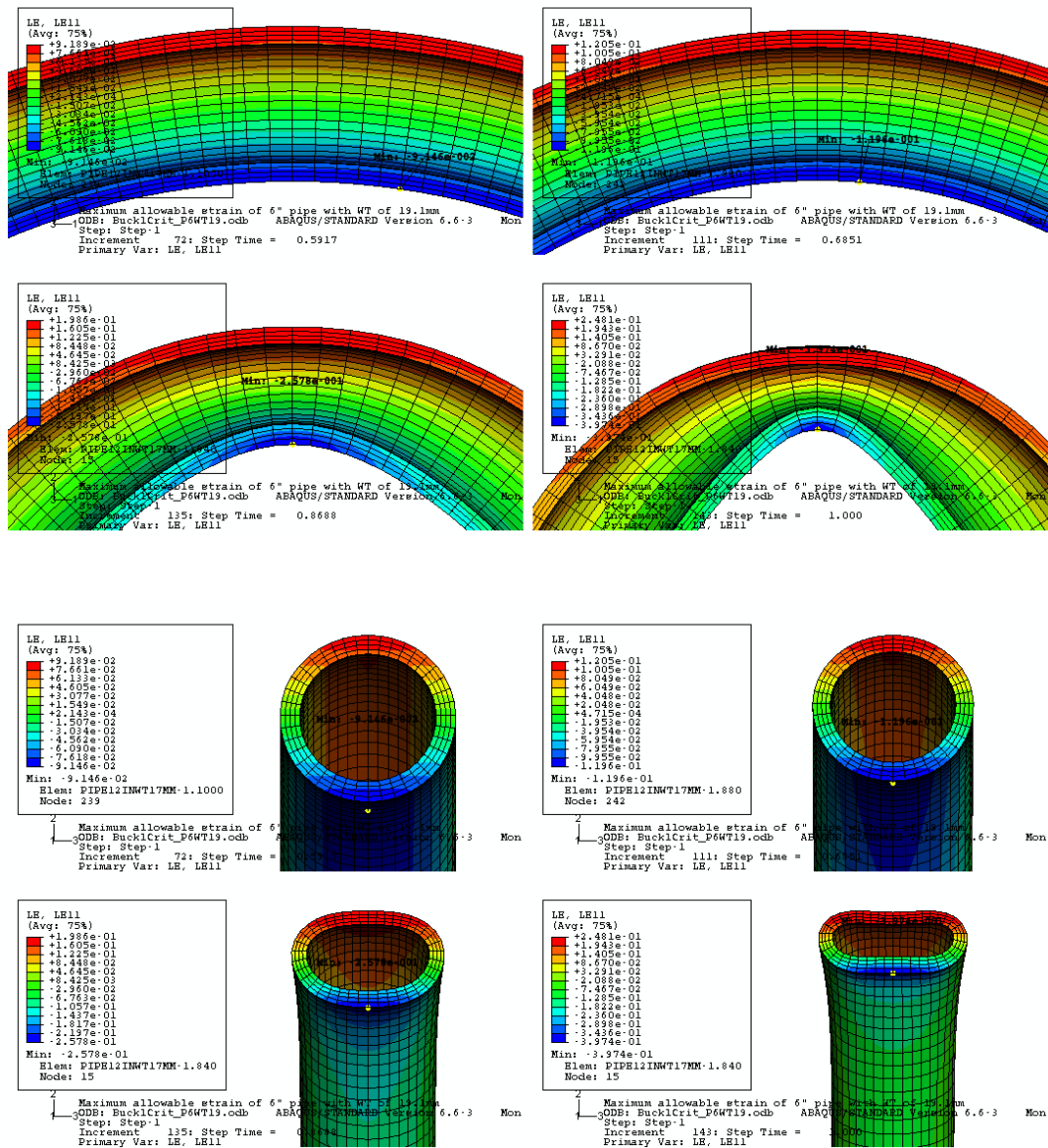
Deformação de escoamento	$\epsilon_y := \frac{S_y}{E}$	$\epsilon_y = 0.2\%$
--------------------------	-------------------------------	----------------------

Cálculo do limite da região elástica:

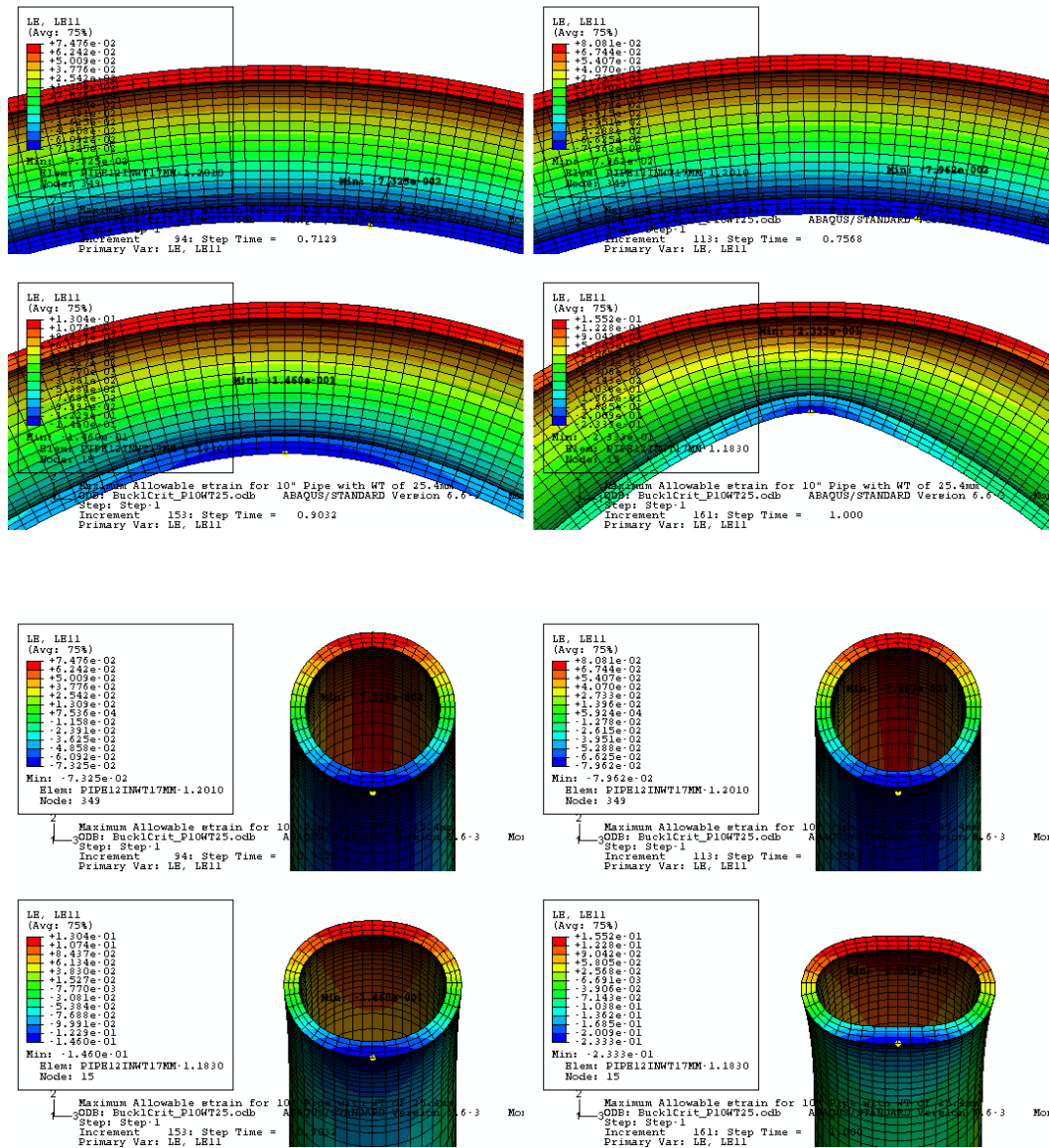
Limite da região elástica em um duto sob esforços de flexão:	$yy := \epsilon_y \cdot r_{\text{plast}}$
	$yy = 18.324 \text{ mm}$

13 APÊNDICE V – Resultados das análises de elementos finitos para verificação dos critérios de momento limite plástico e deformação característica

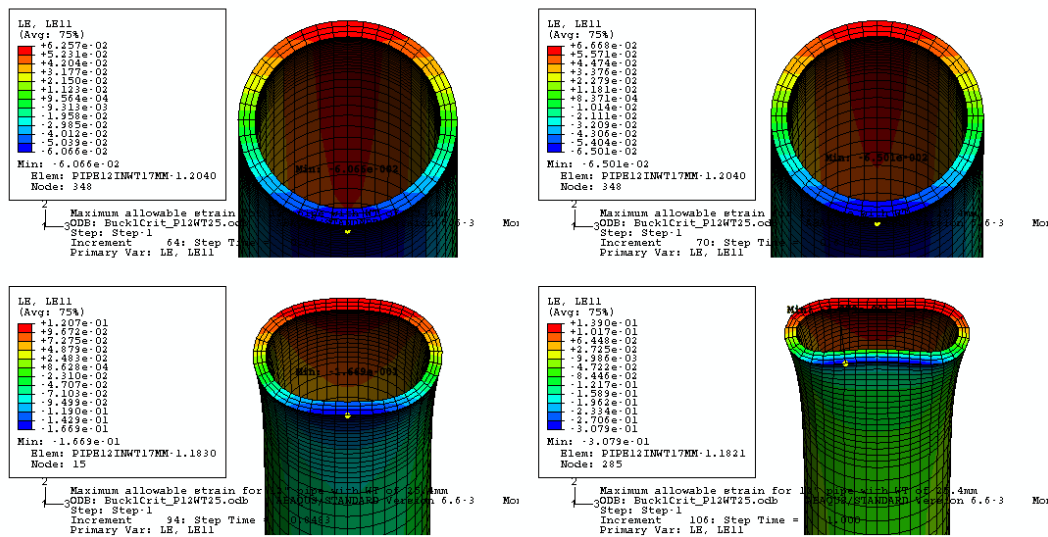
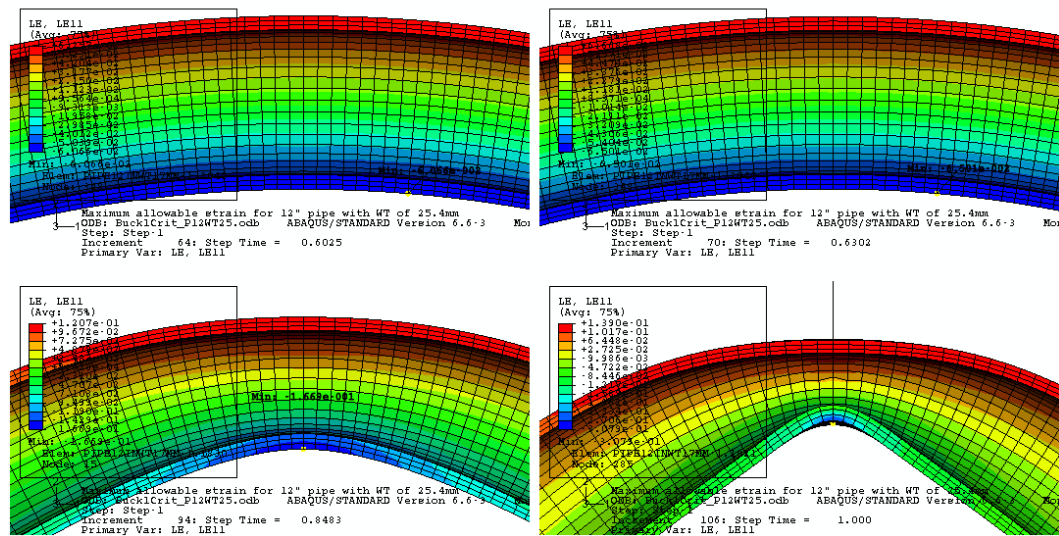
13.1.DE=6.625", t=19.05mm, DE/t=8.8



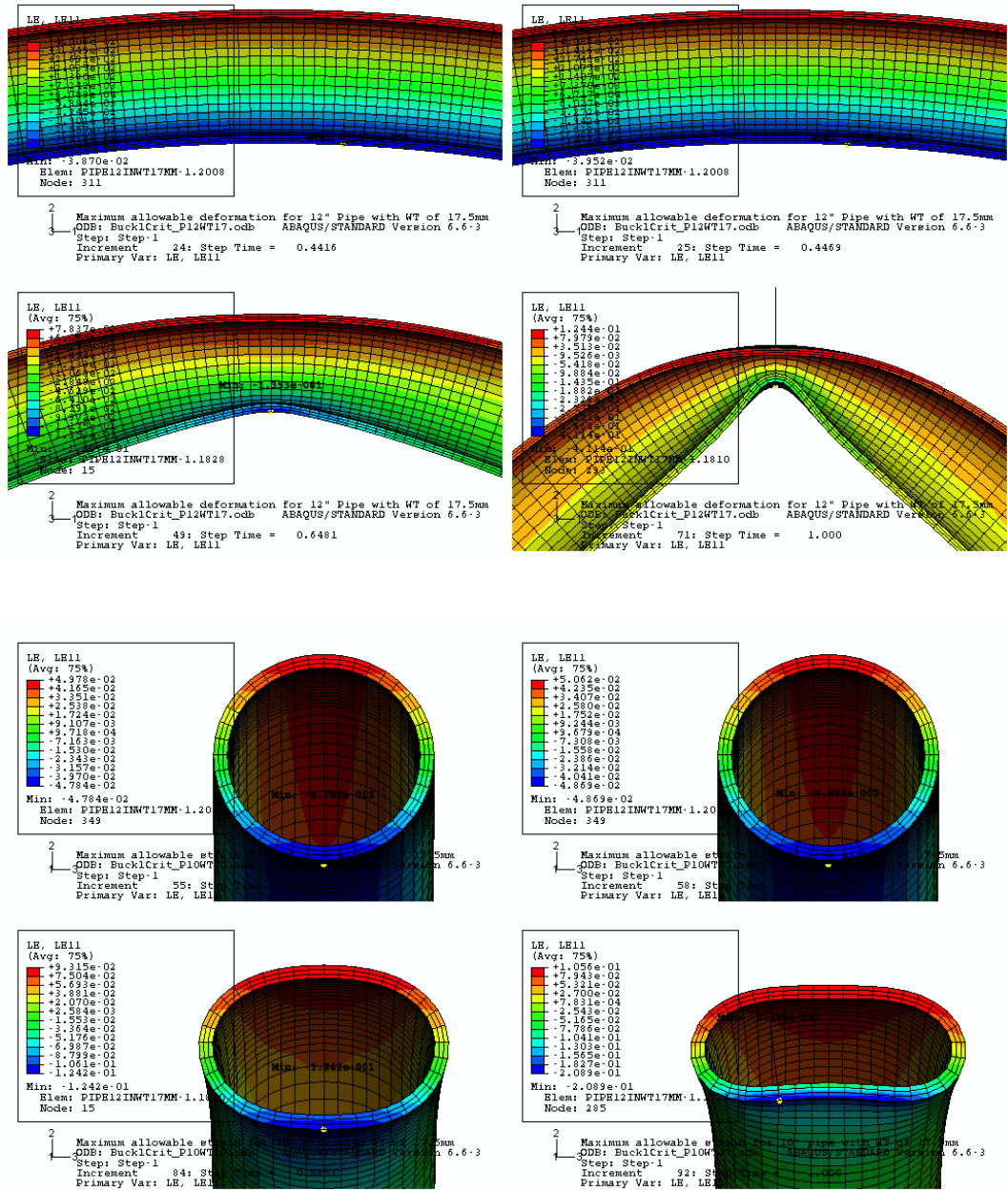
13.2.DE=10.75”, t=25.4mm, DE/t=10.8



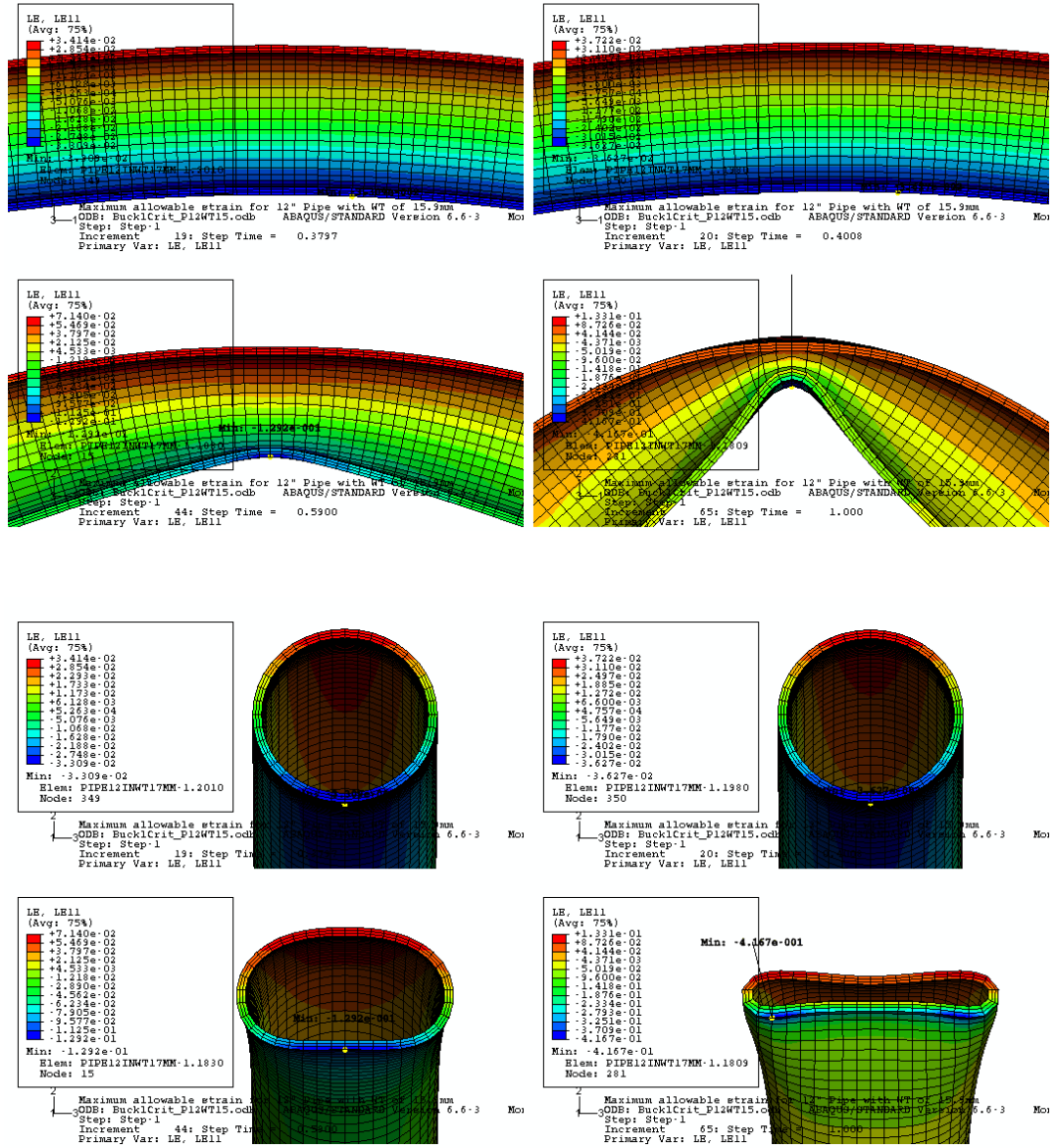
13.3.DE=12.75", t=25.4mm, DE/t=12.8



13.4.DE=12.75", t=17.5mm, DE/t=18.5

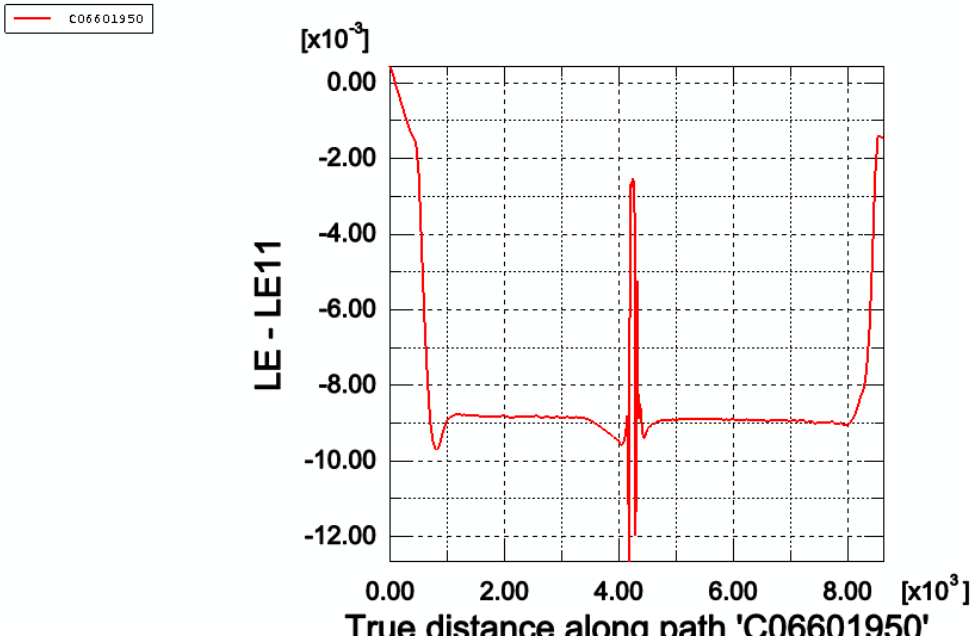
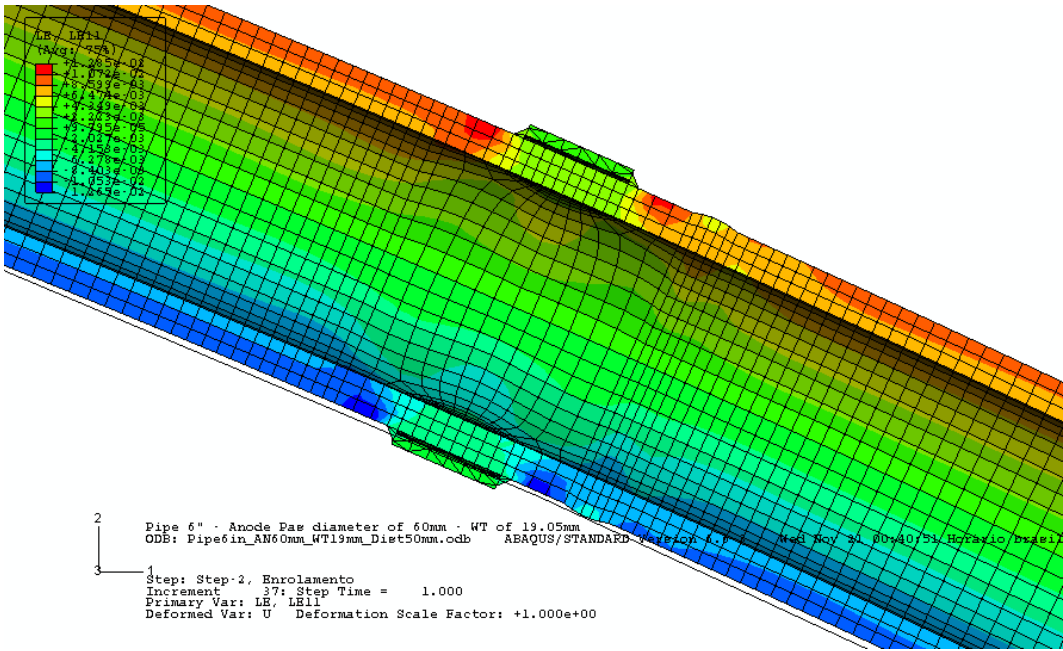


13.5.DE=12.75", t=15.9mm, DE/t=20.4

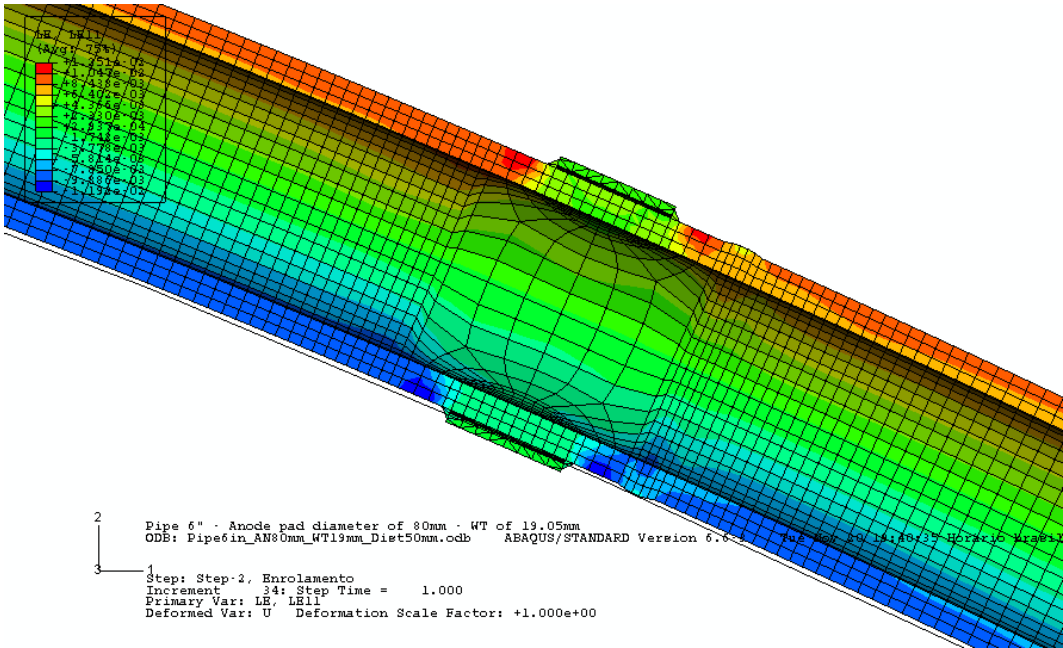


14 APÊNDICE VI – Resultados dos modelos de sapata de anodo com duto engastado 3D

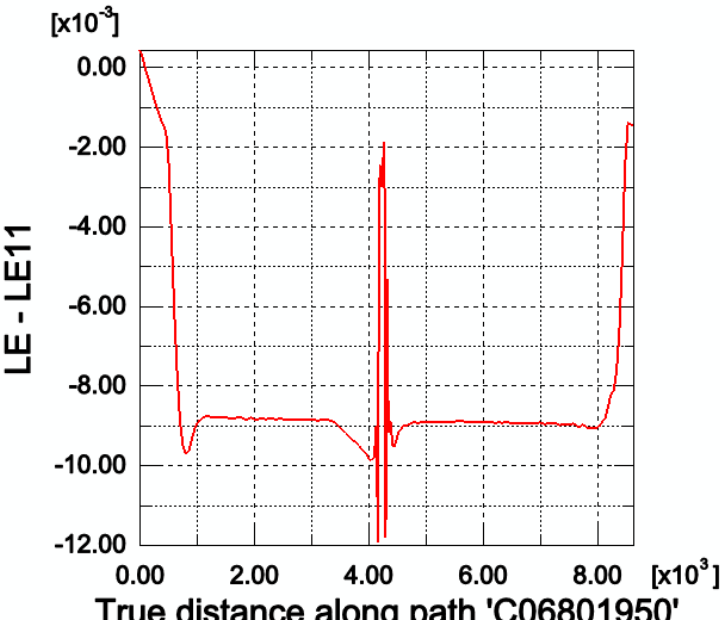
14.1.DE=6.625", t=19.05mm, Dsapanodo=60mm; Lsapanodo=50mm



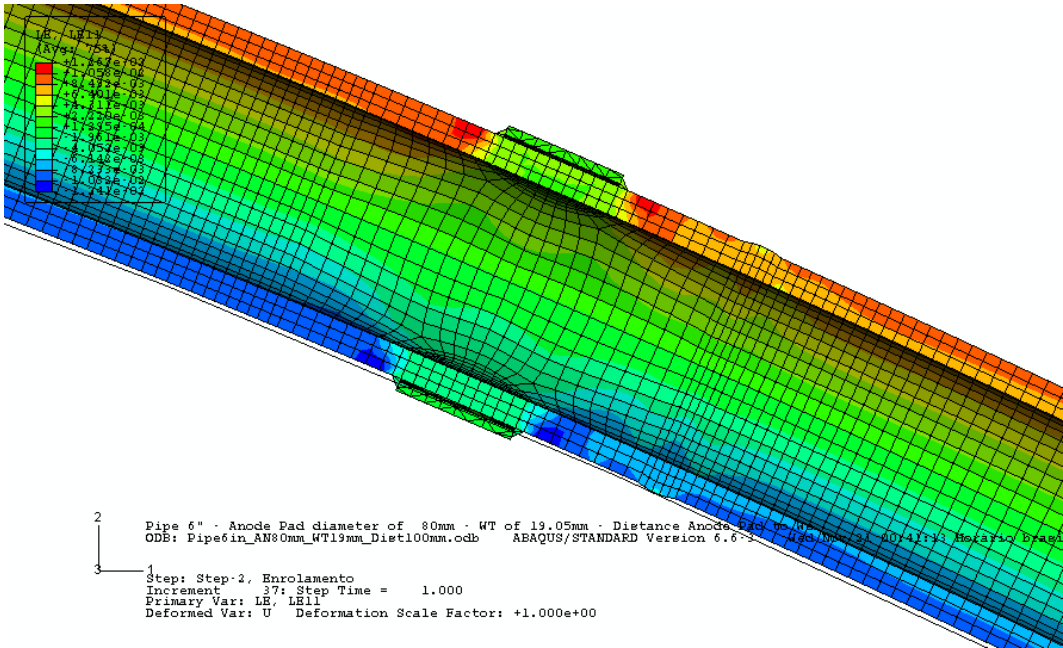
14.2.DE=6.625”, t=19.05mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm



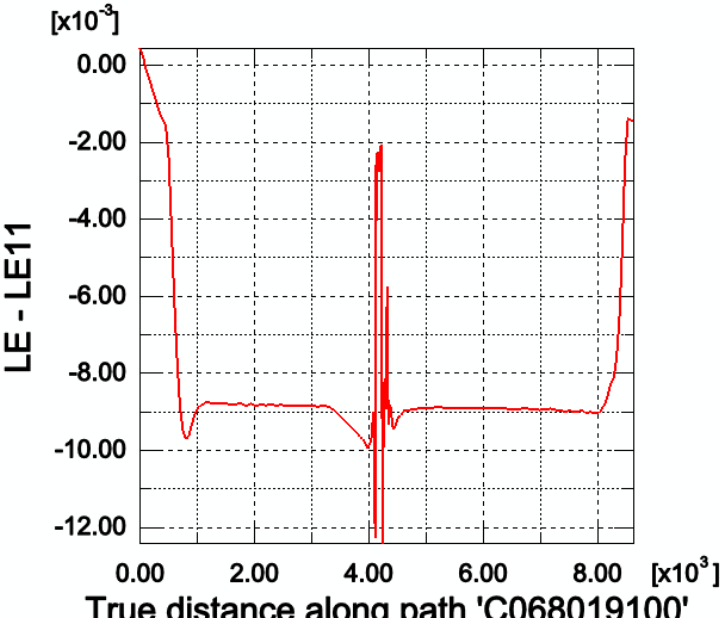
C06801950



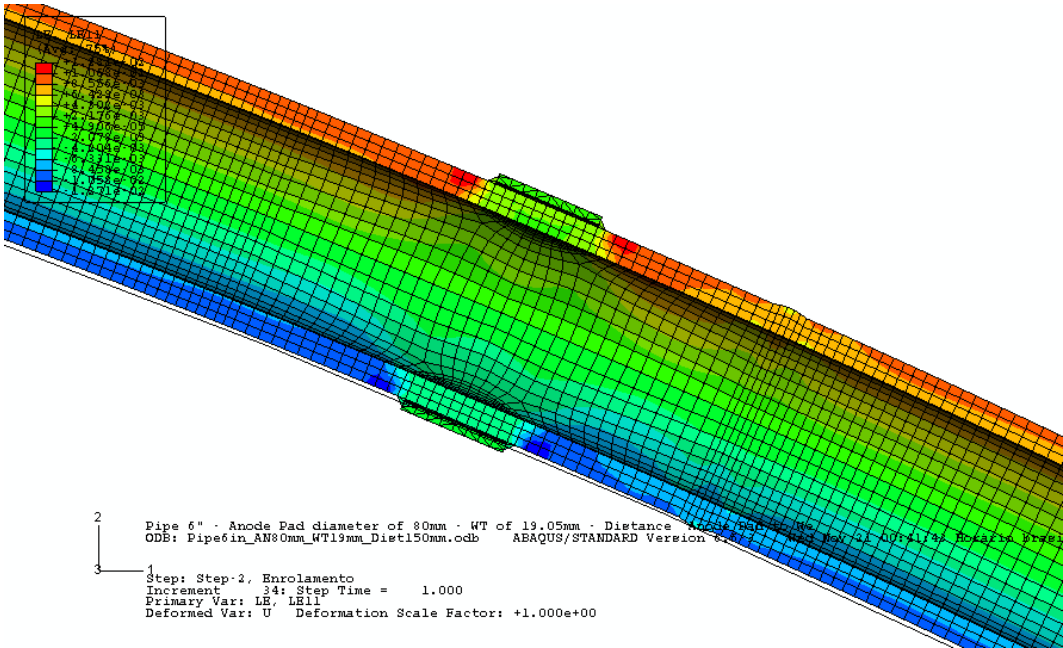
14.3.DE=6.625”, t=19.05mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm



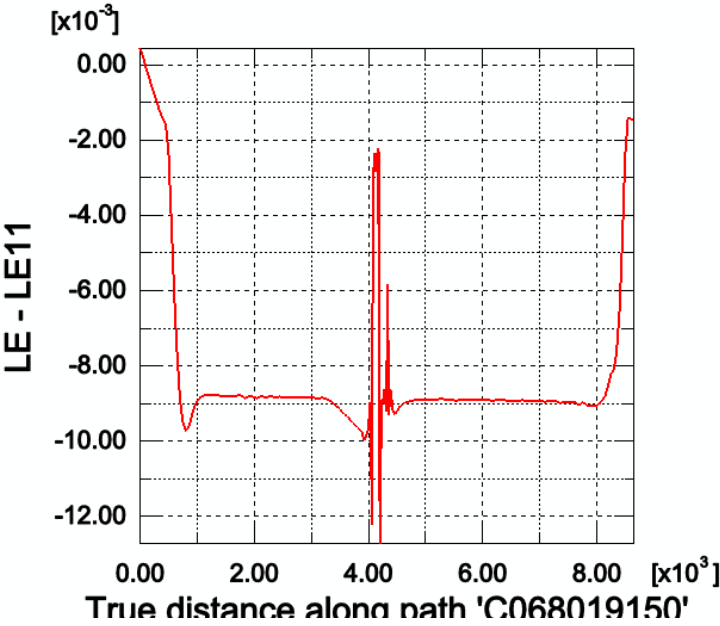
C068019100



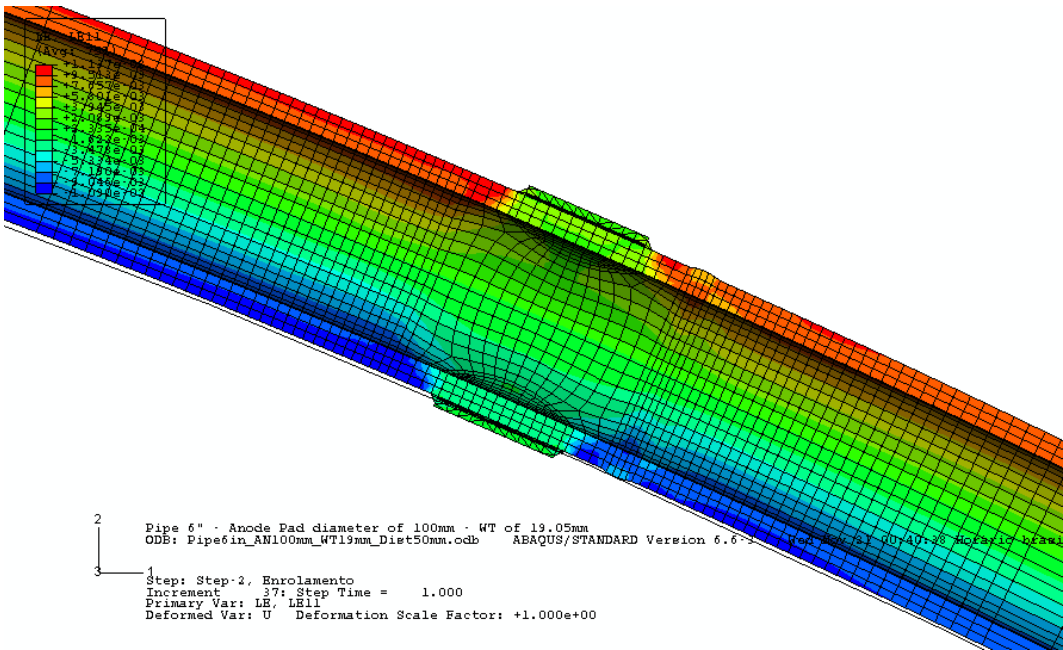
14.4.DE=6.625”, t=19.05mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm



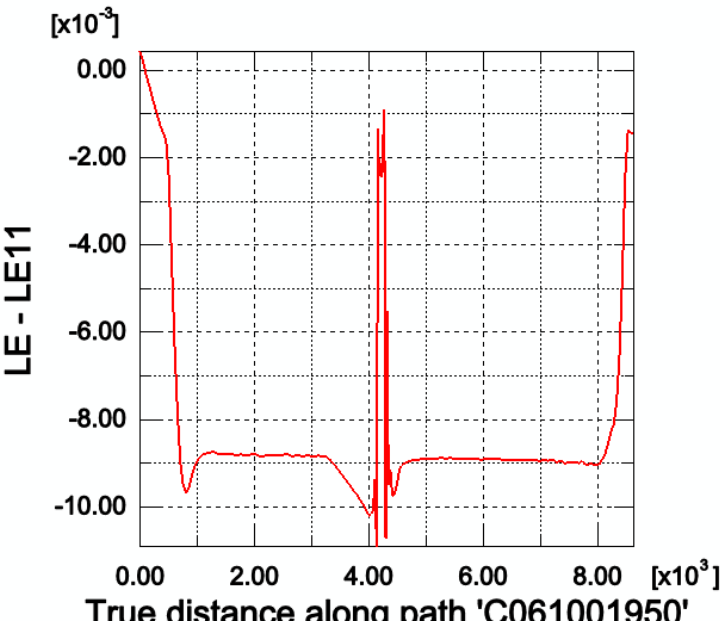
C068019150



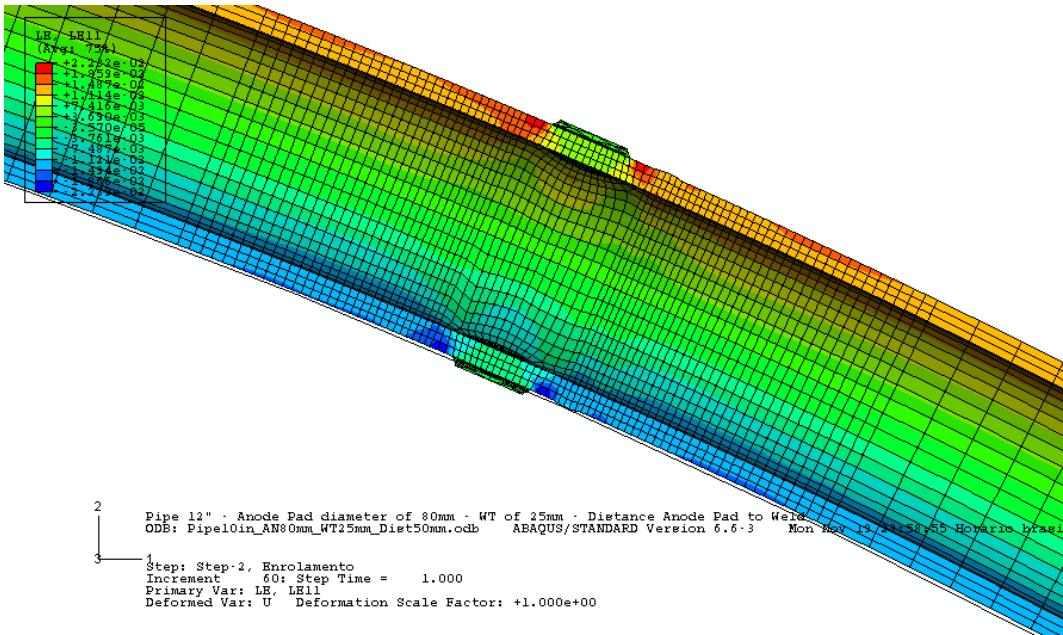
14.5.DE=6.625", t=19.05mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm



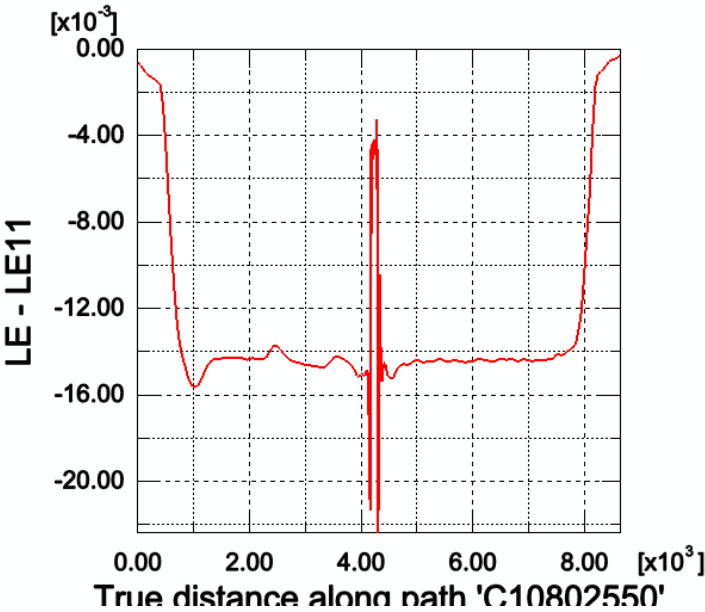
C061001950



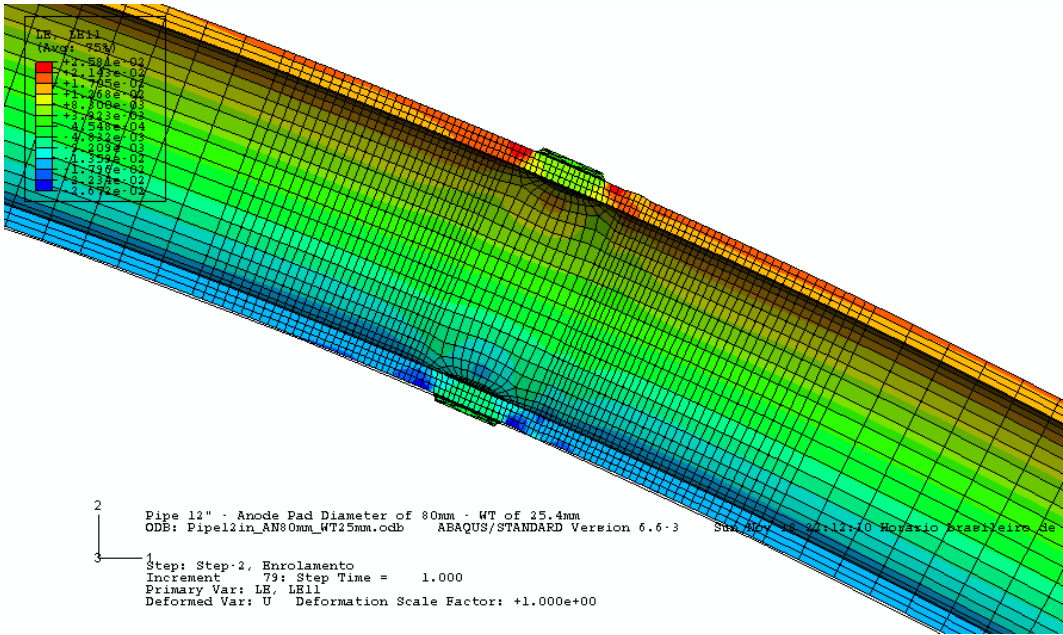
14.6.DE=10.75", t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm



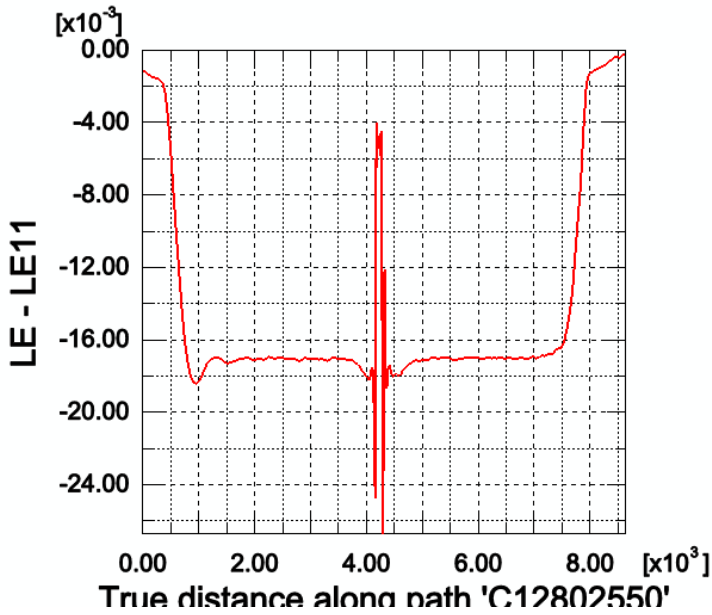
C10802550



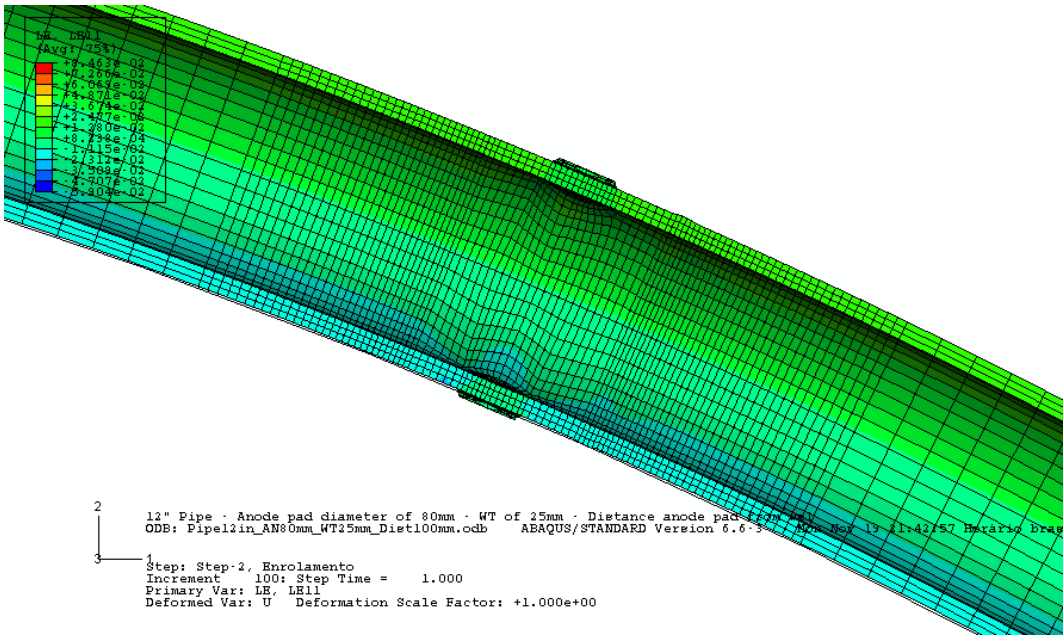
14.7.DE=12.75", t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm



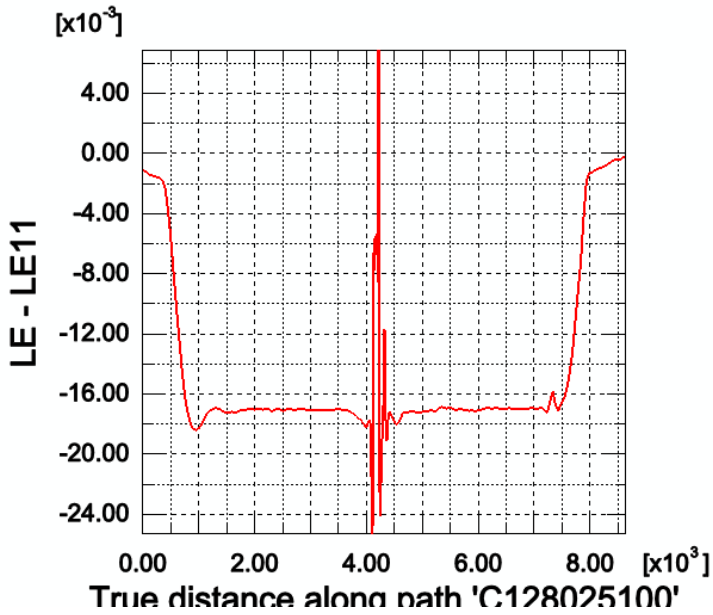
c12802550



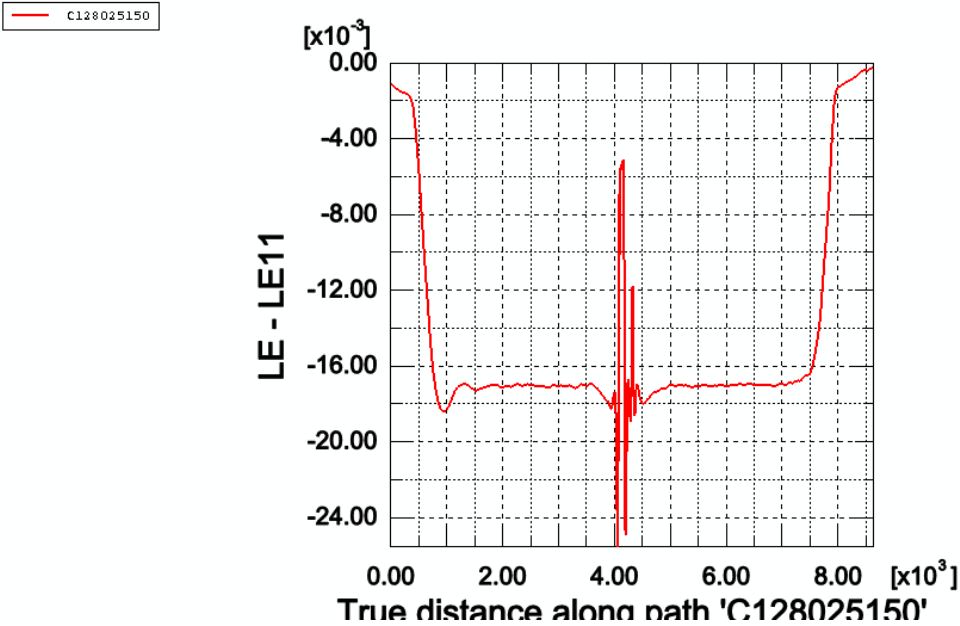
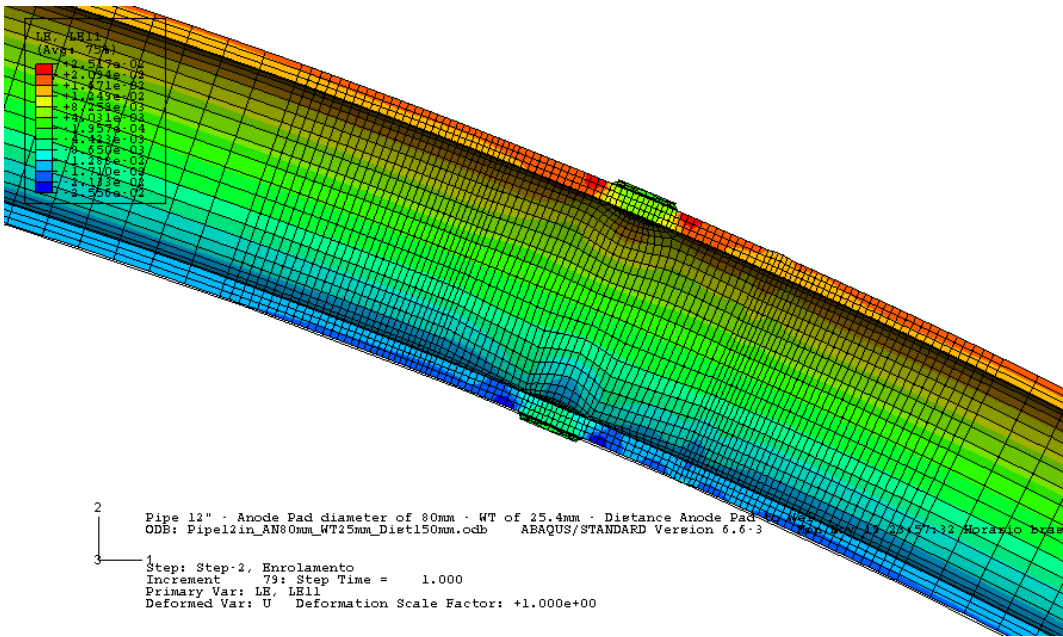
14.8.DE=12.75”, t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm



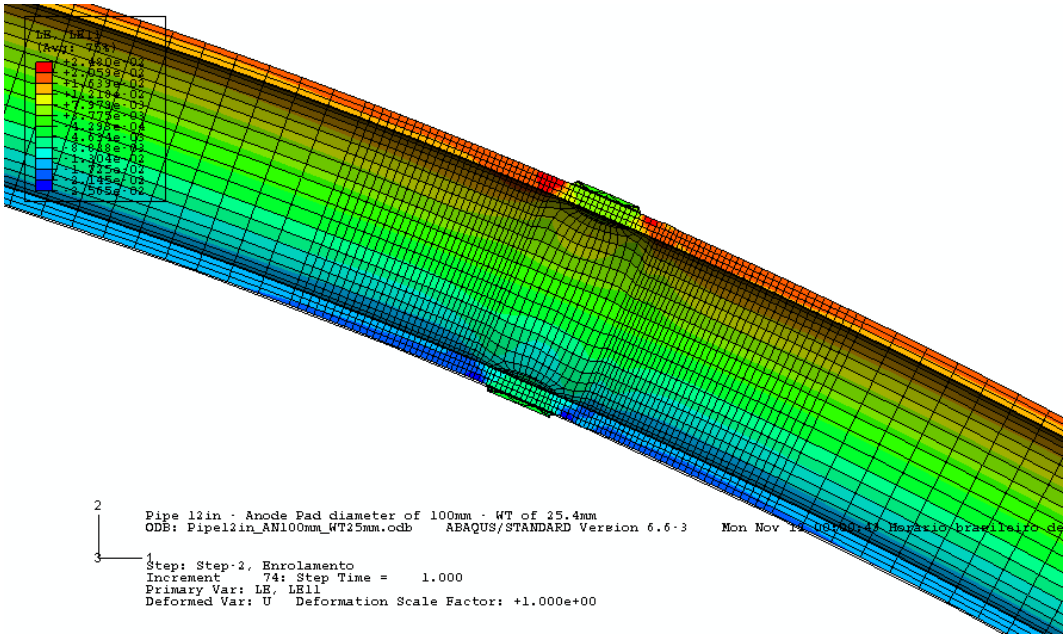
C128025100



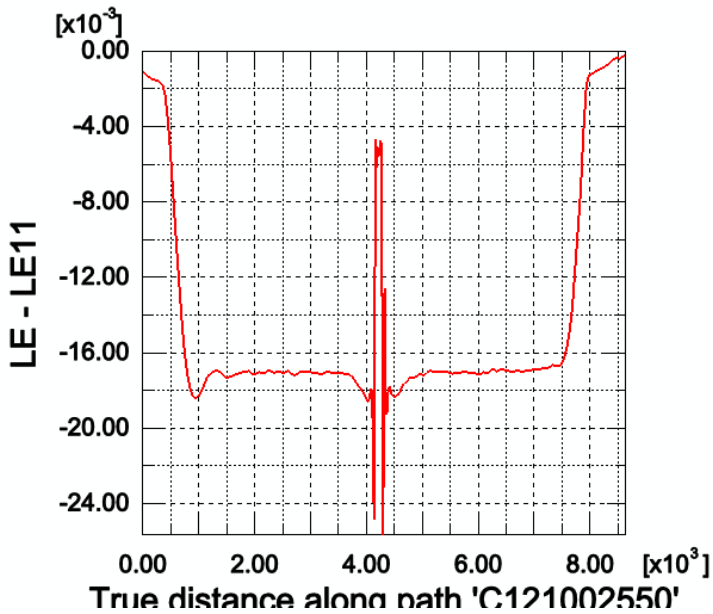
14.9.DE=12.75", t=25.4mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm



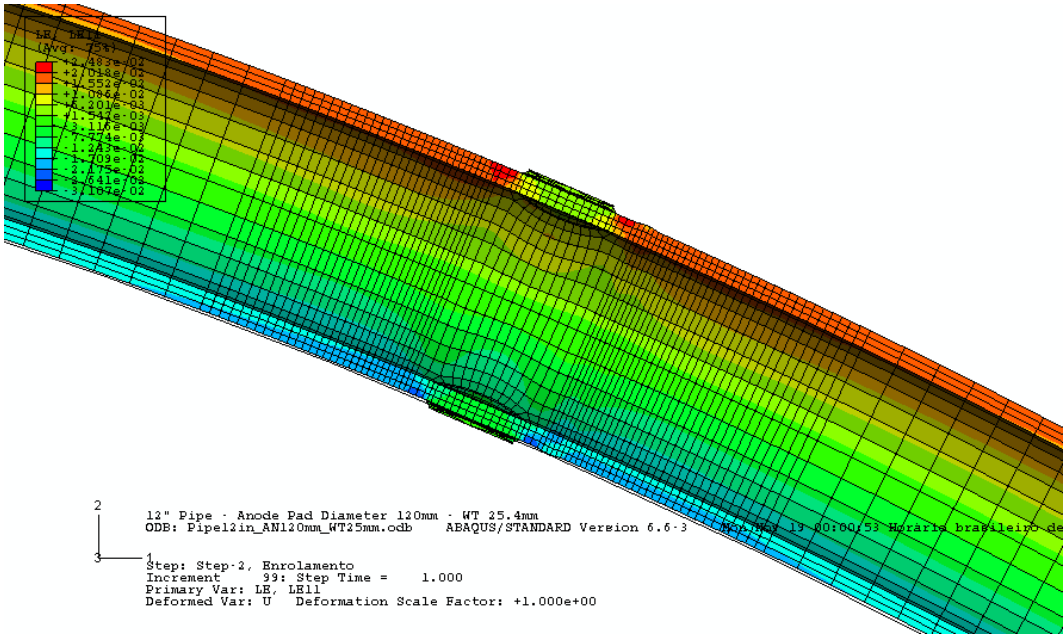
14.10.DE=12.75”, t=25.4mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm



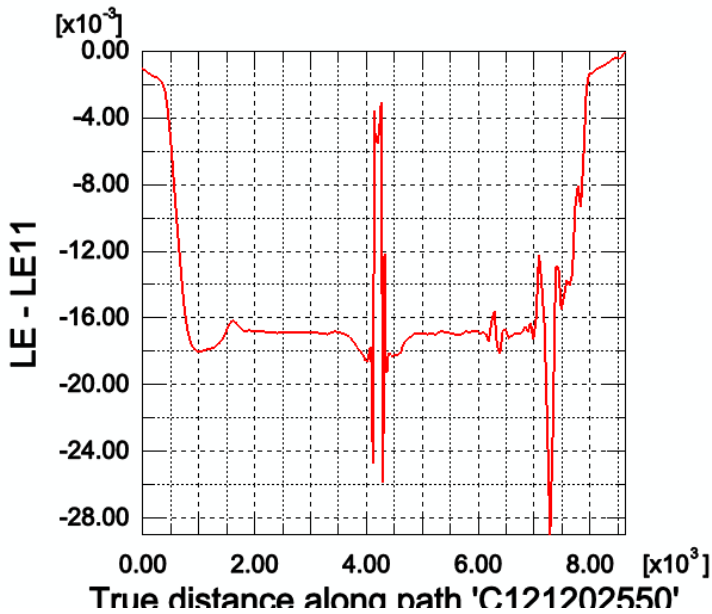
C121002550



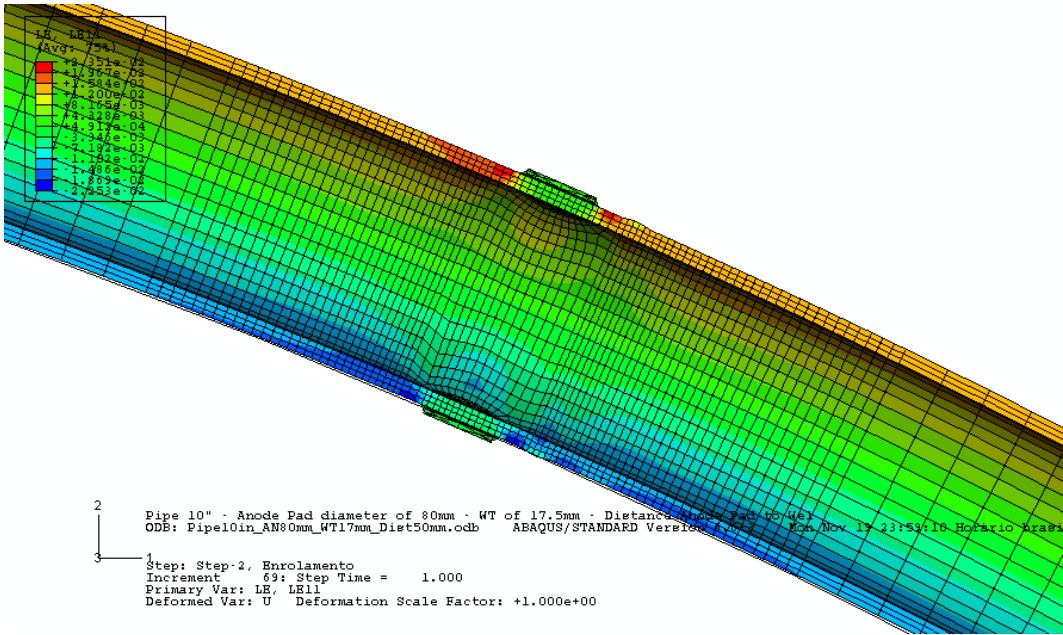
14.11.DE=12.75”, t=25.4mm, Dsapanodo=120mm; Lsapanodo=50mm



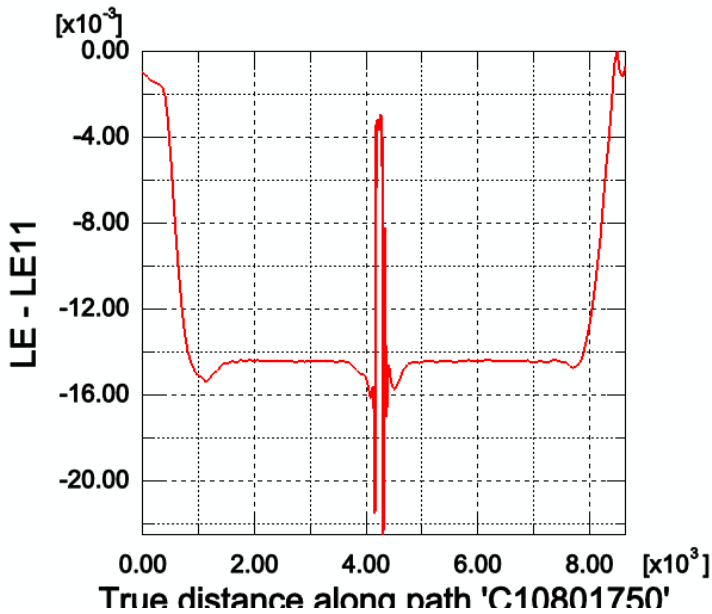
C121202550



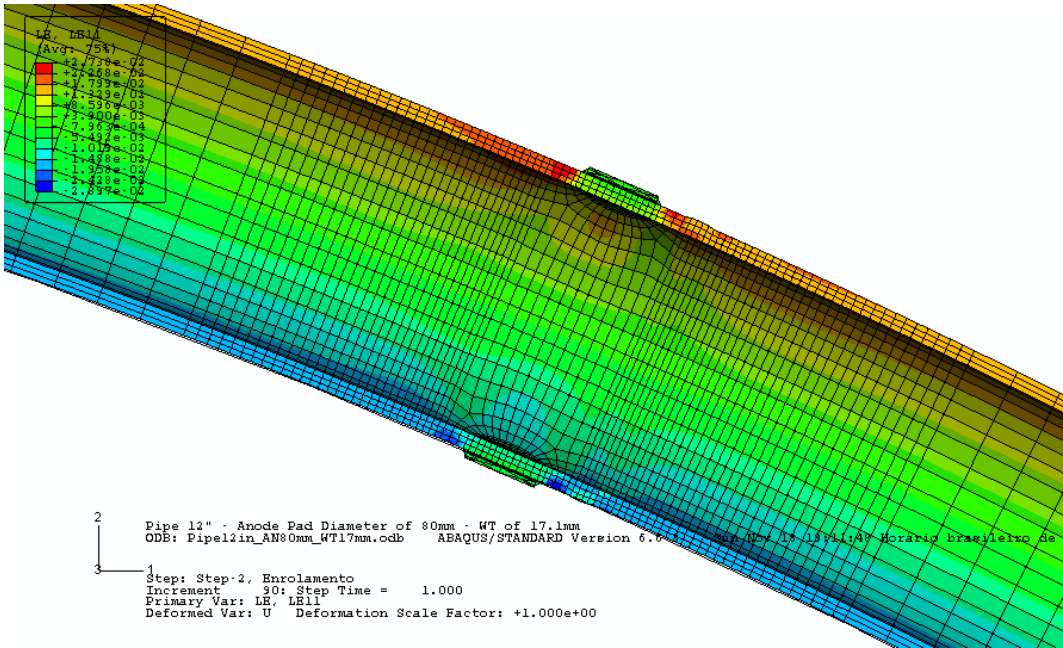
14.12.DE=10.75", t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm



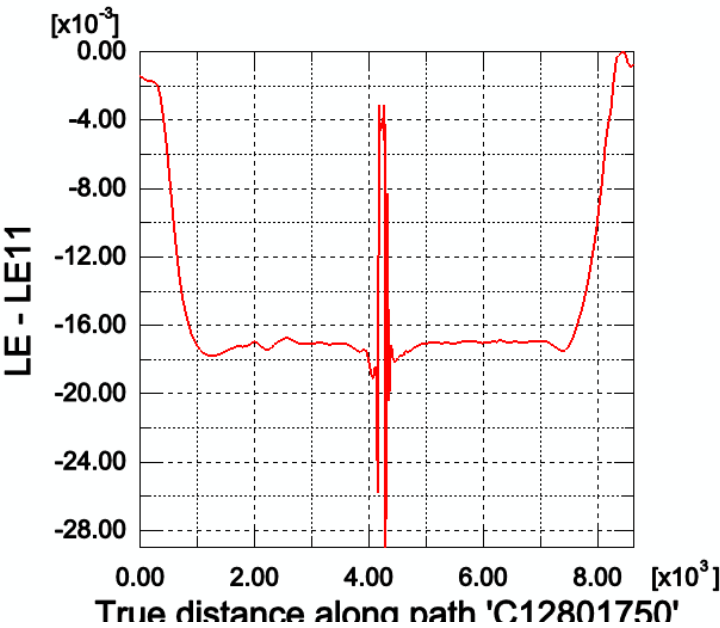
C10801750



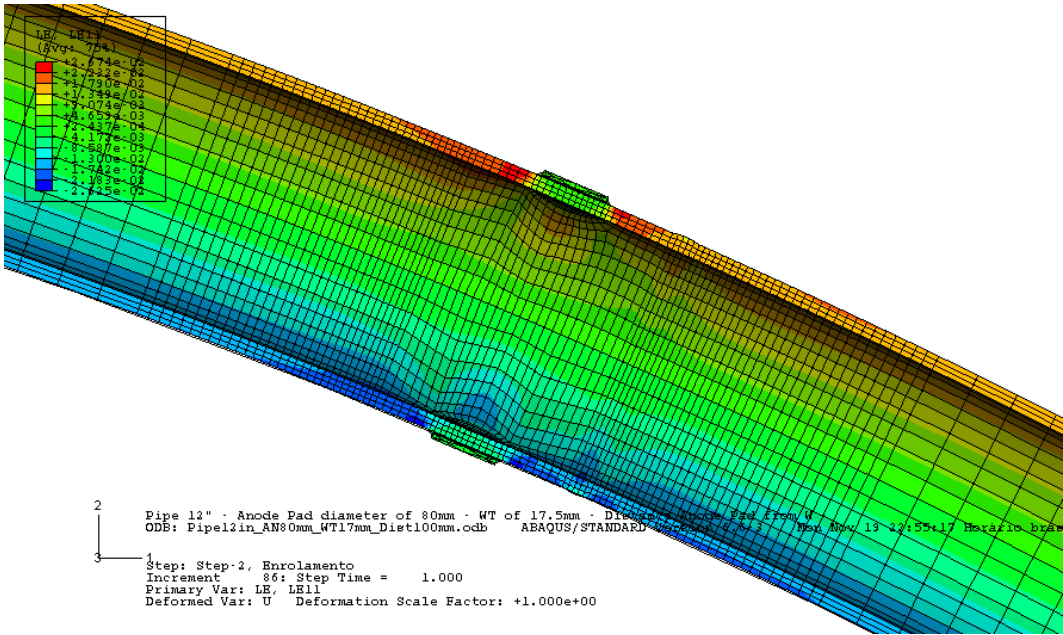
14.13.DE=12.75”, t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm



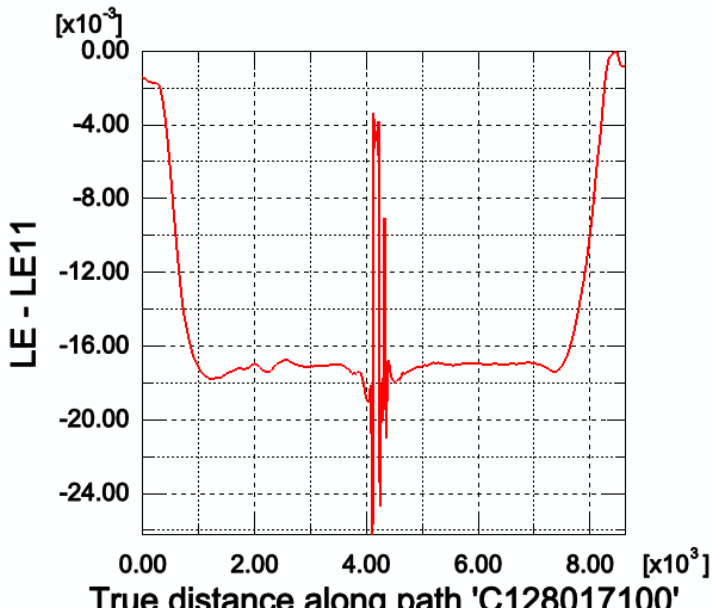
C12801750



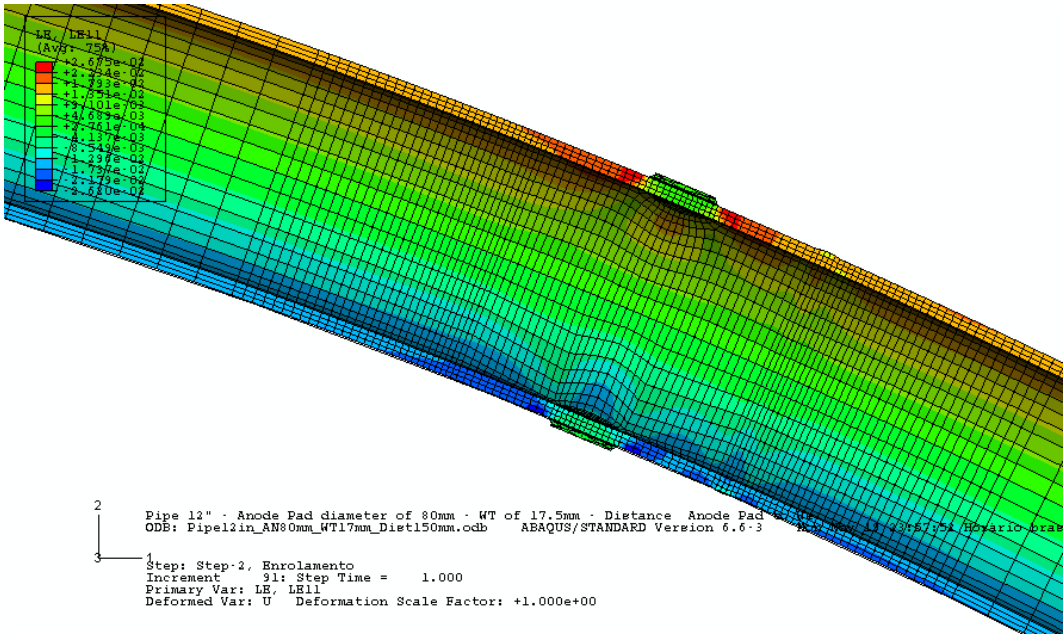
14.14.DE=12.75”, t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm



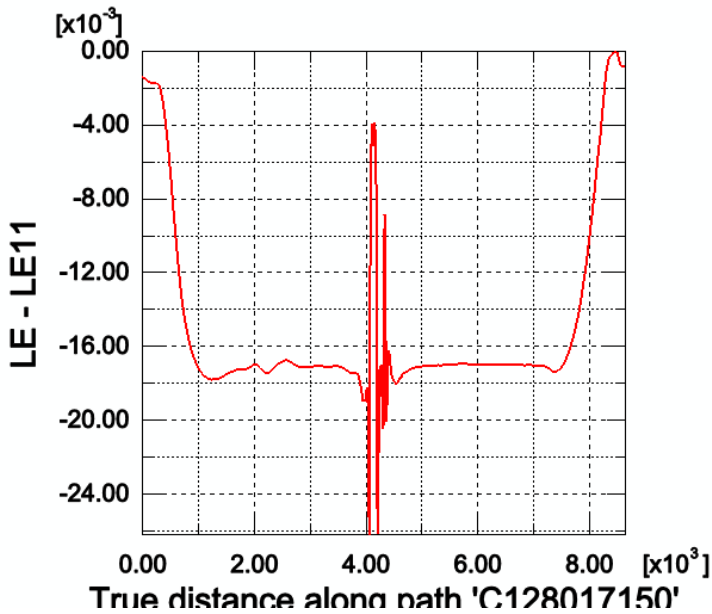
C128017100



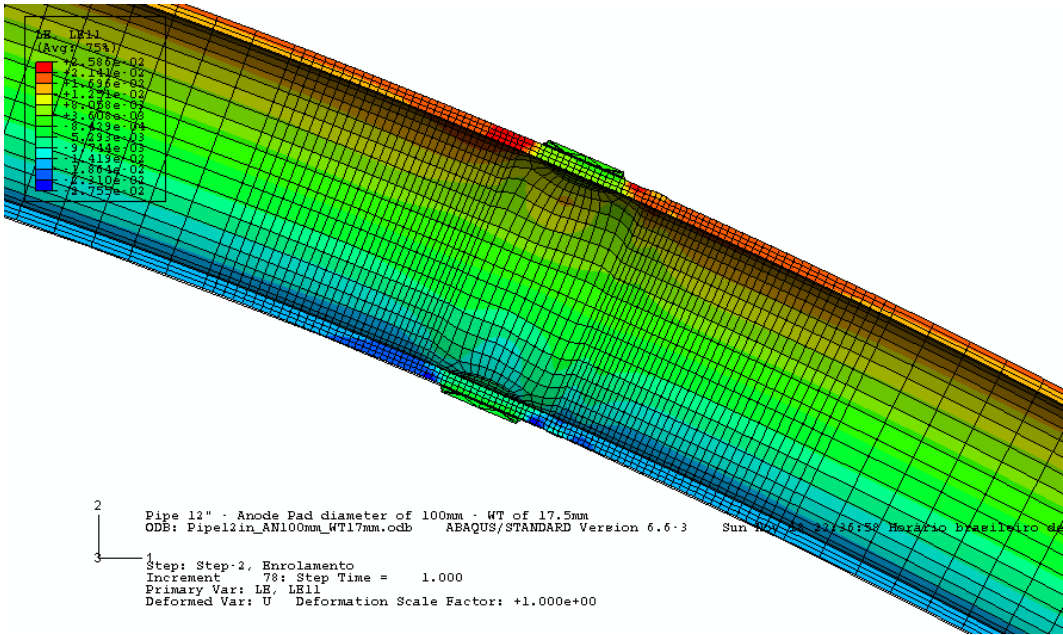
14.15.DE=12.75”, t=17.5mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm



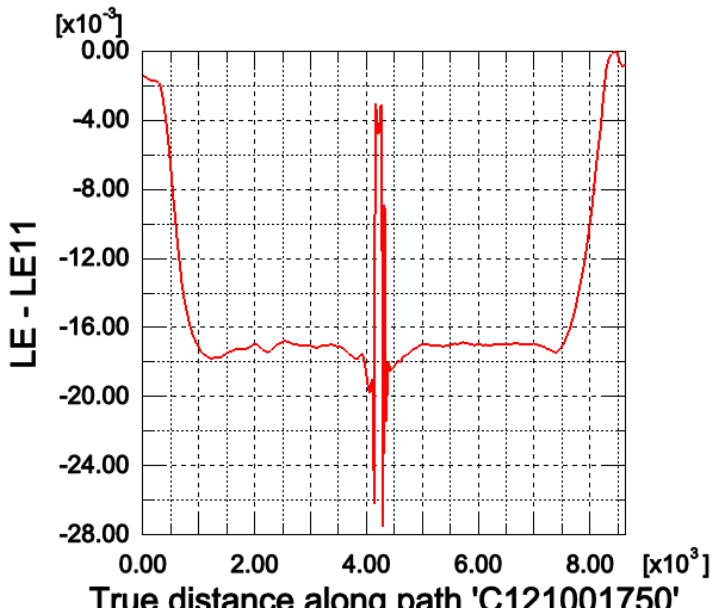
C128017150



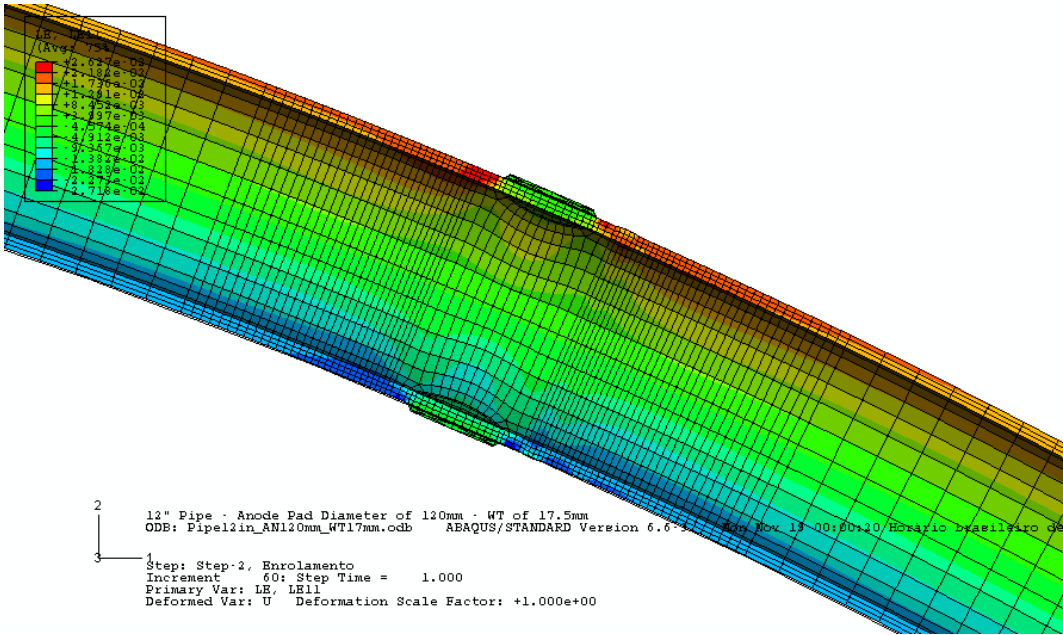
14.16.DE=12.75”, t=17.5mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm



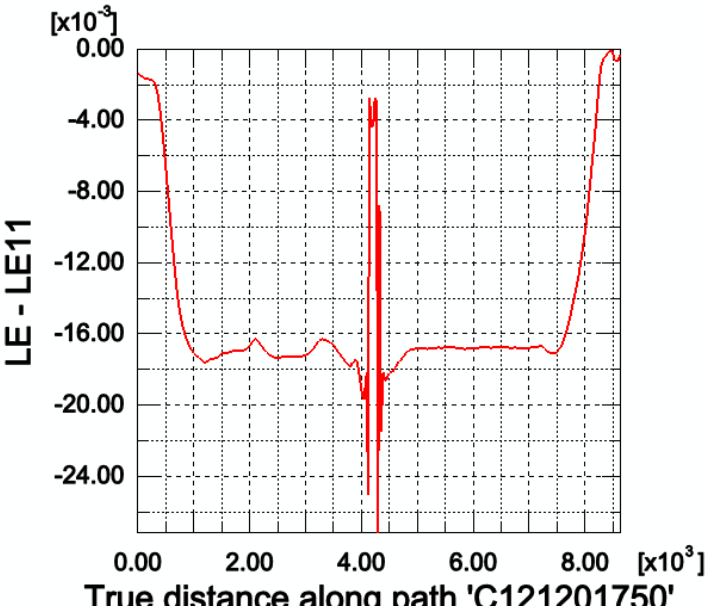
C121001750



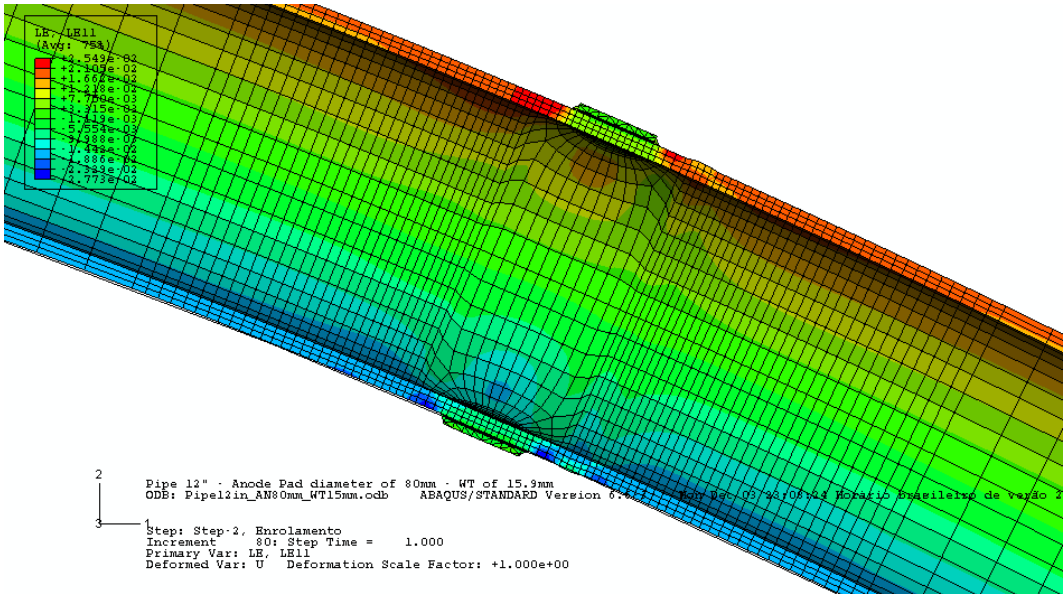
14.17.DE=12.75", t=17.5mm, Dsapanodo=120mm; Lsapanodo=50mm



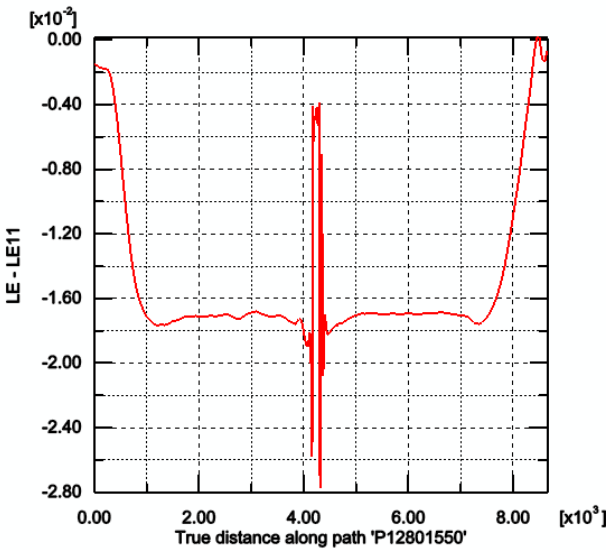
C121201750



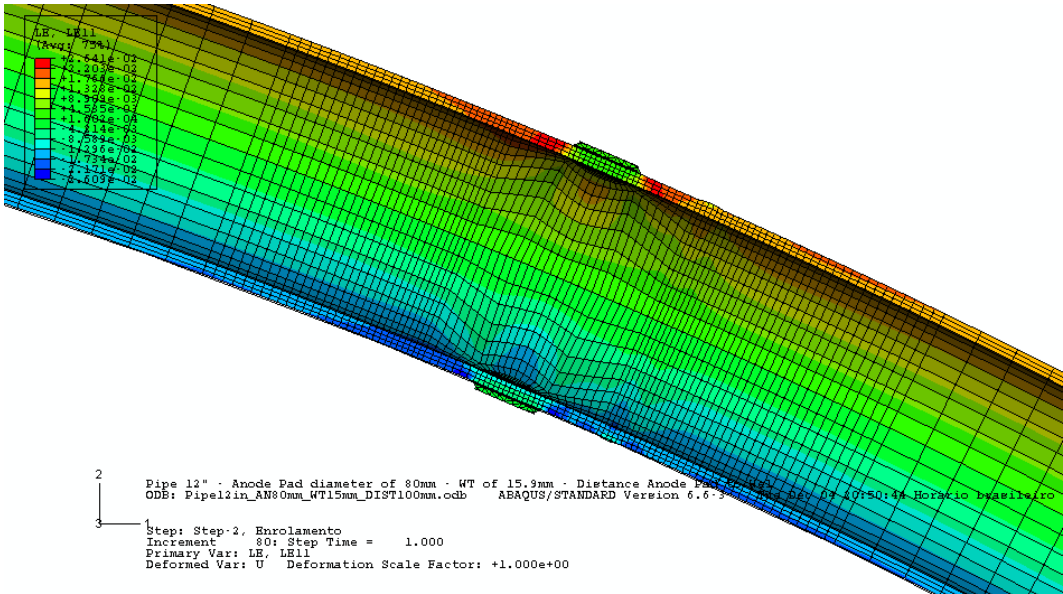
14.18.DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=50mm



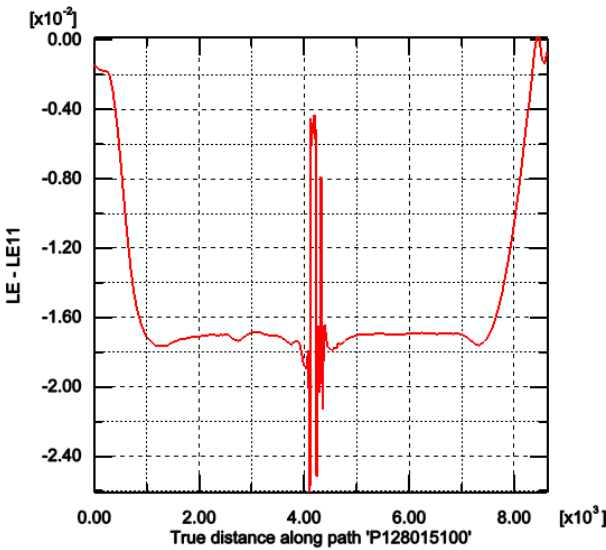
P12801550



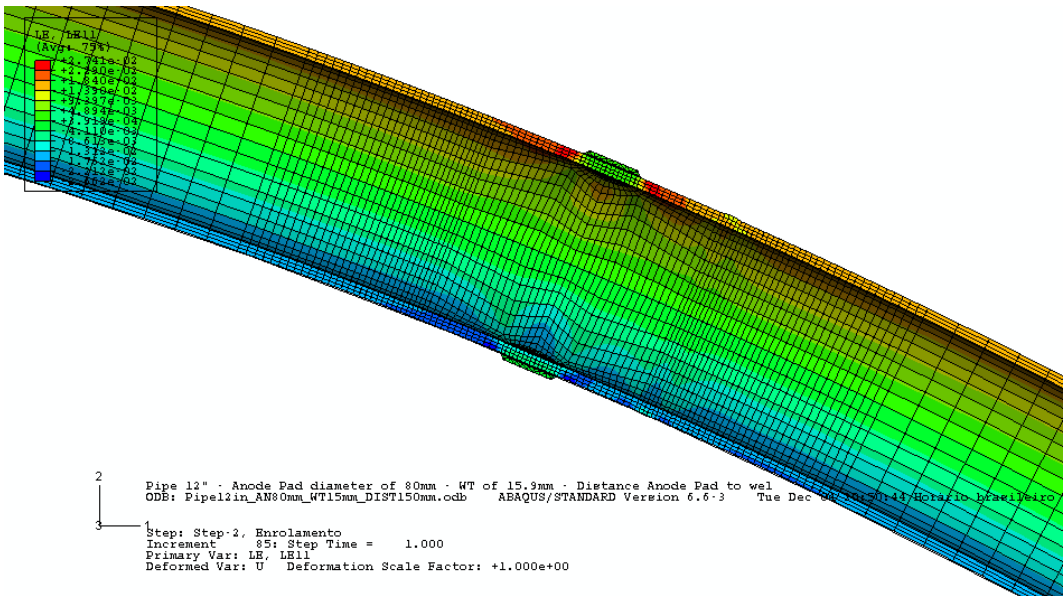
14.19.DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=100mm



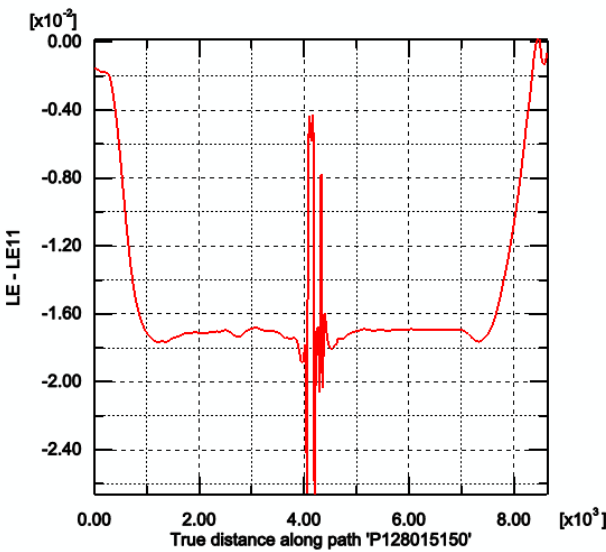
P128015100



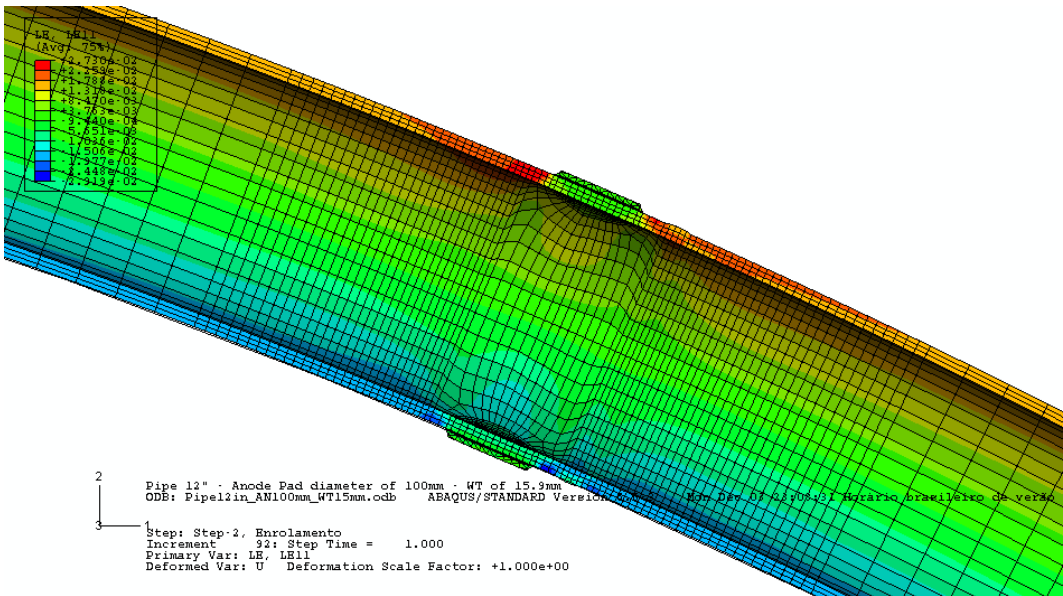
14.20.DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=80mm; Lsapanodo=150mm



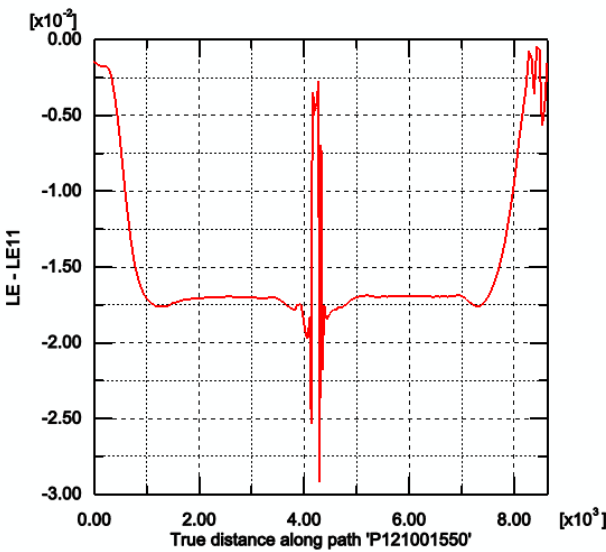
P128015150



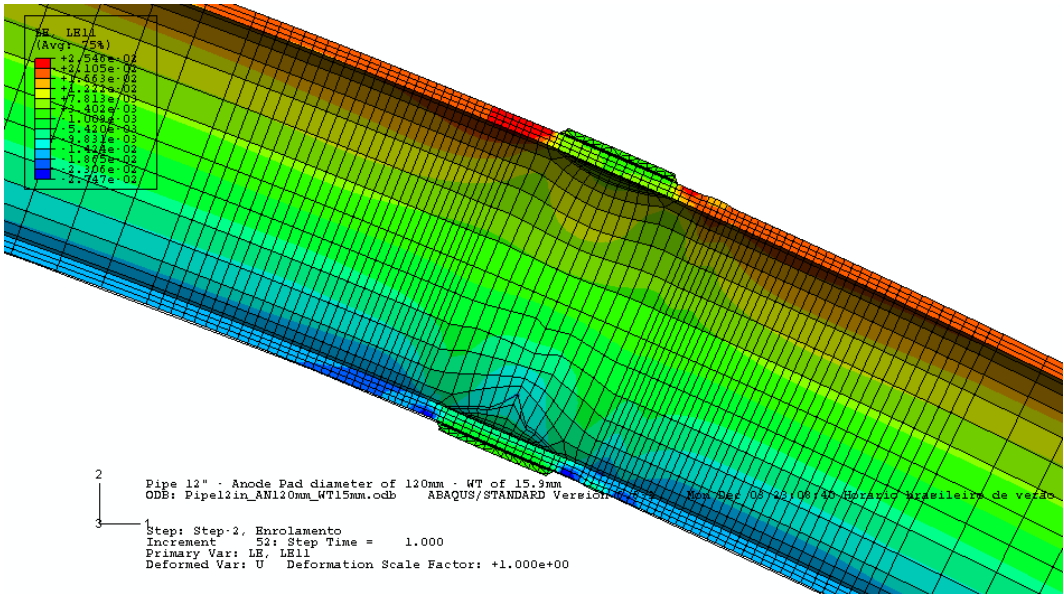
14.21.DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=100mm; Lsapanodo=50mm



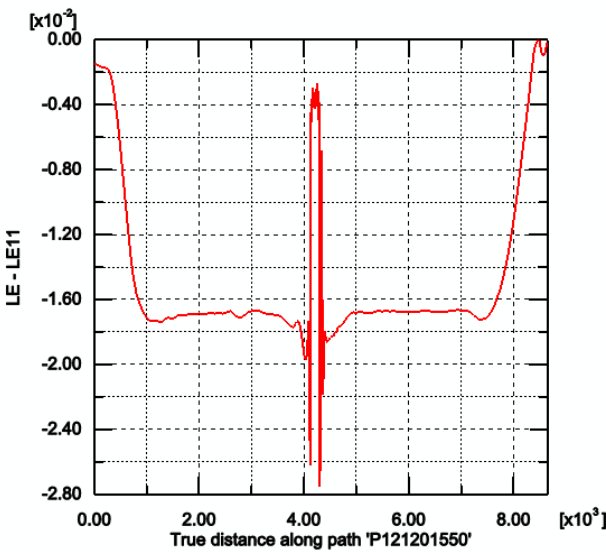
P121001550



14.22.DE=12.75", t=15.9mm, Dsapanodo=120mm; Lsapanodo=50mm



P121201550



15 APÊNDICE VII – Cálculo analítico da deformação acumulada para um ciclo completo

Cálculo analítico da deformação acumulada em um ciclo completo de enrolamento

1. Dados de entrada

1.1. Dados de entrada do duto:

DE := 323.85mm Diâmetro externo nominal do duto

t := 17.5mm Espessura nominal de parede do duto

tc := 3mm Espessura do revestimento

$$\frac{DE}{t} = 18.506$$

2.2. Dados de entrada do material

Pipe material properties, ref. DnV OS-F101, Section 12 H101:

API 5L X-60: SMYS := 414-MPa SMTS := 517-MPa E := 207-GPa

2.2.Dados de entrada da embarcação:

Diâmetro do Carretel: D_{car} := 18m Raio do Aligner: R_{align} := 9m

2.Cálculo da deformação acumulada

1. Introdução

NO processo de enrolamento são considerados os seguintes passos para o cálculo da deformação acumulada:

1. Enrolamento
2. Desenrolamento
3. Flexão sobre o "aligner"
4. Retificação no "straightener"

Notas:

- O efeito de endurecimento não é considerado neste cálculo.
- O duto fica retilíneo após o desenrolamento (passo 2).
- Deformação devido a tração não é considerada, uma vez que a análise é estática.
- A deformação no passo 4 é considerada igual ao valor negativo SMYS, a fim de garantir o retorno do duto à sua condição inicial no fim do processo de enrolamento.

2. Metodologia

Deformação elástica: $\varepsilon_{\text{elast}} := \frac{SMYS}{E}$ $\varepsilon_{\text{elast}} = 0.2\%$

2.1. Enrolamento

$$\varepsilon_1 := \frac{DE}{D_{\text{car}} + DE + 2 \cdot t_c} \quad \varepsilon_1 = 1.767\%$$

$$\varepsilon_{1\text{plast}} := \varepsilon_1 - \varepsilon_{\text{elast}} \quad \varepsilon_{1\text{plast}} = 1.567\%$$

$$\varepsilon_{1\text{acc}} := \varepsilon_1 \quad \varepsilon_{1\text{acc}} = 1.767\%$$

2.2. Desenrolamento (entre o "aligner" e o carretel)

$$\varepsilon_2 := 0$$

$$\varepsilon_{2\text{plast}} := \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_{\text{elast}} - \varepsilon_2 \quad \varepsilon_{2\text{plast}} = 1.367\%$$

$$\varepsilon_{2\text{acc}} := \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad \varepsilon_{2\text{acc}} = 1.767\%$$

2.3. Flexão sobre o "aligner"

$$\varepsilon_3 := \frac{DE}{2R_{\text{align}} + DE + 2 \cdot t_c} \quad \varepsilon_3 = 1.767\%$$

$$\varepsilon_{3\text{plast}} := \varepsilon_3 - 2 \cdot \varepsilon_{\text{elast}} - \varepsilon_2 \quad \varepsilon_{3\text{plast}} = 1.367\%$$

$$\varepsilon_{3\text{acc}} := \varepsilon_3 \quad \varepsilon_{3\text{acc}} = 1.767\%$$

2.4. Retificação no "straightener"

$$\varepsilon_4 := -\varepsilon_{\text{elast}} \quad \varepsilon_4 = -0.2\%$$

$$\varepsilon_{4\text{plast}} := \varepsilon_3 - 2 \cdot \varepsilon_{\text{elast}} - \varepsilon_4 \quad \varepsilon_{4\text{plast}} = 1.567\%$$

$$\varepsilon_{4\text{acc}} := \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \quad \varepsilon_{4\text{acc}} = 1.967\%$$

2.5. Deformação plástica acumulada

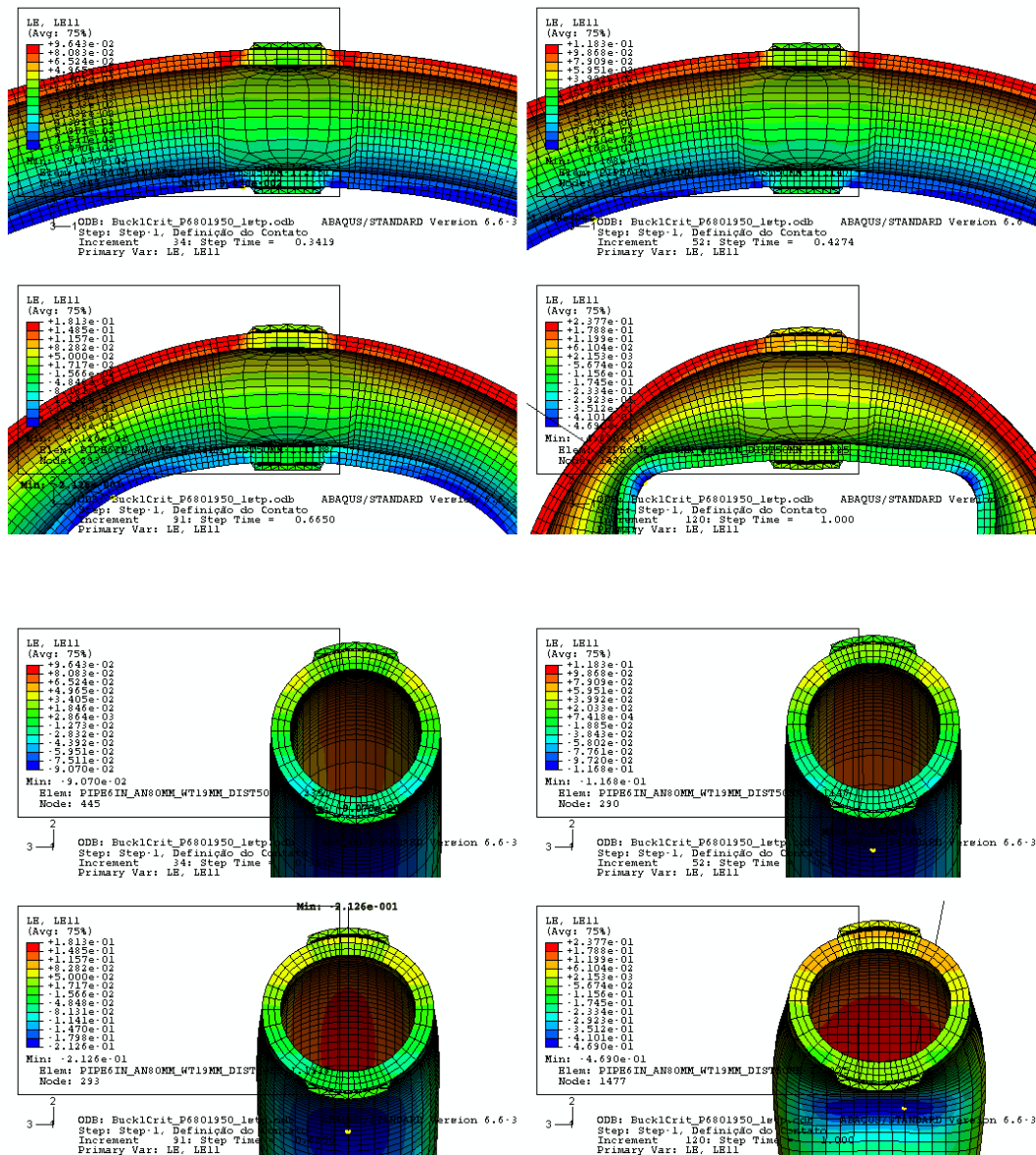
$$\varepsilon_{\text{acc}} := \varepsilon_{1\text{plast}} + \varepsilon_{2\text{plast}} + \varepsilon_{3\text{plast}} + \varepsilon_{4\text{plast}} \quad \varepsilon_{\text{acc}} = 5.867\%$$

2.6. Deformação total acumulada

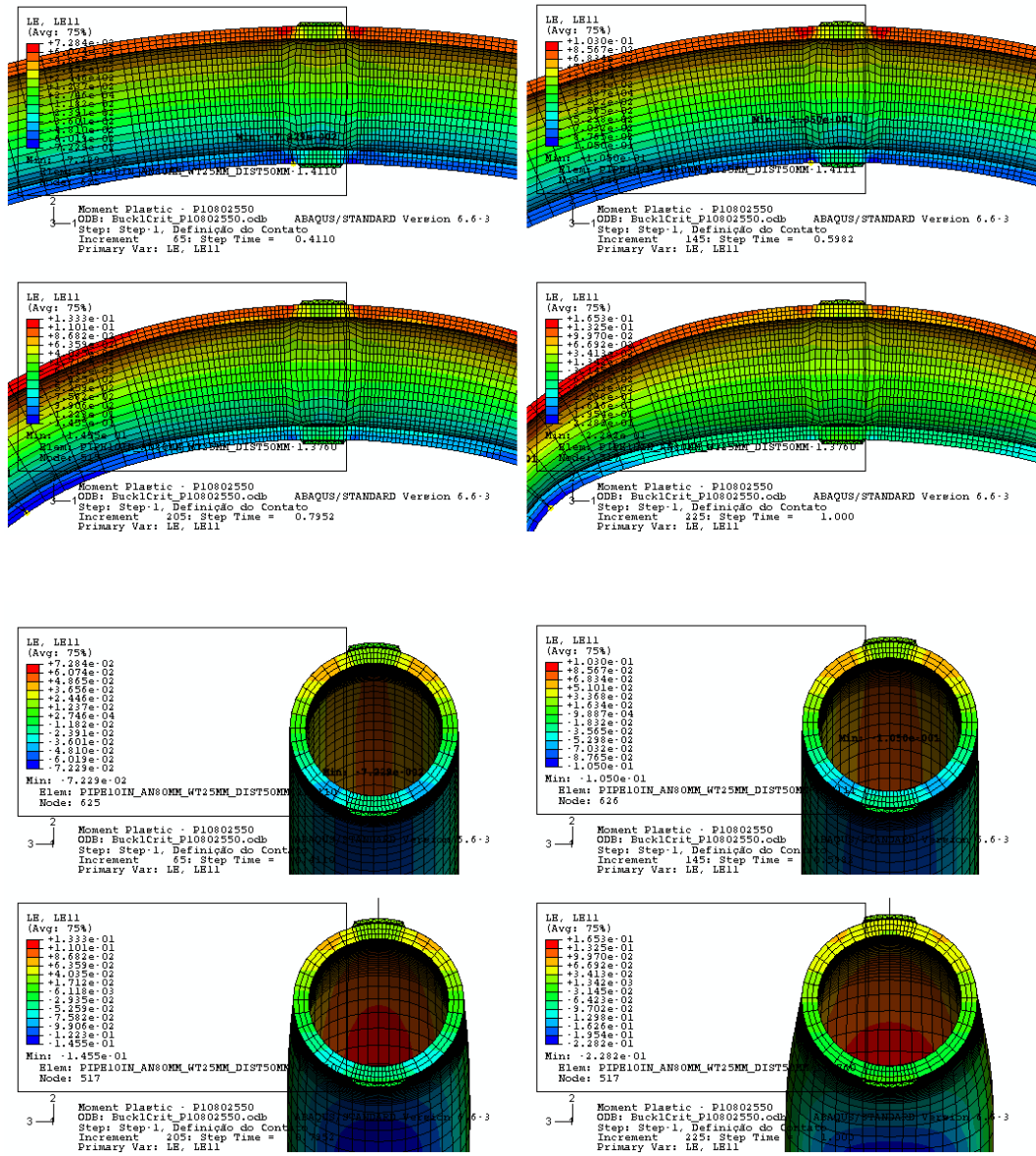
$$\varepsilon_{\text{totacc}} := \varepsilon_{1\text{acc}} + \varepsilon_{2\text{acc}} + \varepsilon_{3\text{acc}} + \varepsilon_{4\text{acc}} \quad \varepsilon_{\text{totacc}} = 7.267\%$$

16 APÊNDICE VIII – Resultados das análises de elementos finitos para verificação dos critérios da deformação característica com a presença da sapata de anodo

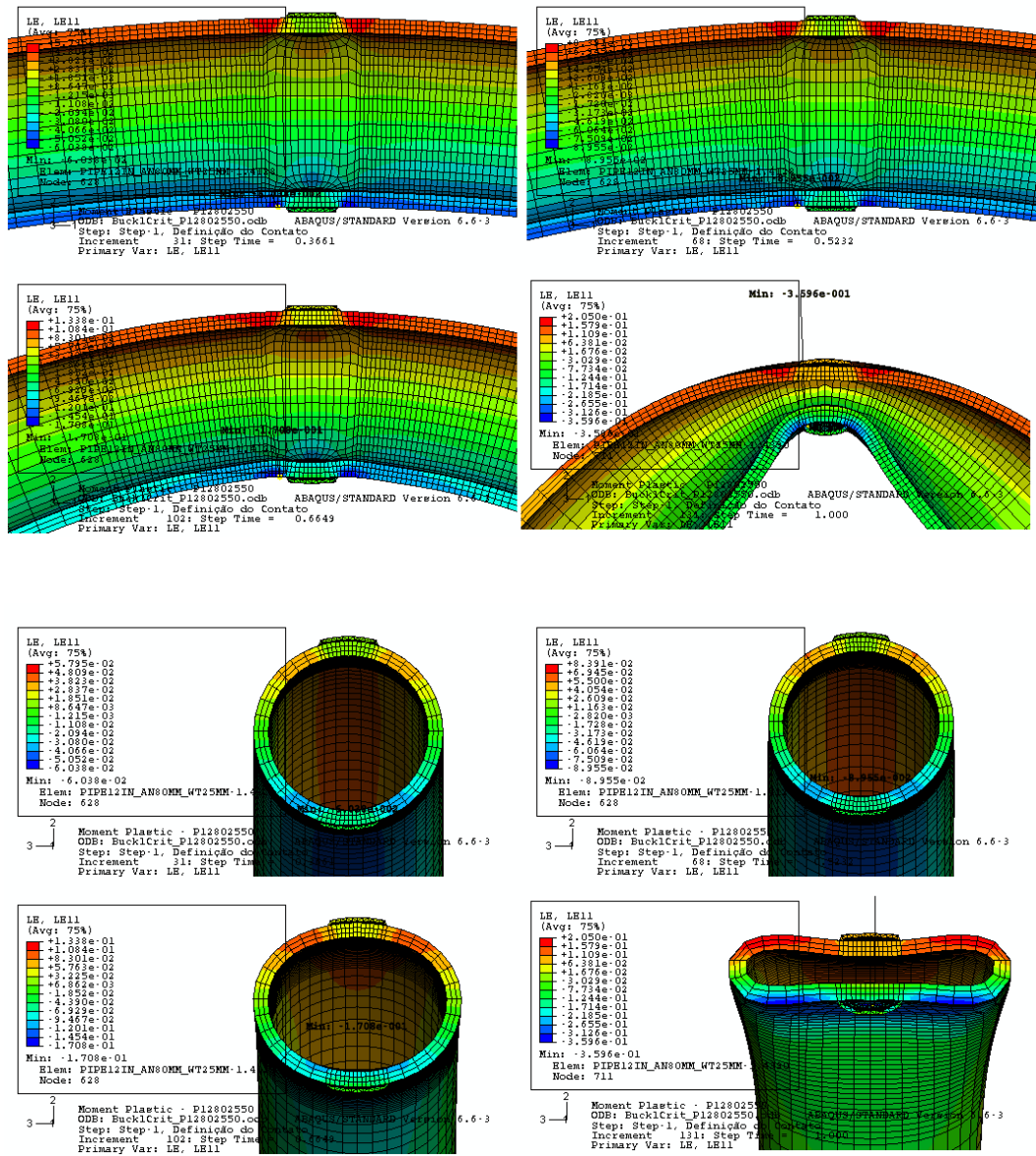
16.1.DE=6.625”, t=19.05mm, DE/t=8.8



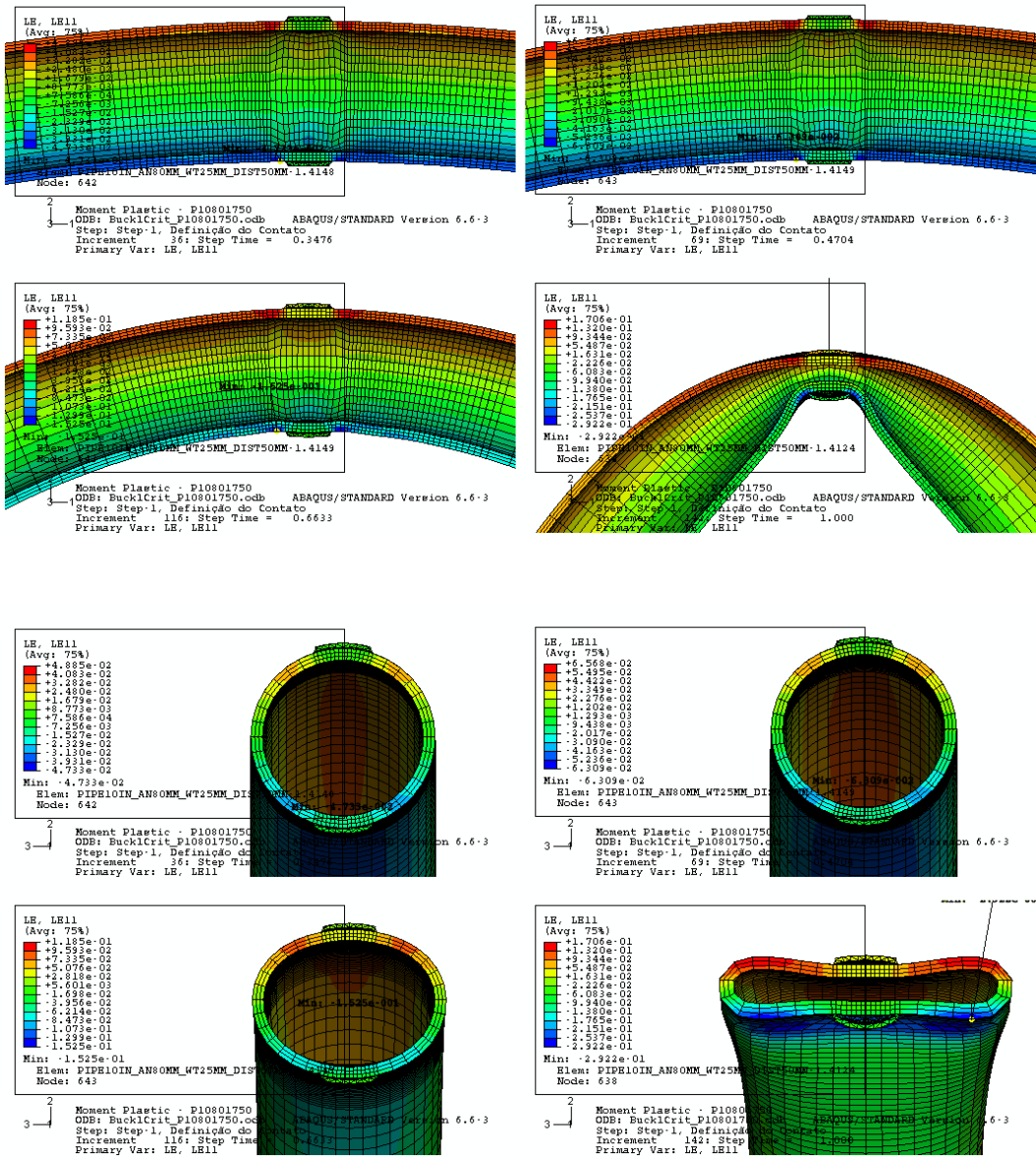
16.2.DE=10.75", t=25.4mm, DE/t=10.8



16.3.DE=12.75”, t=25.4mm, DE/t=12.8



16.4.DE=10.75”, t=17.5mm, DE/t=15.6



16.5.DE=12.75", t=15.9mm, DE/t=20.37

