



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA ARMADURA DE PRESSÃO
DE UM DUTO FLEXÍVEL SUJEITO À CARGA AXISSIMÉTRICA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Andréa Sampaio Pitta

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós graduação em Engenharia
Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

Marcos Queija de Siqueira

Rio de Janeiro

Junho de 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA ARMADURA DE PRESSÃO
DE UM DUTO FLEXÍVEL SUJEITO À CARGA AXISSIMÉTRICA PELO MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS

Andréa Sampaio Pitta

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D. Sc.

Dr. Marcos Queija de Siqueira, D. Sc.

Dr. José Renato Mendes de Sousa, D. Sc.

Dr. Carlos Alberto Duarte de Lemos, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JUNHO DE 2010

Pitta, Andréa Sampaio

Análise do comportamento estrutural da armadura de pressão de um duto flexível sujeito à carga axissimétrica pelo método dos elementos finitos./Andréa Sampaio Pitta – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVI, 175 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

Marcos Queija de Siqueira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 108-110

1. Dutos Flexíveis. 2. Método de Elementos Finitos. I. Ellwanger, Gilberto Bruno *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Gilberto e Queija que me encorajaram, apoiaram e ajudaram e foram indispensáveis para realização deste trabalho. Obrigada pela motivação, compreensão e confiança.

A toda equipe do LACEO, em especial ao professores Sagrilo e José Renato pelo conhecimento passado e a Cristina por cuidar de tudo com tanta paciência e carinho.

À ANP pelo apoio financeiro ao longo da pesquisa, principalmente à Cássia.

Aos professores da COPPE pelos conhecimentos transmitidos.

Aos amigos do Cenpes que me despertaram para a área da pesquisa.

A minha família que sempre esteve do meu lado, dando muito amor e enchendo a minha vida de alegria.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA ARMADURA DE PRESSÃO
DE UM DUTO FLEXÍVEL SUJEITO À CARGA AXISSIMÉTRICA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Andréa Sampaio Pitta

Junho/2010

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger
Marcos Queija de Siqueira

Programa: Engenharia Civil

Foram construídos modelos numéricos, pelo método dos elementos finitos (MEF), da armadura de pressão de um duto flexível empregando elementos de estado plano axissimétricos para fornecerem valores de tensão e deformação acurados, inclusive pontos de concentração de tensão. Um estudo de sensibilidade, no qual se variam alguns parâmetros dos modelos, foi conduzido com o intuito de se determinar a malha de elementos finitos que demanda o menor esforço computacional e valores acurados. A necessidade de se considerar, no modelo, as camadas poliméricas que a circundam também foi estudada. Uma malha de elementos finitos sólidos isoparamétricos foi construída com discretização da seção transversal semelhante à determinada pelo estudo de sensibilidade. As tensões que se desenvolveram na armadura de pressão são estudadas e comparadas aos resultados obtidos com a malha de elementos planos axissimétricos e modelos analíticos.

Obteve-se 1,2 como valor de concentração de tensão normal na armadura de pressão do duto estudado e observou-se o comportamento do modelo axissimétrico variando alguns parâmetros.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STRUCTURAL BEHAVIOR ANALYSIS OF PRESSURE ARMOR OF FLEXIBLE
RISER UNDER AXISSYMMETRICAL LOADS THROUGH THE FINITE ELEMENT
METHOD

Andréa Sampaio Pitta

June/2010

Advisors: Gilberto Bruno Ellwanger
Marcos Queija de Siqueira

Department: Civil Engineering

Numerical analysis, made by finite element models (FEM), of the pressure armor of a flexible riser were constructed using axisymmetric elements to provide accurate stress and strain values, including points of stress concentration. A sensitivity study, in which some parameters related to their models were modified, was conducted in order to determine the finite element model which demands less computational effort and accurate values. An isoparametric elements model was constructed with a similar mesh of the cross section determined by the sensitivity study. The normal stress that developed in the pressure armor are studied and compared to axisymmetric element model and analytical models responses.

The normal stress concentration value obtained is 1.20 in the pressure armor of flexible riser studied and verified the behavior of the axisymmetric model modifying some parameters.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e objetivo	1
1.2 Metodologia da pesquisa	3
1.3 Organização do texto	5
1.4 Convenções adotadas ao longo da dissertação	5
CAPÍTULO 2 - DUTOS	8
2.1 Duto flexível	8
2.1.1 Classificação quanto à estrutura dos dutos flexíveis.	8
2.1.2 Classificação segundo a configuração de instalação.	10
2.1.3 Análise estrutural dos dutos	12
2.2 Duto rígido	13
CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DO DUTO FLEXÍVEL ESTUDADO	14
CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA RESPOSTA DA ESTRUTURA	18
4.1 Introdução	18
4.2 Modelo analítico	19
4.2.1 Introdução à análise de dutos flexíveis por modelo analítico	19
4.2.2 Modelo gerado	20
4.3 Modelo numérico	21
4.3.1 Introdução à análise de dutos flexíveis por modelo numérico	21
4.3.2 Modelo numérico gerado	24
4.4 Resultado obtido	28
CAPÍTULO 5 - MODELOS EM ELEMENTOS FINITOS	30
5.1 Modelos empregando elementos planos axissimétricos	30
5.1.1 Descrição geral dos modelos	30
5.1.2 Análises realizadas	34
5.1.3 Resultados obtidos	36
5.2 Modelo empregando elementos sólidos isoparamétricos	46
5.2.1 Descrição geral do modelo	46
5.2.2 Análises realizadas	47
5.2.3 Resultados obtidos	48

5.3	Comparação dos resultados dos modelos de elementos planos axissimétricos e sólidos isoparamétricos	57
CAPÍTULO 6 - ESTUDO DO DUTO FLEXÍVEL.		60
6.1	Estudo paramétrico	60
6.1.1	Grupo I	61
6.1.2	Grupo II	77
6.1.3	Grupo III	93
6.1.4	Grupo IV	98
6.2	Análise de fadiga determinística	99
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		106
7.1	Conclusões finais	106
7.2	Desdobramentos futuros	107
CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		108
ANEXO 1 - RESULTADOS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES DAS ANÁLISES DOS MODELOS EMPREGANDO ELEMENTOS PLANOS AXISSIMÉTRICOS COMPOSTOS APENAS PELA CAMADA DE ARMADURA DE PRESSÃO.		1
A1.1	Malha de dimensão de 0,2 mm e 6 passos.	1
A1.2	Malha de dimensão de 0,8 mm e 6 passos.	3
A1.3	Malha de dimensão de 0,2 mm e 10 passos.	4
A1.4	Malha de dimensão de 0,4 mm e 10 passos.	6
A1.5	Malha de dimensão de 0,8 mm e 10 passos.	8
ANEXO 2 - RESULTADOS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES DAS ANÁLISES DOS MODELOS EMPREGANDO ELEMENTOS PLANOS AXISSIMÉTRICOS COMPOSTOS PELA ARMADURA DE PRESSÃO E PELAS CAMADAS POLIMÉRICAS QUE A CIRCUNDAM.		1
A2.1	Malha de dimensão de 0,2 mm e 6 passos.	1
A2.2	Malha de dimensão de 0,4 mm e 6 passos.	3
A2.3	Malha de dimensão de 0,8 mm e 6 passos.	5
A2.4	Malha de dimensão de 0,4 mm e 3 passos.	7
A2.5	Malha de dimensão de 0,4 mm e 4 passos.	9

ANEXO 3 - RESULTADOS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES DAS ANÁLISES DOS MODELOS EMPREGANDO ELEMENTOS FINITOS SÓLIDOS ISOPARAMÉTRICOS.	1
A3.1 Fator de rigidez de contato 0,1	1
A3.2 Fator de rigidez de contato 1	7
A3.3 Fator de rigidez de contato 10	13
 ANEXO 4 - DESENVOLVIMENTO DE FÓRMULAS	 1
A4.1 Fórmula aproximada de Feret e Bournazel (1987).	1
A4.2 Deformação equivalente de Von Mises	2
A4.3 Ângulo de assentamento da camada da armadura de pressão	3
 ANEXO 5 - CÁLCULO DE FADIGA DETERMINÍSTICO	 1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Aumento da profundidade das lâminas d' água dos campos de petróleo ao longo dos anos (PETROBRAS, 2009).	1
Figura 1-2 – Sistema de dutos flexíveis. (a) linha de exportação (SUBSEA7, 2010) e (b) linhas de produção e injeção (PADILHA, 2009).	2
Figura 1-3 - Seção transversal simplificada do duto flexível.	3
Figura 1-4- Convenções de eixos adotados ao longo da dissertação (a) eixos e tensões globais e (b) eixos e tensões locais (adaptação de SOUSA, 2005).	6
Figura 1-5- Convenções das propriedades geométricas locais.	7
Figura 2-1- Duto flexível (a) tipo aderente (<i>bonded</i>) e (b) não aderente (<i>unbonded</i>) (MUÑOZ, 2009).	9
Figura 2-2- Duto flexível de parede lisa (MUÑOZ, 2009).	9
Figura 2-3- Duto flexível de parede rugosa (MUÑOZ, 2009).	10
Figura 2-4- (a) Configuração catenária simples (SILVA, 2006) e (b) Flutuadores (SILVA, 2006).	10
Figura 2-5 – Duto rígido (SBM Atlantia, 2009).	13
Figura 3-1- Duto flexível típico de 2,5" de camadas não aderentes e parede rugosa, adaptado de GIRON (2009).	14
Figura 3-2- Perfil da carcaça intertravada (MUÑOZ, 2009).	14
Figura 3-3- Perfil Zeta (MUÑOZ, 2009).	15
Figura 4-1 – Vista geral do modelo de elementos finitos do duto flexível gerada pelo programa RiserTools.	24
Figura 4-2 – Vista detalhada da malha do duto flexível.	25
Figura 4-3 – Carregamento aplicado no modelo (a) tração e (b) pressões.	26
Figura 4-4 – Deslocamento axial (mm) ao longo do duto flexível.	27
Figura 4-5 – Tensão axial (MPa) nas camadas do duto flexível.	27
Figura 4-6 - Pressões (MPa) de contato nas interfaces do duto: (a) apenas a armadura pressão e (b) armadura de pressão e as camadas poliméricas que a circundam.	29

Figura 5-1 - Camadas modeladas e elementos de contato.	30
Figura 5-2 - Dimensões do arame da armadura de pressão (mm).	31
Figura 5-3 – Representação esquemática da teoria de atrito de Coulomb (MBAYE, 2006).	32
Figura 5-4 – Indicação da correção geométrica (mm).	33
Figura 5-5 – Indicação dos carregamentos aplicados no modelo de elementos finitos.	34
Figura 5-6 – Comprimentos das bordas dos elementos que formam a malha.	35
Figura 5-7 – Tensão normal (MPa) das malhas de dimensão 0,2 mm e 6 passos. (a) somente armadura de pressão e (b) armadura de pressão e as 2 camadas plásticas.	36
Figura 5-8 - Tensão normal (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão de 6 passos. (a) 0,2 mm, (b) 0,4 mm e (c) 0,8 mm.	37
Figura 5-9 - Tensão X (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão de 6 passos. (a) 0,2 mm, (b) 0,4 mm e (c) 0,8 mm.	38
Figura 5-10 - Tensão normal (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão 0,4 mm. (a) 6 passos, (b) 3 passos e (c) 4 passos.	39
Figura 5-11 - Tensão X (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão 0,4 mm. (a) 6 passos, (b) 3 passos e (c) 4 passos.	40
Figura 5-12 - Malha de elementos finitos gerada, possuindo dimensão 0,4 mm de 4 passos.	42
Figura 5-13 - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.	42
Figura 5-14 - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.	43
Figura 5-15 - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.	43
Figura 5-16 - Tensão Y (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.	44
Figura 5-17 - Tensão cisalhante (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.	44
Figura 5-18 - Deformação (mm/mm) nas camadas plásticas da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.	45
Figura 5-19 - Tensão Von Mises (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.	45
Figura 5-20- Malha gerada para o modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos.	46

Figura 5-21 – Elementos de contato do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos.	47
Figura 5-22 - Carregamentos aplicados no modelo (a) condição de contorno e (b) pressão interna e externa.	48
Figura 5-23 - Deslocamento (mm) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	49
Figura 5-24 - Tensão normal (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	50
Figura 5-25 - Tensão X (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	51
Figura 5-26 - Tensão Y (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	52
Figura 5-27 - Tensão cisalhante (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	53
Figura 5-28 - Deformação (mm/mm) das camadas poliméricas do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	54
Figura 5-29 - Tensão Von Mises (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	55
Figura 5-30 - Deformação (mm/mm) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.	56
Figura 5-31 - Localização dos nós do modelo de elementos axissimétricos.	58
Figura 5-32 - Localização dos nós do modelo de elementos sólidos isoparamétricos.	58
Figura 5-33 - Tensão Von Mises (MPa) do arame da armadura de pressão.	59
Figura 5-34 – Deslocamento (mm) do arame da armadura de pressão.	59
Figura 6-1 – Modelo original do estudo.	60
Figura 6-2 – Parâmetros estudados.	61
Figura 6-3 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação de espessuras da barreira de pressão e camada antidesgaste.	63
Figura 6-4 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 1, (b) 2 e (c) 3.	65

Figura 6-5 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 1, (b) 2 e (c) 3.	66
Figura 6-6 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 4, (b) 5 e (c) 6.	67
Figura 6-7 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 4, (b) 5 e (c) 6.	68
Figura 6-8 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 7, (b) 8 e (c) 9.	69
Figura 6-9 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 7, (b) 8 e (c) 9.	70
Figura 6-10 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 7, (b) 10 e (c) 11.	71
Figura 6-11 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 7, (b) 10 e (c) 11.	72
Figura 6-12 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 4, (b) 12 e (c) 13.	73
Figura 6-13 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 4, (b) 12 e (c) 13.	74
Figura 6-14 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 1, (b) 14 e (c) 15.	75
Figura 6-15 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 1, (b) 14 e (c) 15.	76
Figura 6-16 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação do material da barreira de pressão e camada antidesgaste.	79
Figura 6-17 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 16, (b) 1, (c) 17 e (d) 18.	81
Figura 6-18 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 16, (b) 1, (c) 17 e (d) 18.	82
Figura 6-19 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 19, (b) 4, (c) 20 e (d) 21.	83
Figura 6-20 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 19, (b) 4, (c) 20 e (d) 21.	84
Figura 6-21 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 22, (b) 7, (c) 23 e (d) 24.	85
Figura 6-22 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 22, (b) 7, (c) 23 e (d) 24.	86
Figura 6-23 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 25, (b) 7, (c) 26 e (d) 27.	87
Figura 6-24 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 25, (b) 7, (c) 26 e (d) 27.	88
Figura 6-25 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 28, (b) 4, (c) 29 e (d) 30.	89
Figura 6-26 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 28, (b) 4, (c) 29 e (d) 30.	90
Figura 6-27 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 31, (b) 1, (c) 32 e (d) 33.	91
Figura 6-28 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 31, (b) 1, (c) 32 e (d) 33.	92
Figura 6-29 – Espaçamento entre arames (mm) das análises (a) 34, (b) 4 e (c) 35.	94
Figura 6-30 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação de espessuras da barreira de pressão e camada antidesgaste.	95

Figura 6-31 – Tensão Von Mises (MPa) de modelo de diversos espaçamento (a) espaçamento máximo, (b) espaçamento padrão e (c) espaçamento mínimo.	96
Figura 6-32 – Tensão normal (MPa) de modelo de diversos espaçamento (a) espaçamento máximo, (b) espaçamento padrão e (c) espaçamento mínimo.	97
Figura 6-33 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação de pressão aplicada.	99
Figura 6-34 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 1.	100
Figura 6-35 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 36.	100
Figura 6-36 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 37.	100
Figura 6-37 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 38.	101
Figura 6-38 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 39.	101
Figura 6-39 – Tensão normal (MPa) da análise 1.	101
Figura 6-40 – Tensão normal (MPa) da análise 36.	102
Figura 6-41 – Tensão normal (MPa) da análise 37.	102
Figura 6-42 – Tensão normal (MPa) da análise 38.	102
Figura 6-43 – Tensão normal (MPa) da análise 39.	103
Figura 6-44 – Vista dos pontos A e B do duto.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre configurações de dutos flexíveis (SILVA, 2006).	11
Tabela 2 - Características do duto flexível de 2,5" analisado (WITZ, 1996).	16
Tabela 3 - Complemento da Tabela 2 com características do duto analisado.	17
Tabela 4 – Resumo das principais características dos modelos teóricos para análise de dutos flexíveis sob ação de cargas axissimétricas (baseado em SOUSA, 2005).	18
Tabela 5 – Pressões de contato nas interfaces do duto flexível 2,5", segundo o modelo analítico.	20
Tabela 6 - Tipos de elemento que compõe cada camada do duto.	25
Tabela 7 – Pressões de contato nas interfaces do duto flexível 2,5", segundo programa RiserTools.	28
Tabela 8 - Resumo das malhas de elementos finitos desenvolvidas.	35
Tabela 9 - Resumo dos resultados de tensão/deformação na camada de armadura de pressão.	41
Tabela 10 - Resumo dos resultados de tensão/deformação na camada de armadura de pressão.	57
Tabela 11 - Resultados de Tensão Von Mises (MPa) e deformações (mm).	58
Tabela 12 - Resumo das análises do Grupo I.	62
Tabela 13 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão. confirmar	64
Tabela 14 - Resultados de tensões (MPa) no ponto de maior tensão Von Mises.	77
Tabela 15 – Propriedade das camadas poliméricas adjacentes à camada da armadura de pressão.	78
Tabela 16 - Resumo das análises do Grupo II.	78
Tabela 17 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão.	80
Tabela 18 - Resultados de tensões (MPa) no ponto de maior tensão Von Mises.	93
Tabela 19 - Resumo das análises do Grupo III.	94
Tabela 20 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão.	95
Tabela 21 - Resultados de tensões (MPa) no ponto de maior tensão Von Mises.	98

Tabela 22 - Resumo das análises do Grupo IV.	98
Tabela 23 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão.	99
Tabela 23 - Resultados de tensões normais e axiais na camada de pressão do duto estudado e o respectivo fator de concentração.	106
Tabela 24 – Esforço computacional para análise do comportamento do duto de 2,5" e espaço em disco requerido para toda a análise.	107

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e objetivo

Os dutos flexíveis são fundamentais na indústria do petróleo. Uma de suas funções é transportar os fluidos do fundo do mar até as unidades flutuantes de produção. Nota-se na Figura 1-1, que a produção de hidrocarbonetos no mar está caminhando para profundidades cada vez maiores gerando um aumento significativo na pressão externa atuante nos dutos flexíveis e, por consequência, suas armaduras de pressão são cada vez mais solicitadas.

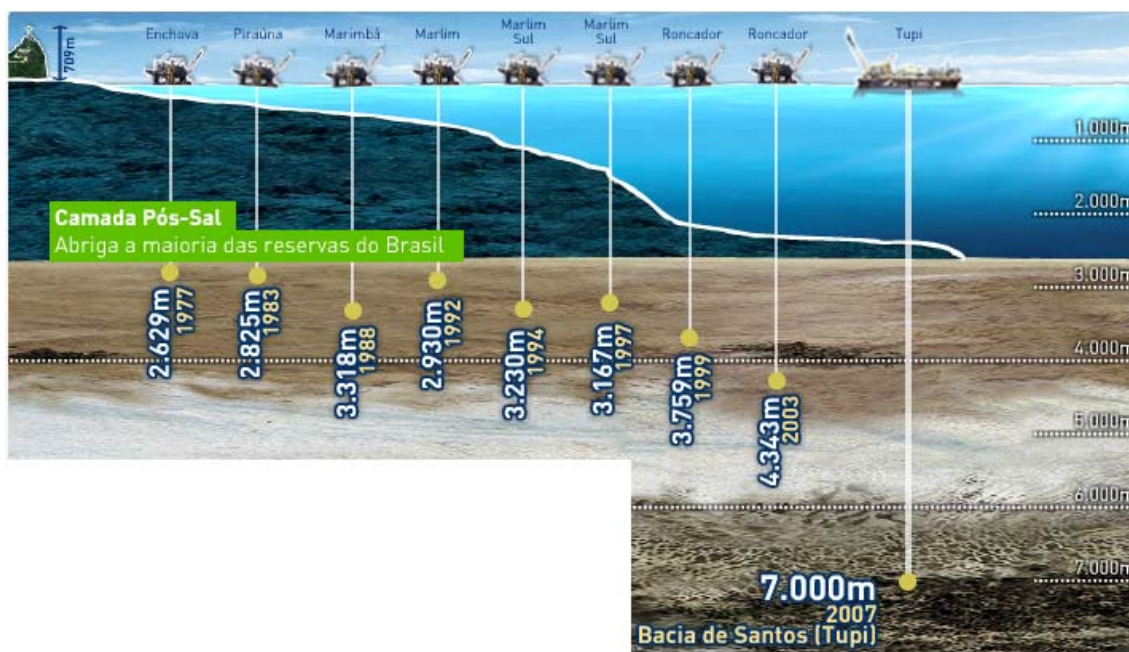
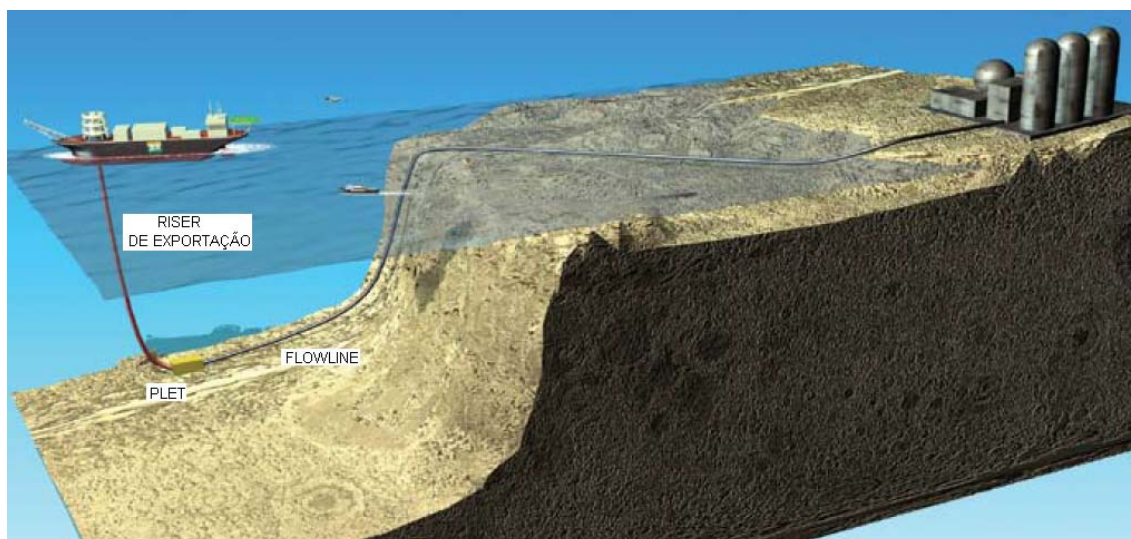
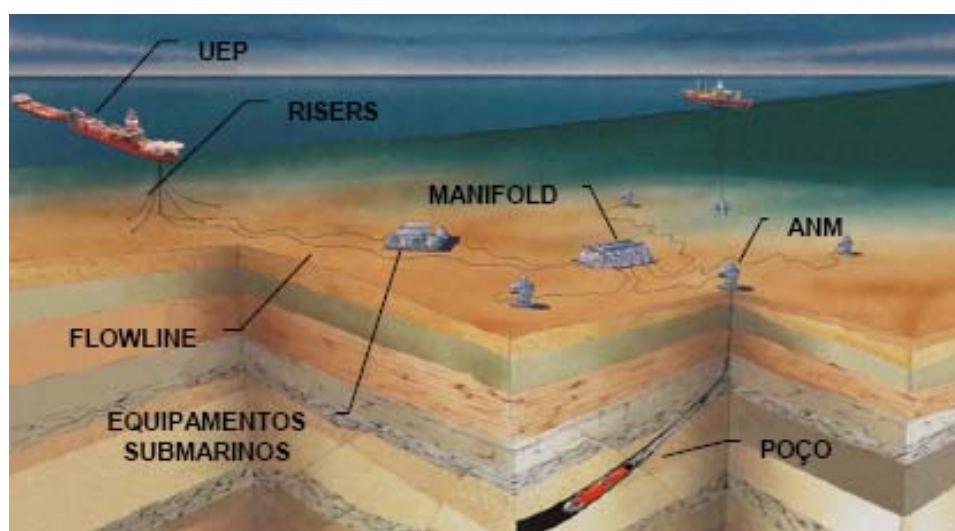


Figura 1-1 – Aumento da profundidade das lâminas d' água dos campos de petróleo ao longo dos anos (PETROBRAS, 2009).

O conceito de superpor reforçadores helicoidalmente dispostos é prática antiga, mas os primeiros protótipos viáveis de duto flexível com capacidade de resistir à pressão interna do fluido e externa da lâmina d'água só foram vistos em 1960. No Brasil, este conceito foi introduzido na década de 1970 e revelou-se uma tecnologia segura e versátil, de fácil instalação, transporte e operação. Essa versatilidade tornou a utilização do duto flexível uma boa opção para as empresas de produção de hidrocarbonetos. Vê-se um sistema de dutos flexíveis em operação na Figura 1-2.



(a)



(b)

Figura 1-2 – Sistema de dutos flexíveis. (a) linha de exportação (SUBSEA7, 2010) e (b) linhas de produção e injeção (PADILHA, 2009).

Tipicamente, para a determinação de tensões nas camadas dos dutos flexíveis, os modelos de análise estrutural costumam simplificar a complexa seção transversal dessas armaduras por seções retangulares com área e momentos de inércia equivalentes. Estes modelos são capazes de fornecer valores médios de tensão, porém são incapazes de avaliar possíveis pontos de concentração de tensões ao longo dessas camadas.

O comportamento estrutural dos dutos flexíveis é bastante complexo do ponto de vista geométrico e físico, oriundo de uma intrincada interação entre as diversas camadas plásticas homogêneas e helicoidais metálicas (SILVA, 2006).

Especial atenção deve ser dispensada ao projeto das camadas do duto flexível, pois a falha por fadiga, desgaste ou corrosão sob tensão se tornam cada vez mais prováveis principalmente em dutos para operação em lâminas d'água profundas ou ultra-profundas. Um incidente com o duto flexível pode causar dano a um equipamento, parada de produção, poluição ambiental ou até mesmo a perda de vidas humanas.

Neste trabalho, apresentam-se modelos baseados no método dos elementos finitos para a determinação da distribuição de tensões e deformações ao longo da armadura de pressão de um duto flexível de 2,5" (ver Figura 1-3) sob a ação de cargas axissimétricas (pressão interna e externa). Especial atenção será dada à verificação de possíveis pontos de concentração e será determinado o fator de concentração de tensão normal na armadura de pressão do duto estudado.

Para completar o trabalho será feito um estudo paramétrico analisando a sensibilidade da tensão normal na armadura de pressão, variando alguns parâmetros do duto. Para finalizar, como exemplo de aplicação do fator de concentração de tensão normal na armadura de pressão do duto, será demonstrada a análise de fadiga determinística da camada da armadura de pressão.

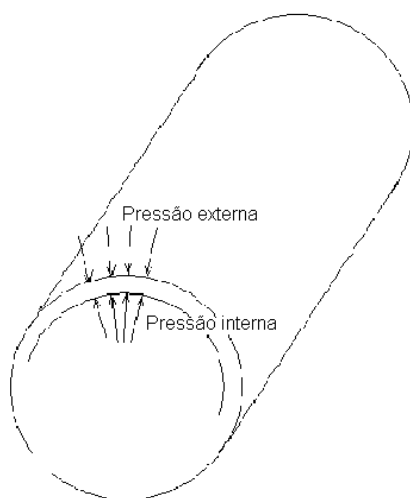


Figura 1-3 - Seção transversal simplificada do duto flexível.

1.2 Metodologia da pesquisa

Nas análises preliminares todas as camadas do duto flexível são representadas através de propriedades geométricas gerais. Os resultados destes serviram como entrada de dados (pressões de contato) para os modelos de elementos finitos seguintes. Ainda que esses modelos não representem detalhadamente a armadura de pressão dessas estruturas, os valores de tensão axial por eles previstos servem como

referência para este estudo, pois estes modelos são amplamente empregados no dimensionamento de dutos flexíveis.

Os modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos (MEF) foram construídos empregando elementos de estado plano axissimétricos obtendo o perfil que compõe a armadura de pressão do duto bem como as camadas plásticas que a circundam detalhadamente representadas e considerando o ângulo de assentamento dos arames das armaduras de pressão igual a 90°.

Um estudo de sensibilidade, no qual se variam as dimensões dos elementos finitos e o comprimento total dos modelos, é conduzido com o intuito de se determinar a malha de elementos finitos que demanda o menor esforço computacional e, ao mesmo tempo, forneça valores acurados. Além dos parâmetros citados, a necessidade de se considerar ou não as camadas poliméricas também foi avaliada.

Os resultados de tensão normal média obtidos com as malhas de elementos finitos axissimétricos serão comparados aos resultados de tensão axial obtidos com modelos utilizados nas análises preliminares e calculados os valores de concentração de tensão normal.

Tomando por base os resultados obtidos no estudo de sensibilidade, uma malha de elementos finitos sólidos isoparamétricos foi também construída. Essa malha tem discretização da seção transversal semelhante à determinada pelo estudo de sensibilidade previamente realizado. Com essa nova malha, as tensões que se desenvolvem na armadura de pressão, assim como os valores de concentração de tensão normal, são estudados e comparados aos resultados obtidos com a malha de elementos planos axissimétricos.

É importante destacar que todo o estudo numérico é conduzido empregando-se o programa de elementos finitos ANSYS®.

Para completar o trabalho será feito um estudo paramétrico analisando a sensibilidade da tensão normal da armadura de pressão, variando alguns parâmetros do duto. O estudo paramétrico será separado em grupos, segundo o parâmetro avaliado, para facilitar o entendimento. As pressões internas e externas serão aplicadas individualmente e em conjunto. Os resultados serão analisados e formarão um gráfico para melhor visualização do comportamento do duto.

A análise de fadiga determinística da camada de pressão será realizada a partir de dados de tração e variação de tração vindos do programa Anflex e do fator de concentração de tensão normal determinada por este estudo.

1.3 Organização do texto

O texto está dividido em sete capítulos:

No Capítulo 2, apresentam-se os dutos flexíveis quanto à forma construtiva, estrutural e configurações de instalação.

No Capítulo 3, descrevem-se as características do duto flexível de camadas não aderentes e de parede rugosa de 2,5" de diâmetro interno que será analisada.

No Capítulo 4, apresentam-se as análises preliminares. Os resultados de tensão axial da camada da armadura de pressão do duto flexível obtidos por modelos numéricos e analíticos geram dados de entrada para análise de elementos finitos do Capítulo 5.

No Capítulo 5, descrevem-se sucintamente os modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos de elementos axissimétricos e sólidos isoparamétricos para a análise da resposta de dutos flexíveis submetidos a cargas de pressão externa e interna.

No Capítulo 6, realiza-se um estudo paramétrico do duto flexível pelo modelo de elementos finitos axissimétricos e análise de fadiga determinística.

No Capítulo 7, conclui-se o estudo da determinação do fator de concentração de tensão normal da camada de pressão do duto estudado e sugerem-se alguns desdobramentos futuros.

1.4 Convenções adotadas ao longo da dissertação

As convenções de eixo adotadas no texto estão apresentadas nas Figuras 1-4 e 1-5. O referencial global é designado pelos eixos X, Y e Z, onde Z é o eixo axial do cilindro. O referencial local, definido pelos arames que compõem as armaduras metálicas, é denominado x, y e z, onde z é a direção de assentamento do arame.

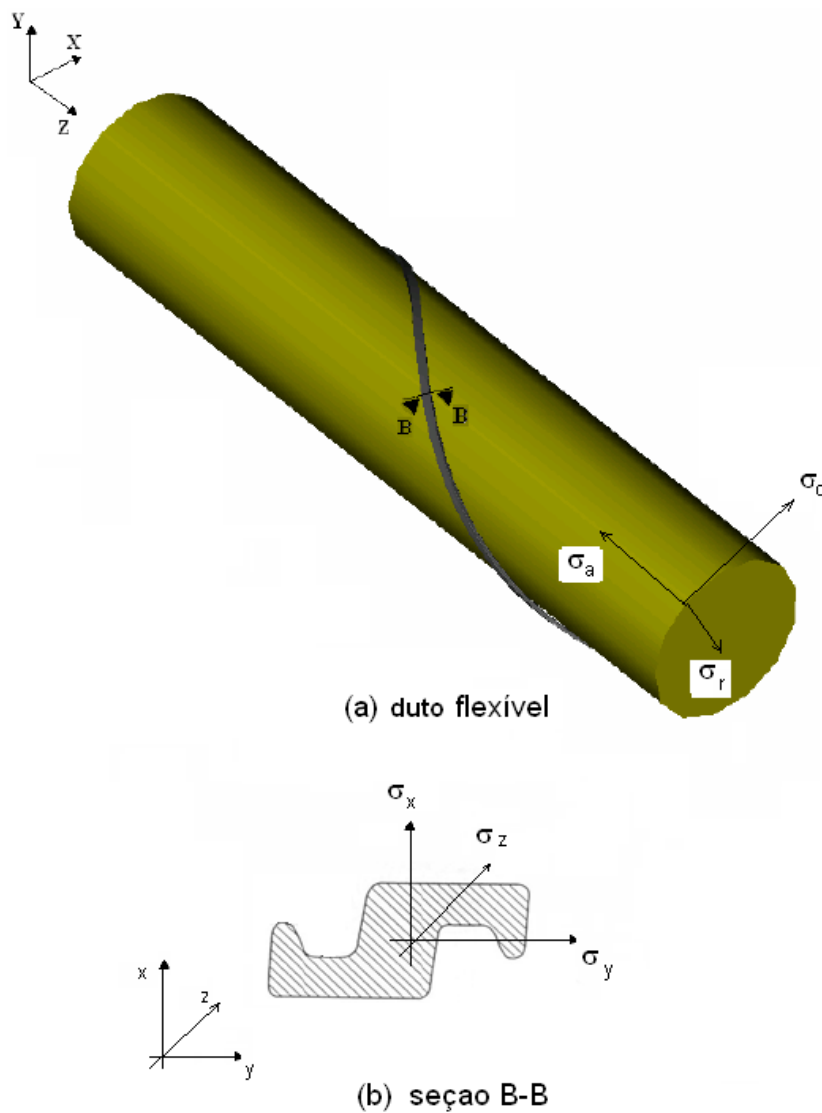


Figura 1-4- Convenções de eixos adotados ao longo da dissertação (a) eixos e tensões globais e (b) eixos e tensões locais (adaptação de SOUSA, 2005).

Outro ponto a ser destacado são as tensões. As tensões negativas indicam compressão e positivas indicam tração. Nas análises globais serão utilizadas as nomenclaturas: σ_r = tensão radial, σ_c = tensão circunferencial, σ_a = tensão axial. Já nas análises locais realizadas nos Capítulos 5 e 6, as tensões nos arames serão denominadas: σ_x = tensão X, σ_y = tensão Y, σ_z = tensão normal e τ_{xy} = tensão cisalhante. Os deslocamentos UX e UY representam os deslocamentos nos eixos x e y respectivamente.

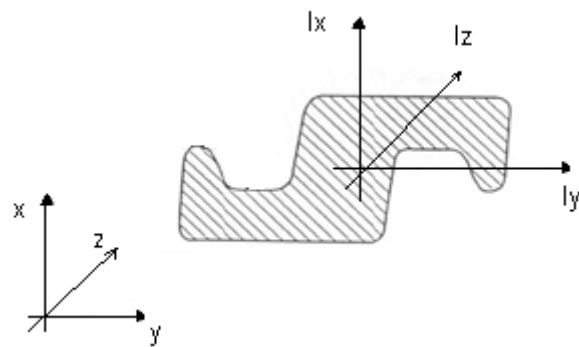


Figura 1-5- Convenções das propriedades geométricas locais.

As propriedades geométricas locais citadas ao longo da dissertação podem ser vistas na Figura 1-4 e são A_z = área da seção, I_x = inércia tangencial, momento de inércia em relação ao eixo x, I_y = inércia radial, momento de inércia em relação ao eixo y e I_z = inércia torsional, momento de inércia em relação ao eixo z.

CAPÍTULO 2 - DUTOS

Os dutos podem ser, segundo sua forma construtiva, rígidos ou flexíveis como será visto a seguir.

2.1 Duto flexível

Os dutos flexíveis são compostos por diversas camadas concêntricas de diferentes materiais e propriedades. O comportamento estrutural é bastante complexo do ponto de vista geométrico e físico devido à inter-relação entre as camadas plásticas homogêneas e helicoidais metálicas.

O arranjo e dimensionamento do duto oferecem grande resistência à tração, baixa rigidez à flexão e resistência a pressões.

A Petrobras, uma das empresas líderes na exploração em águas profundas, dispõe atualmente de mais de 5300 km de dutos flexíveis em operação sendo a maior usuária mundial. Muitos já atingindo o limite de suas vidas.

2.1.1 Classificação quanto à estrutura dos dutos flexíveis.

As camadas poliméricas têm função de vedação, mantém o fluido em seu interior e podem auxiliar no isolamento térmico e redução de atrito entre as camadas metálicas. As camadas poliméricas se deformam relativamente de acordo com o esforço aplicado ao duto, permitindo que o duto flexível atinja grandes curvaturas.

As camadas metálicas possuem as funções estruturais, sendo arames enrolados helicoidalmente em torno do eixo central do duto.

Os dutos se caracterizam, quanto ao processo construtivo, em (ver Figura 2-1):

- Camadas aderentes (*bonded*) possuem camadas coladas umas nas outras devido à vulcanização das camadas; e
- Camadas não aderentes (*unbonded*) possuem camadas em contato com as adjacentes de tal forma que o movimento relativo entre as mesmas seja permitido.

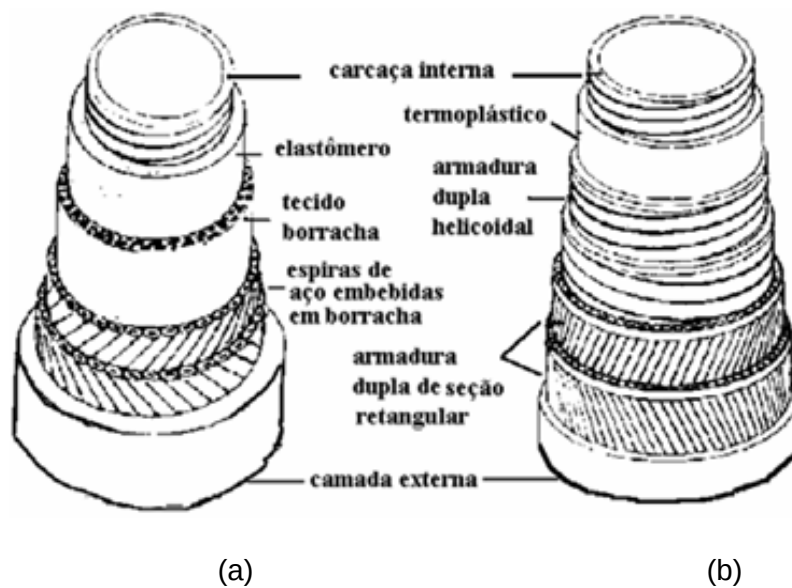


Figura 2-1- Duto flexível (a) tipo aderente (*bonded*) e (b) não aderente (*unbonded*) (MUÑOZ, 2009).

Quanto às camadas internas, os dutos de classificam em parede lisa e rugosa:

- Parede lisa (*smooth bore*) possui a camada interna feita de polímeros como uma barreira de pressão. Utilizado para transporte de produtos onde não se encontra gás, pois parte dos gases permearia através da camada plástica responsável pela estanqueidade do tubo e acabaria por ficar aprisionada na região anular do tubo (LEMOS, 2005). Ilustrada na Figura 2-2; e

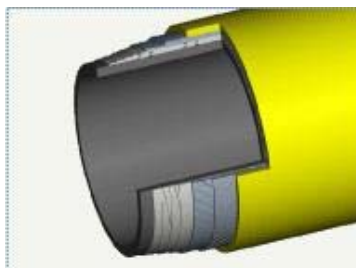


Figura 2-2- Duto flexível de parede lisa (MUÑOZ, 2009).

- Parede rugosa (*rough bore*) possui a camada interna metálica disposta de modo helicoidal, denominada carcaça intertravada. Ilustrada na Figura 2-3. É usado para transporte de fluidos que possam possuir gases livres ou dissolvidos e, algumas vezes, para água devido à necessidade de aumento de resistência ao colapso no caso de ocorrência de rápida descompressão interna do tubo (LEMOS, 2005).

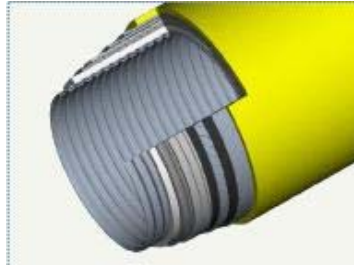


Figura 2-3- Duto flexível de parede rugosa (MUÑOZ, 2009).

2.1.2 Classificação segundo a configuração de instalação.

As configurações em catenária são assumidas em diversos cenários. A configuração em catenária livre (Figura 2-4) é a mais simples e barata, porém gera maior esforço na conexão da unidade de produção com o duto e também grande tensão de flexão no ponto de contato com o solo (TDP - *touch down point*).

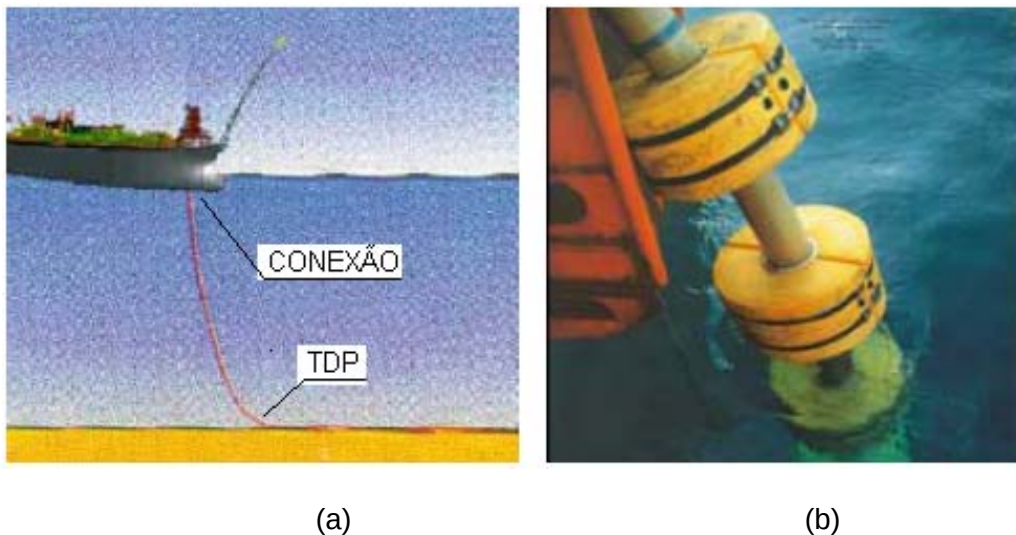


Figura 2-4- (a) Configuração catenária simples (SILVA, 2006) e (b) Flutuadores (SILVA, 2006).

Para aliviar o peso por metro de duto e aumentar a complacência e diminuir os esforços na conexão da unidade de produção com o duto, podem ser colocados flutuadores em seções intermediárias e, desta forma, os dutos assumem diferentes configurações:

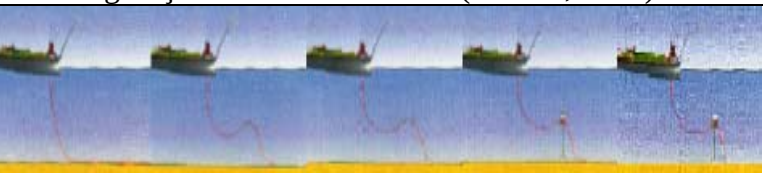
- *Lazy-wave* é a alternativa mais simples para a catenária, é obtida com a utilização de flutuadores distribuídos em um trecho central, o que faz com que após equilíbrio estático inicial, o sistema assume uma forma ondulada e a seção inferior permaneça apoiada em catenária no fundo do mar (SILVA, 2006), alivia a tração no topo e diminui o movimento no TDP;
- *Lazy-S* é caracterizada por um elemento de flutuação (bóia) concentrado em uma posição intermediária do duto, causando topo e cavado, onde uma

catenária suspensa parte no navio e é conectada à bóia. Por sua vez, da bóia parte uma catenária simples que se estende até o fundo do mar (SILVA, 2006);

- *Steep-wave* é composta por uma catenária e um trecho reto e também possui flutuadores distribuídos, porém o trecho de flutuação prolonga-se até a extremidade inferior do duto na ancoragem. A extremidade do duto não repousa em catenária no fundo do mar, e a ancoragem trabalha sob tração em uma base fixa no leito marinho (SILVA, 2006). A configuração *steep* não apresenta problemas no TDP e são recomendadas para situações em que existe um espaço pequeno para o segmento apoiado; e
- *Steep-S* é semelhante ao *steep-wave*, porém o trecho de flutuação é fornecido pela utilização de uma bóia, também causa topo e cavado (SILVA, 2006).

Na Tabela 1, comparam-se os métodos de configurações de dutos flexíveis para um melhor entendimento do comportamento do duto.

Tabela 1 - Comparação entre configurações de dutos flexíveis (SILVA, 2006).

						
		Catenária simples	<i>Lazy-wave</i>	<i>Steep-wave</i>	<i>Lazy-S</i>	<i>Steep-S</i>
Comportamento estático	Águas rasas	LIMITADO	BOM	BOM	BOM	EXCELENTE
	Águas profundas	BOM	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
Comportamento dinâmico	Tempo hostil em águas rasas	RUIM	LIMITADO	BOM	BOM	BOM
	Tempo hostil em águas profundas	LIMITADO	BOM	EXCELENTE	BOM	BOM
	Tempo amigável em águas rasas	LIMITADO	BOM	BOM	BOM	BOM
	Tempo amigável em águas profundas	BOM	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE
Facilidade de instalação		EXCELENTE	LIMITADO	BOM	BOM	EXCELENTE
Perfil econômico	Sistema com 1 linha	EXCELENTE	LIMITADO	BOM	BOM	BOM
	Sistema com várias linhas	EXCELENTE	BOM	BOM	LIMITADO	LIMITADO

2.1.3 Análise estrutural dos dutos

Os primeiros modelos propostos para a análise local de dutos flexíveis eram baseados em formulações analíticas, isto é, em equações de equilíbrio e compatibilidade. Alguns modelos utilizados nas análises tomam por base os métodos desenvolvidos para cabos e cordas.

Neste estudo é necessário entender o comportamento estrutural do duto flexível, em especial a distribuição de tensões e deformações ao longo da camada da armadura de pressão. Para isso, são avaliados dois modelos para análise da resposta de carregamentos axissimétrico: analítico e numérico. A metodologia foi descrita no Capítulo 1.2.

O projeto de dutos flexíveis, segundo especificação da API RP 17B (2002) exige resistência interna e externa e manutenção mínima, englobando as seguintes fases:

- Definição da função (seção 4 da API);
- Seleção dos materiais (seção 6 da API);
- Seleção da configuração da seção transversal (análise local) (seção 5 da API);
- Configuração do sistema (seção 7 e 8 da API), (análise estática global);
- Análise dinâmica; e
- Detalhamento e determinação da vida útil de projeto.

Embora existam poucos casos de falha em dutos flexíveis de camadas não aderentes relatados na literatura, há diversos tipos de causas individuais de falha, desde ataque químico à ruptura de uma armadura. Raramente estes fatos ocorrem isoladamente.

Os dutos flexíveis são projetados para cada aplicação específica e não são encontrados no mercado para pronta entrega. Este fato possibilita a sua otimização para um determinado campo de aplicação, visto que são inúmeras as variáveis envolvidas em seu projeto.

2.2 Duto rígido

Como alternativa aos dutos flexíveis têm-se os dutos rígidos, que são tubos de aço formados por juntas de aproximadamente 12 metros unidos por solda, como ilustrado na Figura 2-5. Se instalados em catenária (SCR), tornam-se uma alternativa mais econômica que os dutos flexíveis.

Possui seção transversal simples e grande variedade de diâmetros. O tempo de fabricação é relativamente baixo, o material é bastante conhecido estruturalmente e resiste a grandes pressões internas e externas.



Figura 2-5 – Duto rígido (SBM Atlantia, 2009).

Devido aos grandes movimentos verticais e offsets durante a operação, o duto fica submetido a grandes curvaturas, que podem impedir que se atinja a vida útil requerida quanto à compressão. Para evitar essa situação pode-se utilizar a configuração *lazy-wave*, envolvido por flutuadores para diminuir o seu peso, quando em lâminas d'água profundas.

Existem algumas preocupações com seu uso em águas profundas como a necessidade de grande área de armazenamento, o método de instalação é difícil necessitando de realizar solda no local da instalação e mobiliza uma embarcação de instalação e a possibilidade de ocorrer fadiga no duto é grande.

CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DO DUTO FLEXÍVEL ESTUDADO

A Figura 3-1 ilustra as camadas de um duto flexível de camadas não aderentes e de parede rugosa típico com 2,5" de diâmetro interno.

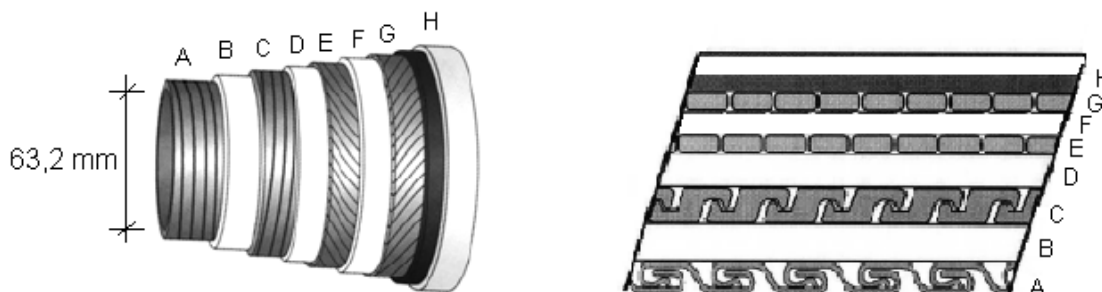


Figura 3-1- Duto flexível típico de 2,5" de camadas não aderentes e parede rugosa, adaptado de GIRON (2009).

Os dutos flexíveis não aderentes são compostos por diversas camadas de aço independentes intercaladas com camadas poliméricas que atendem a fins específicos e que interagem entre si.

As camadas de aço têm função estrutural, são descontínuas e oferecem resistência ao esforço aplicado, suportam as cargas máximas e impedem que as deformações do tubo como um todo ultrapassem limites aceitáveis. As camadas plásticas, na maioria dos casos, são contínuas e se constituem no meio de transferência do esforço, protegem de danos superficiais e mantêm o espaçamento entre as camadas metálicas.

Como visão geral, segue a descrição das camadas que compõe o duto flexível:

A - Carcaça intertravada (ver Figura 3-2) é formada por uma fita de aço inox enrolado em torno do seu eixo axial com ângulo de assentamento próximo de 90°. Resiste às cargas radiais, como pressão externa e hidrostática, compressão mecânica externa durante a instalação, além de prover resistência à erosão provocada pela areia e partículas presentes no fluido transportado e prevenir o colapso do duto por descompressão rápida. Possui alta flexibilidade devido à folga no intertravamento.



Figura 3-2- Perfil da carcaça intertravada (MUÑOZ, 2009).

B – Barreira de pressão é responsável pela contenção do fluido transportado no interior do duto flexível. Sofre o envelhecimento produzido pela exposição aos hidrocarbonetos e variações de temperatura e pressão.

C - A armadura de pressão (ver Figura 3-3) é formada por um ou dois arames de aço carbono enrolado em torno do seu eixo axial com ângulo de assentamento próximo de 90°. Resiste às cargas radiais, como pressão interna e hidrostática. Possui pequena rigidez axial e à flexão. Os arames são trefilados e podem formar seções transversais complexas de diferentes formatos, dependendo do fabricante e das condições de projeto. O mais utilizado é o perfil Zeta.

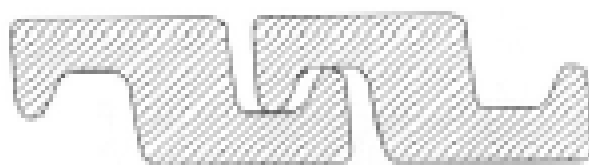


Figura 3-3- Perfil Zeta (MUÑOZ, 2009).

As folgas no intertravamento oferecem flexibilidade ao duto.

D e F – Camadas antidesgaste minimizam o desgaste entre as camadas metálicas gerado pelo atrito entre elas, pois ocorrem deslizamentos relativos entre as camadas metálicas o que garante a baixa rigidez à flexão do duto. Também garantem estanqueidade ao duto.

E e G - As armaduras de tração são formadas por vários arames com seções transversais retangulares. Tem como função resistir às cargas axiais e pressão interna.

H – Capa externa evita o alongamento do anular do duto, protege o duto de danos externos e ajuda no isolamento térmico.

Possui diâmetro interno de 2,5" (63,5 mm) e 111,5 mm de diâmetro externo. O peso do duto é 30,43 kgf/m, rigidez à tração (EA) 160 MN e rigidez à flexão (EI) 1,24 kNm². A pressão interna de operação do duto é de 20 MPa e de colapso hidrostático é 25 MPa.

A Tabela 2 foi desenvolvida de acordo com a Tabela 2 de WITZ (1996) e apresenta as principais características geométricas e físicas do duto estudado. Alguns dados necessários para complemento da Tabela 2 estão descritos na Tabela 3.

Tabela 2 - Características do duto flexível de 2,5” analisado (WITZ, 1996).

Camada	Material	Propriedades físicas e geométricas
A – Carcaça intertravada	Aço inoxidável	Espessura= 3,5 mm Número de arames= 1 $\bar{A}z = 19,6 \text{ mm}^2$ $I_x = 20 \text{ mm}^4$ $I_y = 556 \text{ mm}^4$ $I_z = 6,5 \text{ mm}^4$ E=207000 MPa
B – Barreira de pressão	Grilamida, poliamida 12	Espessura=4,9 mm E=284 MPa
C – Armadura de pressão (zeta)	Aço carbono	Espessura=6,2 mm Número de arames= 1 $I_y = 771 \text{ mm}^4$ $I_z = 204,6 \text{ mm}^4$ E=207000 MPa
D – Camada antidesgaste	Poliamida 11	Espessura=1,5 mm E=301 MPa
E – Armadura interna de tração	Aço carbono	Espessura=3,0 mm Número de arames= 40 Largura= 6 mm, Altura= 3 mm Ângulo de assentamento= -35° E=207000 MPa
F – Camada antidesgaste	Poliamida 11	Espessura=1,5 mm E=301 MPa
G – Armadura externa de tração	Aço carbono	Espessura=3,0 mm Número de arame= 44 Largura= 6 mm, Altura= 3 mm Ângulo de assentamento= +35° E=207000 MPa
H – Capa externa	Poliamida 11	Espessura=0,5 mm E=300 MPa

Tabela 3 - Complemento da Tabela 2 com características do duto analisado.

Camada	Propriedades físicas e geométricas
A – Carcaça intertravada	Ângulo de assentamento=87,3°
C – Armadura de pressão (zeta)	$\bar{A}_z = 54,3 \text{ mm}^2$ $I_x = 99,5 \text{ mm}^4$ Ângulo de assentamento=87,98° Tensão de escoamento= 900 MPa
E e G – Armadura de interna e externa de tração	$\bar{A}_z = 18,0 \text{ mm}^2$ $I_x = 13,5 \text{ mm}^4$ $I_y = 185 \text{ mm}^4$ Tensão de escoamento= 1260 MPa

Na tabela original do trabalho de WITZ (1996) o ângulo de assentamento da armadura de pressão corresponde a 2 arames enrolados, como neste trabalho convencionou-se trabalhar com apenas 1 arame enrolado, foi necessário calcular o novo valor para o ângulo de assentamento da camada da armadura de pressão correspondente a meio passo, que está descrito no Anexo 4.

Novos perfis e materiais para carcaça intertravada e camada de pressão estão sendo estudados para gerar estruturas mais leves, confiáveis e resistentes e então capacitar os dutos a serem instalados numa lâmina d' água superior a 2000 m.

Maiores detalhes sobre os dutos flexíveis podem ser visto em SOUSA (2005).

CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA RESPOSTA DA ESTRUTURA

4.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados alguns resultados obtidos com modelos numéricos e analíticos disponíveis para o cálculo de tensões nas camadas de dutos flexíveis. O resultado de tensão axial média na seção transversal da camada de pressão é comparado com as tensões normais médias obtidas nos modelos de elementos finitos axissimétricos descritos no Capítulo 5. Também serão obtidos, dos modelos numéricos e analíticos disponíveis, os resultados de pressões de contato entre as camadas do duto flexível que servirão como entrada de dados nos modelos de elementos finitos.

A Tabela 4 resume as principais características dos modelos teóricos disponíveis para análise de dutos flexíveis sob ação de cargas axissimétricas.

Tabela 4 – Resumo das principais características dos modelos teóricos para análise de dutos flexíveis sob ação de cargas axissimétricas (baseado em SOUSA, 2005).

	Modelos							
Características	FERET & BOURNAZEL (1987)	BATISTA & EBECKEN (1989)	FERET & MOMPLOTT (1991)	WITZ & TAN (1992)	CRUZ (1996)	CUSTÓDIO (1999)	SOUSA (2001)	SOUSA et al. (2001)
Tipo de modelo	Analítico	Analítico	Analítico	Analítico	Numérico	Analítico	Numérico	Numérico
Teoria para as camadas (armaduras/polímero)	Hastes retas/ não considera camadas poliméricas	Hastes retas/ Teoria de Lamé (parede espessa)	Hastes retas/ Teoria de Lamé (parede espessa)	Hastes curvas/ Teoria de Lamé (parede fina)	Elemento de casca e pórtico espacial/ Elemento sólido	Hastes curvas/ Teoria de Lamé (parede espessa)	Elemento de casca e pórtico espacial/ Elemento sólido	Elemento de casca e pórtico espacial/ Elemento sólido
Seções genéricas	S	S	S	S	S	S	S	S
Pequenos deslocamentos	S	S	S	S	S	S	S	S
Seções planas na estrutura deformada	S	S	S	S	NN	S	NN	NN
Não linearidade geométrica	N	N	N	N	P	N	P	P
Não linearidade física	N	N	N	N	P	S	P	P
Não linearidade de contato	N	N	S	S	N	S	N	S
Defeitos iniciais	N	N	N	N	N	N	N	S
Atrito entre camadas	N	S	S	N	P	N	P	N

sendo: S= sim, N= não, NN= não necessariamente e P= possível.

4.2 Modelo analítico

Neste trabalho a carga que será aplicada nos modelos são as mesmas para efeito de comparação de resultados. Uma tração de 500 kN em uma extremidade do duto enquanto a outra permanece engastada. A pressão interna de 20 MPa e pressão externa de 10 MPa.

4.2.1 Introdução à análise de dutos flexíveis por modelo analítico

Alguns modelos analíticos foram desenvolvidos a partir do proposto por FERET e BOURNAZEL (1987). No Anexo 4, descreve-se o cálculo de tensões na armadura de pressão por sua fórmula aproximada (FERET e BOURNAZEL, 1987), que considera seções genéricas e despreza a não linearidade geométrica e física e o atrito entre as camadas. Apresentou-se como resultado uma compressão de -77,979 MPa na armadura de pressão.

O modelo de BATISTA *et al.* (1989) foi o primeiro desenvolvido no Brasil e também foi baseado no modelo proposto por FERET e BOURNAZEL (1987) que investigaram o comportamento estrutural de dutos flexíveis.

As alterações admitidas por BATISTA *et al.* (1989) foram as seguintes:

- O modelo pode analisar dutos flexíveis de camadas aderentes ou não;
- As camadas poliméricas são levadas em consideração no cálculo da resistência ao carregamento aplicado;
- O atrito entre as camadas é considerado; e
- Deslocamentos radiais e variações de espessura distintos são assumidos para cada camada.

WITZ e TAN (1992) propuseram um modelo analítico não linear voltado para a determinação do comportamento estrutural à tração e torção de dutos flexíveis. O modelo considera que as camadas poliméricas são tubos de paredes finas e permite a avaliação do deslocamento radial, da variação de espessura, das deformações e tensões em cada camada do duto.

Propondo modificações em relação ao modelo de FERET e BOURNAZEL (1987), WITZ (1996) e alguns trabalhos que o sucederam mostram que os modelos para carregamento axissimétrico praticamente se equivalem.

4.2.2 Modelo gerado

Nesta análise, foi utilizado o programa de análise de dutos flexíveis que tem por base o modelo analítico proposto por BATISTA *et al.* (1989), que considera atrito entre as camadas.

Para entrada de dados, utilizaram-se as mesmas propriedades geométricas e mecânicas do duto flexível de 2,5" citadas nas Tabelas 2 e 3.

Simulando o estudo do duto numa profundidade de 1000 m e lembrando que o peso específico da água do mar é $1,025 \text{ tf/m}^3$. Aplicou-se 500 kN de tração, uma pressão de 20 MPa na camada interna e uma pressão de 10 MPa na camada externa.

Gerou como resultado a tensão axial de -69,71 na carcaça intertravada, -78,32 MPa na armadura de pressão, 417 MPa na armadura interna de tração e 357 MPa na armadura externa de tração. Os resultados de tensão circunferencial nas camadas metálicas não foram gerados pelo modelo.

As pressões (MPa) de contato encontradas nas interfaces do duto estudada estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Pressões de contato nas interfaces do duto flexível 2,5", segundo o modelo analítico.

Número	Interface	Pressão de contato (MPa)
1	meio interno - carcaça intertravada	20
2	carcaça intertravada – barreira de pressão	3,93
3	barreira de pressão - armadura de pressão	20,98
4	armadura de pressão – camada antidesgaste	27,80
5	camada antidesgaste– armadura interna de tração	26,93
6	armadura interna de tração – camada antidesgaste	17,63
7	camada antidesgaste – armadura externa de tração	17,13
8	armadura externa de tração – capa externa	10,09
9	capa externa – meio externo	10

4.3 Modelo numérico

4.3.1 Introdução à análise de dutos flexíveis por modelo numérico

Apesar da extensa literatura sobre modelos analíticos para análise de dutos flexíveis sujeitos a cargas axissimétricas, os modelos numéricos baseados no método de elementos finitos apresentam as seguintes vantagens em relação aos modelos analíticos (SOUSA, 2005):

- São capazes de considerar as diversas camadas da duto flexível, respeitando suas características físicas e geométricas;
- É extremamente simples considerar simultaneidade dos carregamentos de instalação, pressões interna e externa, tração e torção;
- É possível atribuir aos modelos diferentes condições de contorno;
- Podem considerar imperfeições iniciais como ovalizações, rompimento de arames das armaduras de tração e não linearidades físicas e/ou geométricas; e
- Conseguem representar novas estruturas desenvolvidas por fabricantes.

A evolução da capacidade de processamento dos micro-computadores começou a viabilizar a análise de dutos flexíveis através de métodos numéricos como o método dos elementos finitos (MEF).

Para citar alguns programas encontrados no mercado:

AFLEX foi desenvolvido por SAEVIK (1992) e permite simular a resposta do arame próximo às terminações do duto. Para modelagem do arame da armadura de tração, foi utilizado um elemento curvo de pórtico espacial com dois nós e quatro graus de liberdade por nó utilizando-se como base, a teoria de hastes curvas desenvolvida por HAY (1942).

BFLEX é nova versão do AFLEX, na qual foi incluído um módulo para análise de dutos flexíveis à flexão. Utilizou a teoria de viga sanduíche, que considera a interação de cada arame com o cilindro de apoio através de molas não lineares e permite a modelagem de todas as camadas do duto.

O pré-processador GEFLEX foi proposto por CRUZ (1996), apresentando boa concordância com FERET e BOURNAZEL (1987). Este programa consegue representar um modelo tridimensional completo. Discretiza as camadas do duto flexível da seguinte forma:

- Carcaça intertravada e armaduras de pressão são efetuadas simplificações assumidas pelo autor, além de uma analogia entre grelhas e cascas ortotrópicas, proposta por Timoshenko. São utilizados elementos finitos de casca ortotrópica para construção destas camadas;
- Armadura de tração é modelada com elemento finito de pórtico espacial;
- Camadas poliméricas são representadas através de elementos finitos sólidos isotrópicos; e
- O contato entre as camadas foi representado através de elementos de pórtico espacial, quando ocorre interação entre as camadas metálicas e nós comuns para contato entre uma camada polimérica e outra metálica.

SOUSA (1999) analisou o modelo proposto por CRUZ (1996) e encontrou os seguintes problemas na correlação com parâmetros fornecidos pelos fabricantes, como rigidez a tração e torção:

- Perda de contato entre as camadas não é simulada; e
- Não linearidades físicas não podem ser simuladas.

SOUSA (2001), então fez as seguintes modificações no programa:

- As armaduras de pressão e carcaça intertravada passaram a ser modeladas com elementos sólidos ortotrópicos, utilizando uma espessura equivalente para a camada considerada;
- O contato entre as camadas é feito através de elementos de contato do tipo tração-compressão, que uma vez comprimidos, possuem determinada rigidez específica; e
- O atrito entre as camadas metálicas e poliméricas foi simulado considerando um parâmetro de calibração para o módulo de cisalhamento dos materiais das duas camadas em contato.

Observando alguns aspectos que poderiam melhorar SOUSA *et al.* (2001) propuseram modificações no modelo anterior (SOUSA, 2001), dentre elas cita-se:

- Em uma tentativa de uniformizar o modelo, os elementos sólidos isotrópicos utilizados para representar as camadas poliméricas foram substituídos por elementos de casca isotrópicos. Esta modificação melhorou o processo de convergência e não introduziu mudanças no resultado; e

- Retornou-se ao elemento de casca ortotrópica originalmente proposto por CRUZ (1996) para representar as armaduras de pressão e a carcaça intertravada. Desta forma, garantiu-se uma boa representação destas camadas para as análises axissimétricas.

Os dutos flexíveis de camadas não aderentes e de grandes diâmetros foram estudados por ZHANG e TUOHY (2002). Eles utilizaram o programa ANSYS® para realização das análises considerando o contato entre as camadas.

RIBEIRO *et al.* (2003), baseando-se nos trabalhos anteriores de CRUZ (1996) e SOUSA (1999), apresentou um modelo tridimensional em elementos finitos para estudar a reposta dos dutos flexíveis submetidos a carregamentos de tração ou compressão axial puros. O modelo consistiu em um sanduíche de cascas finas concêntricas as quais representam a carcaça intertravada, a armadura de pressão e todas as camadas poliméricas. Os arames da armadura de tração foram modelados com elementos de pórtico tridimensionais. A interação entre as camadas foi estabelecida com molas não lineares.

BAHTUI *et al.* (2008) estudou a resposta de um duto flexível com cinco camadas (três camadas poliméricas e um par de armaduras de tração) submetido à tração pura com um detalhado modelo tridimensional em elementos finitos. Neste modelo, as camadas são representadas com elementos sólidos isoparamétricos de oito nós. Elementos de contato são definidos entre cada camada e não é considerado o contato entre os arames de uma mesma armadura metálica. O atrito entre as camadas é considerado. Segundo os autores, boa concordância entre o modelo proposto e modelos analíticos foi encontrada, mas o modelo exigiu grande esforço computacional. Além disso, as análises apresentadas não consideram a presença da carcaça intertravada e/ou da armadura de pressão as quais poderiam provavelmente levar a um modelo ainda mais complexo.

O programa RiserTools desenvolvido por SOUSA (2005) gera automaticamente uma malha de elementos finitos que será lida e analisada através do programa ANSYS®. Este programa teve algumas modificações com relação ao elaborado em SOUSA (2001):

- O contato entre camadas é feito com elementos tridimensionais do tipo nó-nó capazes de considerar o atrito entre as camadas; e
- Considera todas as camadas do duto flexível.

No modelo proposto por SOUSA *et al.* (2008), o contato entre as camadas é feito com elementos do tipo superfície-superfície, que permite grandes deslocamentos relativos entre as camadas.

4.3.2 Modelo numérico gerado

Apresenta-se a análise realizada pelo programa ANSYS®, cujo modelo foi construído pelo gerador de malhas RiserTools.

O arquivo de entrada de dados foi criado com as propriedades equivalentes do duto flexível de 2,5", já previamente descrito nas Tabelas 2 e 3.

Uma vista geral do modelo tridimensional poderá ser vista na Figura 4-1. A malha dividiu o duto em 40 divisões circunferenciais e possui 25.924 nós e 48.922 elementos, sendo 23.322 de contato e 155.544 graus de liberdade. Este modelo de elementos finitos representa todas as camadas do duto flexível.

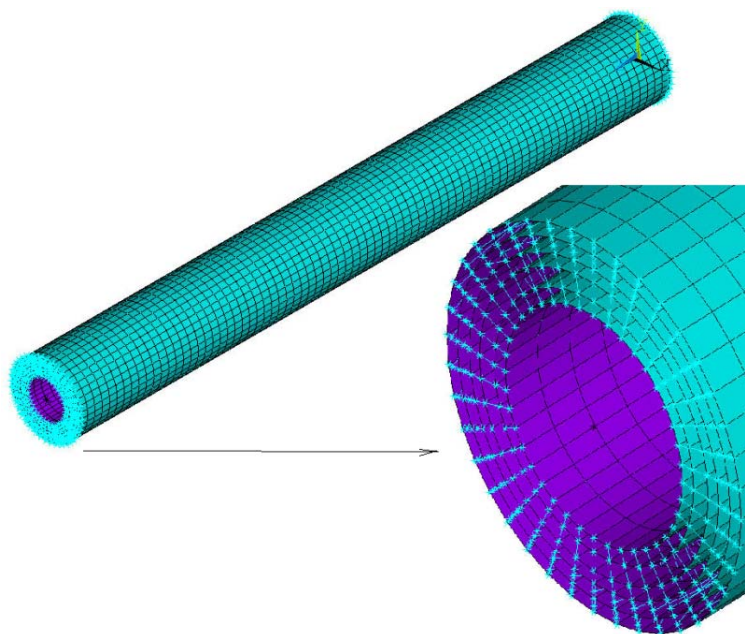


Figura 4-1 – Vista geral do modelo de elementos finitos do duto flexível gerada pelo programa RiserTools.

Na Tabela 6 descrevem-se os tipos de elemento que compõe cada camada do duto e a Figura 4-2 os ilustra e mostra que as propriedades equivalentes possuem espessuras menores que as originais, levando em conta os vazios existentes nas camadas metálicas. Os elementos de contato tridimensionais do tipo nó-nó CONTA178 (possui 2 nós com 3 graus de liberdade cada) e TARGE170 (contato 3D) garantem a interação entre as mesmas, representam as folgas iniciais, perda de contato e atrito entre as camadas. Sua interface de contato é perpendicular ao eixo do

elemento, que por sua vez, estabelece a direção normal de contato. Assim, no modelo proposto, os nós devem se situar sobre a mesma linha radial. Para obter mais detalhes sobre o modelo ver SOUSA (2005).

Tabela 6 - Tipos de elemento que compõe cada camada do duto.

Camada	Tipo de elemento	Característica
Carcaça intertravada e armadura de pressão	Casca ortotrópica (SHELL43).	Adequado para análise de cascas semi espessas e capaz de considerar não linearidades geométricas e físicas
Armaduras de tração	Pórtico espacial (BEAM188)	Baseado na teoria de viga do Timoshenko e possui 6 graus de liberdade. Modela o comportamento não linear físico
Camadas poliméricas	Casca ortotrópica (SHELL43)	Fitas poliméricas de alta resistência são enroladas em torno do eixo central do duto em ângulos muito próximos de 90°.

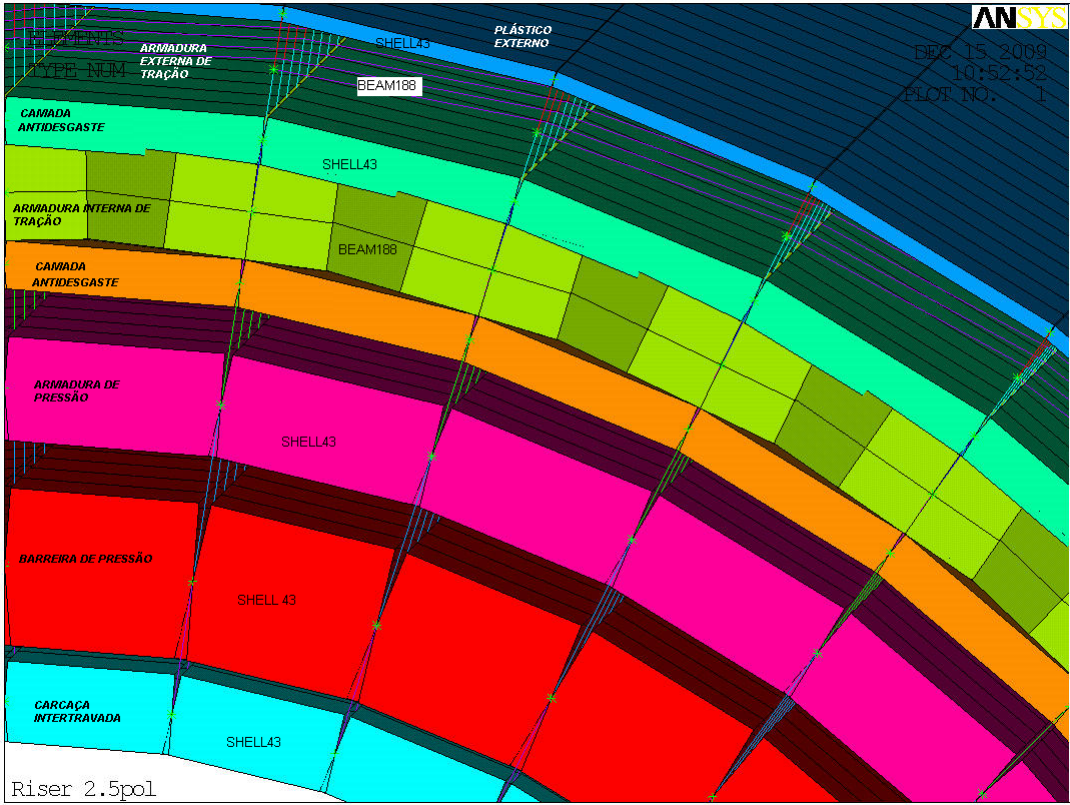


Figura 4-2 – Vista detalhada da malha do duto flexível.

Aplicou-se 500 kN de tração numa extremidade do duto enquanto a oposta permaneceu engastada. A pressão externa de 10 MPa foi aplicada na camada externa do duto e a pressão interna 20 MPa foi aplicada na face interna da barreira de pressão, pois a carcaça intertravada não é vedante. O carregamento está ilustrado na Figura 4-3.

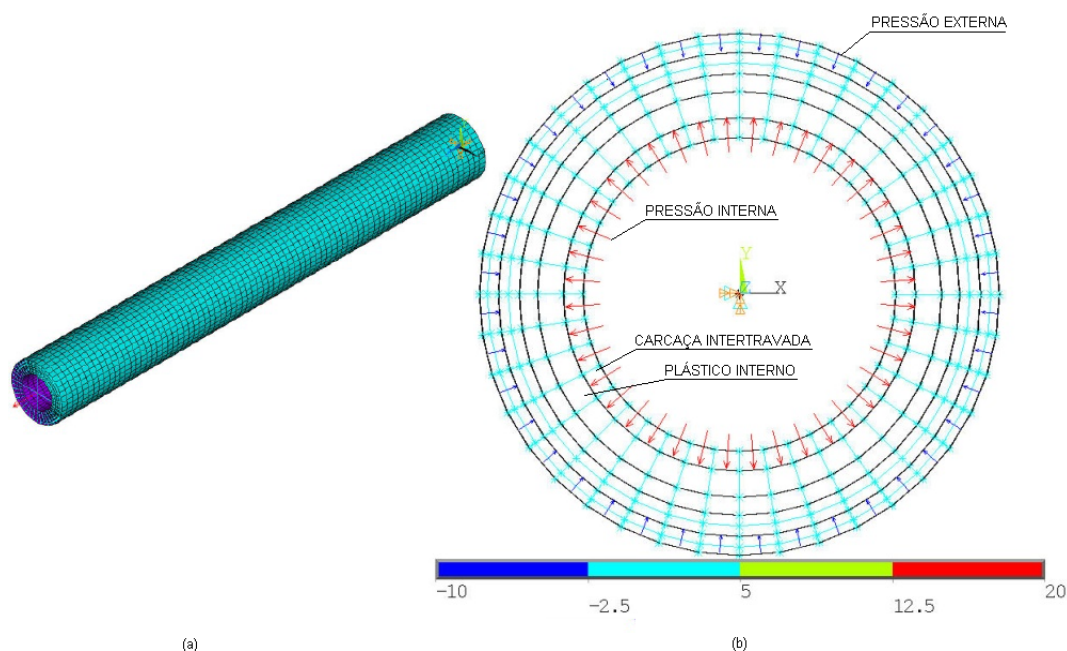


Figura 4-3 – Carregamento aplicado no modelo (a) tração e (b) pressões.

Pode-se notar, na Figura 4-4, a tração na extremidade da linha causa um alongamento unitário constante ao longo da mesma, ocasionando uma distribuição uniforme de compressão nas camadas da armadura de pressão. A tensão axial está ilustrada na Figura 4-5 e tem um valor médio de -81,86 MPa. A análise também gerou como resultado a tensão axial média de 427 MPa e 335 MPa de tração nas armadura de tração interna e externa, respectivamente. As camadas metálicas mais solicitadas são as armaduras de tração seguida da armadura de pressão. A carcaça intertravada não é solicitada, pois, em condições normais de operação, ela se descola da camada plástica interna devido à ação da pressão interna.

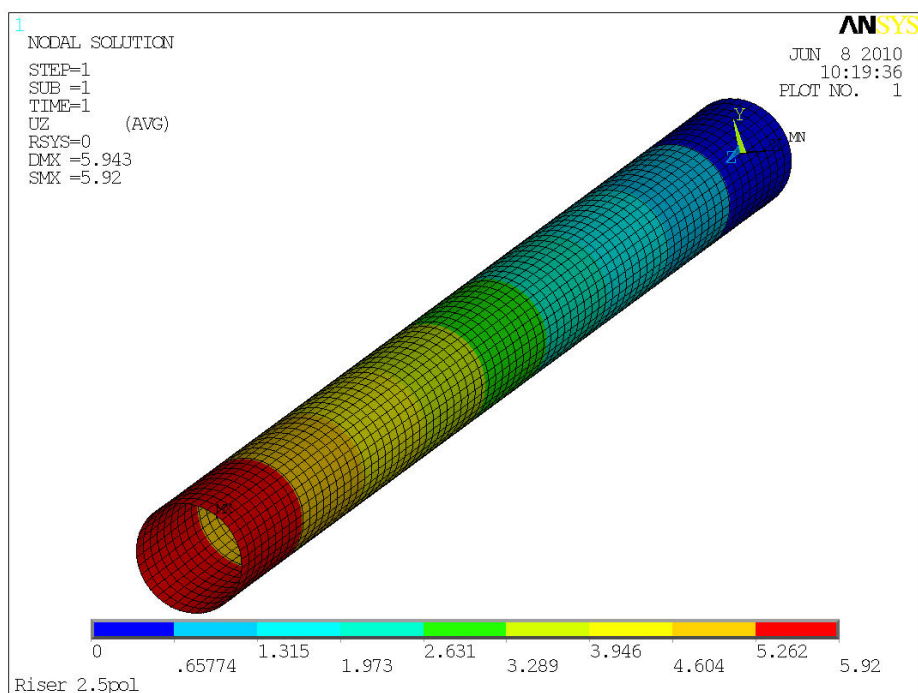


Figura 4-4 – Deslocamento axial (mm) ao longo do duto flexível.

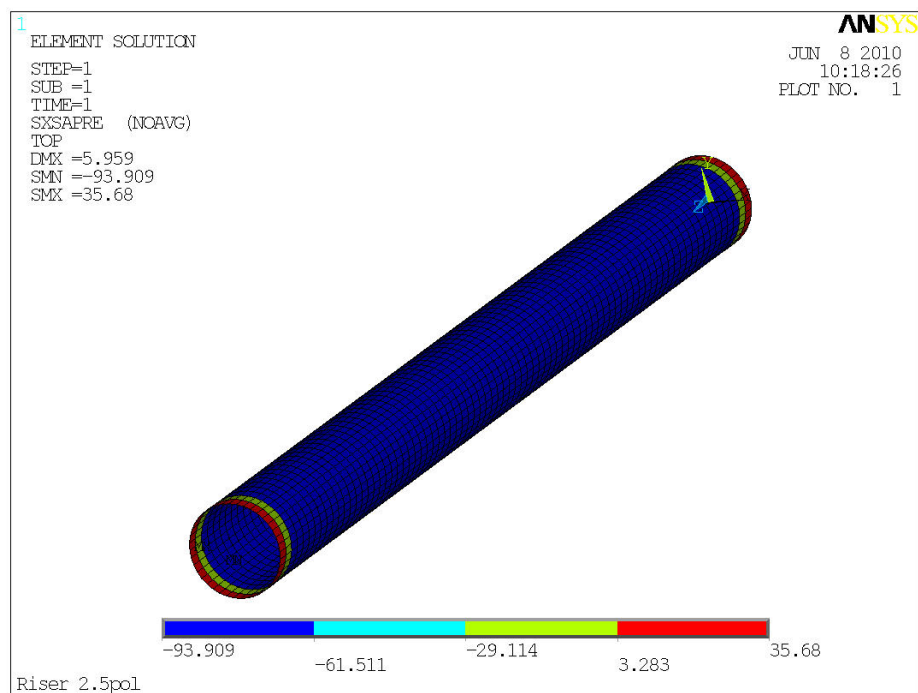


Figura 4-5 – Tensão axial (MPa) nas camadas do duto flexível.

Apenas como observação: as tensões axiais estão bem abaixo das admissíveis pela condição de operação normal pelo item 5.3.1.4 da Norma API SP 17J (2002). A tensão admissível deve ser a menor entre a tensão de escoamento e $0,9 \times$ tensão de ruptura do material $\times$ fator de utilização (0,85), ou seja, 765 MPa na armadura de pressão e 1071 MPa na armadura de tração.

As pressões de contato nas interfaces do duto estudado estão listadas na Tabela 7. Nota-se o aumento das pressões de contato ao longo das camadas até a armadura de pressão, deixando claro que esta camada que resiste a este esforço. A pressão de contato na interface carcaça intertravada – barreira de pressão é considerada o mesmo valor da pressão interna aplicada.

Tabela 7 – Pressões de contato nas interfaces do duto flexível 2,5”, segundo programa RiserTools.

Número	Interface	Pressão de contato (MPa)
1	carcaça intertravada – barreira de pressão	20
2	barreira de pressão - armadura de pressão	18,48
3	armadura de pressão – camada antidesgaste	26,10
4	camada antidesgaste– armadura interna de tração	25,34
5	armadura interna de tração – camada antidesgaste	17,01
6	camada antidesgaste – armadura externa de tração	16,60
7	armadura externa de tração – capa externa	9,98

4.4 Resultado obtido

Os resultados obtidos das análises locais, analítica e numérica, foram apresentados nos itens 4.2.2 e 4.3.2, respectivamente.

Os resultados que servirão para continuação deste trabalho são os da análise numérica.

O resultado de tensão axial na camada de pressão, que servirá para comparação nas análises de elementos finitos, foi de -81,86 MPa. As pressões de contato obtidas entre as camadas do duto servirão como entrada de dados nas análises de elementos finitos específicos da armadura de pressão, os dois casos de carregamento estão demonstrados na Figura 4-6.

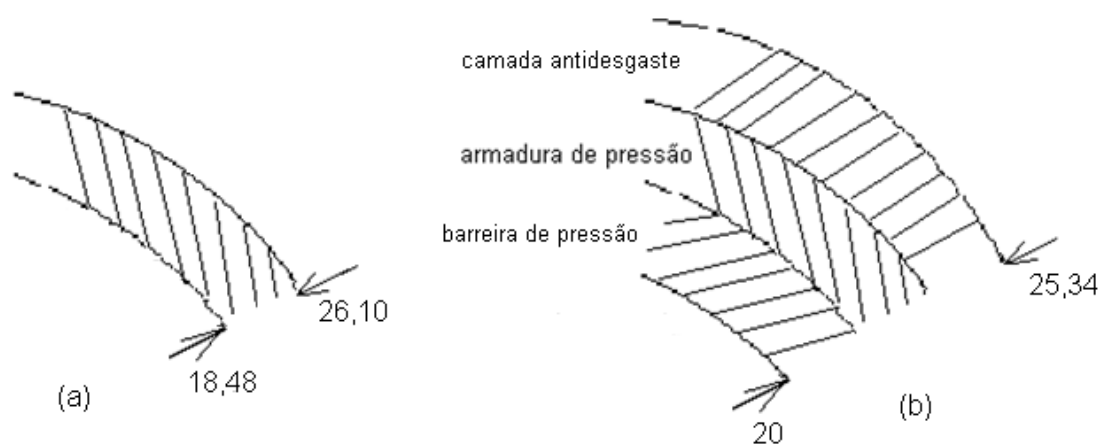


Figura 4-6 - Pressões (MPa) de contato nas interfaces do duto: (a) apenas a armadura pressão e (b) armadura de pressão e as camadas poliméricas que a circundam.

CAPÍTULO 5 - MODELOS EM ELEMENTOS FINITOS

A armadura de pressão foi analisada por meio de modelos de elementos finitos com elementos axissimétricos e sólidos isoparamétricos. Os modelos estão descritos ao longo deste capítulo.

5.1 Modelos empregando elementos planos axissimétricos

5.1.1 Descrição geral dos modelos

Nesse trabalho, inicialmente, supõe-se que os arames da armadura de pressão do duto flexível estejam assentados a 90° e, assim, a estrutura possui axissimetria. Como o carregamento também é axissimétrico, pode-se construir uma malha de elementos finitos empregando-se elementos planos axissimétricos.

A seção estudada é apresentada na Figura 5-1 e é formada pela armadura de pressão estudada e as camadas plásticas que a circundam. Os arames que compõem a armadura de pressão são trefilados e dependendo do fabricante e das condições de projeto podem possuir vários formatos. A seção transversal da armadura de pressão estudada tem as dimensões ilustradas na Figura 5-2 e será chamada de arame.

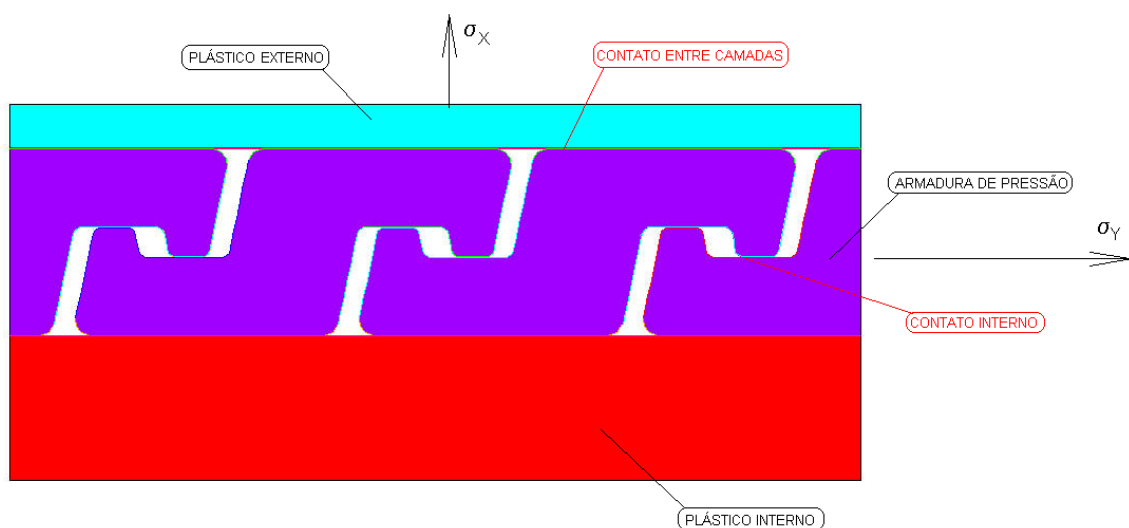


Figura 5-1 - Camadas modeladas e elementos de contato.

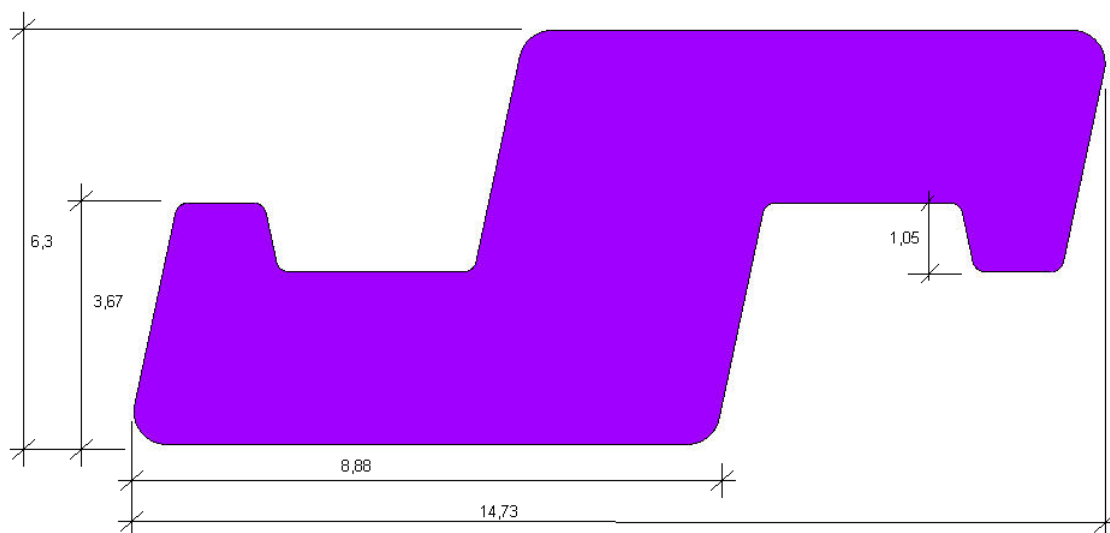


Figura 5-2 - Dimensões do arame da armadura de pressão (mm).

Dois tipos de modelos axissimétricos foram construídos:

- Modelos nos quais apenas a armadura de pressão foi representada; e
- Modelos compostos pela armadura de pressão e pelas camadas poliméricas que a circundam.

Em ambos os modelos, o elemento finito plano axissimétrico chamado PLANE182 no programa ANSYS®, foi utilizado para representar as camadas. Este elemento é definido por quatro nós com dois graus de liberdade em cada nó, deslocamentos nas direções x e y do duto flexível. O elemento é capaz de representar tanto efeitos não lineares geométricos quanto físicos.

Para garantir a interação entre os diferentes arames construídos e entre estes e as camadas poliméricas que os circundam, foram empregados elementos de contato do tipo superfície-superfície, que permite grandes deslocamentos relativos entre as camadas. O método Lagrangeano aumentado foi utilizado para resolver o problema de contato com atrito entre corpos elásticos e os elementos TARGE169 e CONTA172 foram usados no programa. Este método, quando aplicado ao problema de contato, possui multiplicadores de Lagrange que apresentam o significado físico dos esforços de contato, permitindo a verificação das condições de atrito a cada iteração. Estes conceitos permitem formular alguns esquemas computacionais que conduzem a resultados numéricos satisfatórios.

Os elementos CONTA172 e TARGE169 formam pares de elementos de contato que são empregados para simular o contato entre superfícies bidimensionais deformáveis. O contato ocorre quando o elemento de contato CONTA172,

posicionado, em geral, na superfície mais flexível, penetra no elemento alvo TARGE169 posicionado na outra superfície. Nesse caso, quando duas superfícies possuem rigidezas significativamente distintas (caso do contato entre a armadura de pressão e as camadas poliméricas). No caso das superfícies em contato apresentarem rigidezas semelhantes (caso, por exemplo, do contato entre os arames das armaduras de pressão), elementos do tipo TARGE169 e CONTA172 podem estar presentes simultaneamente em ambas as superfícies.

Em todas as análises aqui realizadas, o atrito pelo deslizamento relativo entre as superfícies é considerado através da Lei de Coulomb e o coeficiente de atrito assumido igual a 0,1. A força de atrito a ser vencida, isto é, aquela a partir da qual o deslizamento relativo entre os nós se inicia é igual a $\mu \cdot N_z$, onde μ é o coeficiente de atrito entre as camadas e N_z é a força normal de contato.

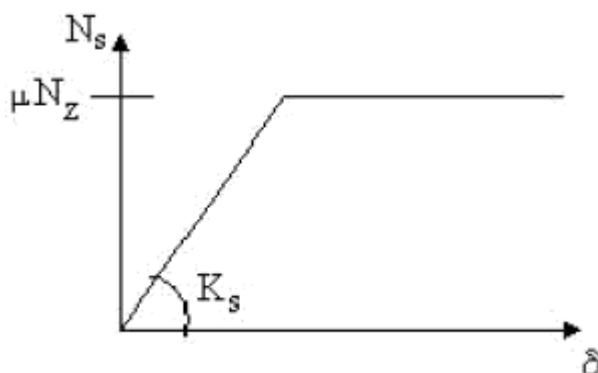


Figura 5-3 – Representação esquemática da teoria de atrito de Coulomb (MBAYE, 2006).

A rigidez de adesão, K_s , deve ser de tal ordem que o deslocamento relativo seja pequeno caso a força na interface de contato, N_z , seja inferior a μN_z . O valor dessa rigidez, entretanto, não pode ser excessivamente alto a ponto de causar problemas numéricos nas análises.

Problemas de contato são altamente não-lineares devido à presença de restrições unilaterais e devido à presença de atrito e, em geral, exigem recursos computacionais elevados. É importante, portanto, que a física do problema esteja clara para configurar o modelo para ser executado da forma mais eficiente possível. De acordo com as análises preliminares realizadas, não se espera o afastamento entre as camadas poliméricas e a armadura de pressão do duto analisada ou mesmo entre os arames das armaduras de pressão. Deste modo, os elementos de contato, em todas as análises, não permitem o afastamento relativo entre as superfícies em contato, mas permitem o deslizamento com atrito entre elas.

Em todas as análises, foram deduzidas as pressões de contato estimadas através do modelo tridimensional não linear (RiserTools), como ilustrado na Figura 4-6. Deste modo, as pressões aplicadas diretamente nas faces externas dos modelos construídos apenas com a armadura de pressão foram de 22,45 MPa e 31,70 MPa, devido a correções geométricas, e nos modelos com armadura de pressão e camadas poliméricas 20 MPa e 25,34 MPa. A aplicação dessas pressões é apontada na Figura 5-5. A correção geométrica pode ser vista na Figura 5-4 e foi necessária, pois a área de aplicação da pressão na camada plástica é maior que na camada da armadura de pressão e era necessário que a multiplicação da pressão pela área de aplicação da mesma mantivesse o mesmo valor.

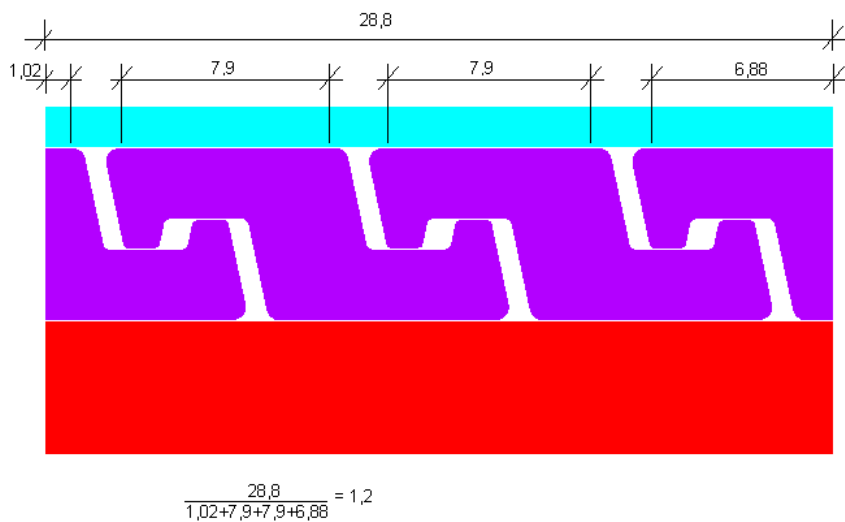


Figura 5-4 – Indicação da correção geométrica (mm).

Para evitar a hipostaticidade do modelo de elementos finitos geradas, o deslocamento axial (na direção Y) foi restringido em suas extremidades, como demonstrado na Figura 5-5.

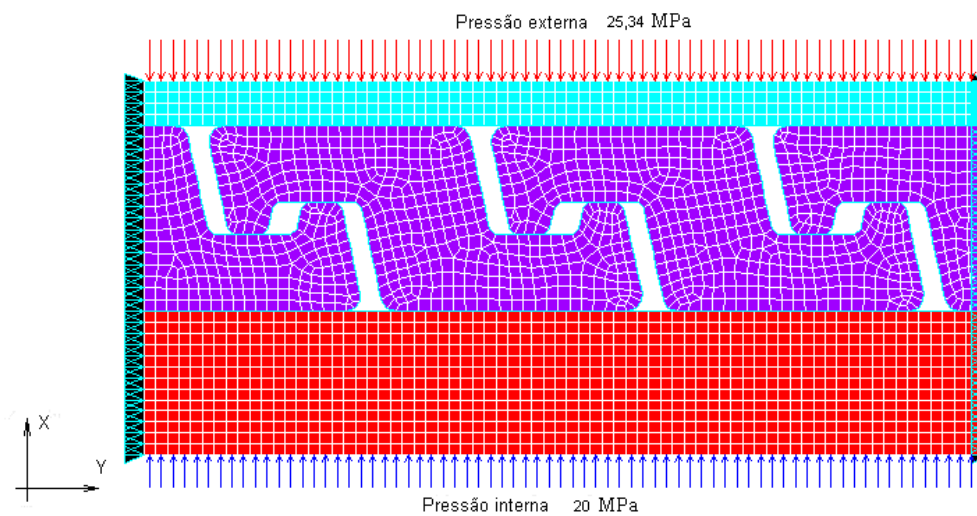
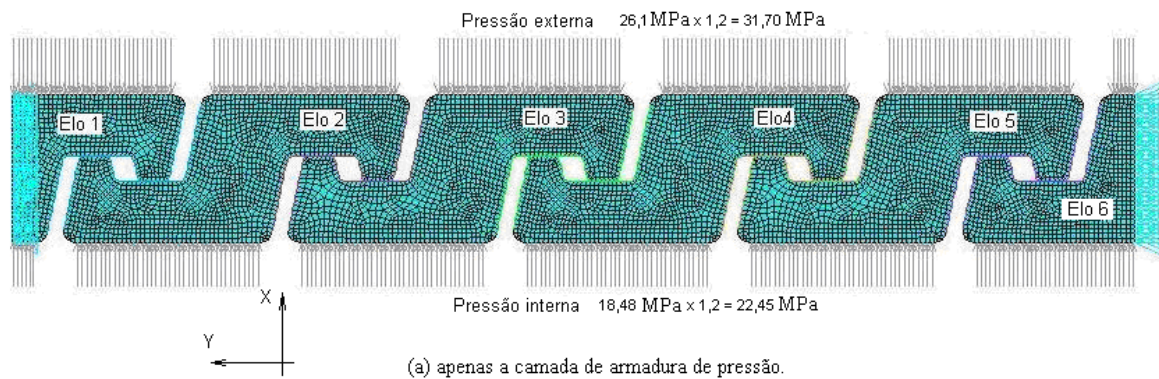


Figura 5-5 – Indicação dos carregamentos aplicados no modelo de elementos finitos.

5.1.2 Análises realizadas

Para determinação da resposta ao longo da armadura de pressão foram realizadas diversas análises com o intuito de estudar a:

- Necessidade de modelar as camadas poliméricas que possuem contato com a armadura de pressão;
- Dimensão da malha de elementos: estuda-se a malha que demande o menor esforço computacional e gere um resultado estável, sem grandes variações de tensão/deformação. Neste estudo, avaliam-se malhas com elementos de dimensões iguais a 0,2 mm, 0,4 mm e 0,8 mm; e
- Número de passos da armadura de pressão.

A malha de elementos finitos é formada por elementos quadriláteros, cujo comprimento das bordas possui as dimensões a, b, c e d como exemplificado na Figura 5-6. Neste trabalho quando utilizada a nomenclatura de malha de 0,2 mm, 0,4

mm e 0,8 mm, indica que esta medida corresponde, exatamente, à maior dimensão entre as bordas dos elementos.

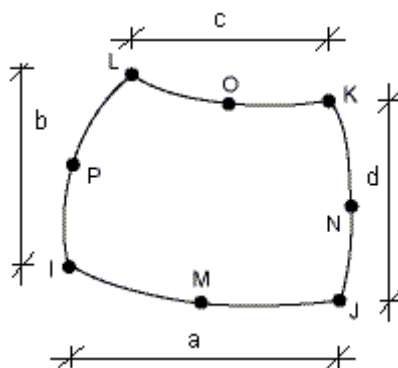


Figura 5-6 – Comprimentos das bordas dos elementos que formam a malha.

Inicialmente realizaram-se as análises de elementos finitos detalhando apenas a camada da armadura de pressão, como os resultados não foram satisfatórios, as análises continuaram acrescentando, no modelo, as camadas poliméricas que a circundam.

Um resumo de todo o estudo, indicando discretização da malha com quantidade de nós, elementos e graus de liberdade, além de camadas modeladas está demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo das malhas de elementos finitos desenvolvidas.

Análise	Tipo de modelo	Discretização da malha (mm)	Quantidade			
			Passos	Nós	Elementos	Graus de liberdade
1	Somente armadura de pressão	0,2	6	7.689	7.713	15.312
2	Somente armadura de pressão	0,8	6	872	717	1.366
3	Somente armadura de pressão	0,2	10	13.893	13.967	27.720
4	Somente armadura de pressão	0,4	10	4.170	4.208	8.306
5	Somente armadura de pressão	0,8	10	1.241	1.294	2.464
6	Armadura de pressão, camada plástica interna e camada plástica antidesgaste	0,2	6	16.358	16.698	32.254
7	Armadura de pressão, camada plástica interna e camada plástica antidesgaste	0,4	6	4.589	4.812	9.046
8	Armadura de pressão, camada plástica interna e camada plástica antidesgaste	0,8	6	1.379	1.509	2.682
9	Armadura de pressão, camada plástica interna e camada plástica antidesgaste	0,4	3	1.845	1.929	3.622

10	Armadura de pressão, camada plástica interna e camada plástica antidesgaste	0,4	4	2.745	2.885	5.422
----	---	-----	---	-------	-------	-------

5.1.3 Resultados obtidos

Os resultados de deformações e tensões das análises dos modelos empregando elementos planos axissimétricos compostos apenas pela camada de armadura de pressão estão demonstrados no Anexo 1. Já os resultados de deformações e tensões das análises dos modelos empregando elementos planos axissimétricos compostos pela armadura de pressão e as camadas que a circundam podem ser vistos no Anexo 2.

Houve necessidade da inclusão das camadas poliméricas para haver uma boa distribuição de tensões da armadura de pressão. Veja, na Figura 5-7, o resultado de tensões normais de 2 modelos com o mesmo número de passos e refinamento de malha, como diferença apenas as 2 camadas plásticas (análise 1 e 6).

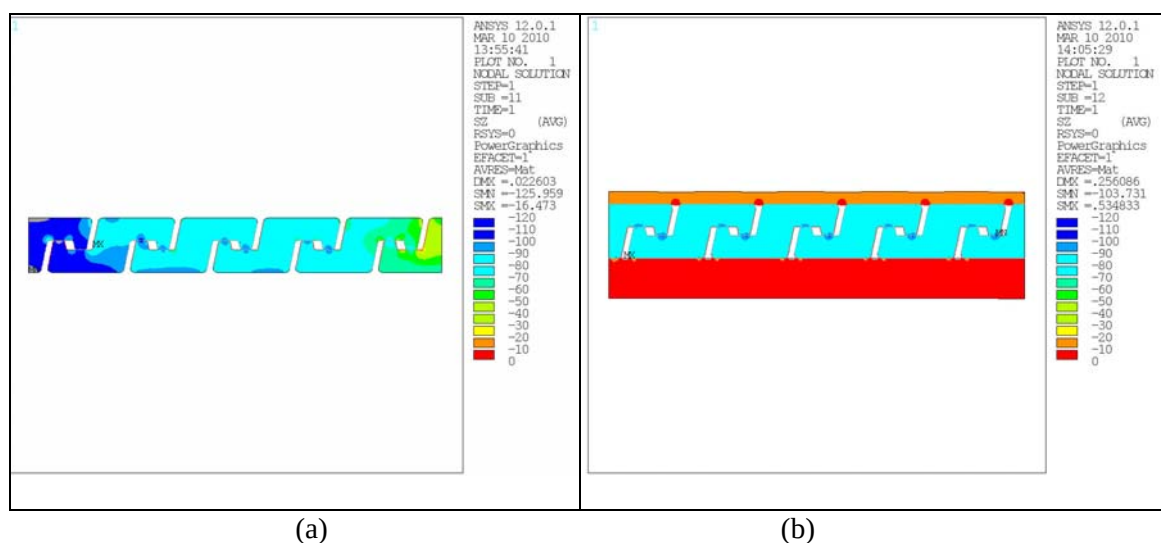
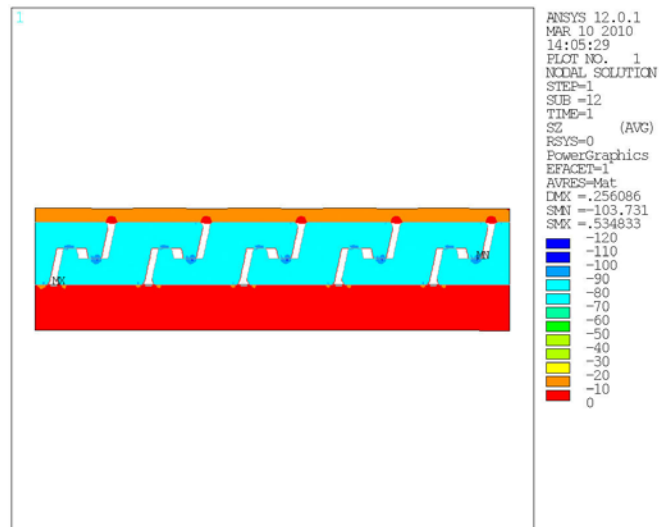
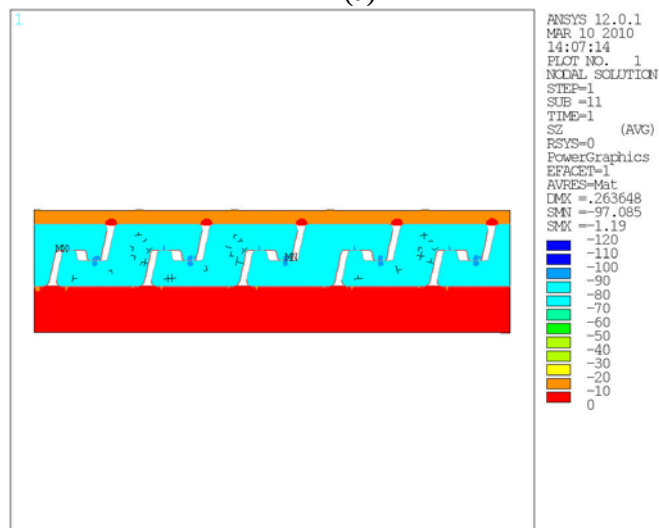


Figura 5-7 – Tensão normal (MPa) das malhas de dimensão 0,2 mm e 6 passos. (a) somente armadura de pressão e (b) armadura de pressão e as 2 camadas plásticas.

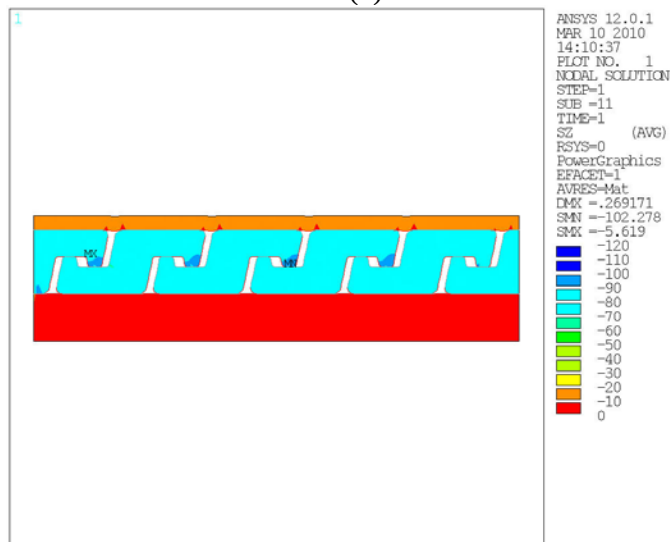
A partir do resultado das análises, observa-se nas Figuras 5-8 e 5-9, que a malha de dimensão 0,8 mm não representa bem as regiões de concentração de tensão nas regiões de contato e que para resultados de tensão/deformação estáveis e sem grandes variações, a malha de dimensão de 0,4 mm é satisfatória.



(a)

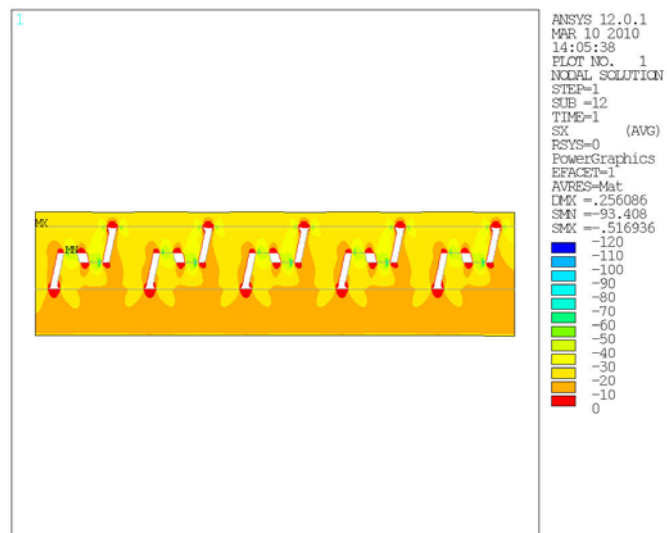


(b)

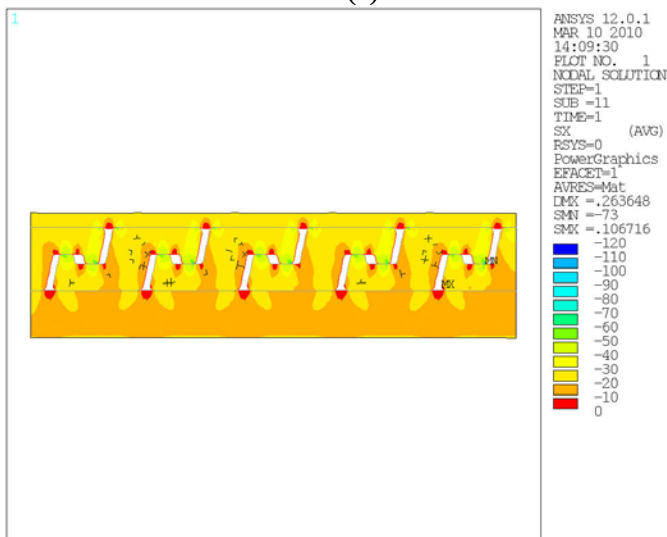


(c)

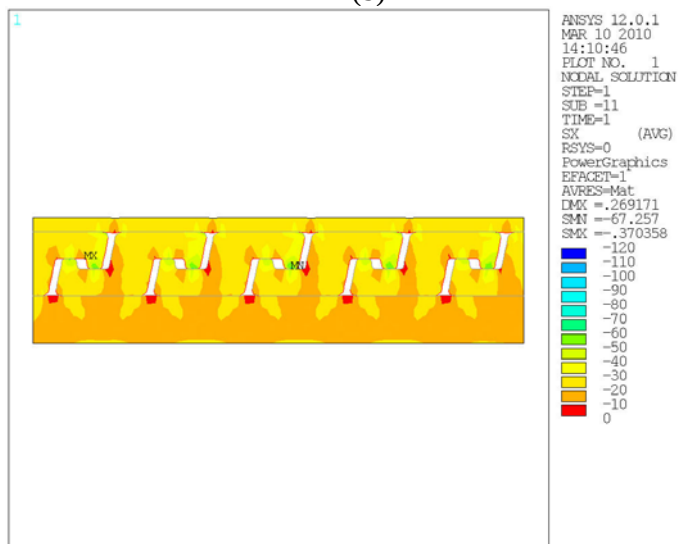
Figura 5-8 - Tensão normal (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão de 6 passos. (a) 0,2 mm, (b) 0,4 mm e (c) 0,8 mm.



(a)



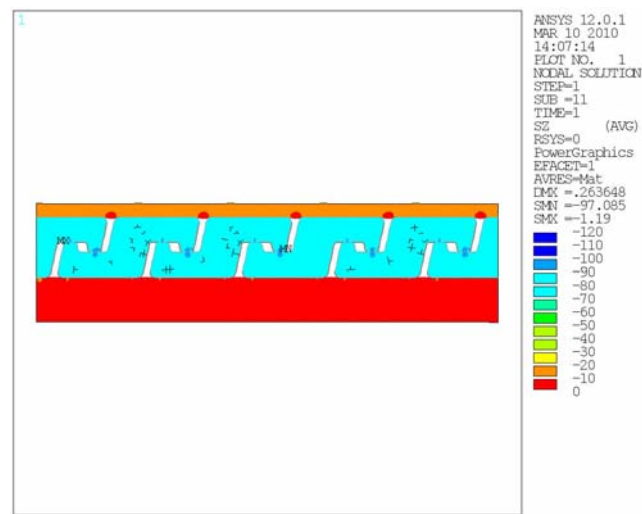
(b)



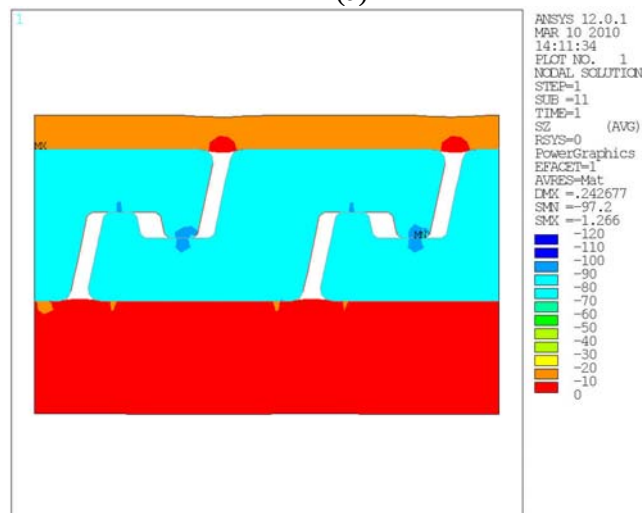
(c)

Figura 5-9 - Tensão X (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão de 6 passos. (a) 0,2 mm, (b) 0,4 mm e (c) 0,8 mm.

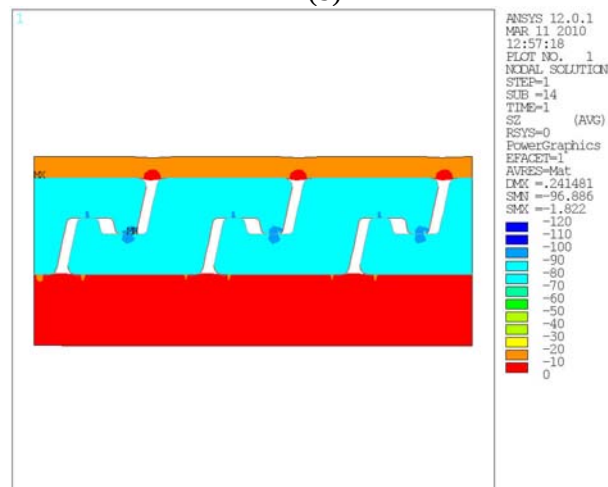
Os resultados de distribuição de tensão normal e X (Figuras 5-10 e 5-11), bem como os valores de tensões máximas (listados na Tabela 9) variam pouco em relação ao número de passos.



(a)

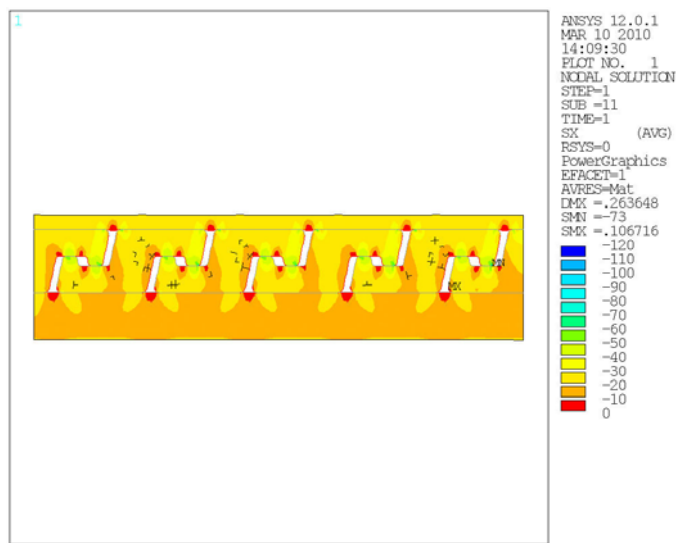


(b)

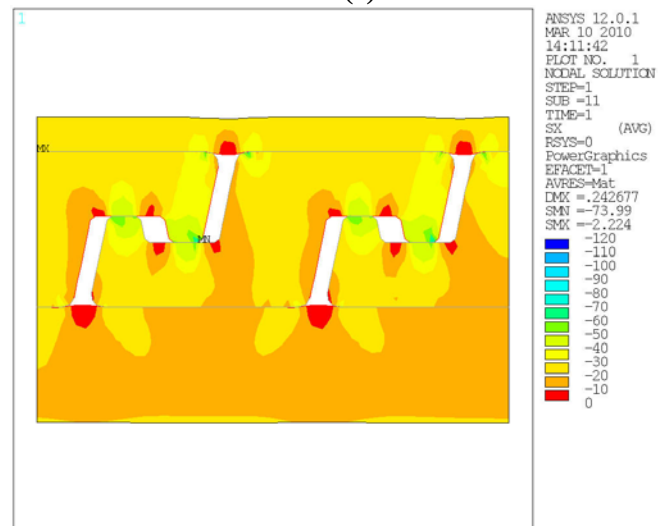


(c)

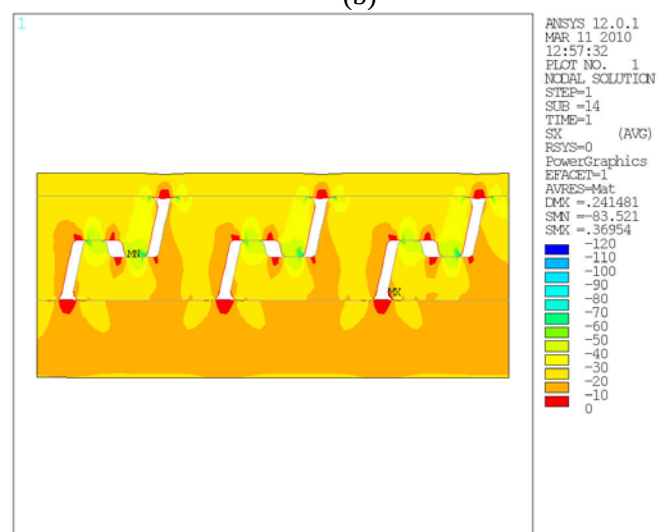
Figura 5-10 - Tensão normal (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão 0,4 mm. (a) 6 passos, (b) 3 passos e (c) 4 passos.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-11 - Tensão X (MPa) das malhas de armadura de pressão e as 2 camadas plásticas, de dimensão 0,4 mm. (a) 6 passos, (b) 3 passos e (c) 4 passos.

A tensão normal média da camada da armadura de pressão foi calculada dividindo a soma da área de cada elemento da armadura de pressão multiplicada por sua tensão pela área total da armadura de pressão. Resultou em σ_z de -80 MPa para o modelo da camada de armadura de pressão e -83,5 MPa para o modelo com as 2 camadas poliméricas. Observa-se uma pequena variação no valor da tensão normal média de 2% ao da tensão axial calculada pelo modelo tridimensional da avaliação preliminar (-81 MPa) realizada pelo programa RiserTools, o que demonstra o bom comportamento do modelo numérico proposto. Nota-se que a tensão calculada pelo modelo tridimensional não é conservativa em relação ao modelo axissimétrico, sendo muito importante a determinação do fator de concentração de tensão normal nos cálculos do duto.

A concentração de tensão próxima a região de contato gerou um fator de concentração de tensão normal de 1,28 para os modelos da camada de armadura de pressão e 1,16 para o modelo com as 2 camadas poliméricas. Pode-se usar o SCFz no valor de 1,20 para maior segurança.

Os resultados de tensão/deformação das análises de elementos axissimétricos estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Resumo dos resultados de tensão/deformação na camada de armadura de pressão.

Análise	Máximo Deslocamento		Máxima tensão (MPa)		Tensão normal média (MPa) σ_z	Fator de concentração de tensão normal (SCFz)
	UX	UY	σ_x	σ_z		
1	-0,014	-0,0018	-76	-102	-80	1,28
2	-0,014	0,0028	-65	-102	-80	1,28
3	-0,013	-0,0017	-69	-96	-80	1,20
4	-0,013	-0,002	-68	-102	-80	1,28
5	-0,014	-0,002	-61	-102	-80	1,28
6	-0,016	-0,002	-93	-100	-83,5	1,20
7	-0,016	-0,0012	-72	-100	-83,5	1,20
8	-0,017	0,0023	-68	-98	-83,5	1,17
9	-0,016	-0,0012	-74	-97	-83,5	1,16
10	-0,016	-0,0016	-83	-97	-83,5	1,16

Com todas as análises realizadas e observações feitas, conclui-se que a análise 10 foi a que mais satisfaz a premissa e o estudo seguirá a partir deste modelo. Seus resultados serão ilustrados para demonstração do comportamento da estrutura.

A análise 10 é ilustrada na Figura 5-12 e, como já se sabe, é composta pela armadura de pressão e as camadas plásticas que a circundam, possui 4 passos e dimensão da malha de 0,4 mm.

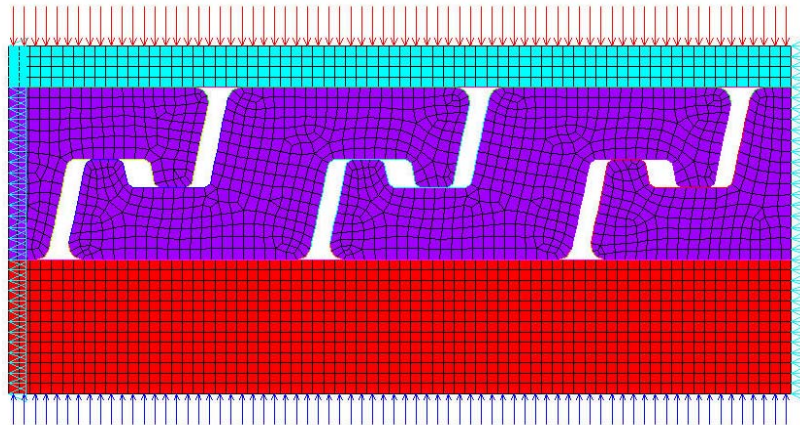


Figura 5-12 - Malha de elementos finitos gerada, possuindo dimensão 0,4 mm de 4 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo, devido ao carregamento aplicado na Figura 5-5 (b), estão indicados na Figura 5-13.

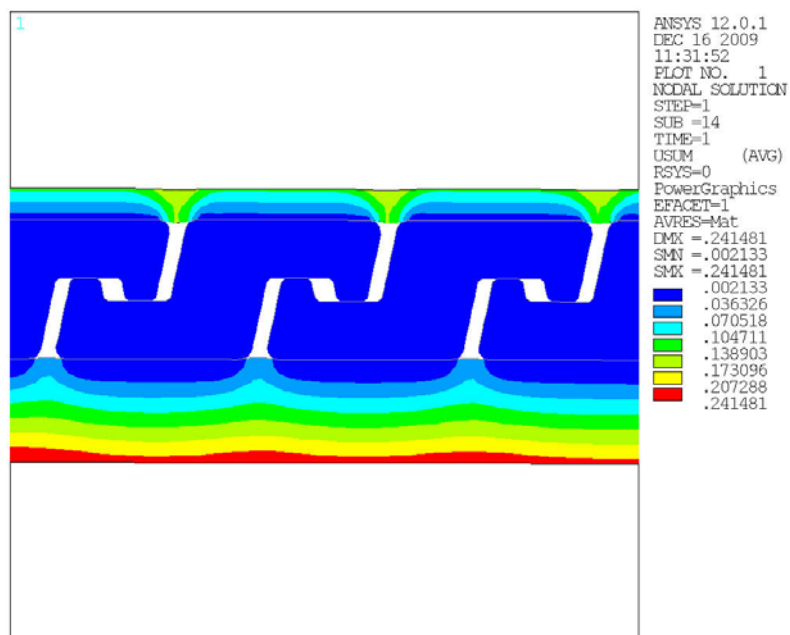


Figura 5-13 - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.

As distribuições de tensões normal e X ao longo da seção transversal estão ilustradas nas Figuras 5-14 e 5-15. A tensão normal σ_z média se mantém em praticamente toda a seção exceto próximo à região de contato interno.

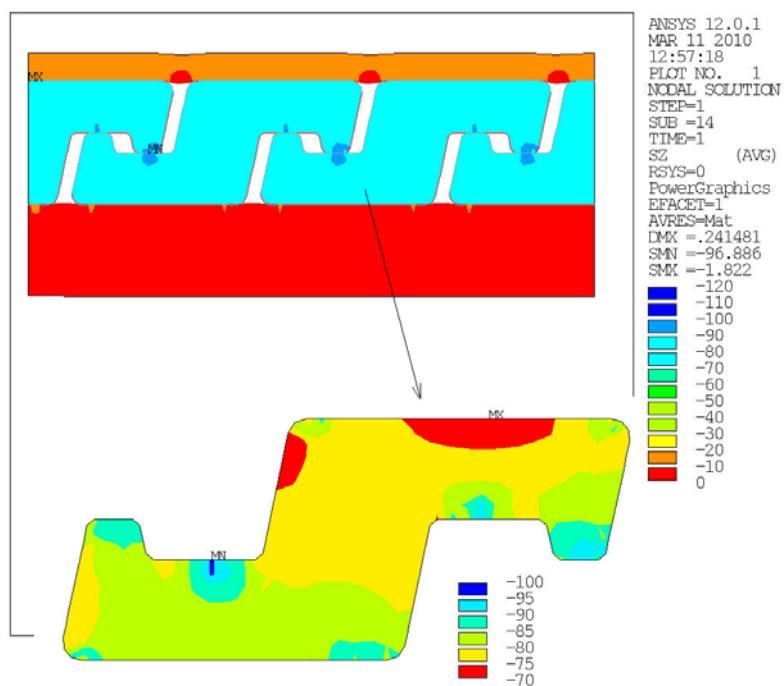


Figura 5-14 - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.

Pode-se ver na Figura 5-15, que a tensão X é bem inferior a tensão normal e só aumenta próximo à zona de contato.

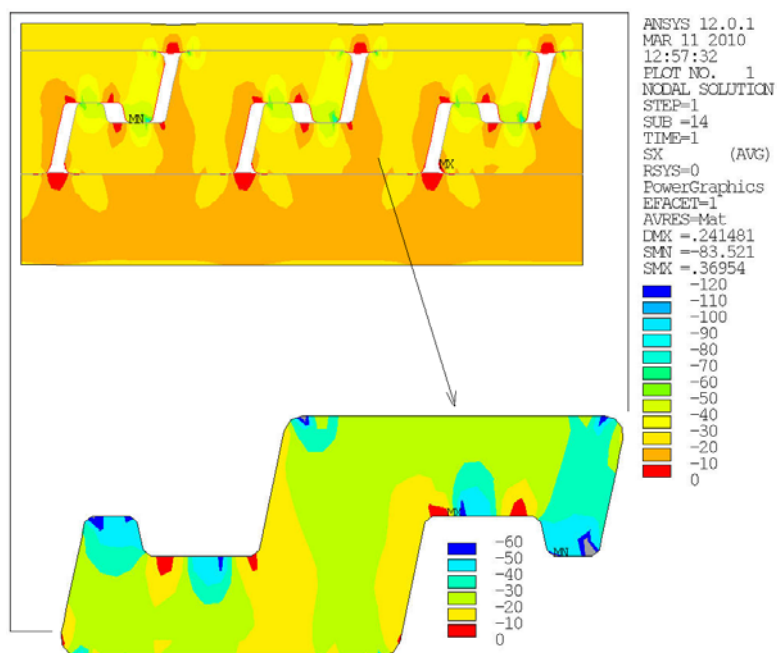


Figura 5-15 - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.

As Figuras 5-16 e 5-17 ilustram as tensões Y e cisalhantes. Seus valores são bem baixos, mas ainda podem-se observar concentrações nas regiões de contato.

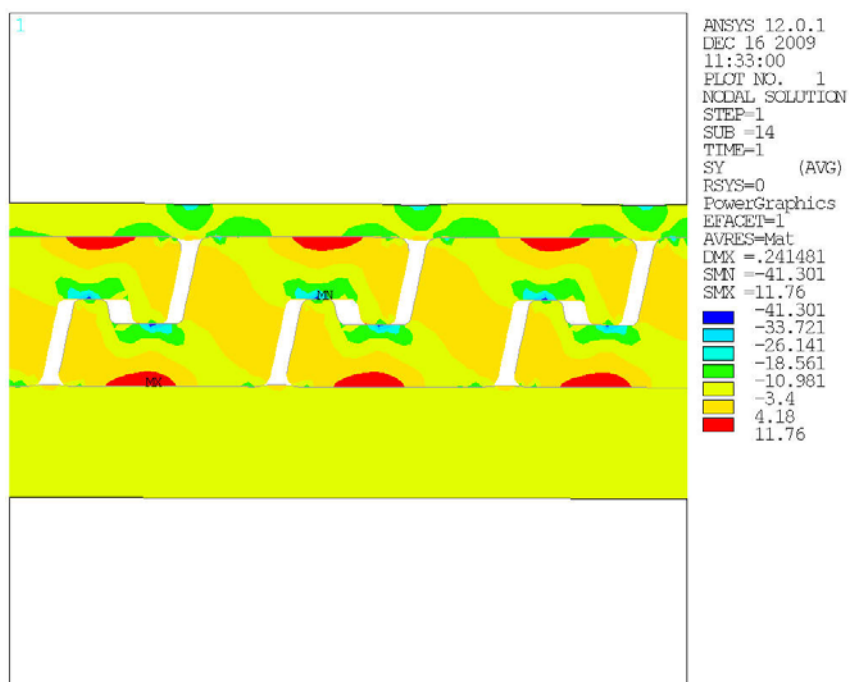


Figura 5-16 - Tensão Y (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.

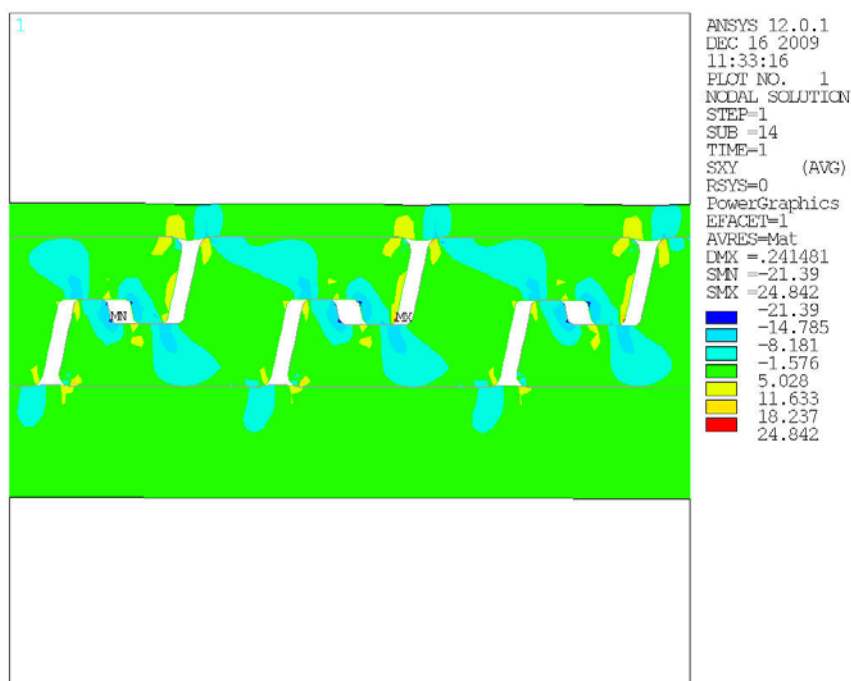


Figura 5-17 - Tensão cisalhante (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.

A Figura 5-18 mostra o local em que se formam as zonas de concentração de deformação nas camadas poliméricas. Essas concentrações se localizam nas folgas existentes ao longo da armadura de pressão.

A deformação ilustrada e citada neste estudo é referente à deformação equivalente de Von Mises, que corresponde a uma combinação entre os componentes

de deformações lineares e angulares obtidos pela estrutura. A fórmula da deformação equivalente de Von Mises está desenvolvida no Anexo 4.

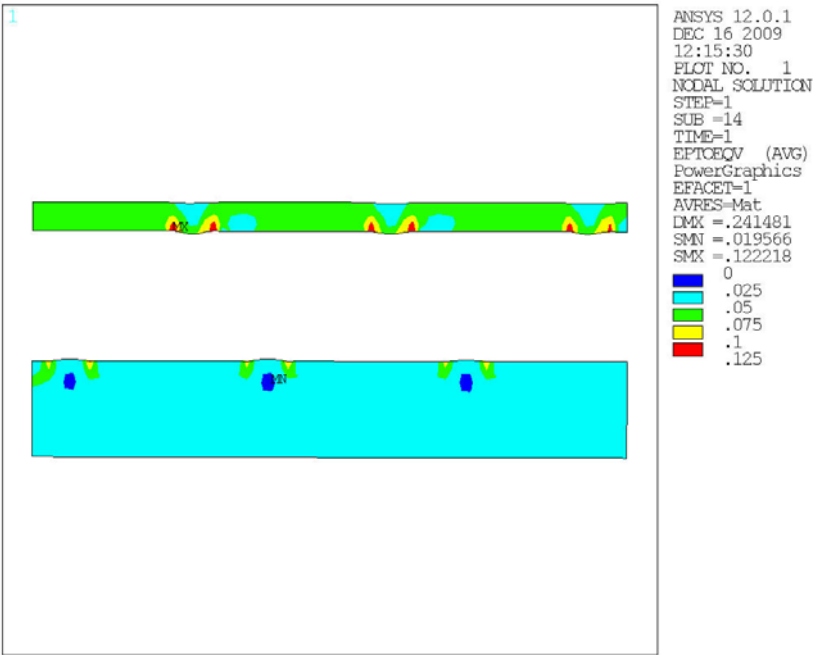


Figura 5-18 - Deformação (mm/mm) nas camadas plásticas da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.

Resumindo o comportamento das tensões na estrutura, vê-se a tensão Von Mises na Figura 5-19. Cria-se uma tensão Von Mises média de 72 MPa.

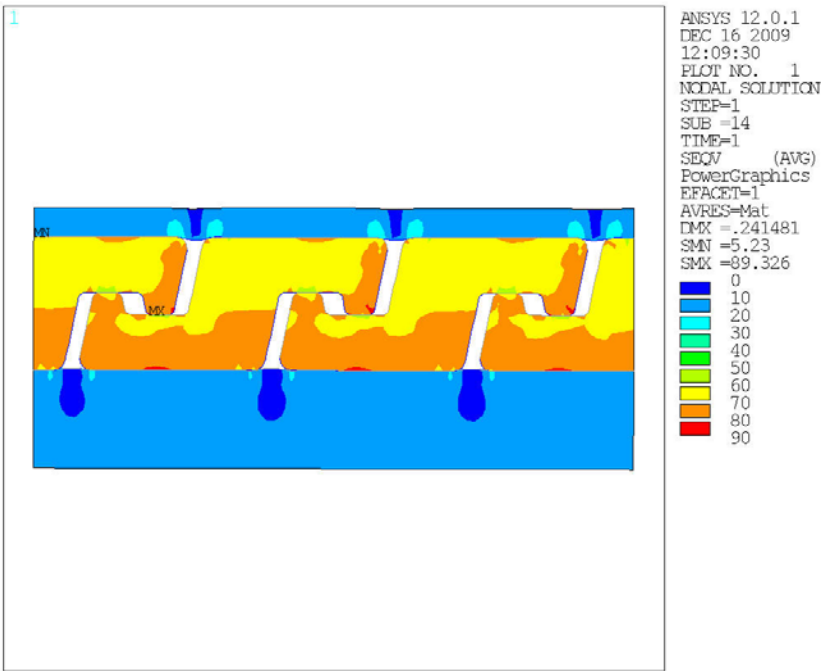


Figura 5-19 - Tensão Von Mises (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos.

Pode-se notar que está clara a caracterização de um estado tridimensional de tensões, que é reforçado, sobretudo, nas regiões de contato com o desenvolvimento de tensões Y e cisalhante.

5.2 Modelo empregando elementos sólidos isoparamétricos

5.2.1 Descrição geral do modelo

O modelo de elementos planos axissimétricos definido anteriormente será extrusado e novamente analisado. Mantendo a consideração de ângulo de assentamento de 90° para armadura de pressão.

O modelo de elementos finitos foi feito pelo programa ANSYS®. A malha gerada está ilustrada na Figura 5-20 e possui 167.201 nós e 172.804 elementos.

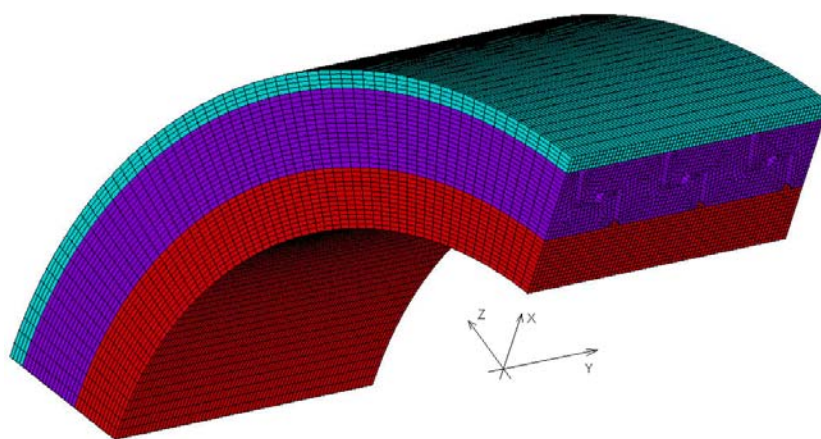


Figura 5-20- Malha gerada para o modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos.

O elemento SOLID185 foi utilizado para representar a armadura de pressão e poliméricas, é definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó. O elemento tem plasticidade e grande capacidade de deformação.

A malha é composta por elementos de dimensões 0,4 mm, nos eixos X e Y, e 1,2 mm no sentido radial.

Para os elementos de contato utilizaram-se os tipos de elemento TARGE170 e CONTA174. Eles são sobrepostos simulando contato entre superfícies deformáveis e estão ilustrados na Figura 5-21.

Atenção especial é dada ao cálculo da rigidez dos elementos de contato desenvolvidos, onde os efeitos das deformações de flexão, cisalhantes e de membrana são levados em consideração.

O modelo de elementos sólidos é analisado com diferentes fatores de rigidez de contato: 0,1, 1 e 10. O objetivo é conhecer a modelagem numérica para melhor obtenção de tensões/deformações resultantes.

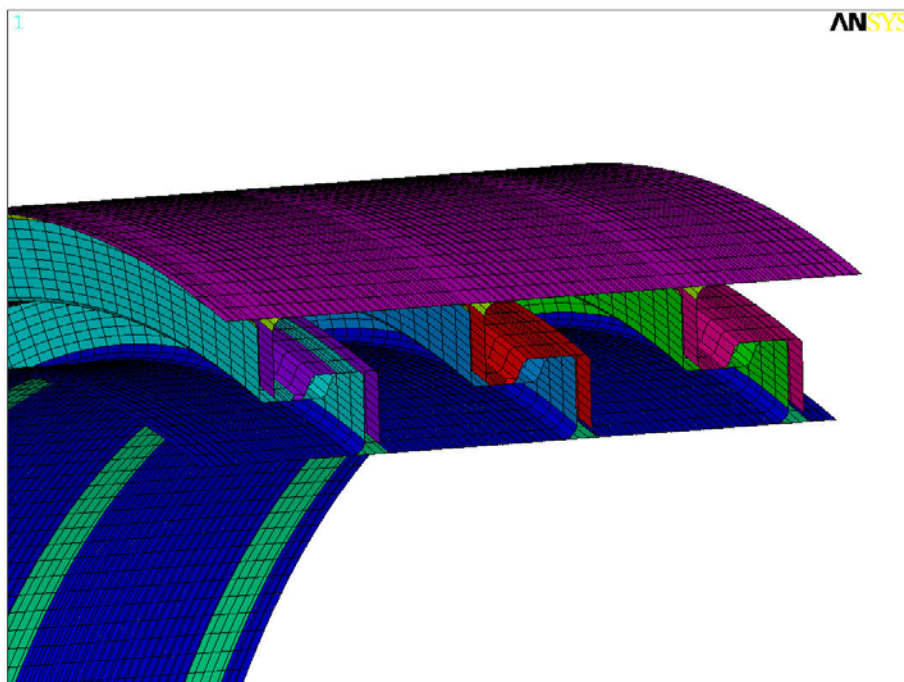


Figura 5-21 – Elementos de contato do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos.

5.2.2 Análises realizadas

A condição de contorno está ilustrada na Figura 5-22 (a). Aplicou-se a restrição de movimento em Y nas extremidades, impedindo que o duto alongue, pois só está sendo analisado o efeito de pressão. O modelo de elementos finitos representa apenas um quadrante da seção transversal do duto, o que gerou a necessidade de condição de simetria nas extremidades onde ficariam os outros quadrantes.

O carregamento de pressão externa e interna é o mesmo das análises anteriores e está ilustrado na Figura 5-22 (b):

- Pressão interna = 20 MPa; e
- Pressão externa = 25,34 MPa.

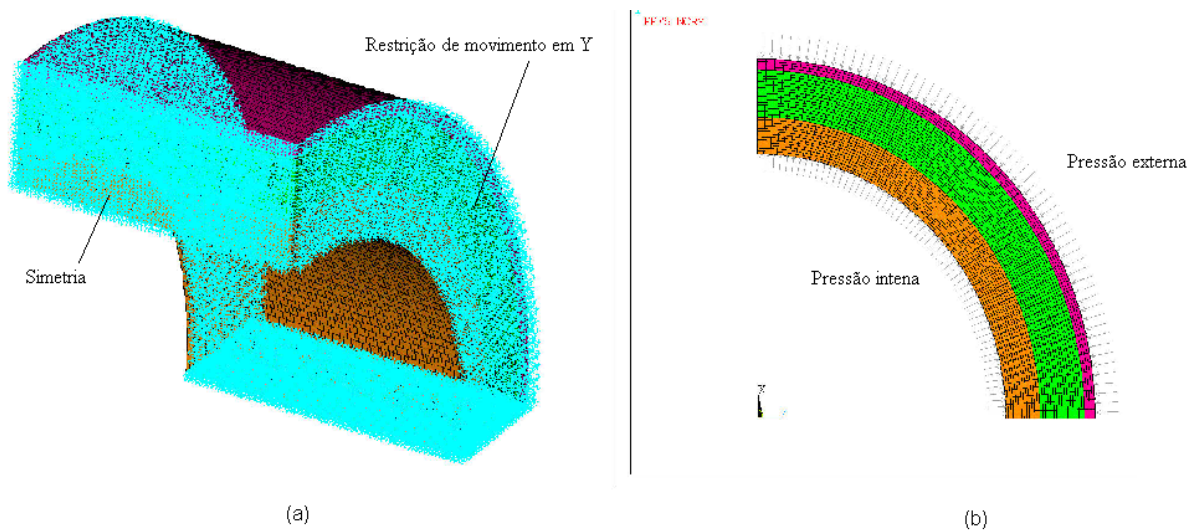


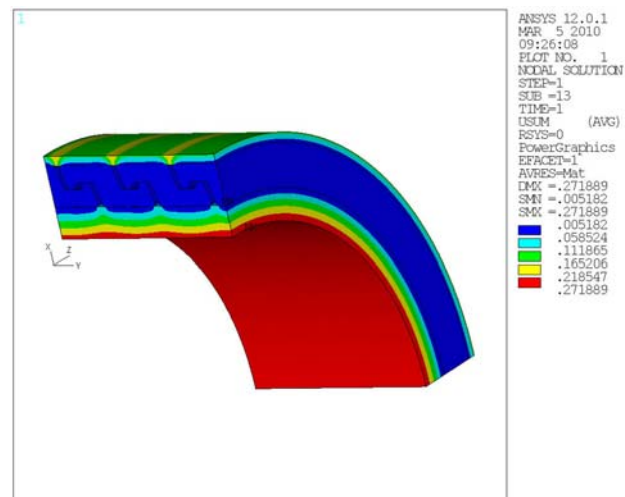
Figura 5-22 - Carregamentos aplicados no modelo (a) condição de contorno e (b) pressão interna e externa.

5.2.3 Resultados obtidos

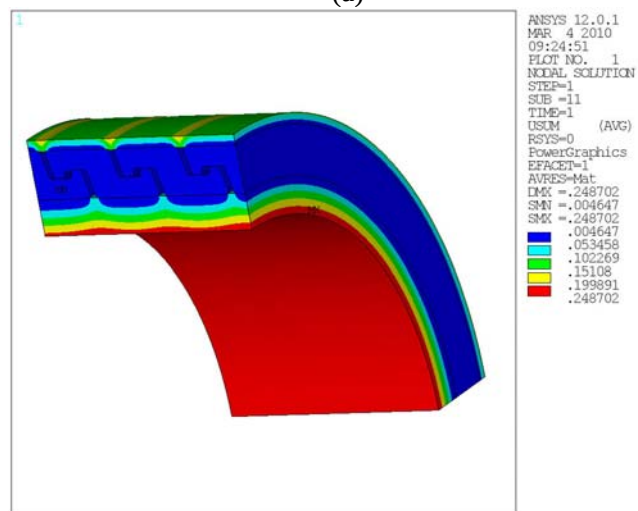
O modelo, cujo fator de rigidez de contato é 0,1, possui rigidez entre aço/plástico na ordem de 10^3 N/mm e entre aço/aço de 10^6 N/mm, quando o fator de rigidez de contato é 1, a rigidez entre aço/plástico fica na ordem de 10^4 N/mm e aço/aço de 10^7 N/mm, já quando o fator de rigidez de contato é 10, a rigidez entre aço/plástico é de 10^5 N/mm e aço/aço de 10^8 N/mm.

Os resultados de deformações e tensões das análises dos modelos empregando elementos sólidos isoparamétricos estão ilustrados nas Figuras 5-23 a 5-30 e com mais detalhes no Anexo 3.

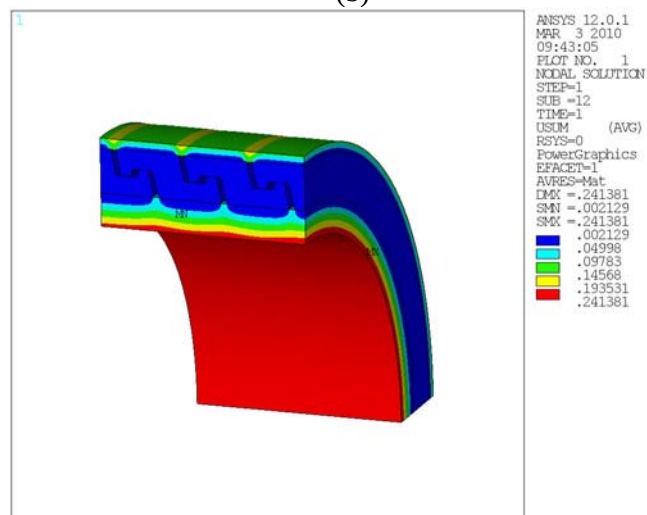
Os deslocamentos obtidos no modelo, devido ao carregamento aplicado na Figura 5-22 (a) e (b), estão indicados na Figura 5-23.



(a)



(b)

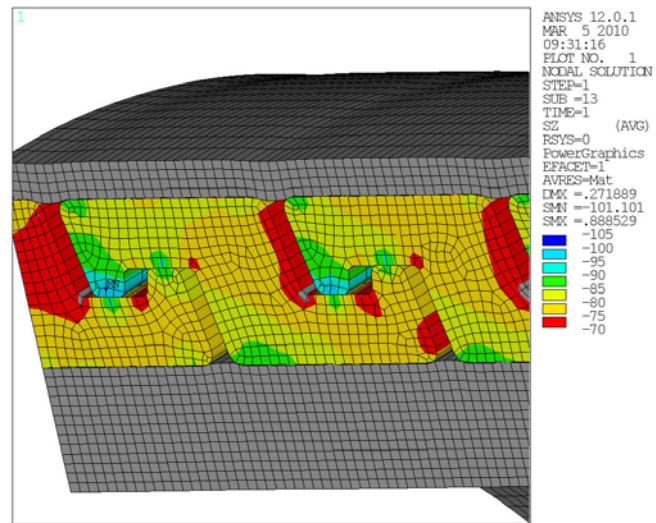


(c)

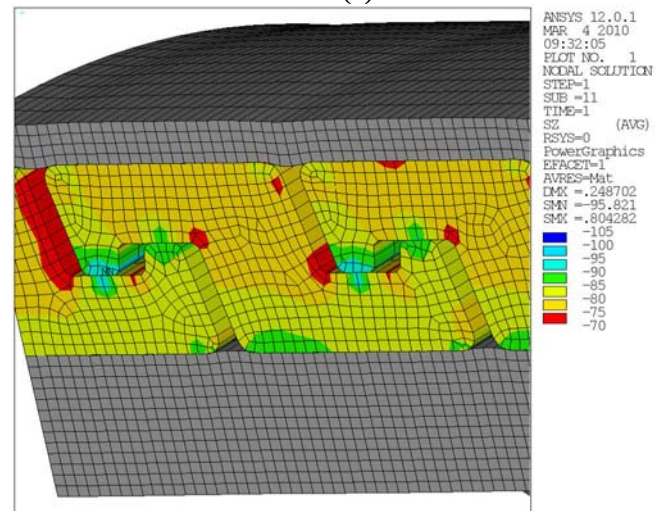
Figura 5-23 - Deslocamento (mm) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.

Os resultados de distribuição de tensão normal, bem como os valores de tensões máximas variam pouco em todas as análises.

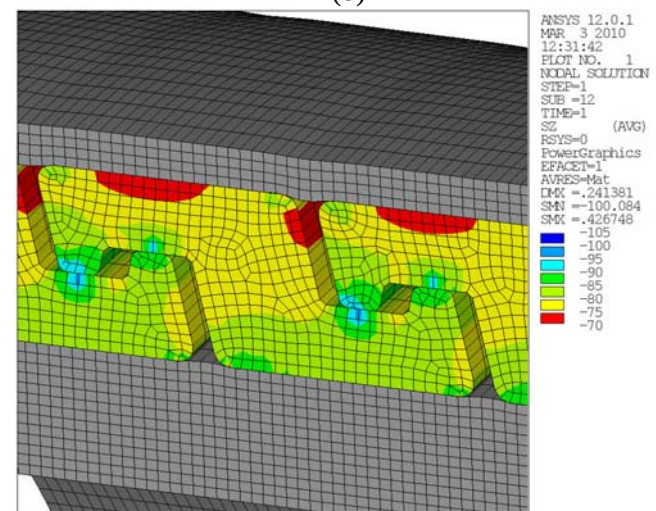
As distribuições de tensões normal e X ao longo da seção transversal estão ilustradas nas Figuras 5-24 e 5-25.



(a)



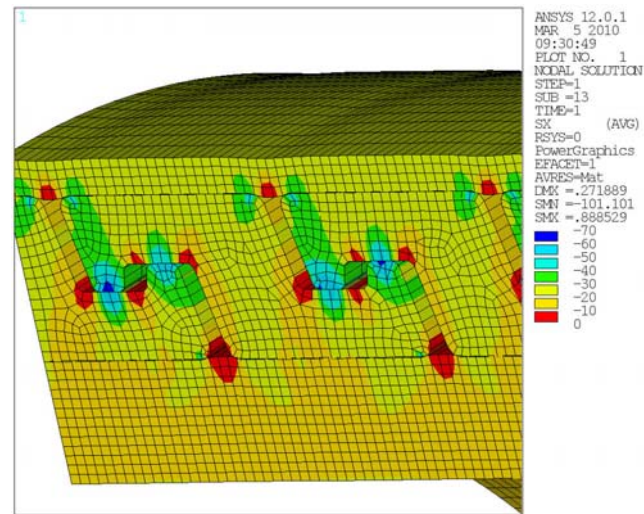
(b)



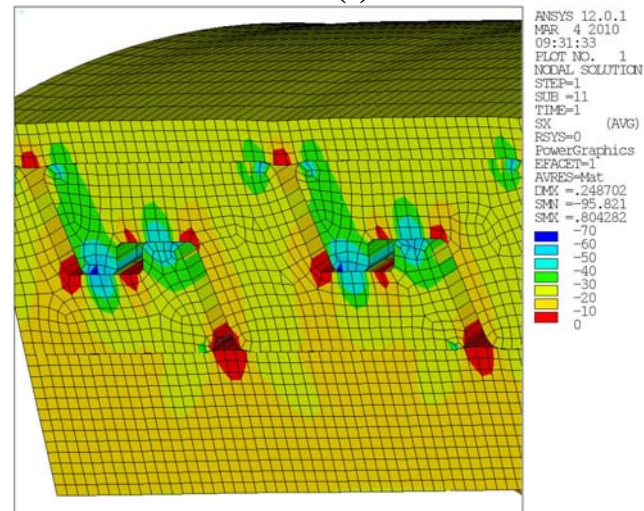
(c)

Figura 5-24 - Tensão normal (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.

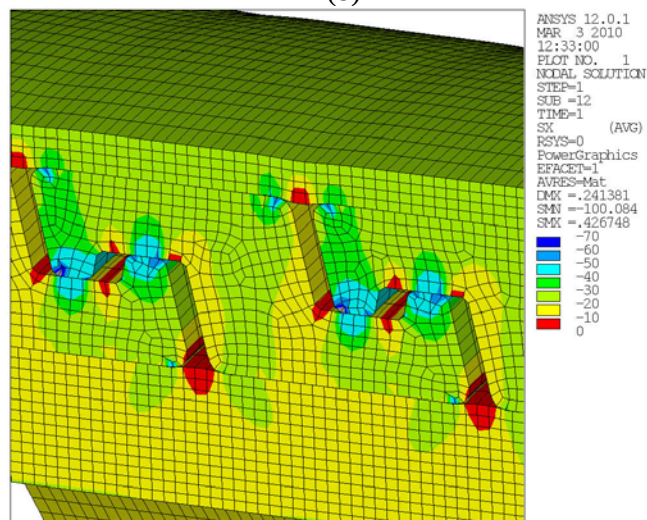
Pode-se ver na Figura 5-25, que a tensão X é bem inferior à tensão normal, porém aumenta bastante próximo à zona de contato.



(a)



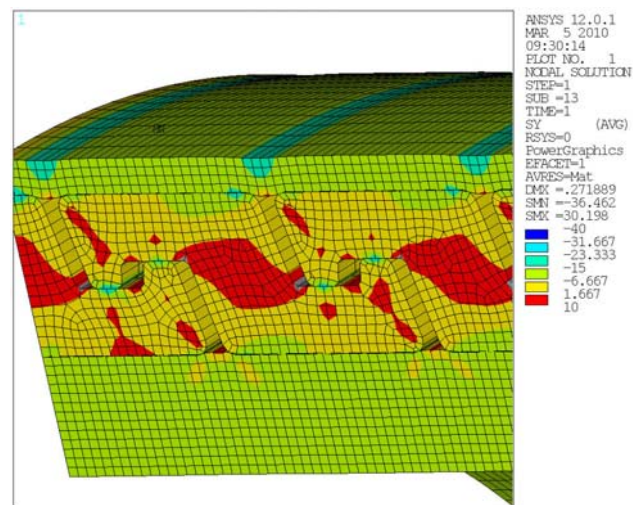
(b)



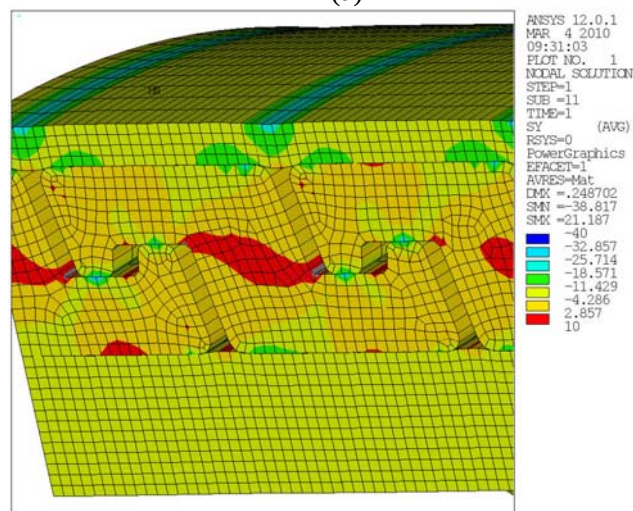
(c)

Figura 5-25 - Tensão X (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.

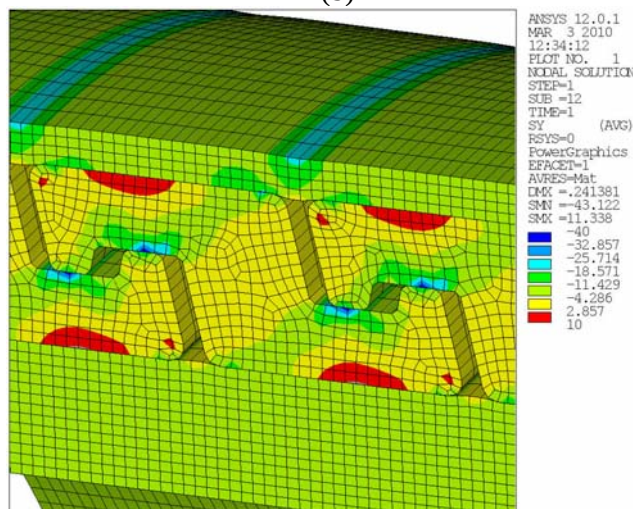
As Figuras 5-26 e 5-27 ilustram as tensões Y e cisalhantes. Seus valores são bem baixos, mas ainda pode-se observar que, com a rigidez de contato 10, as concentrações de tensão próximas a regiões de contato se intensificam.



(a)

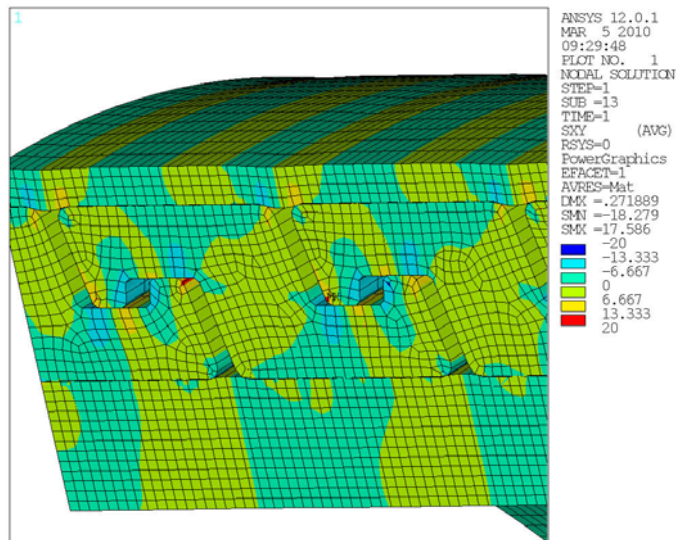


(b)

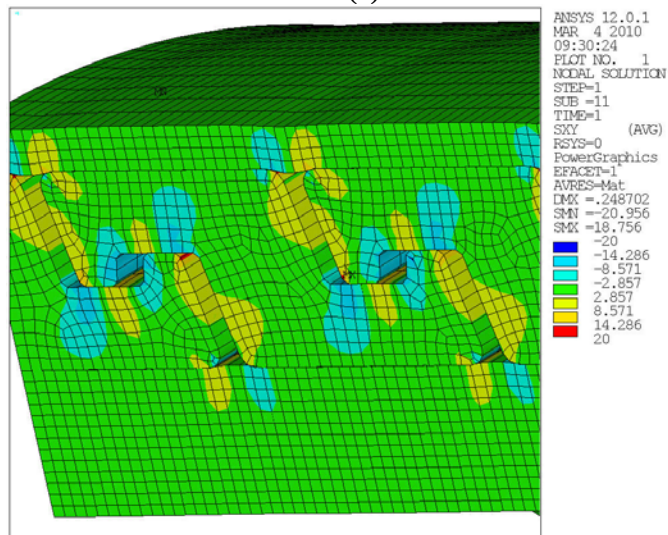


(c)

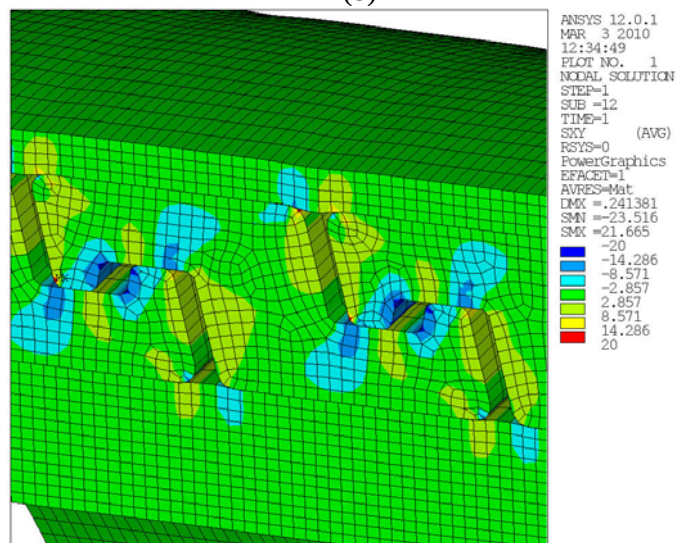
Figura 5-26 - Tensão Y (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.



(a)



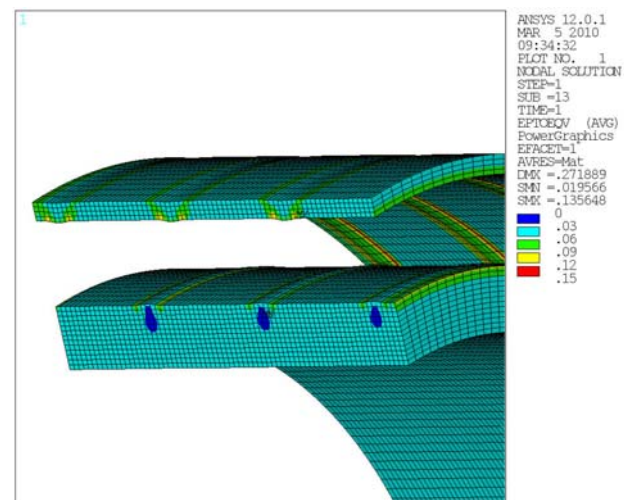
(b)



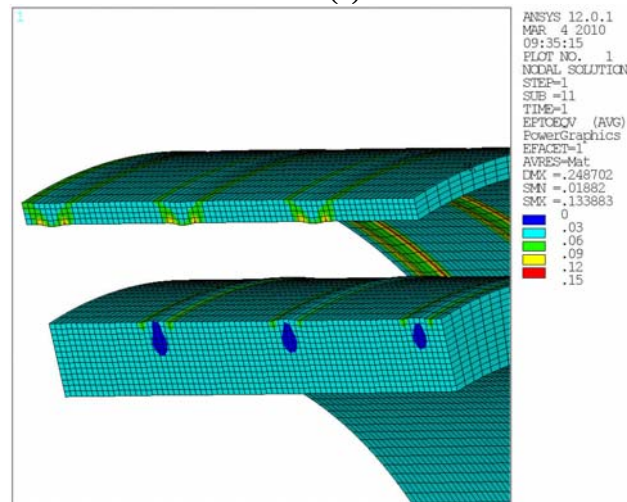
(c)

Figura 5-27 - Tensão cisalhante (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.

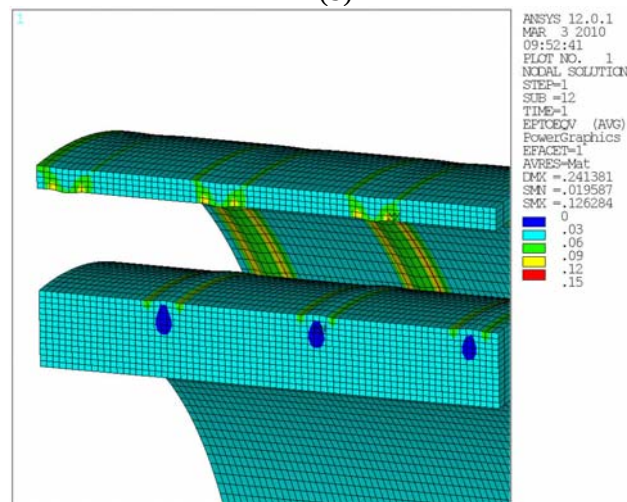
A Figura 5-28 mostra o local em que se formam as zonas de concentração de deformações nas camadas poliméricas. Essas concentrações se localizam nas folgas existentes ao longo da armadura de pressão.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-28 - Deformação (mm/mm) das camadas poliméricas do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.

Resumindo o comportamento das tensões na estrutura, ilustra-se a tensão Von Mises na Figura 5-29 e a deformação de Von Mises está ilustrada na Figura 5-30.

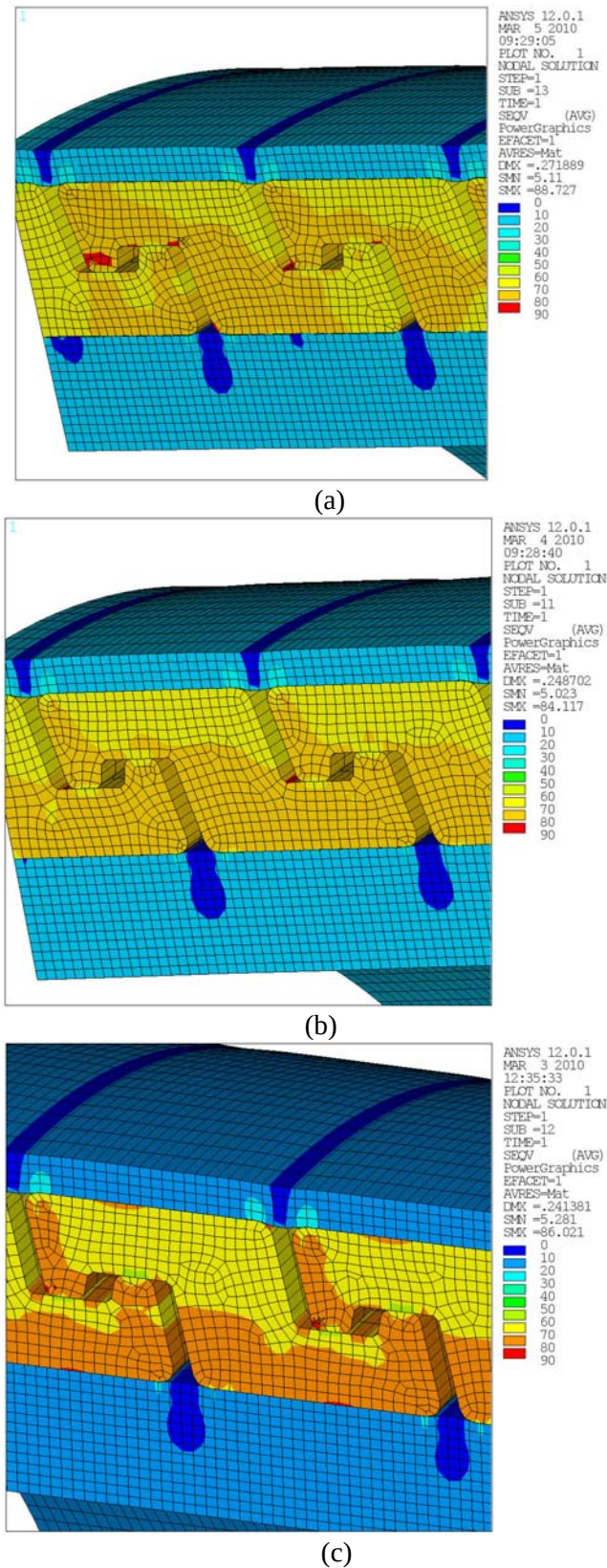
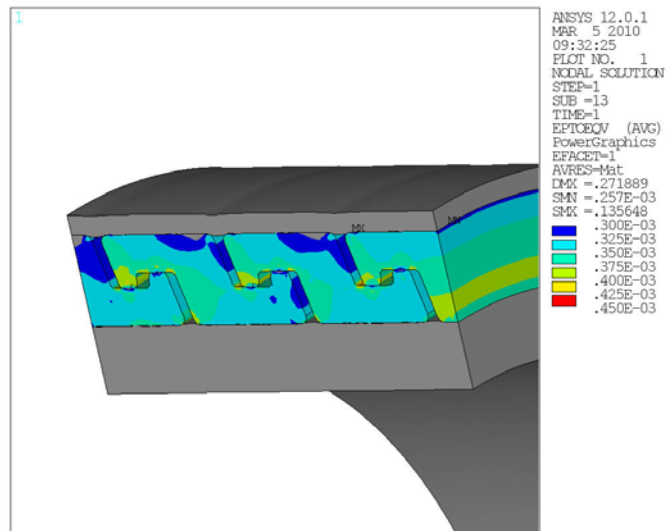
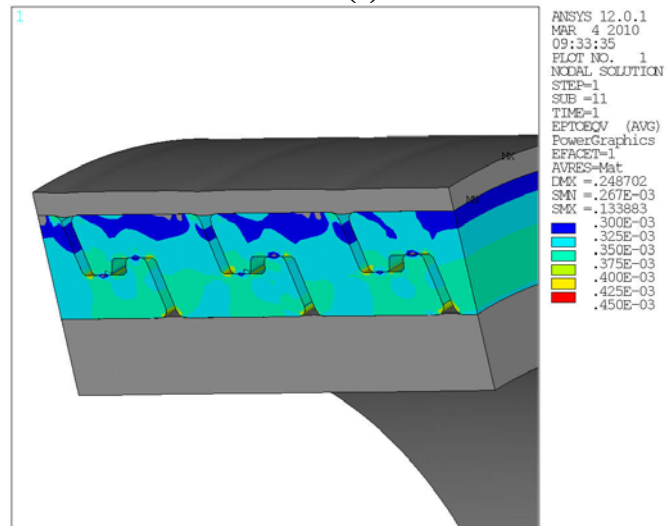


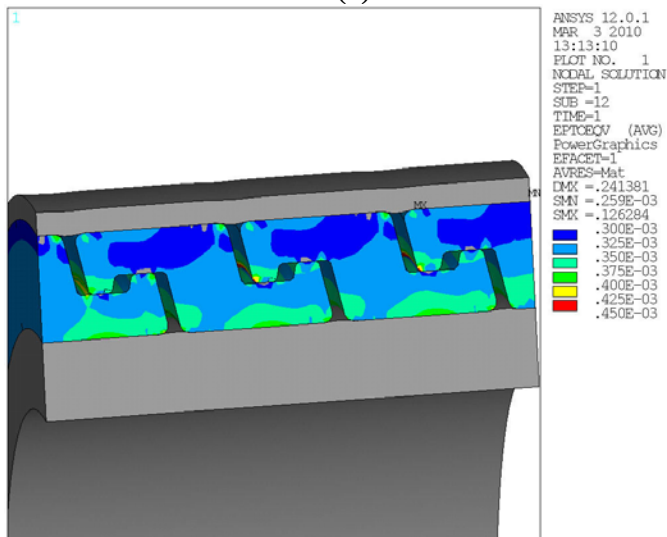
Figura 5-29 - Tensão Von Mises (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-30 - Deformação (mm/mm) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com fatores de rigidez de contato (a) 0,1, (b) 1 e (c) 10.

Pode-se notar que está clara a caracterização de um estado tridimensional de tensões, que é reforçado, sobretudo, nas regiões de contato com o desenvolvimento de tensões Y e cisalhantes.

O resumo dos resultados das análises está descrito na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo dos resultados de tensão/deformação na camada de armadura de pressão.

Fator de rigidez de contato	Máximo Deslocamento	Máxima tensão (MPa)		Tensão normal média (MPa)	Fator de concentração de tensão normal (SCRz)
		σ_x	σ_z	σ_z	
0,1	0,016	-60	-101	-80	1,26
10	0,053	-60	-95	-80	1,19
1	0,050	-70	-100	-80	1,25

As tensões máximas são encontradas sempre próximas a região de contato.

O fator de rigidez de contato 10 do modelo de elementos sólidos isoparamétricos foi a que apresentou resultado mais próximo ao modelo de elementos axissimétricos.

5.3 Comparação dos resultados dos modelos de elementos planos axissimétricos e sólidos isoparamétricos

Foram realizadas comparações entre os resultados das análises realizadas nos modelos de elementos finitos axissimétrico e sólido isoparamétrico. Os resultados de tensão Von Mises e deslocamentos da camada de armadura de pressão nos nós com máximas concentrações de tensão Von Mises e deslocamento foram escolhidos para o critério de comparação e estão listados na Tabela 11. A localização dos nós está ilustrada nas Figuras 5-31 e 5-32.

As distribuições de tensão/deformação podem ser vistas nas Figuras 5-33 e 5-34.

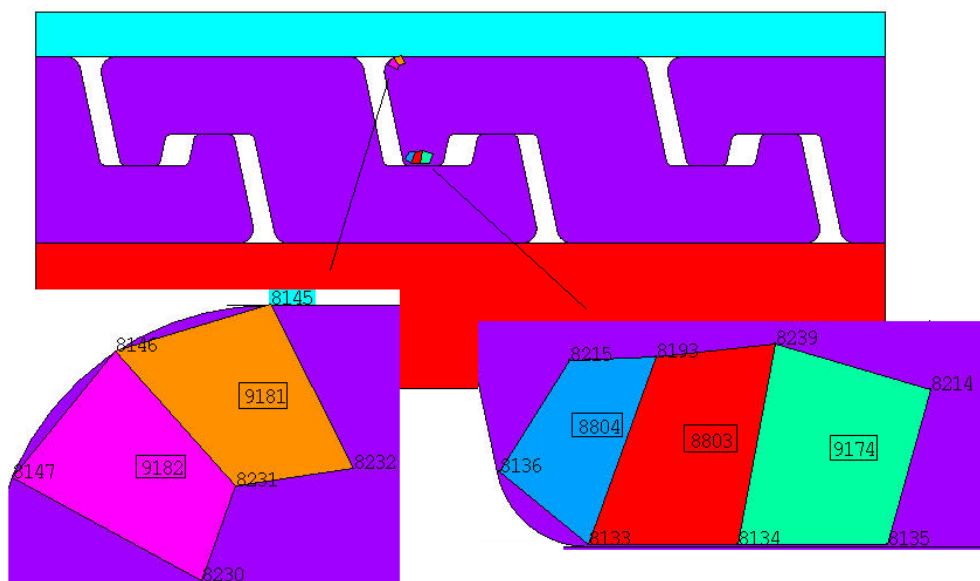


Figura 5-31 - Localização dos nós do modelo de elementos axissimétricos.

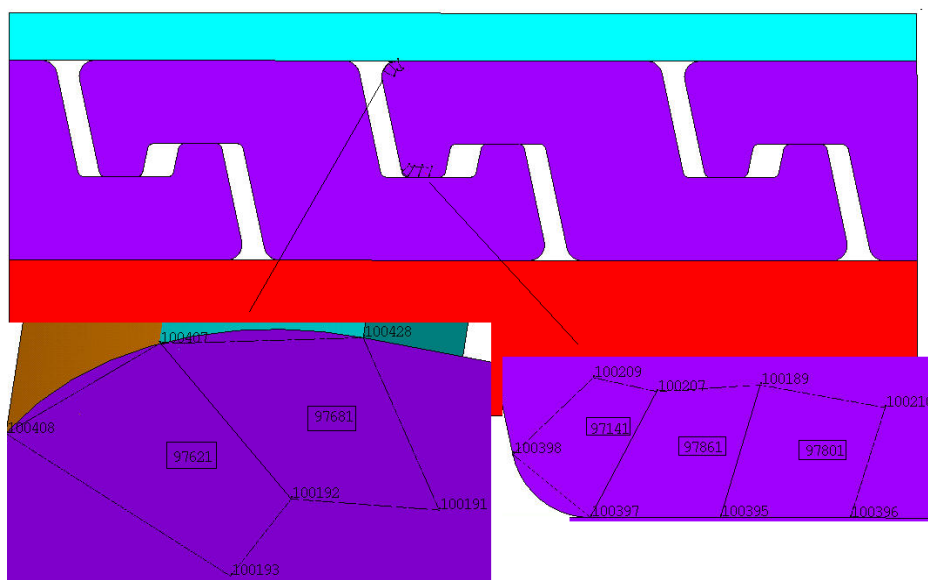
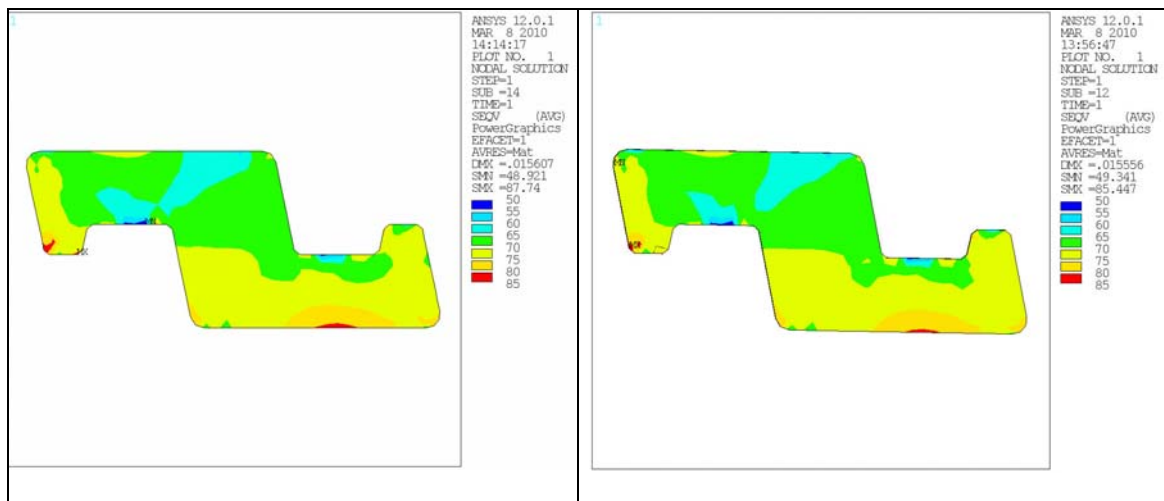


Figura 5-32 - Localização dos nós do modelo de elementos sólidos isoparamétricos.

Tabela 11 - Resultados de Tensão Von Mises (MPa) e deformações (mm).

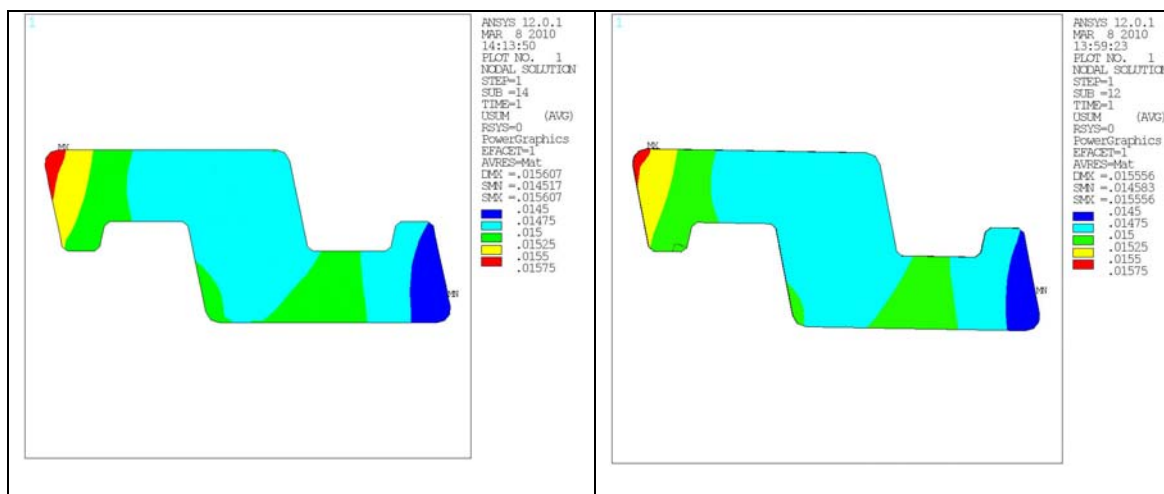
Número do Nó		Tensão Von Mises (MPa)		Deslocamento (mm)	
Modelo de elementos axissimétricos	Modelo de elementos sólidos isoparamétricos	Modelo de elementos axissimétricos	Modelo de elementos sólidos isoparamétricos	Modelo de elementos axissimétricos	Modelo de elementos sólidos isoparamétricos
8136	100398	105	102	0,0153	0,0153
8145	100428	81	80	0,0156	0,0155
8147	100408	72	72	0,0156	0,0155
8193	100207	87	85	0,0152	0,0152
8215	100209	86	85	0,0152	0,0152
8231	100192	70	72	0,0156	0,0155



(a) Modelo de elementos axissimétricos.

(b) Modelo de elementos sólidos isoparamétricos.

Figura 5-33 - Tensão Von Mises (MPa) do arame da armadura de pressão.



(a) Modelo de elementos axissimétricos.

(b) Modelo de elementos sólidos isoparamétricos.

Figura 5-34 – Deslocamento (mm) do arame da armadura de pressão.

Pode-se notar que o comportamento da tensão Von Mises e deformação ao longo da camada de pressão no modelo de elementos axissimétrico e sólidos isoparamétricos são muito similares e com isso, validam-se os resultados do modelo axissimétrico modelado com a mesma discretização da malha e número de passos do arame da armadura de pressão. Conclui-se que a análise realizada pelo modelo de elementos axissimétrico, que não necessita de grande tempo computacional, gera excelentes resultados.

CAPÍTULO 6 - ESTUDO DO DUTO FLEXÍVEL.

Neste capítulo, será descrito um estudo paramétrico e análise de fadiga determinística do duto flexível estudado.

6.1 Estudo paramétrico

O estudo paramétrico do duto flexível é realizado para entender melhor seu comportamento sob ação de carregamento axissimétrico. O duto original possui diâmetro interno de 2,5 mm e foi estudado no Capítulo 5. O modelo original pode ser visto na Figura 6-1.

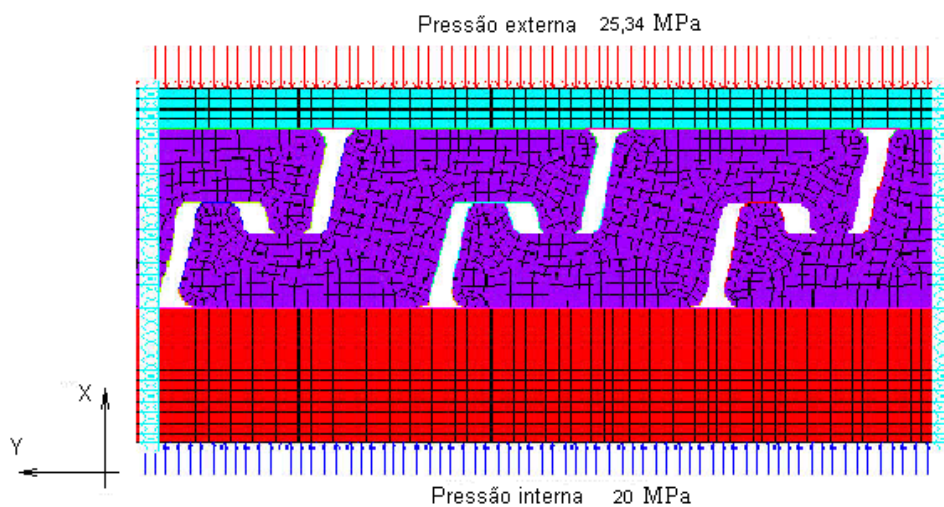


Figura 6-1 – Modelo original do estudo.

Variam-se os seguintes parâmetros, ilustrados na Figura 6-2:

- Espessura das camadas plásticas que a circundam;
- Material das camadas plásticas;
- Espaçamento entre os arames; e
- Valor das pressões interna e externa.

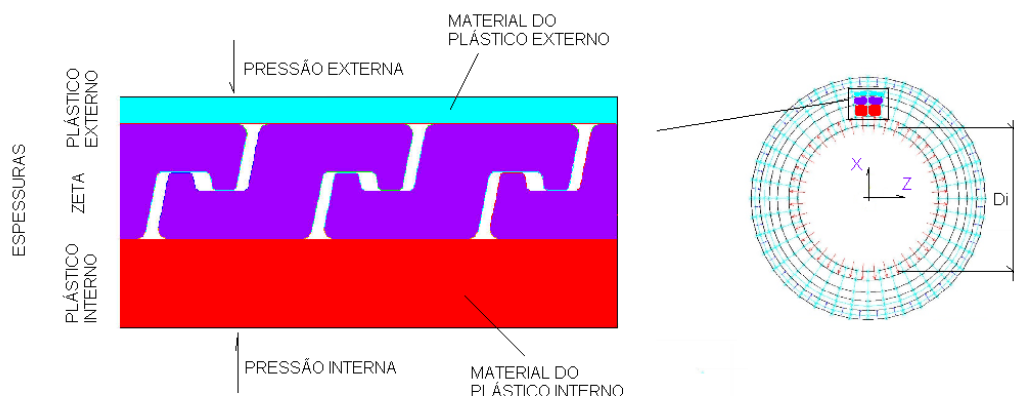


Figura 6-2 – Parâmetros estudados.

As pressões interna e externa são aplicadas e as distribuições de tensões normal e Von Mises ao longo da camada de pressão são analisadas.

Para melhor clareza do estudo paramétrico dos dutos flexíveis, as análises foram divididas em grupos de elementos axissiméticos:

- Grupo I: Variam-se as espessuras das camadas poliméricas que circundam a armadura de pressão;
- Grupo II: Variam-se os módulos de elasticidade das camadas poliméricas que circundam a armadura de pressão;
- Grupo III: Analisa-se o modelo com a armadura de pressão com espaçamento máximo e mínimo entre os arames; e
- Grupo IV: Variam-se as pressões interna e externa nas paredes do duto.

A malha de elementos finitos é formada por elementos planos axissimétricos e composta pela armadura de pressão e as camadas plásticas que a circundam, possui 4 passos e a malha foi discretizada para manter a dimensão do elemento de 0,4 mm.

Os carregamentos axissimétricos aplicados no modelo foram 20 MPa para pressão interna e 25,34 MPa para pressão externa. Estas pressões foram aplicadas tanto em conjunto quanto independentemente, de acordo com a análise.

Os elementos utilizados foram os mesmos descritos no Capítulo 5. O coeficiente de atrito igual a 0,1 se manteve em todas as análises. Como condição de contorno, a translação na direção Y foi restringida em suas seções externas.

6.1.1 Grupo I

Neste grupo, estuda-se o comportamento do duto variando as espessuras das camadas poliméricas que circundam a camada da armadura de pressão.

Fixa-se o diâmetro interno em 2,5" e espessura da camada de pressão em 6,2 mm. O material da barreira de pressão é poliamida 12 e possui o módulo de Young (E) de 284 MPa e a camada antidesgaste é composta por poliamida 11, com módulo de Young no valor de 301 MPa.

Os dutos foram analisadas com espessuras 4,9, 7,35 e 9,8 mm na barreira de pressão e 1,5, 2,25 e 3 mm na camada antidesgaste.

6.1.1.1 Análises realizadas

Para determinação da resposta ao longo da armadura de pressão, foram realizadas as análises apresentadas na Tabela 12, com o intuito de estudar o comportamento do duto flexível sob variação dos parâmetros citados. Nos carregamentos 1, 2, 3, 12 e 15 foi aplicada apenas pressão interna, nos carregamentos 4, 5, 6, 10 e 11 foram aplicadas pressões internas e externas e nos demais carregamentos apenas pressão externa.

Tabela 12 - Resumo das análises do Grupo I.

Análise	Di (pol)	Espessura (mm)			Pressão de contato interna (MPa)	Pressão de contato externa (MPa)
		Barreira de pressão	Zeta	Camada antidesgaste		
1	2,5	4,9	6,2	1,5	20	16,64
2	2,5	7,35	6,2	1,5	20	15,14
3	2,5	9,8	6,2	1,5	20	13,83
4	2,5	4,9	6,2	1,5	20	25,34
5	2,5	7,35	6,2	1,5	20	23,78
6	2,5	9,8	6,2	1,5	20	22,42
7	2,5	4,9	6,2	1,5	2,27	23,08
13	2,5	7,35	6,2	1,5	2,03	21,74
14	2,5	9,8	6,2	1,5	1,9	20,56
7	2,5	4,9	6,2	1,5	2,27	23,08
8	2,5	4,9	6,2	2,25	2,26	22,65
9	2,5	4,9	6,2	3	2,25	22,24
4	2,5	4,9	6,2	1,5	20	25,34
10	2,5	4,9	6,2	2,25	20	24,84
11	2,5	4,9	6,2	3	20	24,36
1	2,5	4,9	6,2	1,5	20	16,64
12	2,5	4,9	6,2	2,25	20	16,17
15	2,5	4,9	6,2	3	20	15,71

6.1.1.2 Resultados Obtidos

Pode-se observar vendo a Figura 6-3 que o aumento da espessura da barreira de pressão e aplicação apenas da pressão interna (análises 1, 2 e 3) causa uma grande redução de tensão normal na armadura de pressão, quando se aplica somente a pressão externa (análises 7, 8 e 9) não causa aumento de tensão normal e quando as duas pressões atuam juntas (análises 4, 5 e 6), a tensão reduz apenas 6%.

O aumento da espessura da camada antidesgaste e aplicação de somente pressão interna (análises 1, 14 e 15) causa uma redução de tensão normal na armadura de pressão, na ordem de 40%, quando se aplica somente a pressão externa (análises 7, 10 e 11) não causa variação de tensão normal e quando as duas pressões atuam juntas (análises 4, 12 e 13), a tensão reduz apenas 3%.

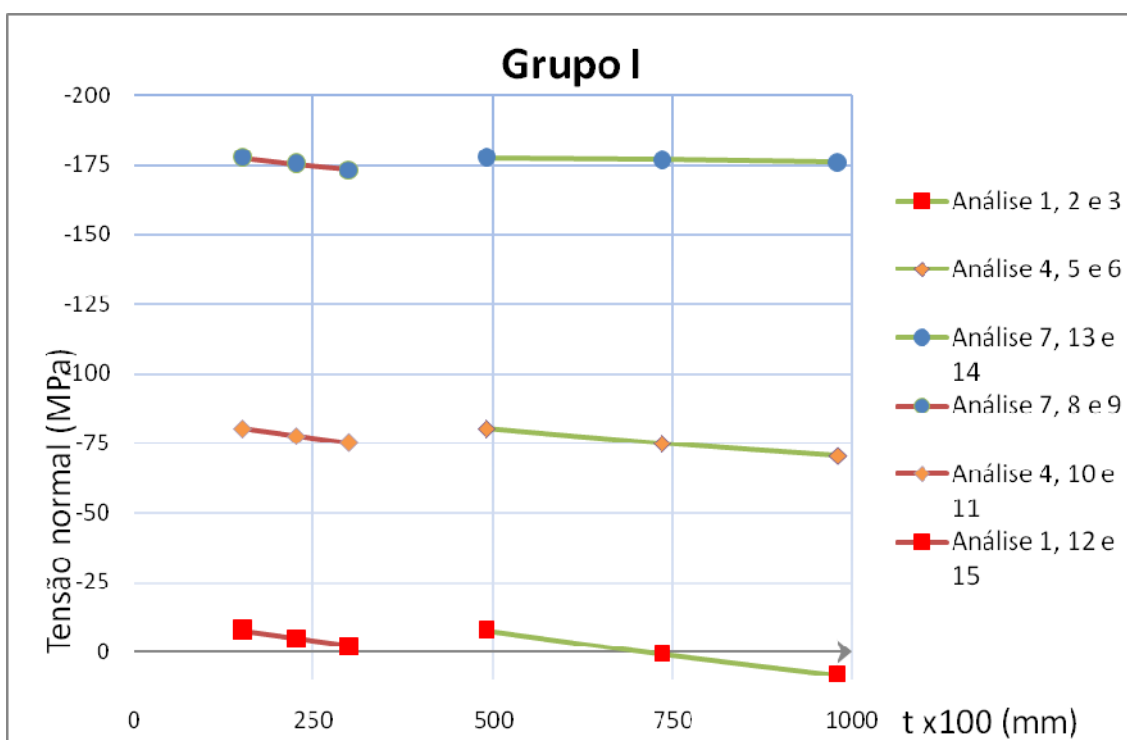


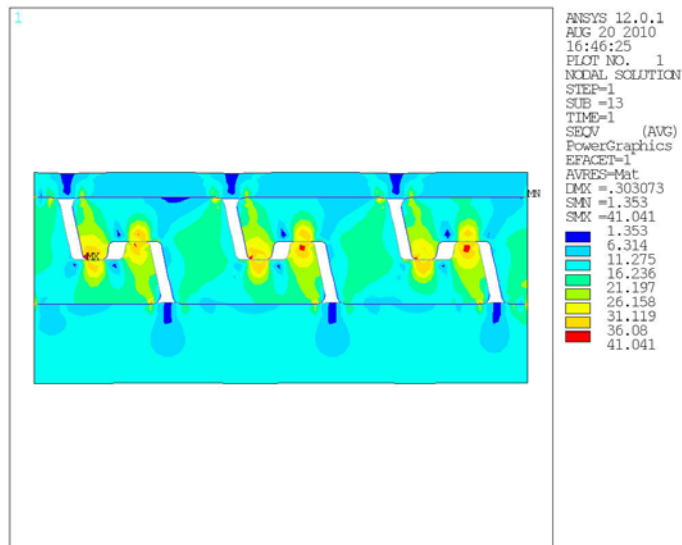
Figura 6-3 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação de espessuras da barreira de pressão e camada antidesgaste.

Os resultados de distribuição de tensão Von Mises e normal das análises de elementos axissimétricos estão ilustrados nas Figuras 6-4 a 6-15. Os valores das tensões normal e de Von Mises médias, assim como os fatores de concentração obtidos estão resumidos na Tabela 13.

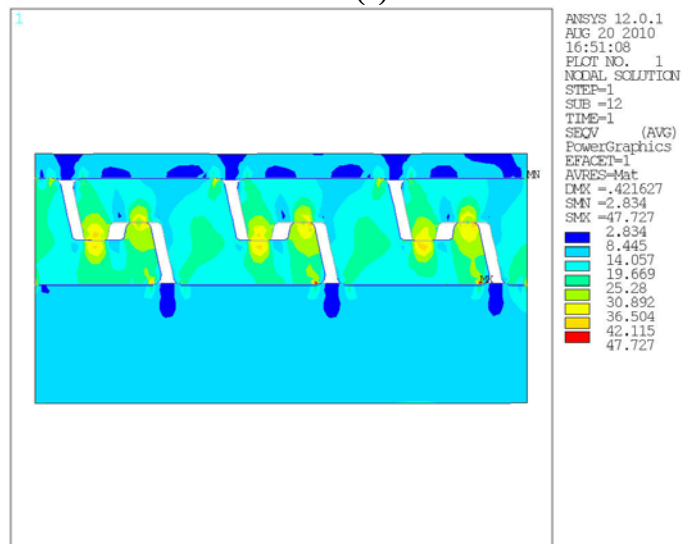
Tabela 13 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão.

Análise	Tensão Von Mises (MPa)		Tensão normal σ_z (MPa)	
	média	SCF	média	SCFz
1	17,4	2,2	-7,7	2,6
2	19,3	1,9	0,8	-18,1
3	23,1	1,7	8,2	2,3
4	70,5	1,1	-80,1	1,2
5	65,8	1,1	-74,8	1,3
6	61,9	1,1	-70,5	1,3
7	169,4	1,1	-177,3	1,1
8	169,4	1,1	-176,8	1,1
9	168,9	1,1	-175,9	1,1
7	169,4	1,1	-177,3	1,1
10	167,5	1,1	-175,2	1,1
11	165,6	1,1	-173,3	1,1
4	70,5	1,1	-80,1	1,2
12	68,1	1,1	-77,6	1,2
13	65,9	1,1	-75,1	1,2
1	17,4	2,2	-7,7	2,6
14	17,9	2,1	-4,8	3,5
15	18,8	2,1	-2,1	7

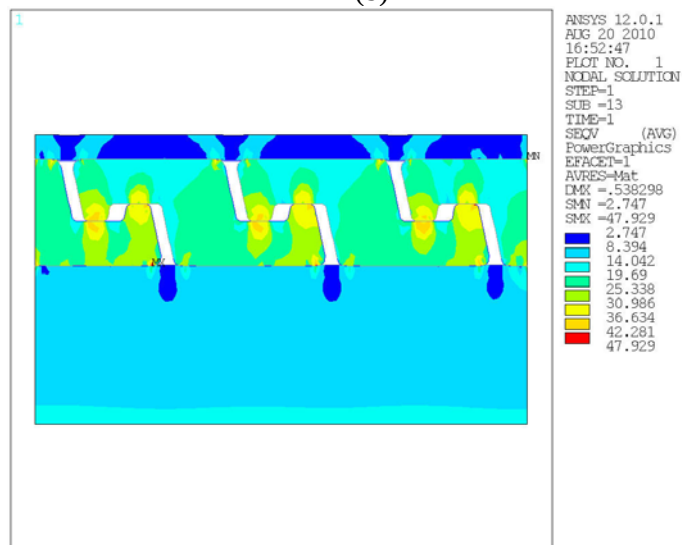
As tensões médias σ_z se mantêm em praticamente toda a seção exceto próximo à região de contato interno, onde se forma concentração de tensões. Os resultados de tensão normal média na armadura de pressão das análises deste grupo são praticamente estáveis para pressão externa e se alteram bastante no carregamento de pressão interna.



(a)

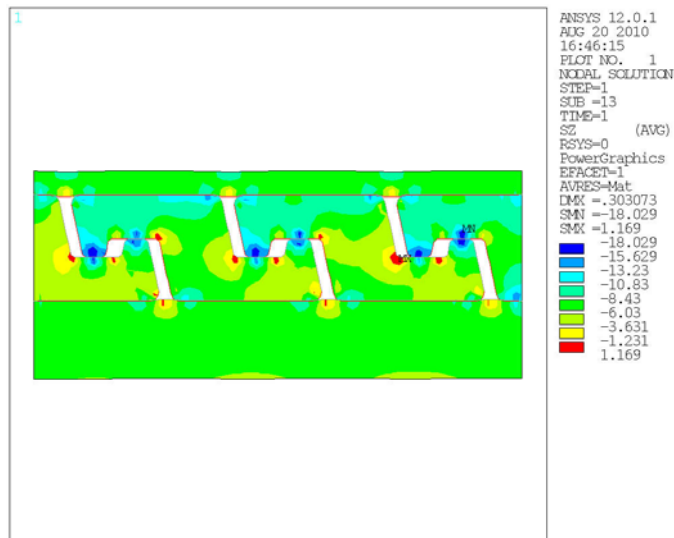


(b)

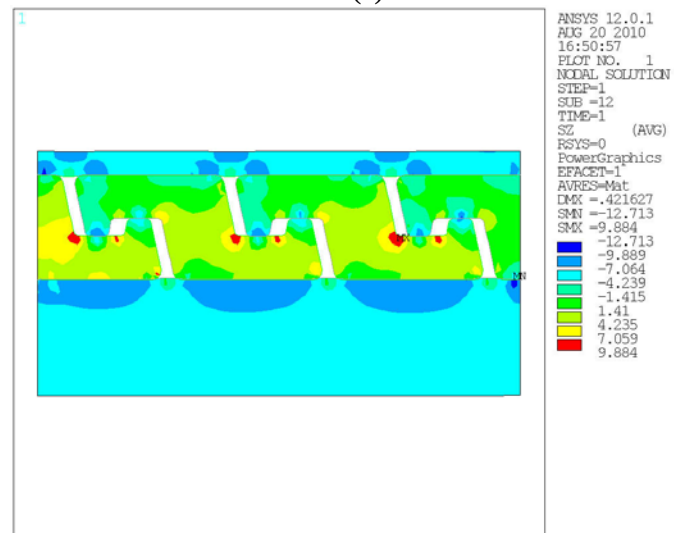


(c)

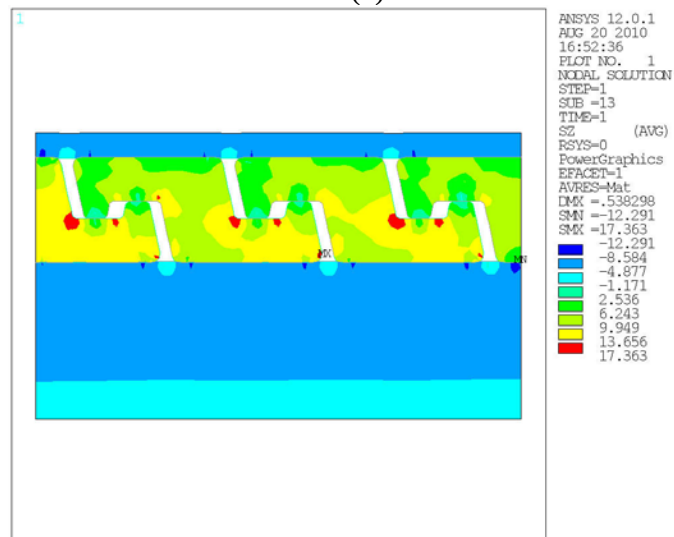
Figura 6-4 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 1, (b) 2 e (c) 3.



(a)

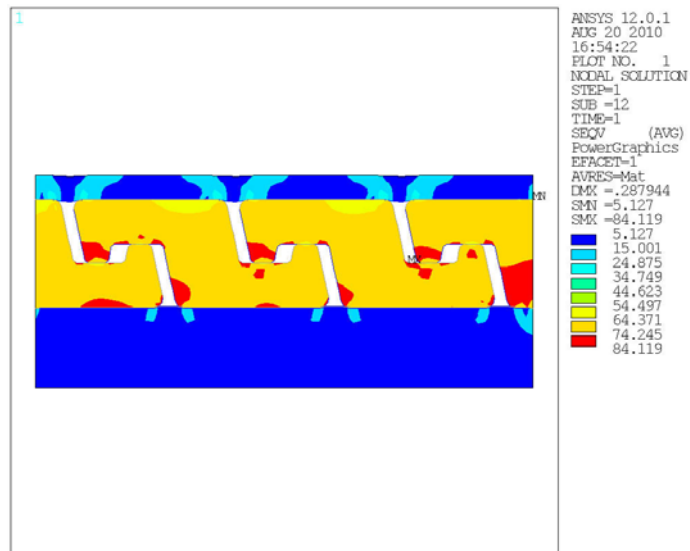


(b)

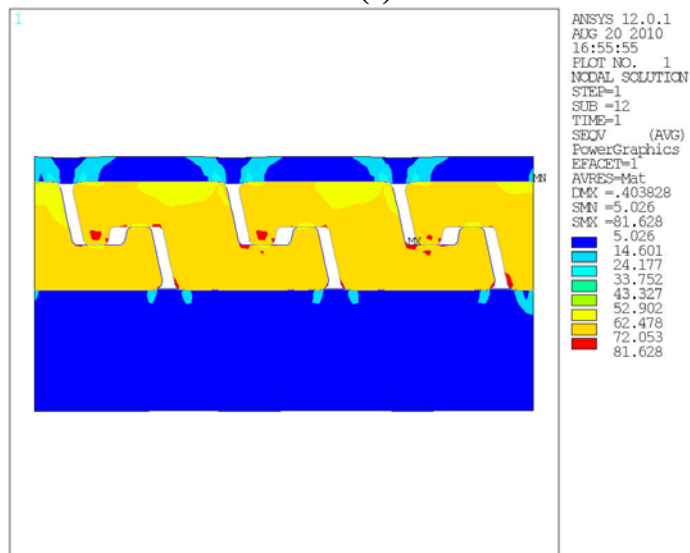


(c)

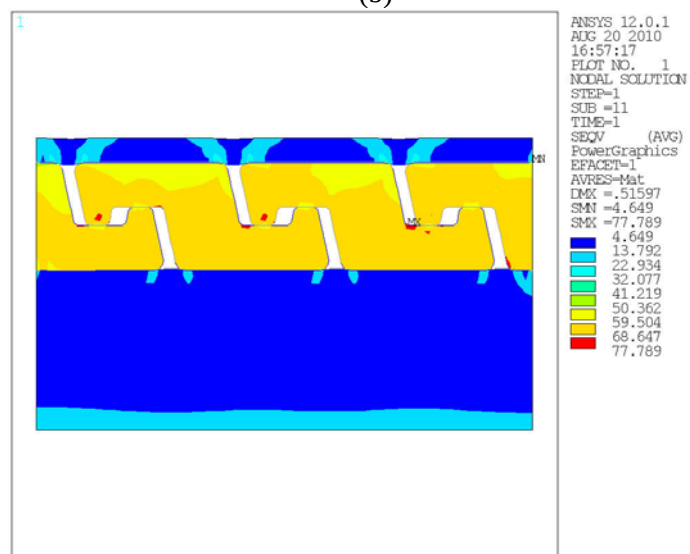
Figura 6-5 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 1, (b) 2 e (c) 3.



(a)

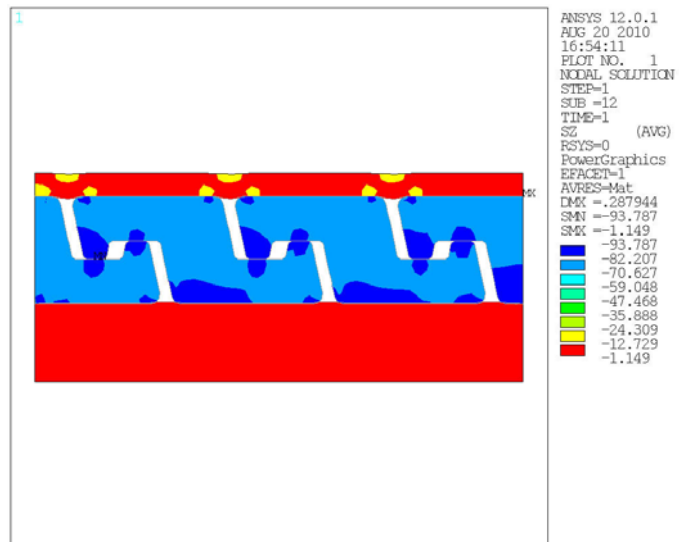


(b)

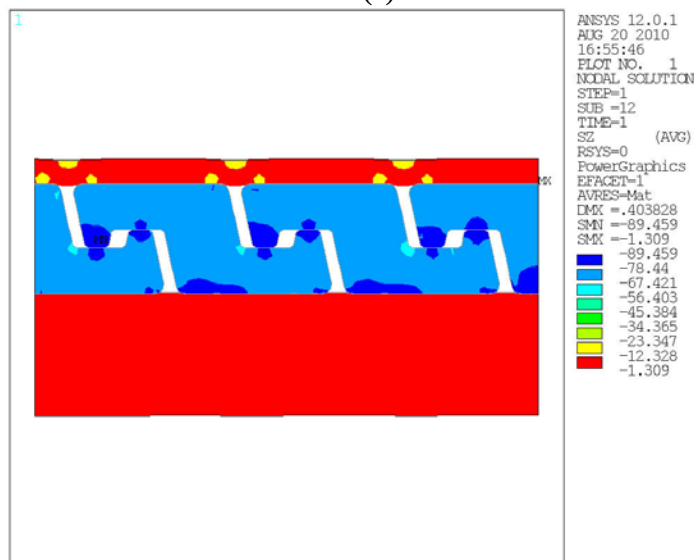


(c)

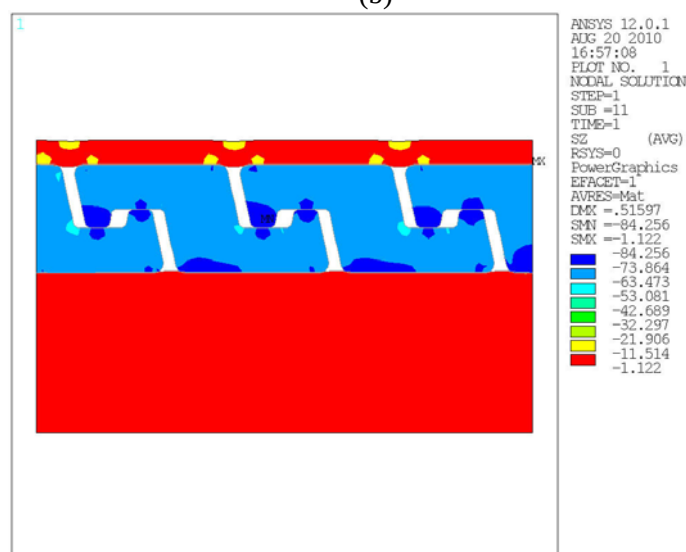
Figura 6-6 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 4, (b) 5 e (c) 6.



(a)

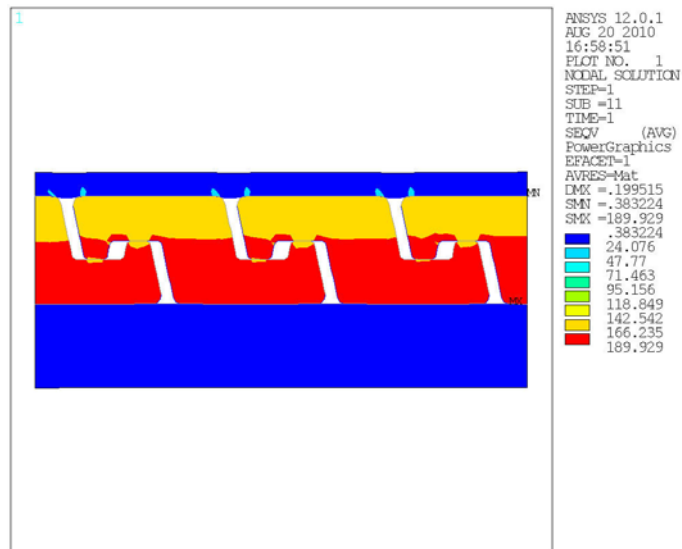


(b)

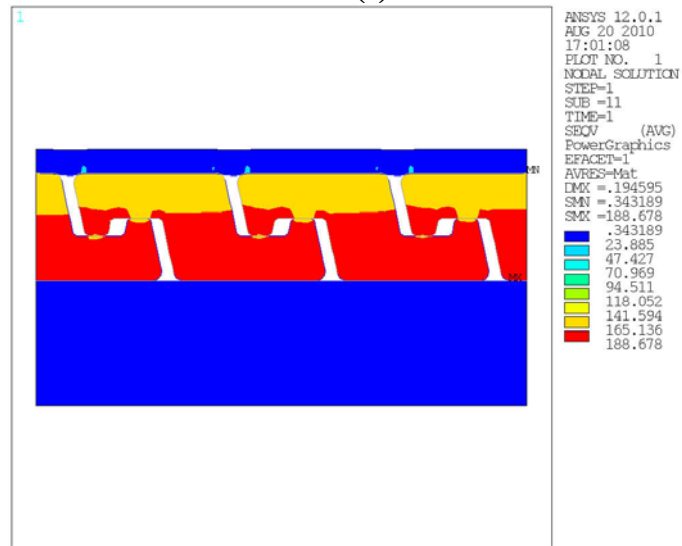


(c)

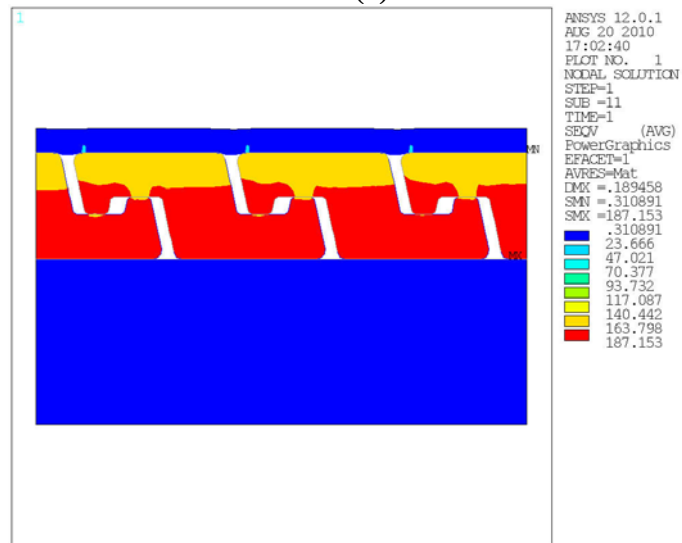
Figura 6-7 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 4, (b) 5 e (c) 6.



(a)

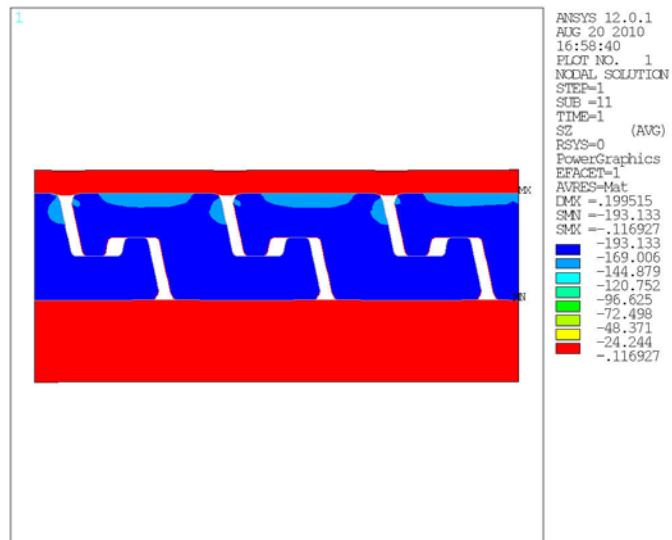


(b)

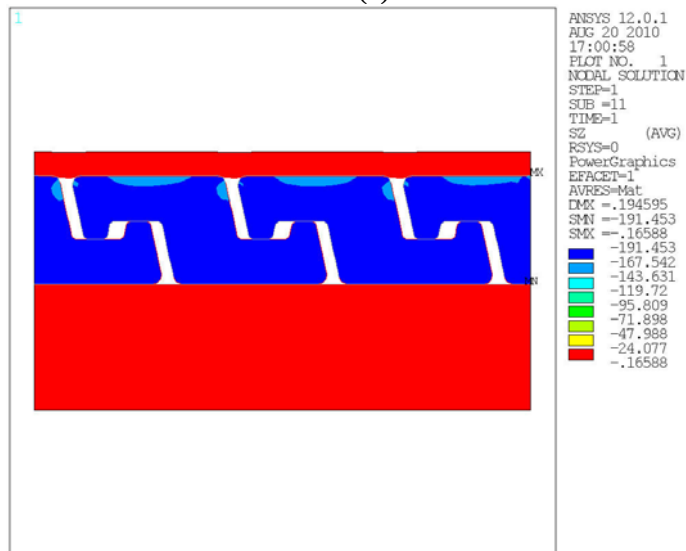


(c)

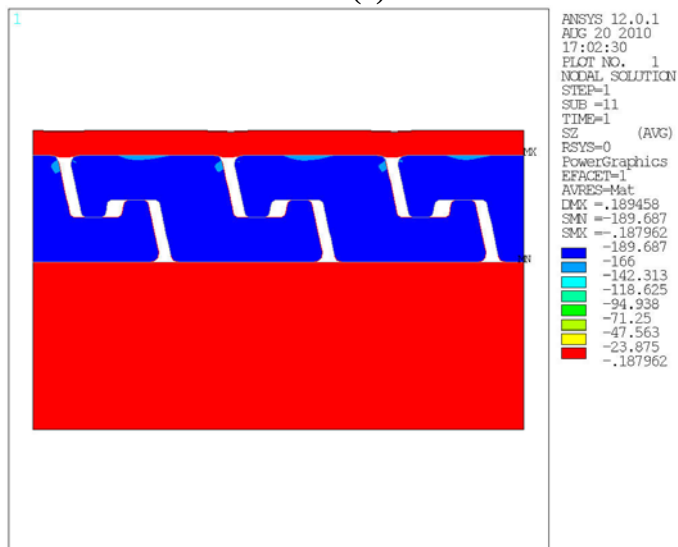
Figura 6-8 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 7, (b) 8 e (c) 9.



(a)

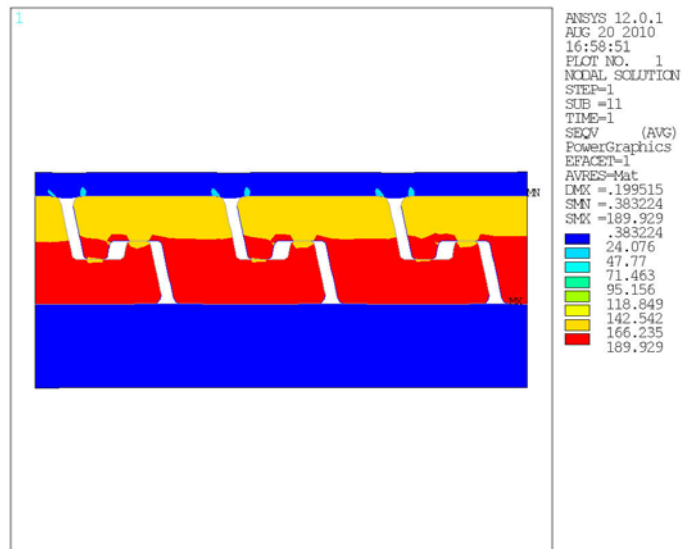


(b)

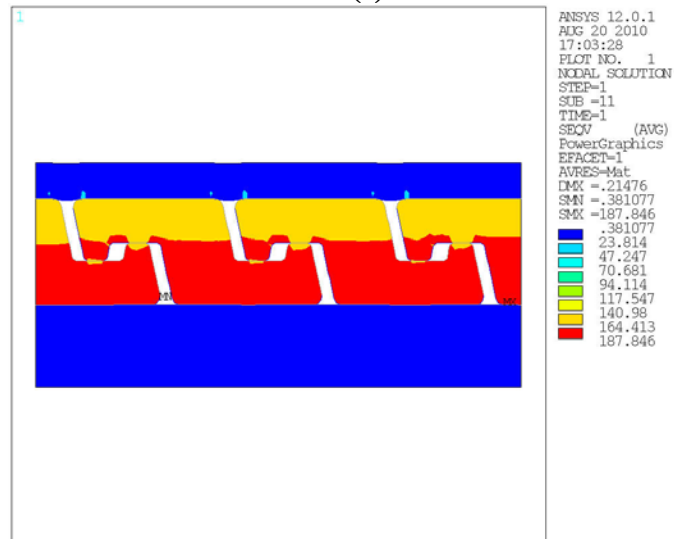


(c)

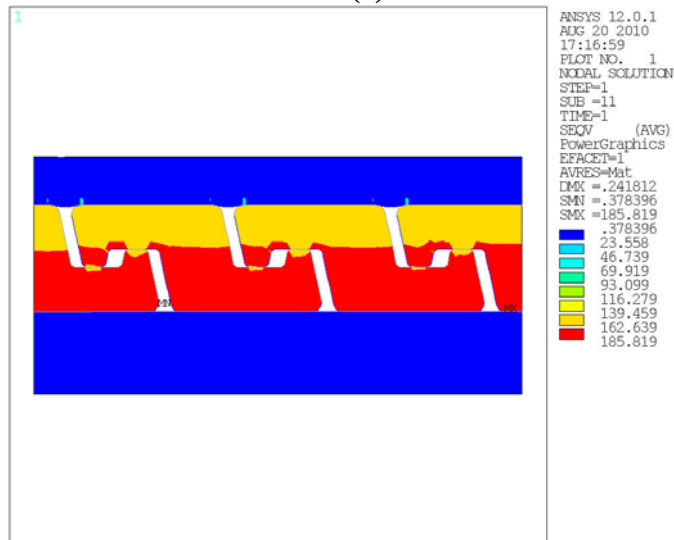
Figura 6-9 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 7, (b) 8 e (c) 9.



(a)

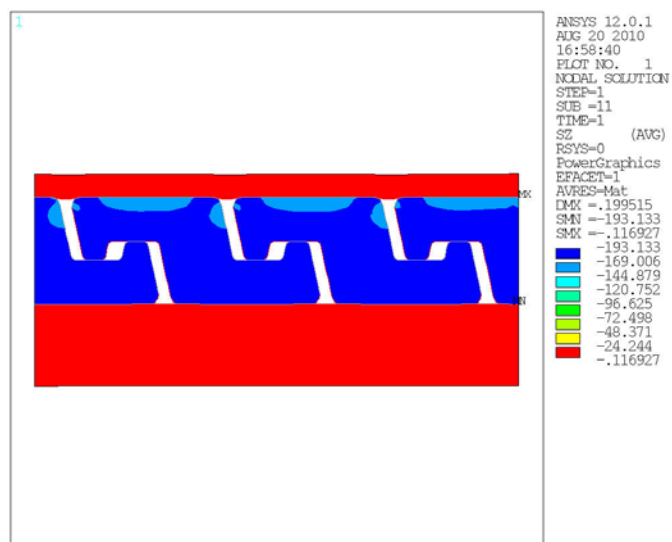


(b)

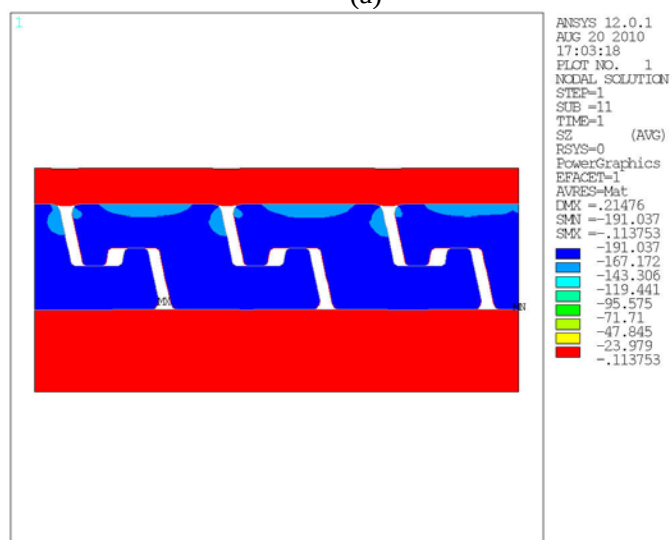


(c)

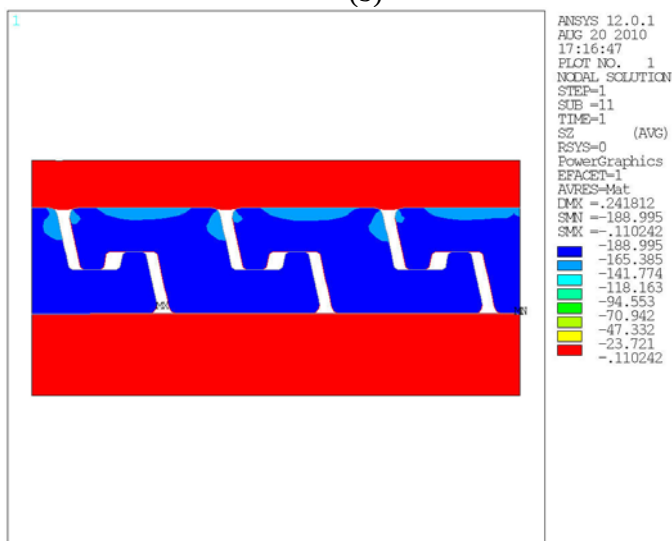
Figura 6-10 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 7, (b) 10 e (c) 11.



(a)

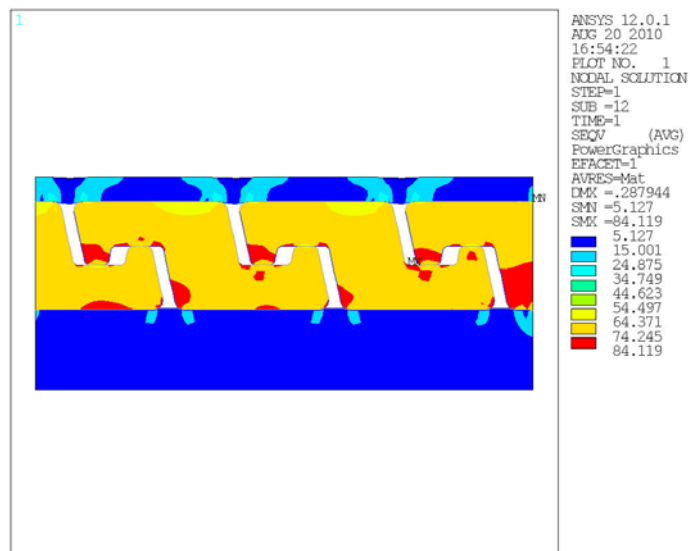


(b)

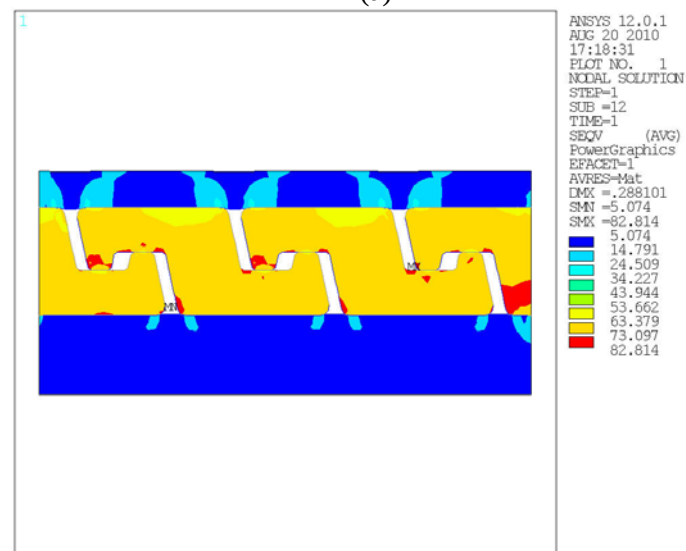


(c)

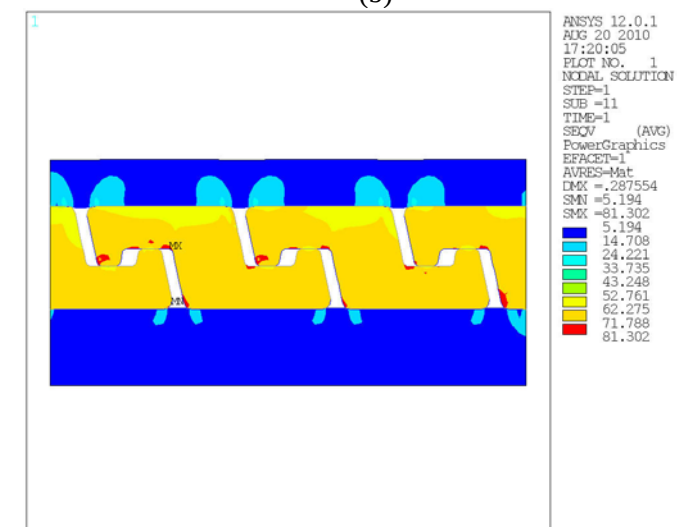
Figura 6-11 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 7, (b) 10 e (c) 11.



(a)

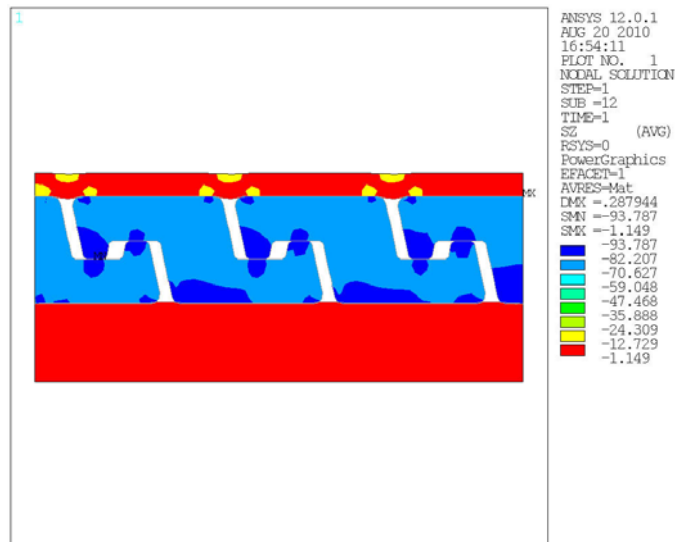


(b)

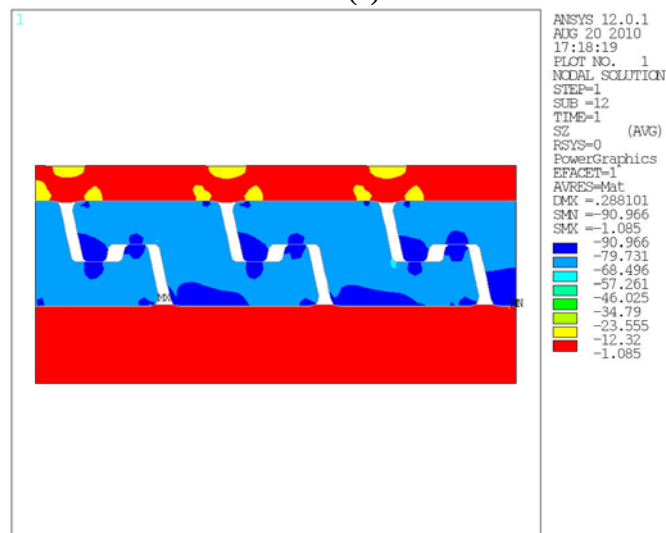


(c)

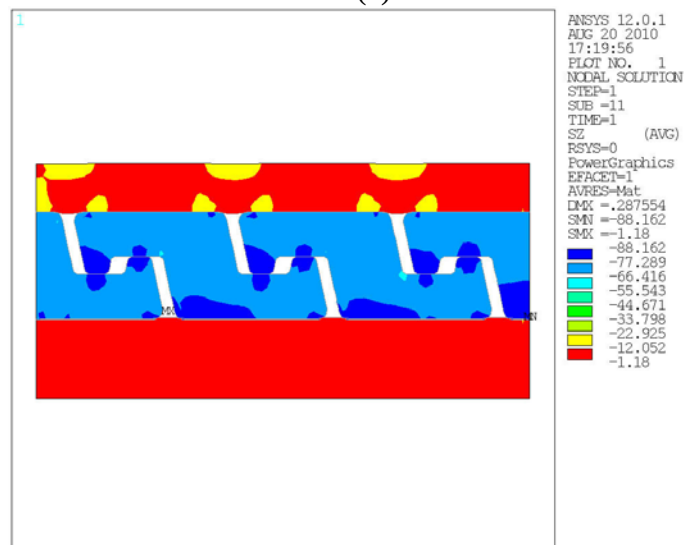
Figura 6-12 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 4, (b) 12 e (c) 13.



(a)

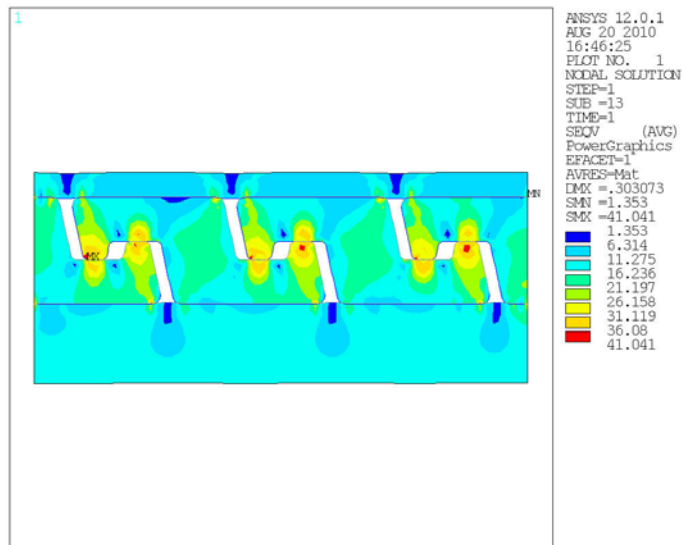


(b)

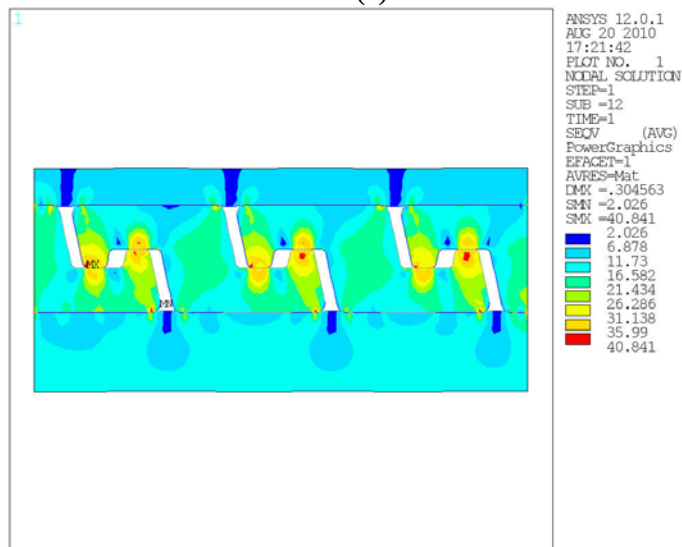


(c)

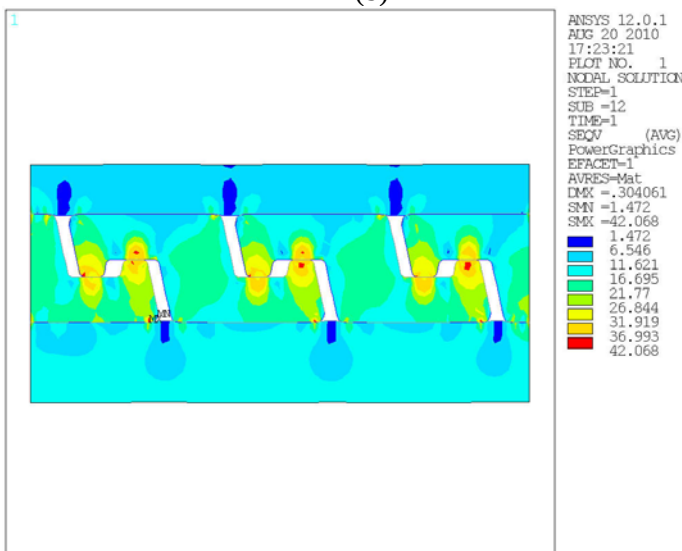
Figura 6-13 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 4, (b) 12 e (c) 13.



(a)

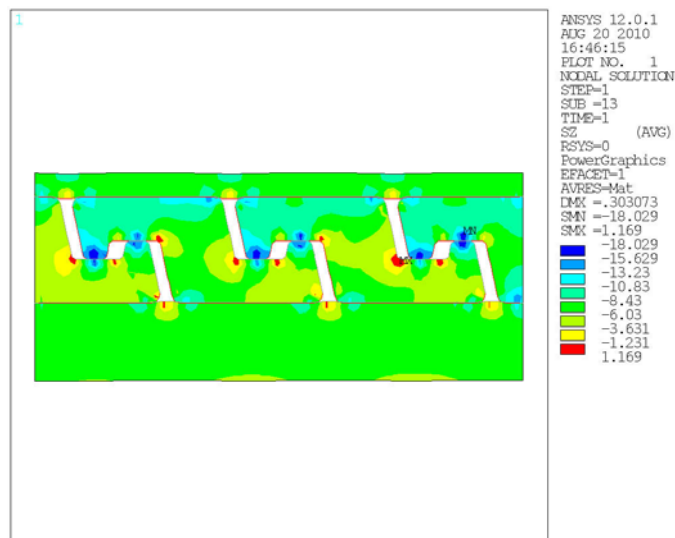


(b)

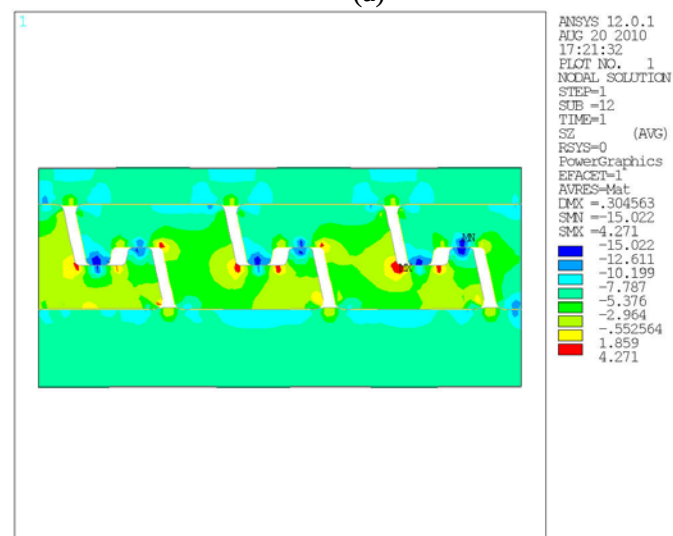


(c)

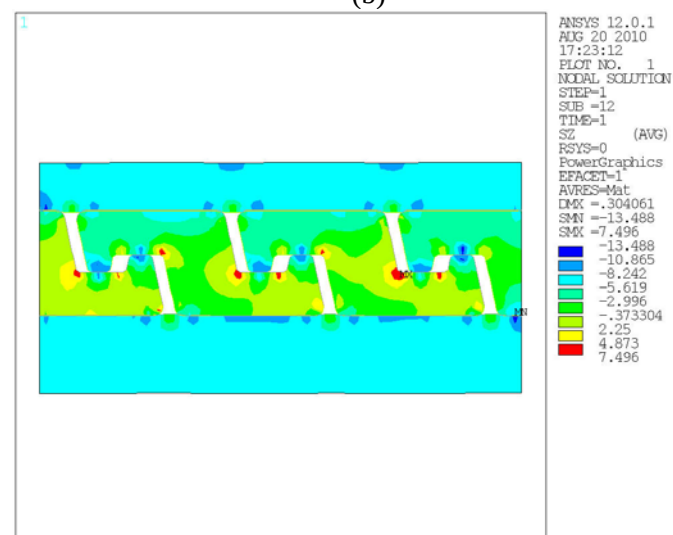
Figura 6-14 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 1, (b) 14 e (c) 15.



(a)



(b)



(c)

Figura 6-15 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 1, (b) 14 e (c) 15.

Na Tabela 14, apresenta-se o resultado de tensões no ponto de maior tensão Von Mises ocorrido na camada da armadura de pressão.

Tabela 14 - Resultados de tensões (MPa) no ponto de maior tensão Von Mises.

Análise	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	σ_{vm}	σ_{vm}/σ_z
1	-43,8	-4,6	-17,5	9,1	38,1	-2,2
2	-40,4	-0,2	-6,6	-1,9	37,5	-5,7
3	-37,8	-3,4	1,9	6,4	38,9	20,6
4	-58,1	-6	-94,1	11,5	79,3	-0,8
5	-51,9	0,5	-84,1	3,9	74,3	-0,9
6	-50,7	0,1	-79,6	-4,2	70,3	-0,9
7	-3,5	4,1	-187,2	-0,4	187,6	-1
8	3,6	-3,1	-186,3	0	186,6	-1
9	-2,8	3,5	-184,9	0	185,3	-1
7	-3,5	4,1	-187,2	-0,4	187,6	-1
10	-1,9	-1,2	-187,1	0,9	185,5	1
11	-1,9	-1,2	-185	0,9	183,5	-1
4	-58,1	-6	-94,1	11,5	79,3	-0,8
12	-56,4	-5,8	-90,8	11,2	76,6	-0,8
13	-55,4	-5,7	-87,9	11	74,2	-0,8
1	-43,8	-4,6	-17,5	9,1	38,1	-2,2
14	-40,9	0,7	-9,1	-1,6	37,8	-4,1
15	-40,9	0,7	-6,5	-1,6	38,6	-5,9

6.1.2 Grupo II

Neste grupo, estuda-se o comportamento do duto variando os módulos de elasticidade das camadas poliméricas que circundam a camada da armadura de pressão. Estes estão descritos na Tabela 15.

Foram analisadas dutos com diâmetro interno de 2,5", espessura da armadura de pressão de 6,2 mm, da barreira de pressão de 4,9 mm e a camada antidesgaste mede 1,5 mm.

Os materiais estudados para a barreira de pressão são o termo plástico Polietileno, polímero vegetal PA 11 e poliéster (PO), além do usado no estudo original PA 12 (módulo de Young, $E = 284$ MPa). Para o estudo camada antidesgaste, utilizaram-se os seguintes materiais: polietileno, polietileno de alta densidade (PEAD) e poliamida (BF01), além do usado no estudo original PA 11 ($E = 301$ MPa).

Tabela 15 – Propriedade das camadas poliméricas adjacentes à camada da armadura de pressão.

	Material	Módulo de Young (MPa)
Barreira de pressão	Polietileno (PE)	200
	PA 11 (Rilsan)	301
	Poliéster (PO)	3000
Camada antidesgaste	Polietileno (PE)	200
	Polietileno de alta densidade (PEAD)	800
	Poliamida (BF01)	3000

6.1.2.1 Análises realizadas

Para determinação da resposta ao longo da armadura de pressão, foram realizadas diversas análises apresentadas na Tabela 16, com o intuito de estudar o comportamento do duto flexível sob variação dos parâmetros citados. Nos carregamentos 1, 16, 17, 18, 7, 25, 26 e 27 foi aplicada apenas a pressão interna, nos carregamentos 4, 19, 20, 21, 4, 28, 29 e 30 foram aplicadas pressões internas e externas e nos demais carregamentos apenas a pressão externa.

Tabela 16 - Resumo das análises do Grupo II.

Análise	E (MPa)		Pressão de contato interna (MPa)	Pressão de contato externa (MPa)
	Barreira de pressão	Camada antidesgaste		
16	200	301	20	16,66
1	284	301	20	16,64
17	301	301	20	16,64
18	3000	301	20	16,13
19	200	301	20	25,36
4	284	301	20	25,34
20	301	301	20	25,33
21	3000	301	20	24,75
22	200	301	1,72	23,10
7	284	301	2,27	23,08
23	301	301	2,3	23,08
24	3000	301	7,37	22,57
25	284	200	2,28	23,03
7	284	301	2,27	23,08
26	284	800	2,27	23,15
27	284	3000	2,26	23,175
28	284	200	20	25,27

4	284	301	20	25,34
29	284	800	20	25,44
30	284	3000	20	25,5
31	284	200	20	16,6
1	284	301	20	16,64
32	284	800	20	16,72
33	284	3000	20	16,76

6.1.2.2 Resultados Obtidos

Pode-se observar vendo a Figura 6-16 que o aumento do módulo de Young da barreira de pressão, e independentemente da pressão aplicada, causa uma redução de tensão normal na armadura de pressão, na ordem de 2%.

O aumento do módulo de Young da camada antidesgaste e aplicação de somente pressão interna (análises 31, 1, 32 e 33) causam um aumento de tensão normal na armadura de pressão, na ordem de 3%, quando se aplica somente a pressão externa (análises 25, 7, 26 e 27) não causa variação de tensão normal e quando as duas pressões atuam juntas (análises 28, 4, 29 e 30), a tensão aumenta menos que 0,5%.

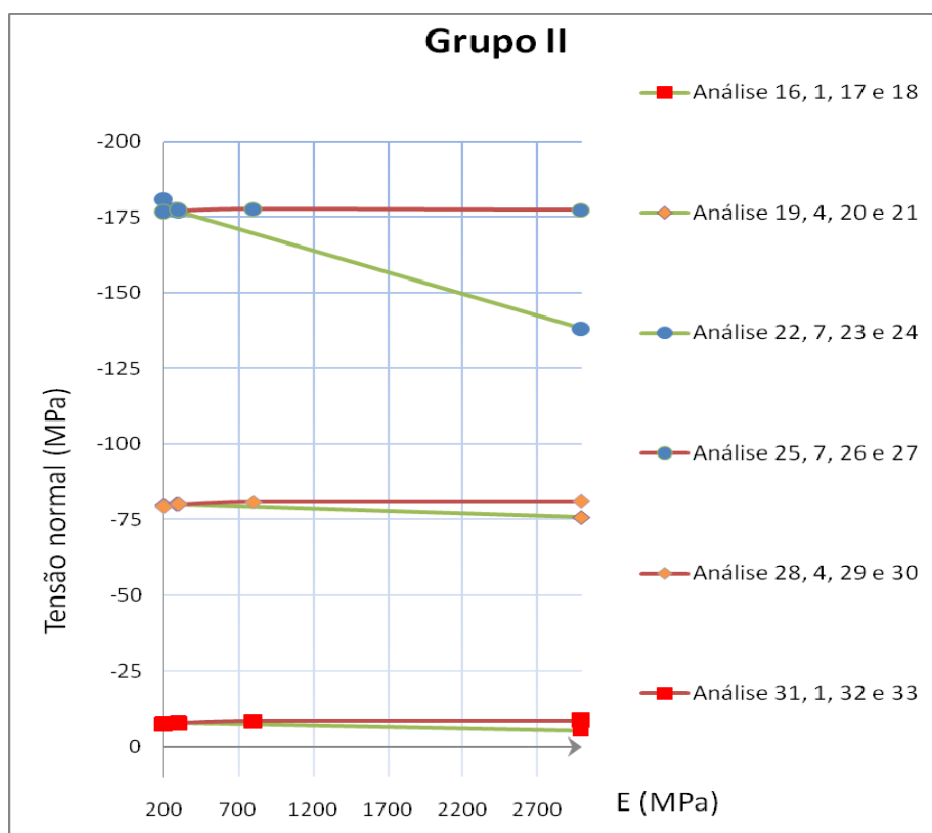


Figura 6-16 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação do material da barreira de pressão e camada antidesgaste.

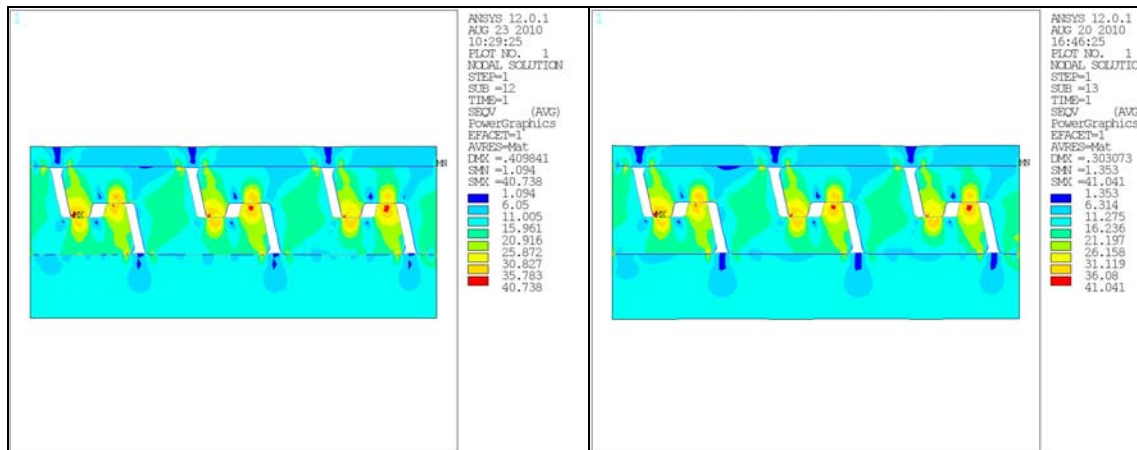
Nota-se que a tensão normal média e as concentrações de tensões praticamente não se alteram quando se varia os módulos de elasticidade das camadas poliméricas adjacentes a camada da armadura de pressão.

Os resultados de distribuição de tensão Von Mises e normal das análises de elementos axissimétricos estão ilustrados nas Figuras 6-17 a 6-28. Os valores das tensões médias, assim como os fatores de concentração criados estão resumidos na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão.

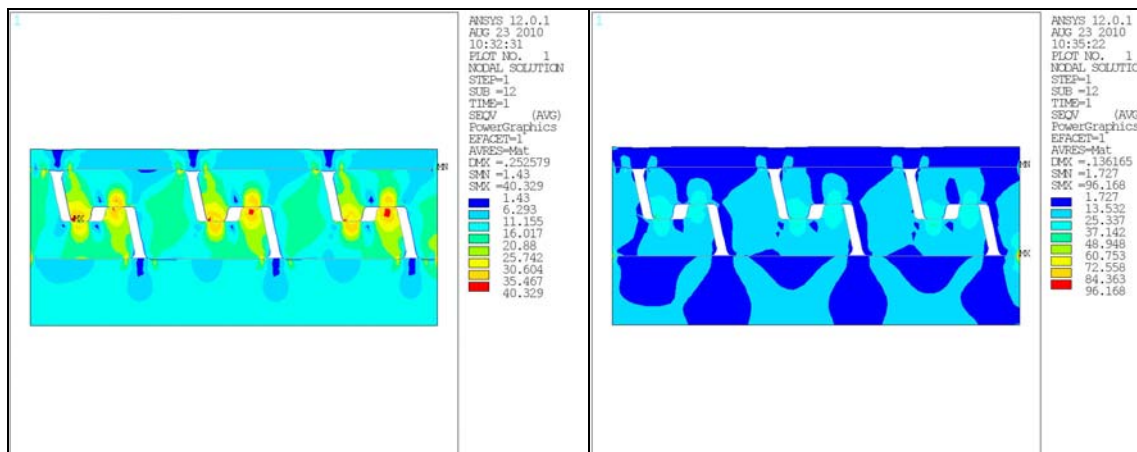
Análise	Tensão Von Mises (MPa)		Tensão σ_z (MPa)	
	média	SCF	média	SCFz
16	17,5	2,2	-7,6	2,6
1	17,4	2,2	-7,7	2,6
17	17,4	2,2	-7,9	2,6
18	17,8	2,2	-5,2	3,3
19	70,3	1,1	-80	1,2
4	70,5	1,1	-80,1	1,2
20	70,6	1,1	-80,2	1,2
21	66,6	1,1	-75,8	1,2
22	173,3	1,1	-181,1	1,1
7	169,4	1,1	-177,3	1,1
23	169,1	1,1	-177	1,1
24	129,6	1,1	-138,2	1,1
25	168,9	1,1	-176,7	1,1
7	169,4	1,1	-177,3	1,1
26	170	1,1	-177,8	1,1
27	169,8	1,1	-177,5	1,1
28	69,8	1,1	-79,4	1,2
4	70,5	1,1	-80,1	1,2
29	71,3	1,1	-81	1,2
30	71,6	1,1	-81,1	1,2
31	17,4	2,2	-7,4	2,6
1	17,4	2,2	-7,7	2,6
32	17,5	2,2	-8,4	2,5
33	17,5	2,2	-8,6	2,5

As tensões normais médias σ_z se mantêm em praticamente toda a seção exceto próximo a região de contato interno, apenas formando concentração de tensões próxima a região de contato. Os resultados de tensões das análises não se alteram.



(a)

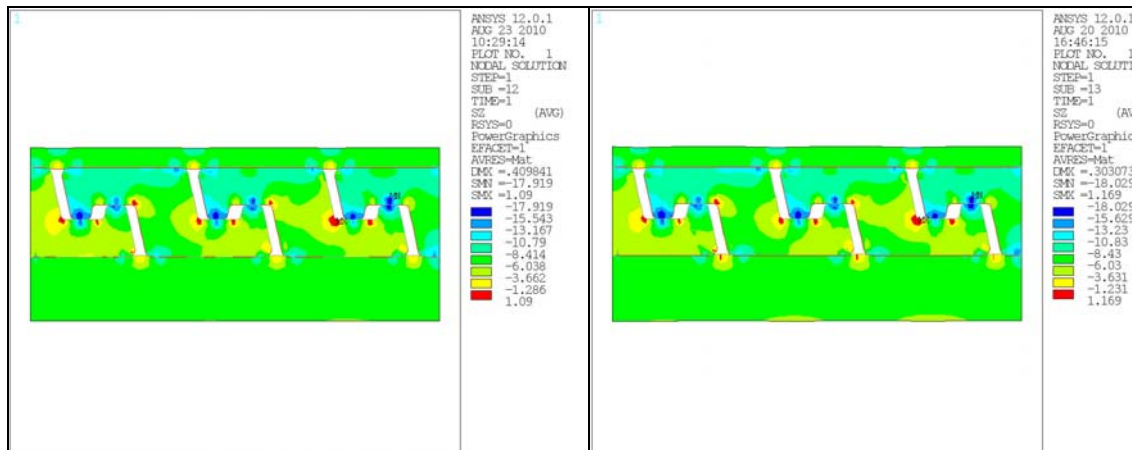
(b)



(c)

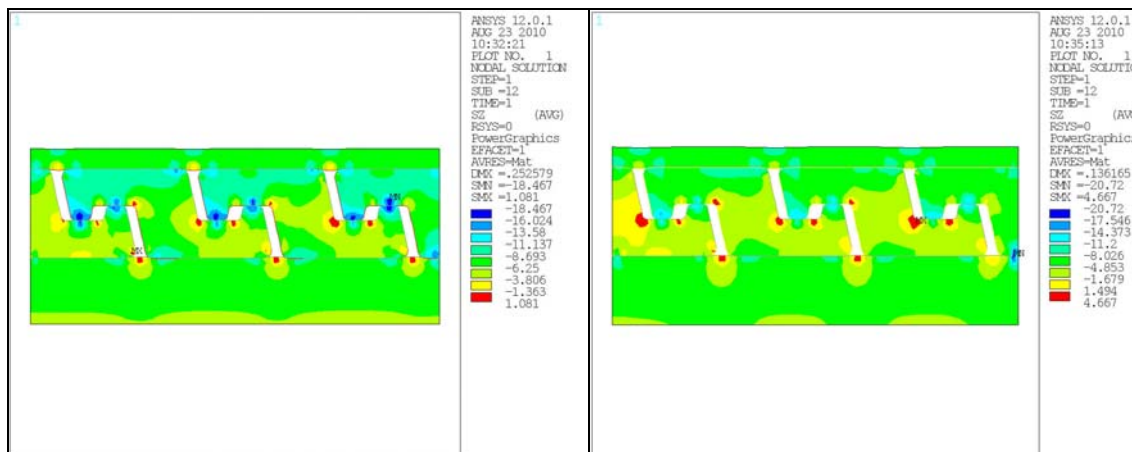
(d)

Figura 6-17 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 16, (b) 1, (c) 17 e (d) 18.



(a)

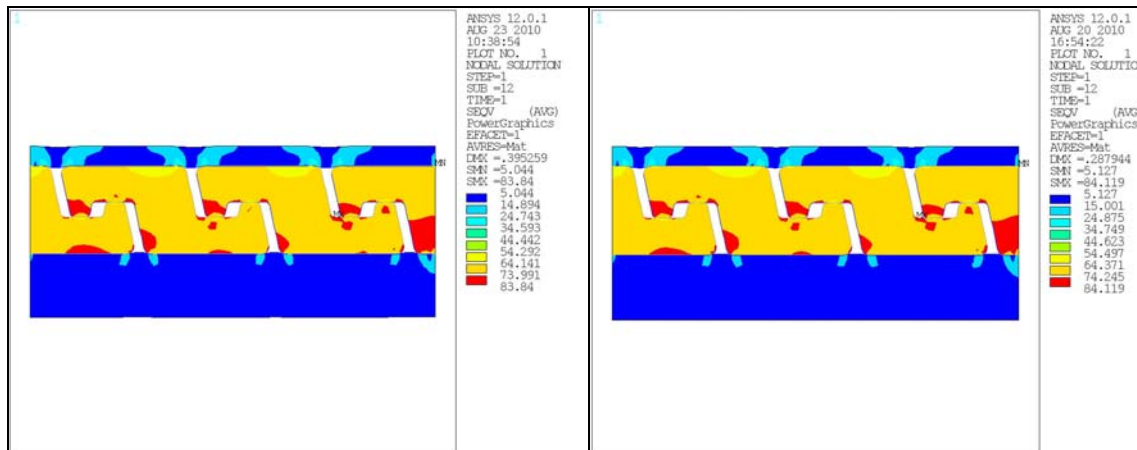
(b)



(c)

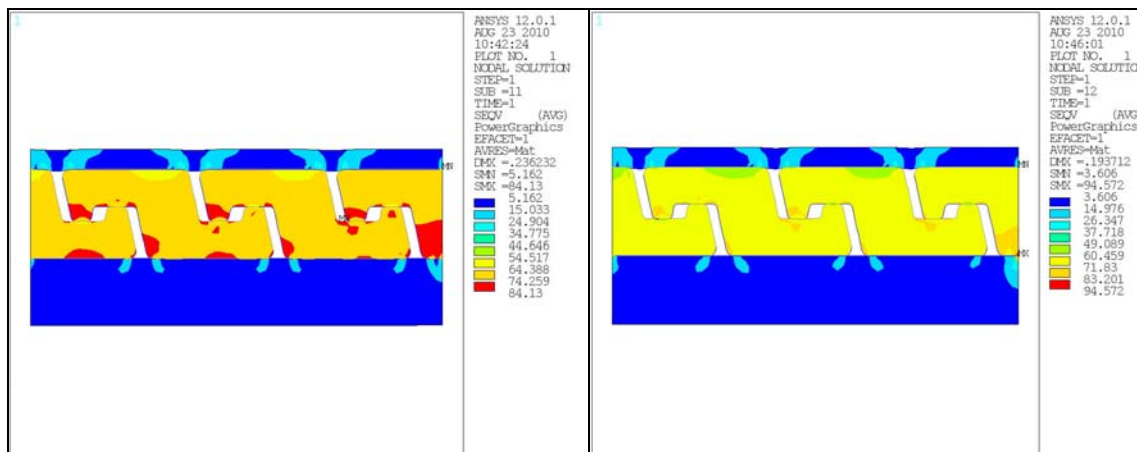
(d)

Figura 6-18 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 16, (b) 1, (c) 17 e (d) 18.



(a)

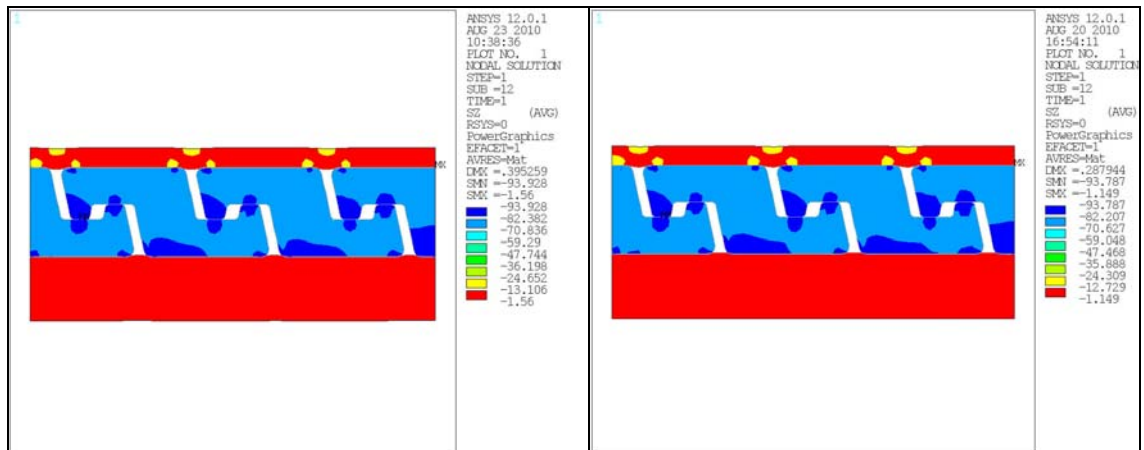
(b)



(c)

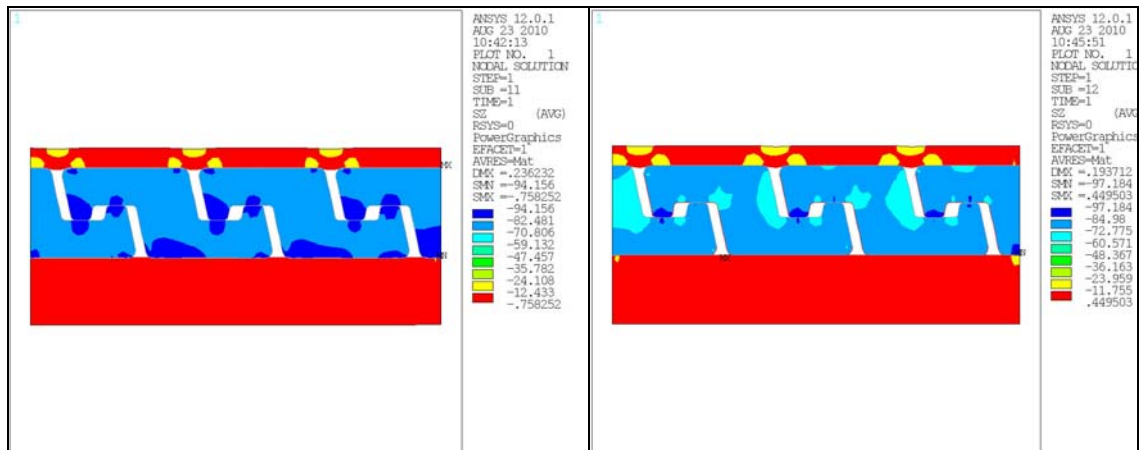
(d)

Figura 6-19 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 19, (b) 4, (c) 20 e (d) 21.



(a)

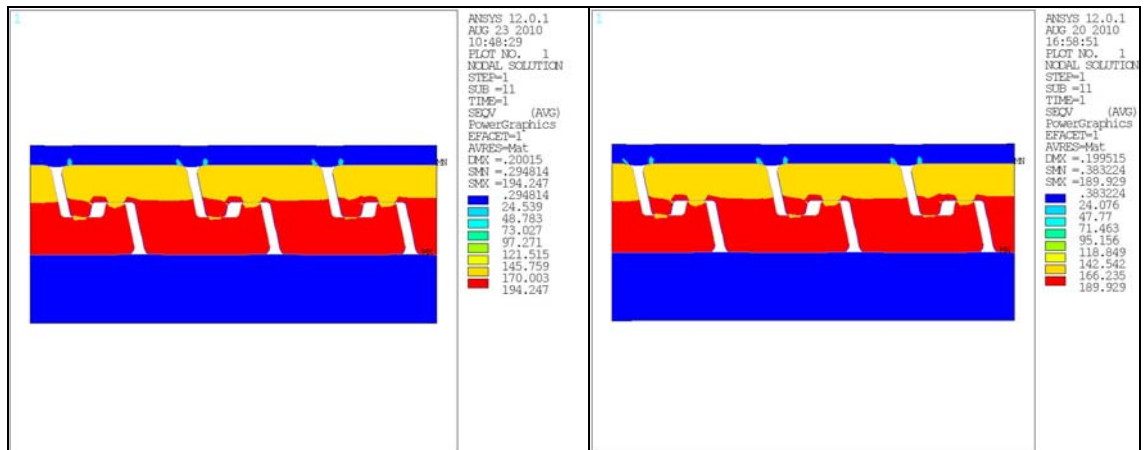
(b)



(c)

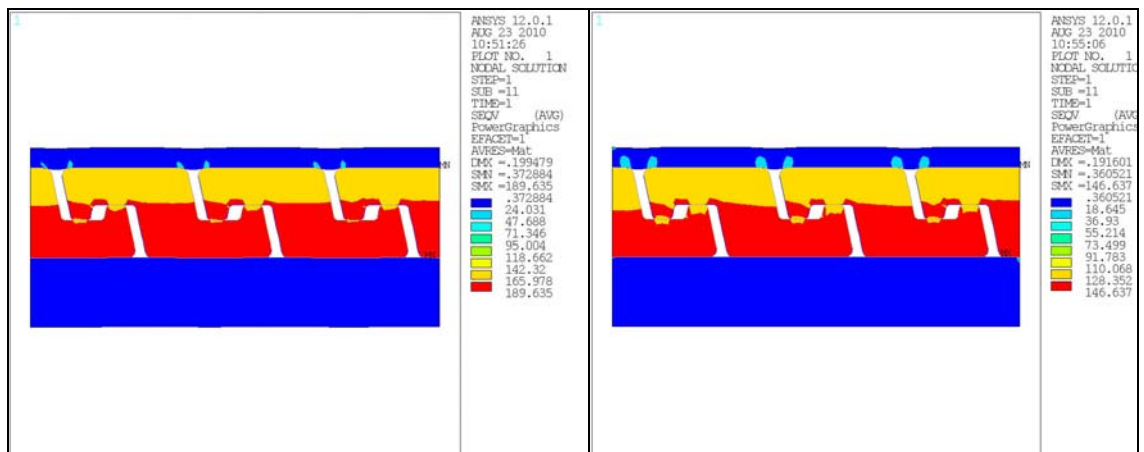
(d)

Figura 6-20 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 19, (b) 4, (c) 20 e (d) 21.



(a)

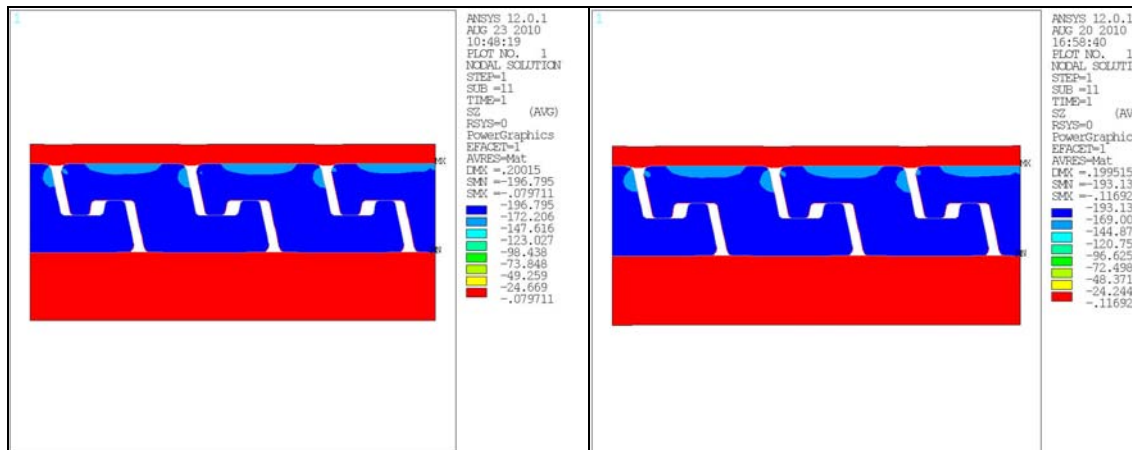
(b)



(c)

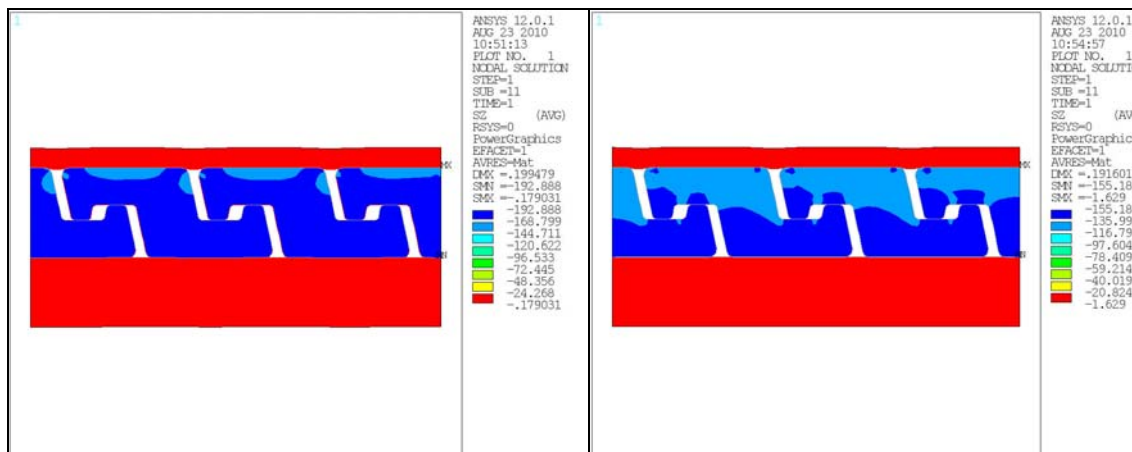
(d)

Figura 6-21 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 22, (b) 7, (c) 23 e (d) 24.



(a)

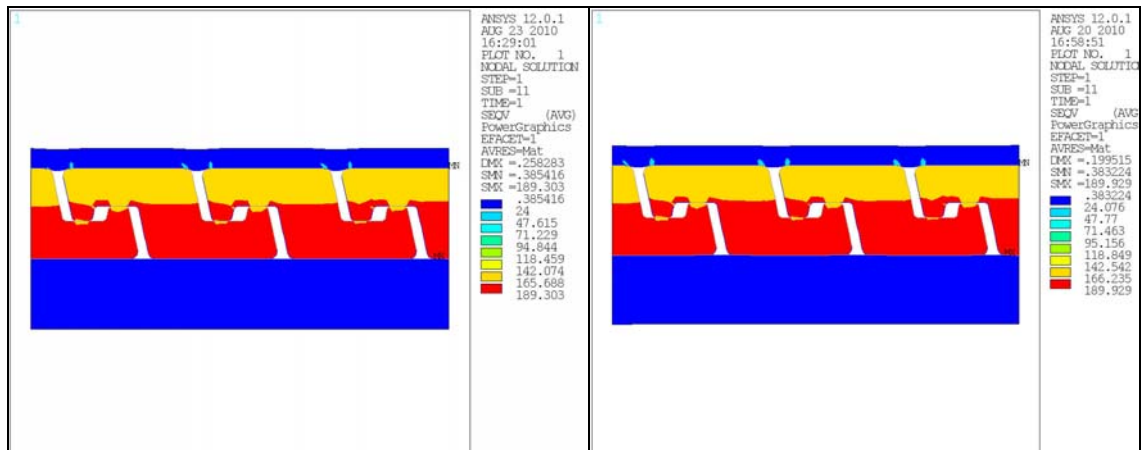
(b)



(c)

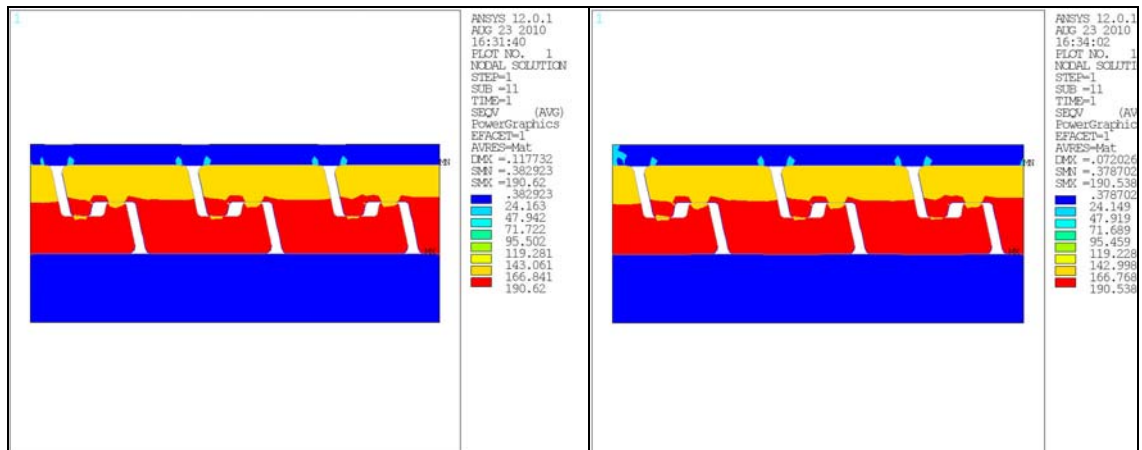
(d)

Figura 6-22 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 22, (b) 7, (c) 23 e (d) 24.



(a)

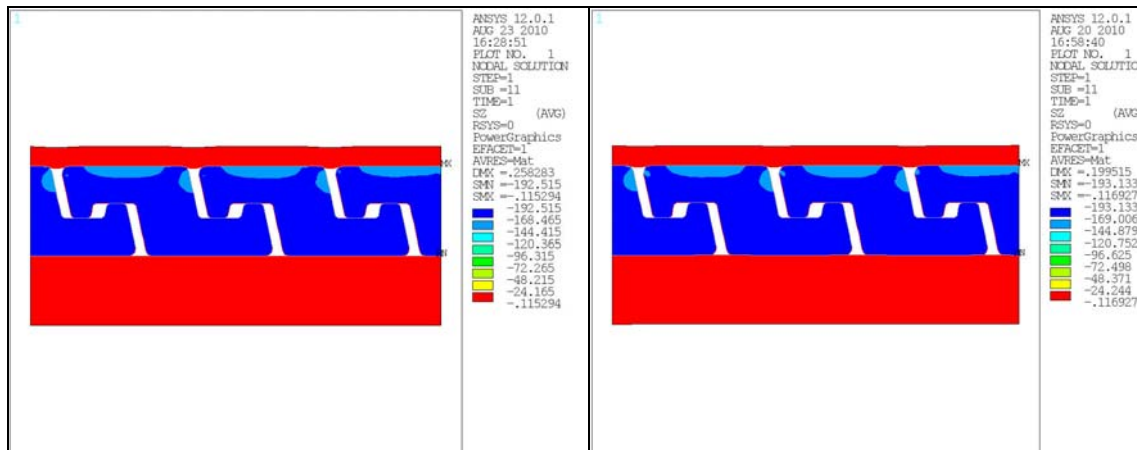
(b)



(c)

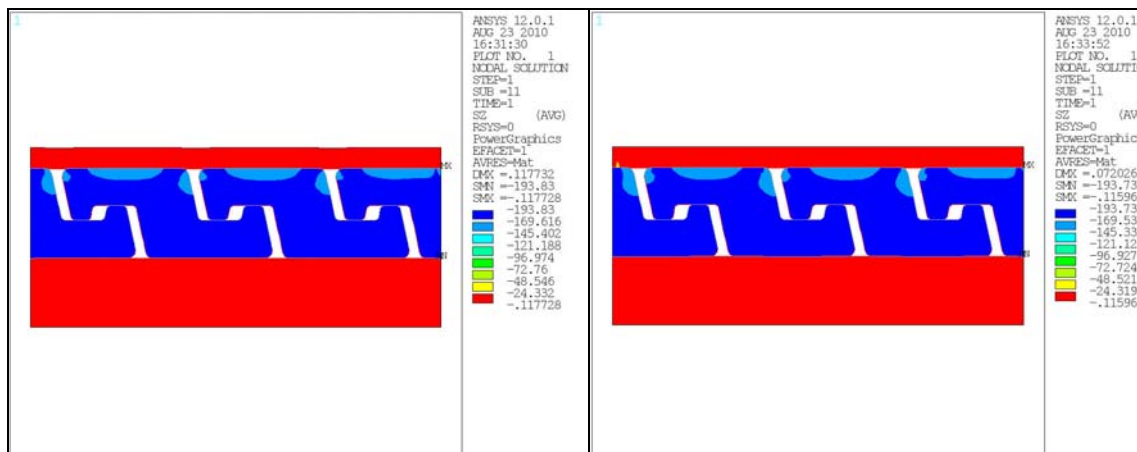
(d)

Figura 6-23 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 25, (b) 7, (c) 26 e (d) 27.



(a)

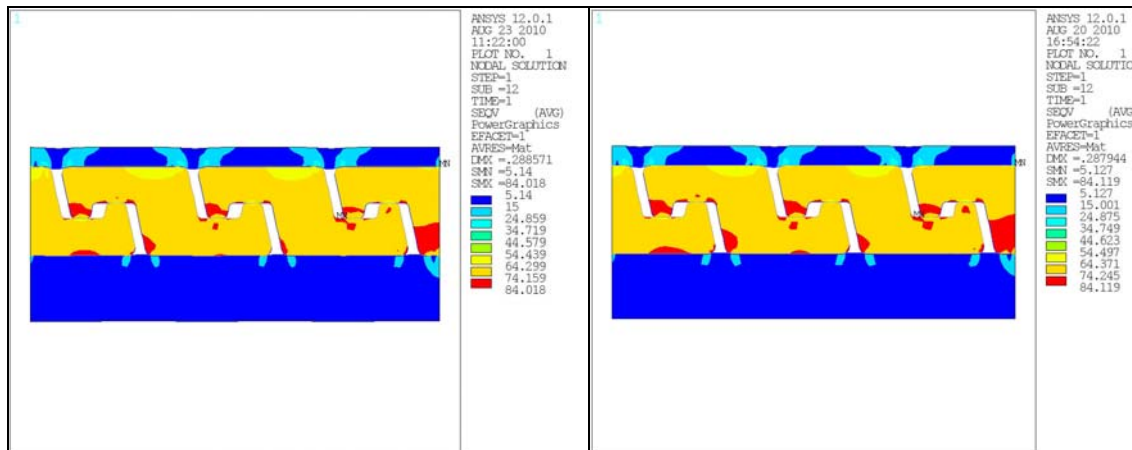
(b)



(c)

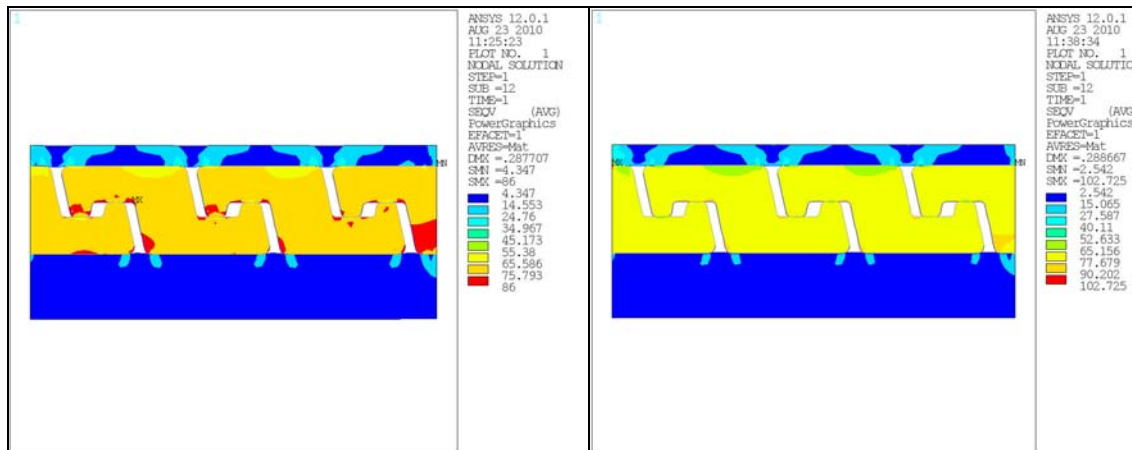
(d)

Figura 6-24 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 25, (b) 7, (c) 26 e (d) 27.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 6-25 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 28, (b) 4, (c) 29 e (d) 30.

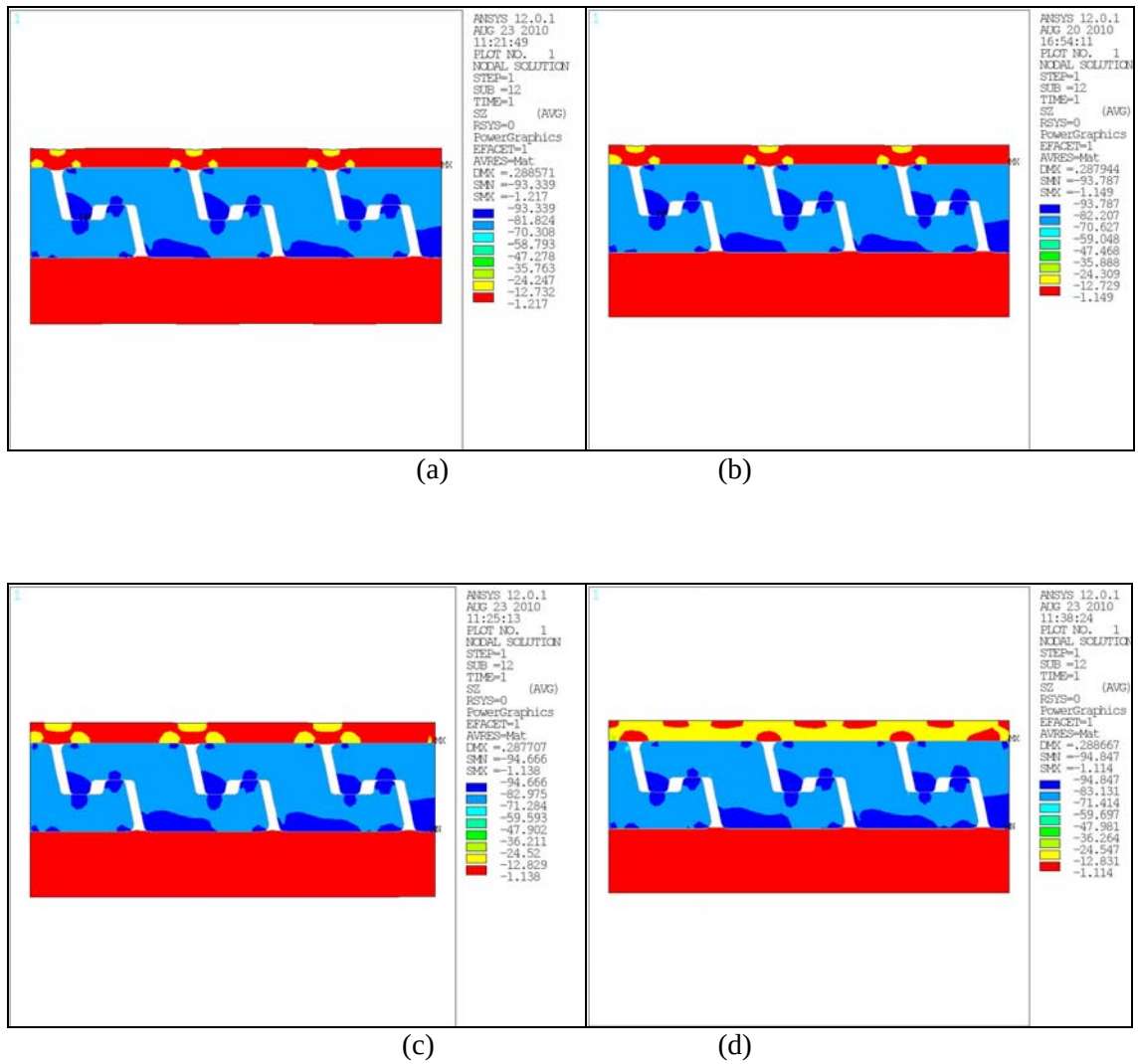
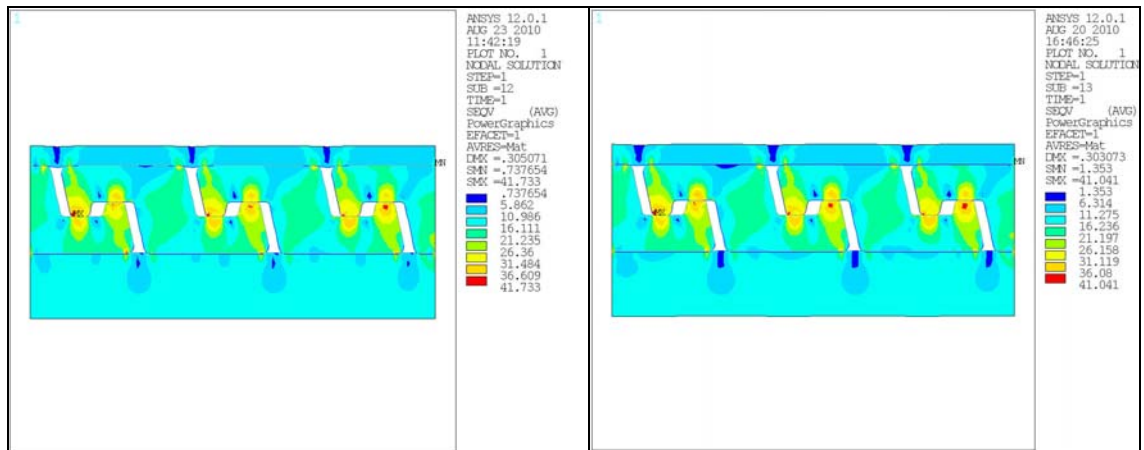
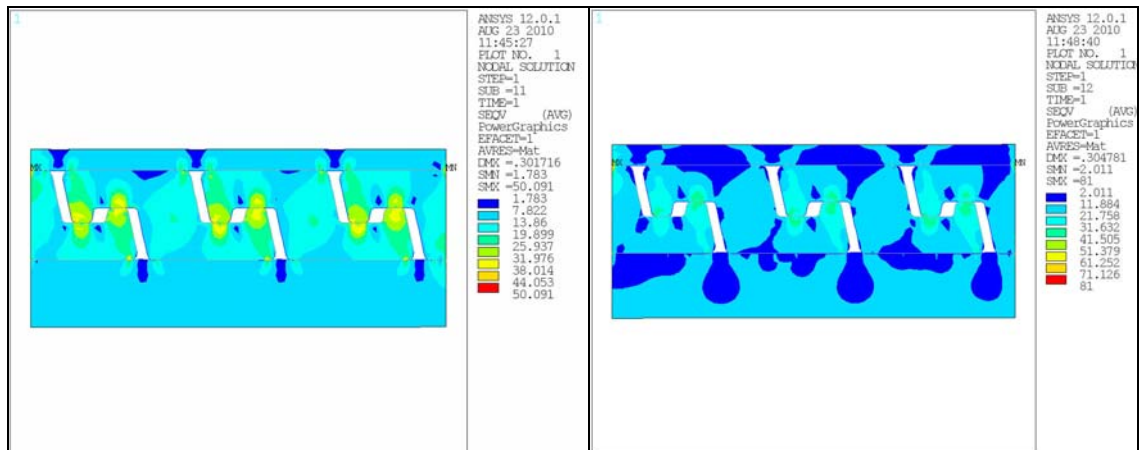


Figura 6-26 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 28, (b) 4, (c) 29 e (d) 30.



(a)

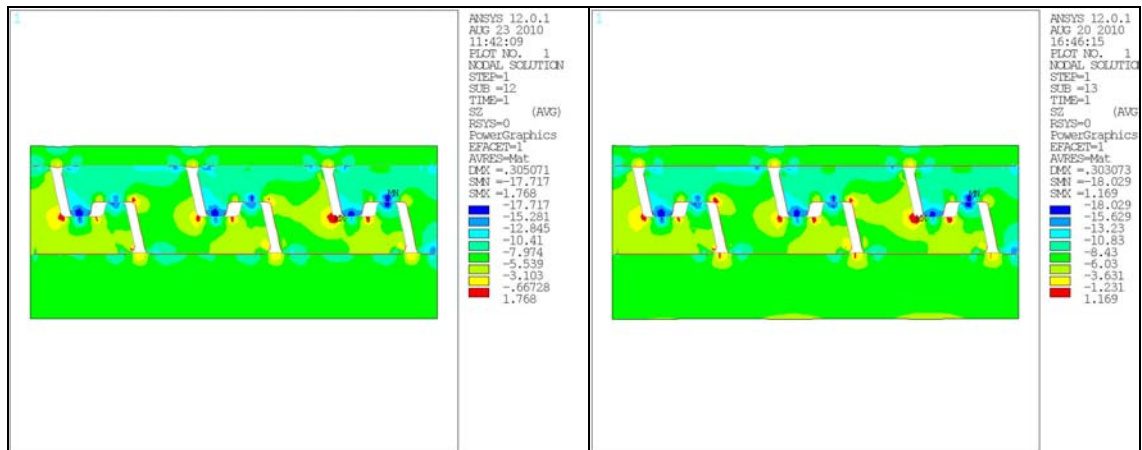
(b)



(c)

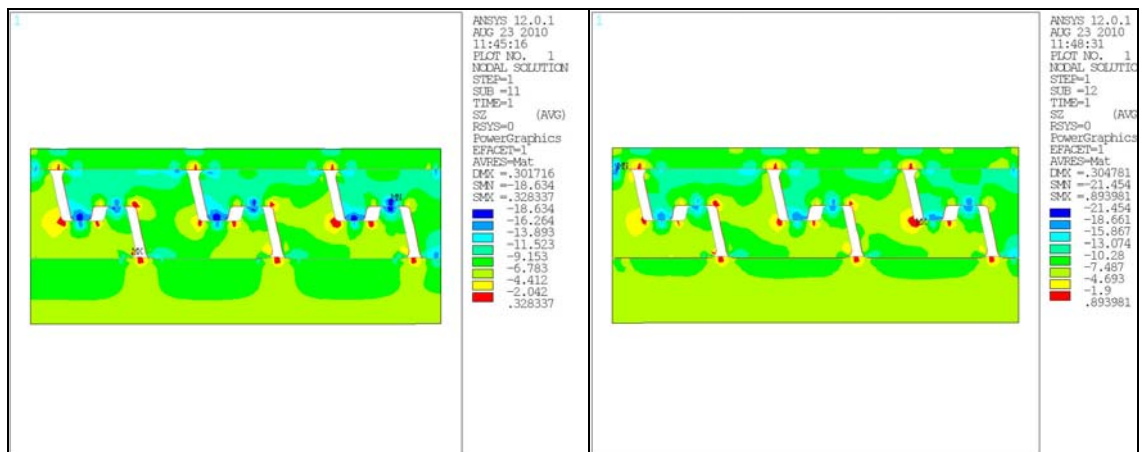
(d)

Figura 6-27 – Tensão Von Mises (MPa) das análises (a) 31, (b) 1, (c) 32 e (d) 33.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 6-28 – Tensão normal (MPa) das análises (a) 31, (b) 1, (c) 32 e (d) 33.

Na Tabela 18, apresenta-se o resultado de tensões no ponto de maior tensão Von Mises ocorrido na camada da armadura de pressão.

Tabela 18 - Resultados de tensões (MPa) no ponto de maior tensão Von Mises.

Análise	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	σ_{vm}	σ_{vm}/σ_z
16	-43,5	-4,5	-17,2	9,1	37,8	-2,2
1	-43,8	-4,6	-17,5	9,1	38,1	-2,2
17	-41,5	0,8	-12,2	-1,6	37,6	-3,1
18	-44,5	-4,6	-14,9	9,2	39,2	-2,6
19	-57,9	-6	-93,9	11,5	79,1	-0,8
4	-58,1	-6	-94,1	11,5	79,3	-0,8
20	-57,5	-5,9	-94	11,4	79,1	-0,8
21	-58,6	-6	-89,6	11,5	75,8	-0,8
22	-2,9	4,3	-191,3	-0,4	192,1	-1
7	-3,5	4,1	-187,2	-0,4	187,6	-1
23	-3,5	4,1	-186,9	-0,4	187,3	-1
24	-4,6	-2	-146,7	1,8	143,5	-1
25	-3,5	4,4	-186,6	-0,4	187,1	-1
7	-3,5	4,1	-187,2	-0,4	187,6	-1
26	-1,9	-1,2	-189,8	0,9	188,3	-1
27	-1,9	-1,3	-189,6	0,9	188	-1
28	-58,6	-6,1	-93,6	11,6	78,9	-0,8
4	-58,1	-6	-94,1	11,5	79,3	-0,8
29	-55,8	-5,8	-93,9	11	78,9	-0,8
30	3	18,7	-67,2	-3,1	79,4	-1,2
31	-44,5	-4,6	-17,4	9,3	38,8	-2,2
1	-43,8	-4,6	-17,5	9,1	38,1	-2,2
32	-43,5	-4,6	-17,8	9,1	37,7	-2,1
33	-41,8	0,7	-13,3	-1,6	37,6	-2,8

Conclui-se que o material das camadas plásticas adjacentes à camada da armadura de pressão não altera a distribuição das tensões normal e Von Mises ao longo da camada e nem seus valores máximos.

6.1.3 Grupo III

Analisa-se o modelo com a armadura de pressão com máximo e mínimo espaçamento entre os arames.

Foram analisados dutos com diâmetro interno de 2,5", espessura da armadura de pressão de 6,2 mm, da barreira de pressão de 4,9 mm e a camada antidesgaste

mede 1,5 mm. O material da barreira de pressão volta a ser o material original, poliamida 12 ($E=284$ MPa) e da camada antidesgaste a poliamida 11 ($E=301$ MPa).

6.1.3.1 Análises realizadas

Para determinação da resposta ao longo da armadura de pressão, foram realizadas as análises apresentadas na Figura 6-29, com o intuito de estudar o comportamento do duto flexível sob variação dos parâmetros. Foram aplicadas as pressões internas e externas.

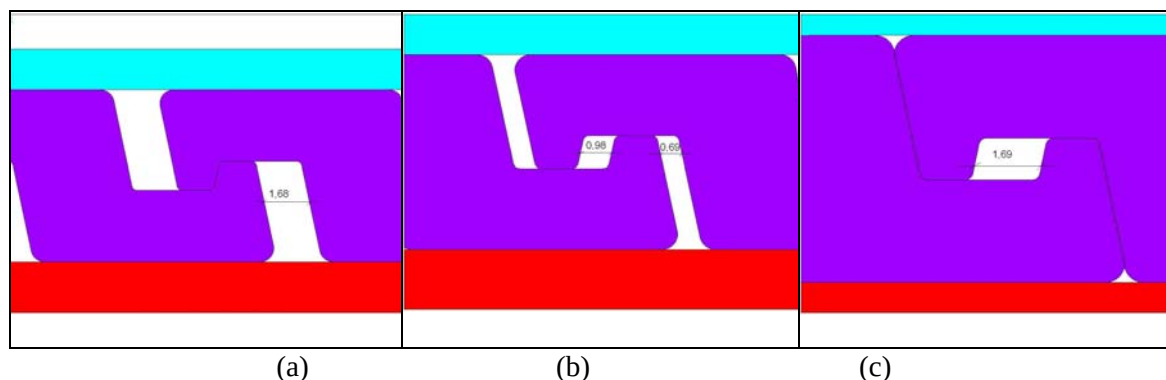


Figura 6-29 – Espaçamento entre arames (mm) das análises (a) 34, (b) 4 e (c) 35.

Tabela 19 - Resumo das análises do Grupo III.

Análise	Afastamento entre arames	Passo de 1 arame (mm)	Ângulo de assentamento (graus)	Pressão de contato interna (MPa)	Pressão de contato externa (MPa)
34	máximo	10,578	87,77	20	25,34
4	médio	9,6	87,98	20	25,34
35	mínimo	8,88	88,13	20	25,34

6.1.3.2 Resultados Obtidos

Pode-se observar vendo a Figura 6-30 que à medida que os arames se afastam (análises 34, 4 e 35) causa um aumento de tensão normal na armadura de pressão, podendo chegar a 8%.

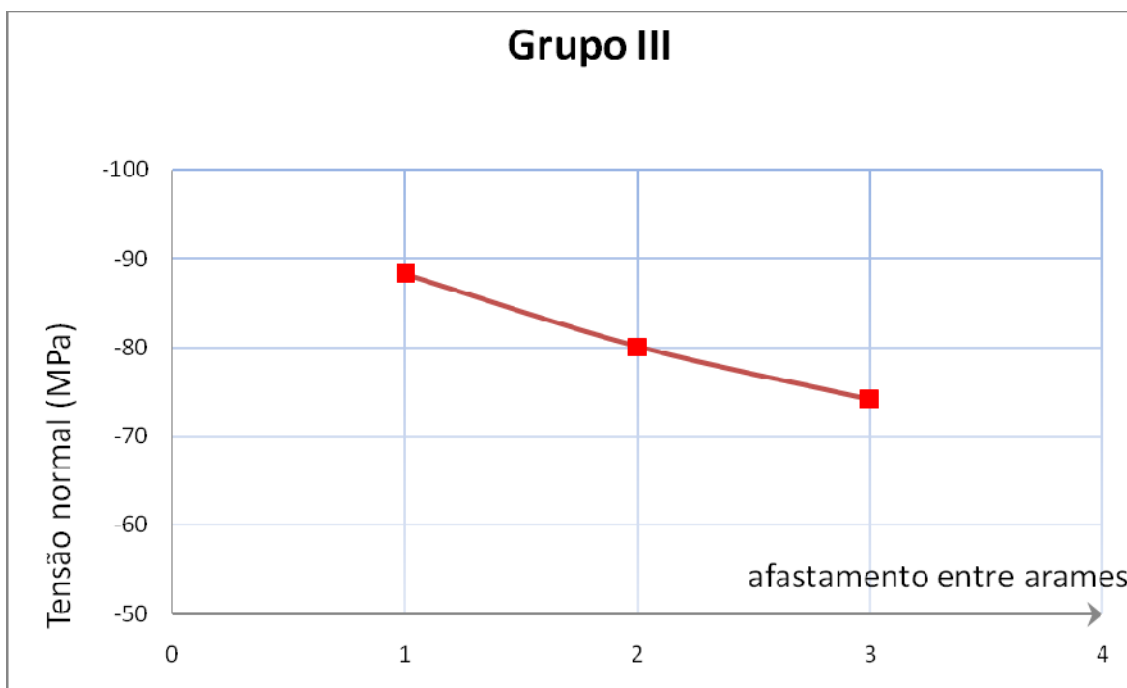


Figura 6-30 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação de espessuras da barreira de pressão e camada antidesgaste.

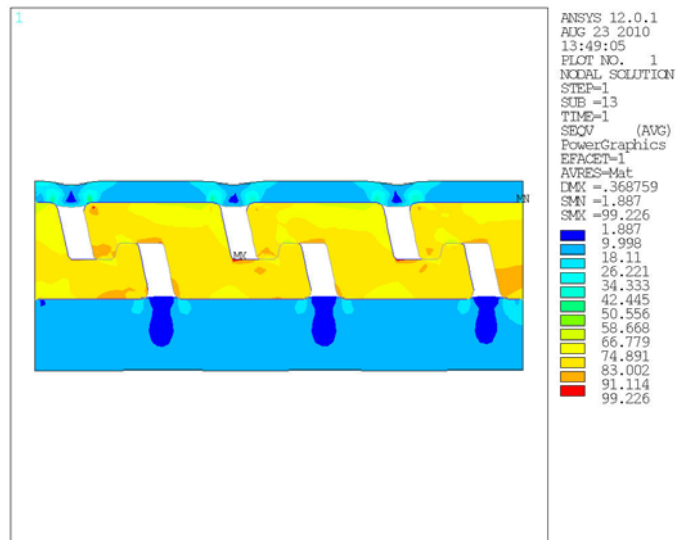
Observa-se nas análises 34, 4 e 35 que a tensões normal diminuem quando os arames se aproximam.

Os resultados de distribuição de tensão Von Mises e normal das análises de elementos axissimétricos estão ilustrados nas Figuras 6-31 e 6-32. Os valores das tensões médias, assim como os fatores de concentração criados estão resumidos na Tabela 20.

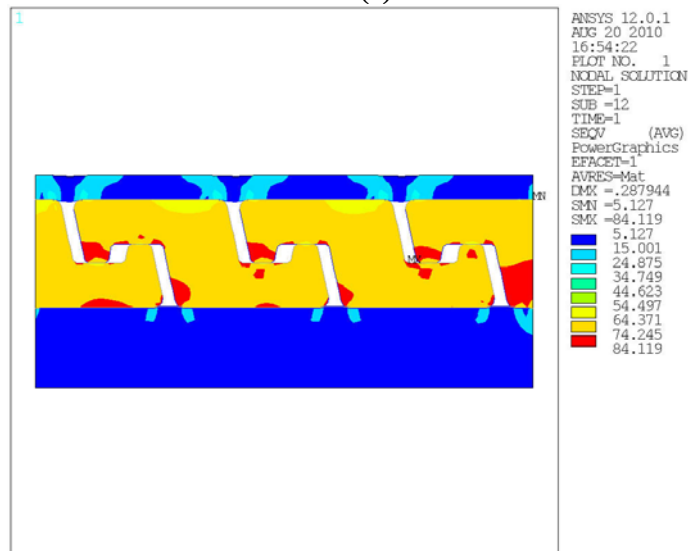
Tabela 20 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão.

Análise	Tensão Von Mises (MPa)		Tensão normal σ_z (MPa)	
	média	SCF	média	SCFz
34	77,5	1,2	-88,3	1,3
4	70,5	1,1	-80,1	1,2
35	51,9	1,2	-74,1	1,2

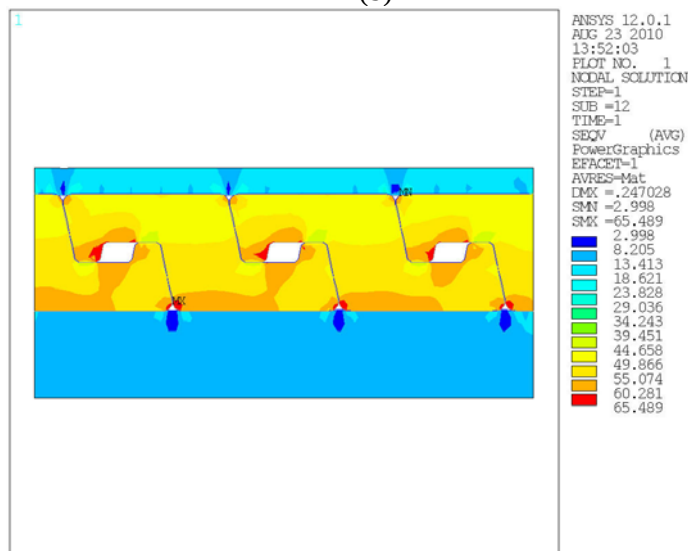
As tensões médias σ_z se mantêm em praticamente toda a seção exceto próximo à região de contato interno, onde se forma concentração de tensões. Os resultados de tensões normais das análises mostram que elas podem aumentar quase 10% com o afastamento máximo entre os arames.



(a)

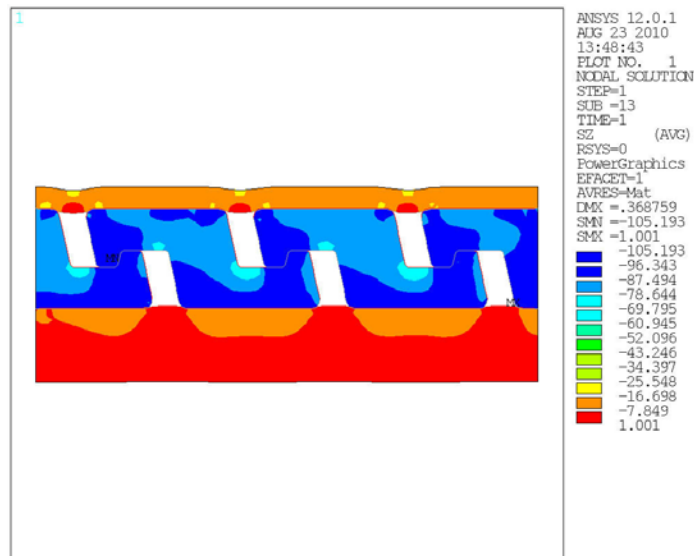


(b)

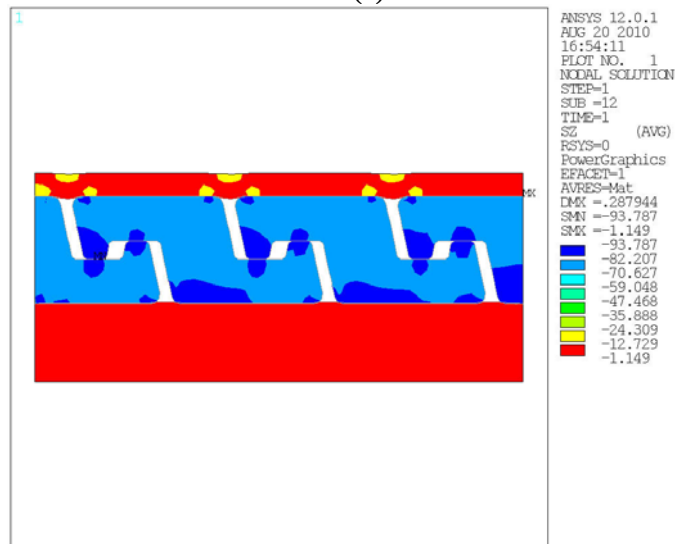


(c)

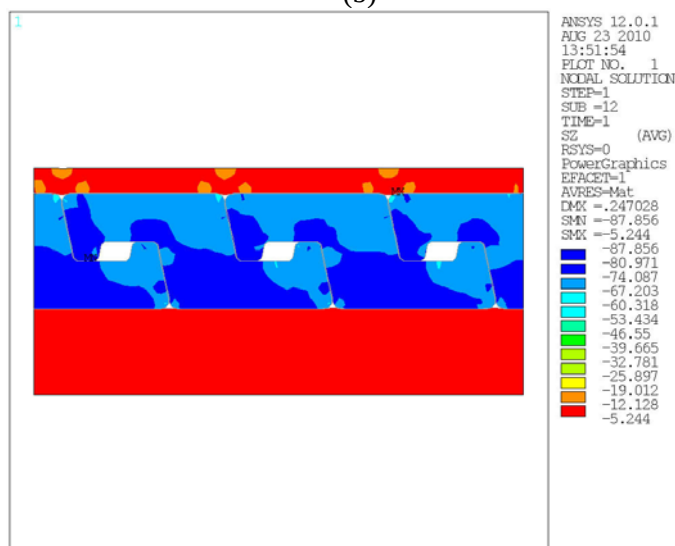
Figura 6-31 – Tensão Von Mises (MPa) de modelo de diversos espaçamento (a) espaçamento máximo, (b) espaçamento padrão e (c) espaçamento mínimo.



(a)



(b)



(c)

Figura 6-32 – Tensão normal (MPa) de modelo de diversos espaçamento (a) espaçamento máximo, (b) espaçamento padrão e (c) espaçamento mínimo.

Na Tabela 21 apresenta-se o resultado de tensões no ponto de maior tensão Von Mises ocorrido na camada da armadura de pressão.

Tabela 21 - Resultados de tensões (MPa) no ponto de maior tensão Von Mises.

Análise	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	σ_{vm}	σ_{vm}/σ_z
34	-58,3	7,4	-93,7	6,9	89,7	-1
4	-58,1	-6	-94,1	11,5	79,3	-0,8
35	-6,4	-4,7	-67,7	5,3	62,8	-0,9

6.1.4 Grupo IV

Neste grupo, estuda-se o comportamento do duto variando as pressões internas e externas aplicadas no duto.

Fixa-se o diâmetro interno em 2,5" e as espessura: 4,9 mm da barreira de pressão, 6,2 mm da armadura de pressão e 1,5 mm da camada antidesgaste. O material da barreira de pressão é poliamida 12 e possui o módulo de Young (E) de 284 MPa e a camada antidesgaste é composta por poliamida 11, com módulo de Young no valor de 301 MPa.

6.1.4.1 Análises realizadas

Para determinação da resposta ao longo da armadura de pressão, foram realizadas as análises apresentadas na Tabela 22, com o intuito de estudar o comportamento do duto flexível sob variação da elevação das pressões aplicadas no duto. Foram aplicadas as pressões internas e externas.

Tabela 22 - Resumo das análises do Grupo IV.

Análise	Pressão (MPa)		Tensão axial (MPa), fonte: RiserTools.	Pressão de contato interna (MPa)	Pressão de contato externa (MPa)
	Interna	Externa			
1	20	0	-9,08	20	16,64
36	25	5	-17,55	25	21,55
37	30	10	-26,02	30	26,46
38	33	15	-45,66	33	31,15
39	38	20	-54,12	38	36,06

Manteve-se uma variação entre a pressão interna e externa aplicadas de 20 MPa, enquanto se elevava a pressão aplicada a tensão normal na armadura de pressão também aumentava, porém a variação não é linear, como pode ser visto na Figura 6-33.

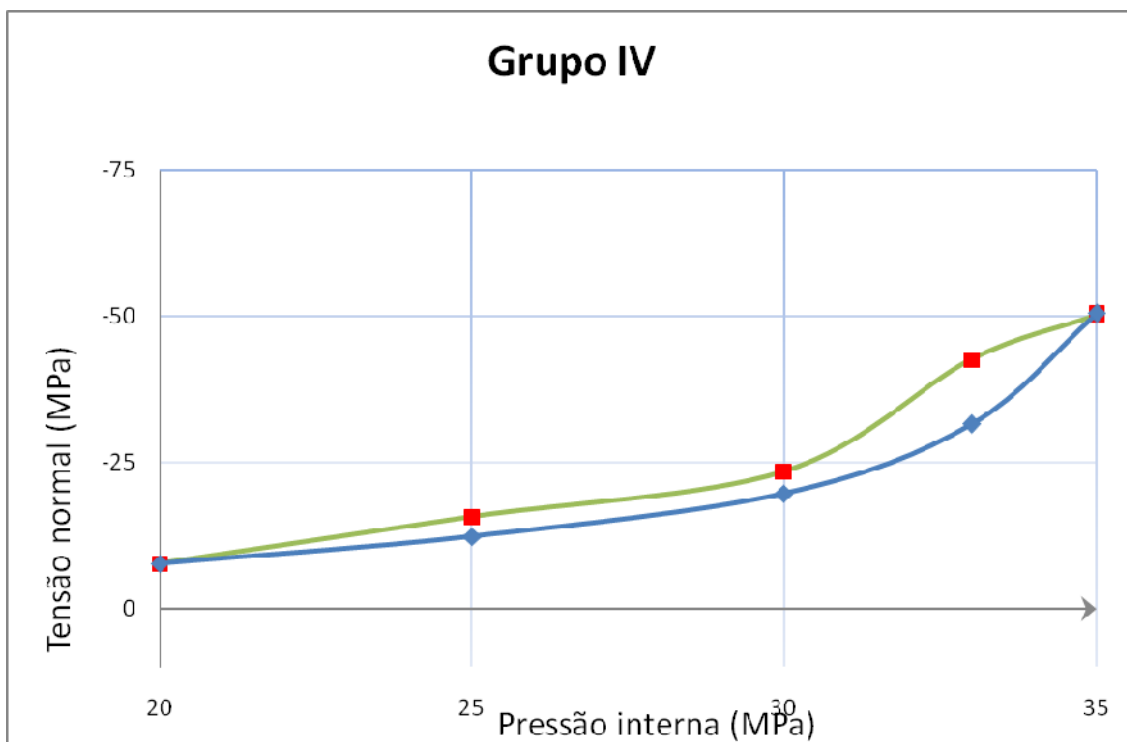


Figura 6-33 – Gráfico de variação de tensão normal na armadura de pressão x variação de pressão aplicada.

Os resultados de distribuição de tensão Von Mises e normal das análises de elementos axissimétricos estão ilustrados nas Figuras 6-34 a 6-43. Os valores das tensões médias, assim como os fatores de concentração criados estão resumidos na Tabela 23.

Tabela 23 - Resumo dos resultados de tensão na camada de armadura de pressão.

Análise	Tensão Von Mises (MPa)		Tensão normal σ_z (MPa)	
	média	SCF	média	SCFz
1	17,4	2,2	-7,7	2,6
36	22,1	2,2	-15,7	2
37	27,7	2,1	-23,5	1,8
38	39,1	1,8	-42,6	1,5
39	45,8	1,8	-50,3	1,5

As tensões normais médias σ_z se mantêm em praticamente toda a seção exceto próximo a região de contato interno, apenas formando concentração de tensões próxima a região de contato.

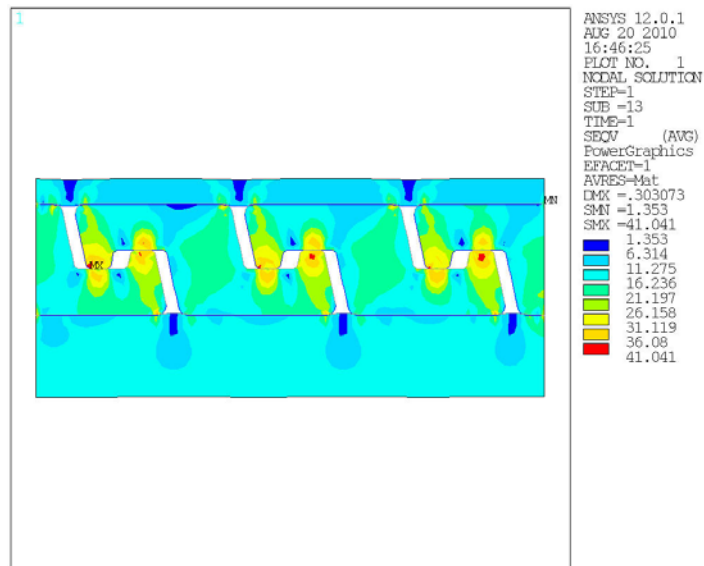


Figura 6-34 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 1.

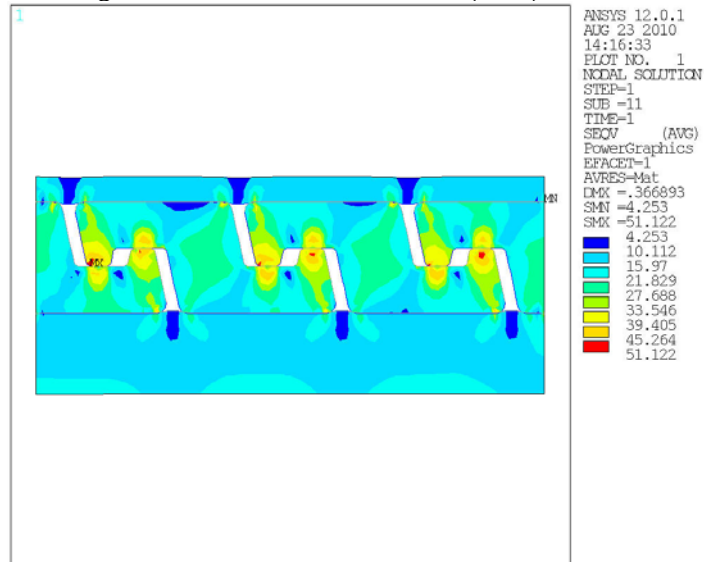


Figura 6-35 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 36.

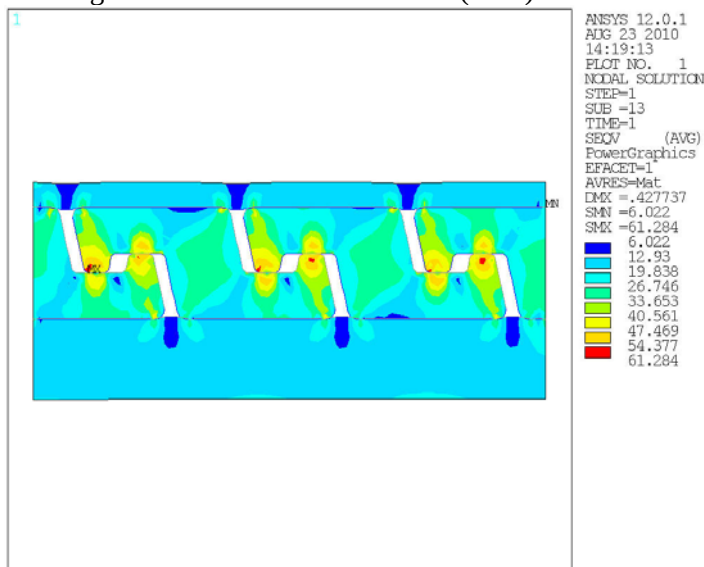


Figura 6-36 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 37.

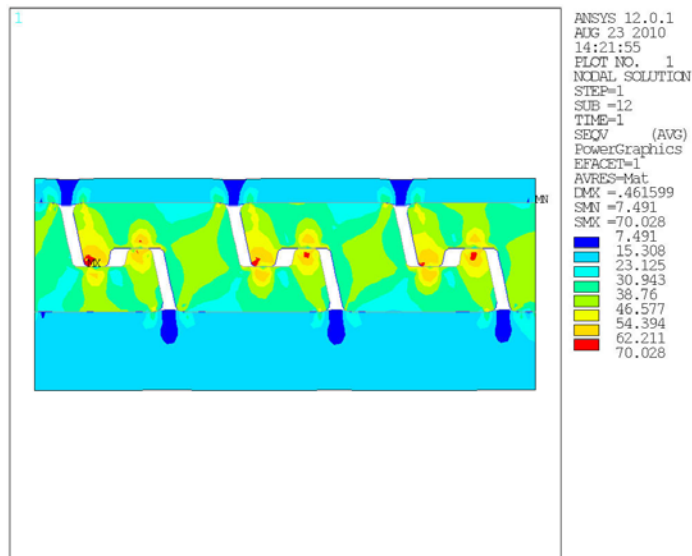


Figura 6-37 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 38.

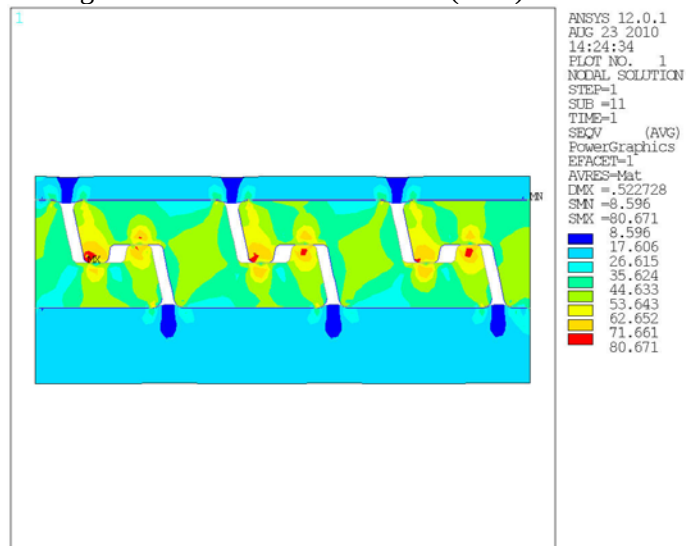


Figura 6-38 – Tensão Von Mises (MPa) da análise 39.

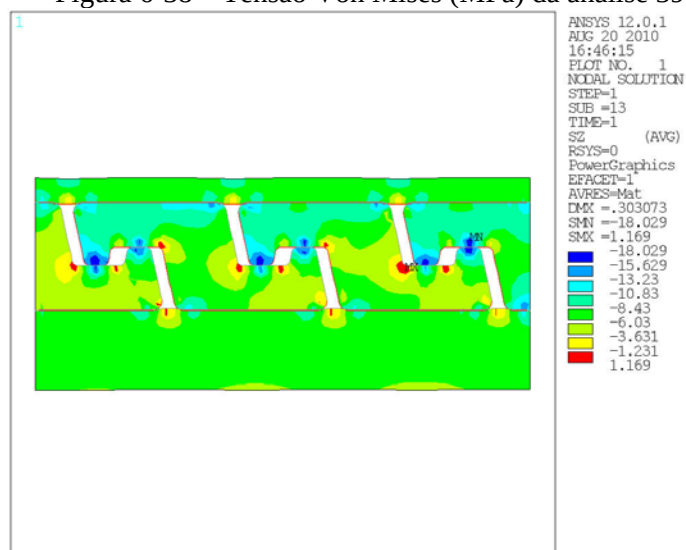


Figura 6-39 – Tensão normal (MPa) da análise 1.

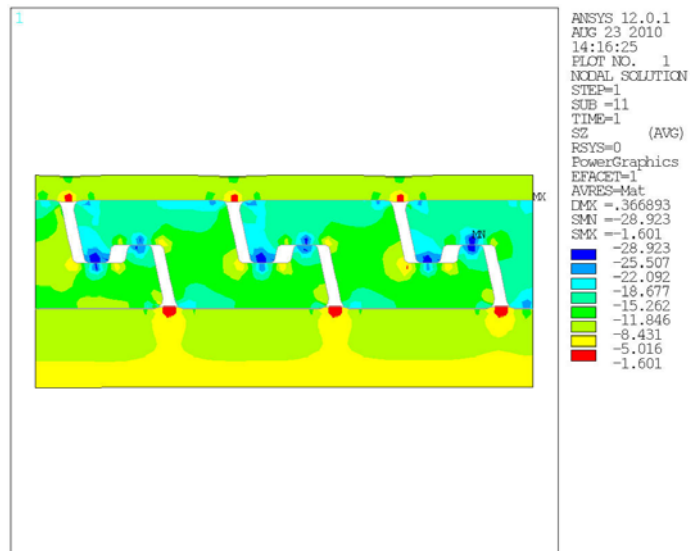


Figura 6-40 – Tensão normal (MPa) da análise 36.

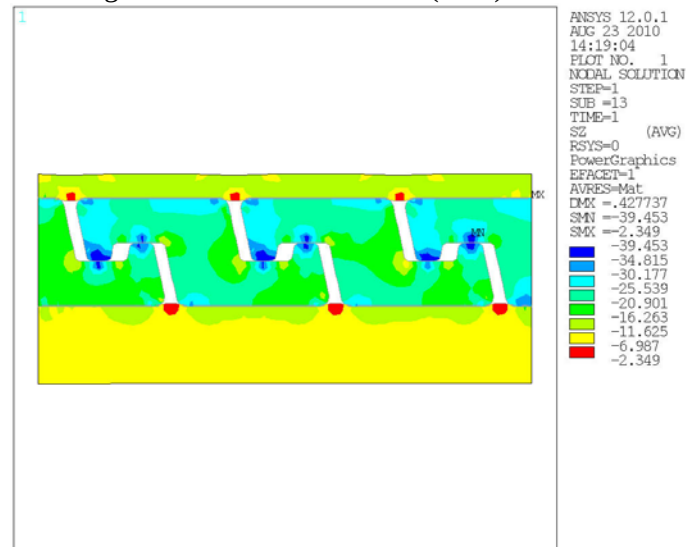


Figura 6-41 – Tensão normal (MPa) da análise 37.

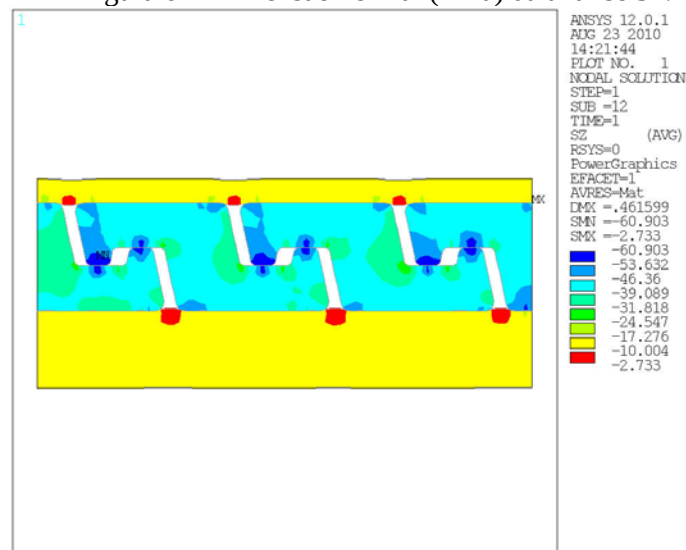


Figura 6-42 – Tensão normal (MPa) da análise 38.

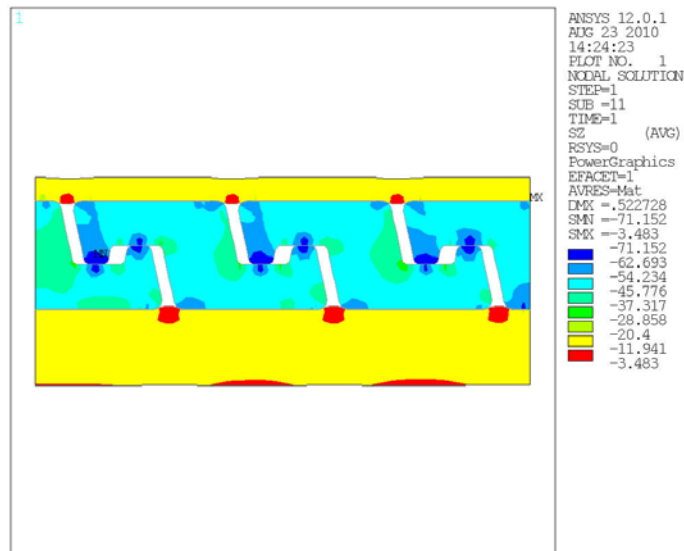


Figura 6-43 – Tensão normal (MPa) da análise 39.

Conclui-se que o aumento das pressões aplicadas altera o resultado de tensão normal média, mas não modifica o comportamento do modelo devido à distribuição de tensão na armadura de pressão.

6.2 Análise de fadiga determinística

Foi feita uma análise de fadiga determinística de dois pontos ao longo do duto. A análise determinística considera a existência de apenas uma onda excitando o duto de cada vez, sendo executada no domínio do tempo. Os pontos A e B podem ser vistos na Figura 6-44. Simula-se que O duto esteja instalado em um FPSO com azimuth de 202,5° numa profundidade de 500 m e localizado 60 m a vante e 50 m a boreste.

Apresentam-se 6 estados de mar por ondas equivalentes (H e T) que vem da direção nordeste. A unidade da altura de onda (H) é metro e do período (T) é segundo. As ocorrências de cada estado de mar estão descritas abaixo:

$$\begin{array}{l}
 H := \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{pmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 T := \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \\ 10.8 \\ 11.14 \\ 11.65 \\ 11.77 \end{pmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{Ocorrencia} := \begin{pmatrix} 26 \\ 1.9 \\ 0.022 \\ 0.0023 \\ 0.0002 \\ 0.0001 \end{pmatrix} \%
 \end{array}$$

O cálculo foi desenvolvido e pode ser visto no Anexo 5.

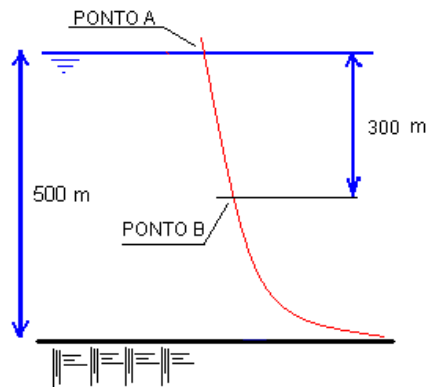


Figura 6-44 – Vista dos pontos A e B do duto.

No ponto A, o duto está submetida a pressão interna de 20 MPa e 0 de pressão externa e no ponto B ela está pressão interna de 22,7 MPa e 3,0 MPa de pressão externa.

A força axial média e sua variação foi resposta de uma análise do programa Anflex. No ponto A, a força média é de 165 kN e no ponto B, a força é 80,5 kN. Elas possuem as variações de força de dupla amplitude abaixo:

$$\Delta F_a := \begin{pmatrix} 80 \\ 1300 \\ 9000 \\ 9200 \\ 7130 \\ 6600 \end{pmatrix} \cdot N \quad \Delta F_b := \begin{pmatrix} 40 \\ 610 \\ 4150 \\ 4720 \\ 3630 \\ 3380 \end{pmatrix} \cdot N$$

A tensão axial foi calculada pela fórmula aproximada de (FERET e BOURNAZEL, 1987). A variação de tensão média pode ainda ser simplificada por: $\Delta\sigma = C1 \times \Delta F$, sendo C1 um fator geométrico dependente do raio médio e da espessura da camada de pressão e o ângulo de assentamento da armadura de tração. Como já se sabe o SCFz da camada de pressão (adotado 1,20) pode-se calcular a variação de tensão (N/mm²) da seguinte forma: $\Delta\sigma = SCFz \times C1 \times \Delta F$. Resultou em:

$$\Delta\sigma_a := \begin{pmatrix} 0.028 \\ 0.454 \\ 3.143 \\ 3.213 \\ 2.49 \\ 2.305 \end{pmatrix} \quad \Delta\sigma_b := \begin{pmatrix} 0.014 \\ 0.213 \\ 1.449 \\ 1.648 \\ 1.268 \\ 1.18 \end{pmatrix}$$

Sendo $\Delta\sigma_a$, a variação de tensão no ponto A e $\Delta\sigma_b$ a variação de tensão no ponto B.

Escolheu-se para curva S-N a curva F2 do Welding Institute (TWI), pois possui parâmetros baixos. As curvas S-N são obtidas em laboratório para um material e tipo de peça e ainda não existe uma específica para dutos flexíveis.

O dano para cada estado de mar é calculado pela razão entre o número de ciclos anual (em segundos) e o número de ciclos obtido na curva S-N. Para calcular o dano total simplesmente somam-se os danos obtidos em cada estado de mar. As condições de carregamento de amplitudes variáveis do mar podem ser tratadas como o somatório de várias condições de carregamento por amplitudes constantes para se determinar o comportamento dos elementos carregados. Por fim a vida útil será o inverso do dano total em cada ponto analisado, sendo 43 milhões de anos no ponto A e 420 milhões de anos no ponto B.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões finais

Neste trabalho, apresentaram-se modelos baseados no método dos elementos finitos para a determinação da distribuição de tensão ao longo da seção transversal da armadura de pressão de um duto flexível de 2,5" sob a ação de cargas axissimétricas.

Foi observada a importância das camadas poliméricas adjacentes à armadura de pressão no modelo de elementos finitos para que haja uma boa distribuição de tensão normal na armadura de pressão, sem concentração de tensão próximo à extremidade do modelo. A discretização da malha também foi analisada e concluiu-se que a dimensão de 0,4 mm gera bons resultados e demonstra claramente a concentração de tensão normal próximo a região de contato.

Para o duto flexível de 2,5" de diâmetro interno estudada, carregada por 500 kN de tração, 20 MPa de pressão interna e 10 MPa de pressão externa, encontrou-se os resultados de tensões normais e axiais e seus respectivos fatores de concentração de tensões apresentados na Tabela 24. A tensão normal média é equivalente às tensões axiais dos modelos gerais, porém, pode-se notar que possuem valores ligeiramente superiores. Concluindo que nem sempre os resultados dos modelos analíticos são conservativos.

Tabela 24 - Resultados de tensões normais e axiais na camada de pressão do duto estudado e o respectivo fator de concentração.

Método	σ_a e σ_z médios (MPa)	SCFz
FERET	-77,98	-
Analítico	-78,32	-
Risertools	-81,86	-
MEF elemento axissimétrico - discretização 0,4 mm	-83,5	1,16
Elemento Sólido – Fator de rigidez de contato 10	-80	1,19

O fator de tensão normal sugerida neste trabalho é de 1,20 na armadura de pressão. O estado tridimensional de tensões observado próximo às áreas de contato é mais um fator que deve ser levado em conta no estudo dos dutos.

O tempo de CPU e espaço em disco de cada análise estão descritos na Tabela 25. Levando em conta que foi utilizado um computador AMD Athlon 64 Processor

3000+ 2,0 GHz, com 1 GB de memória RAM e 240 Gb de espaço livre em disco para realização das mesmas.

Tabela 25 – Esforço computacional para análise do comportamento do duto de 2,5” e espaço em disco requerido para toda a análise.

Modelo	Tempo de CPU	Espaço em disco
Análítico	3 segundos	15 kB
Risertools	15 minutos	763 MB
Element axissimétrico	30 segundos	40 MB
Elemento sólido	7 horas	3310 MB

Um estudo paramétrico do mesmo duto foi realizado variando diversos parâmetros.

Observou-se, que a tensão normal média se altera muito pouco quando se variam os módulos de elasticidade das camadas poliméricas adjacentes à camada de armadura de pressão e que a compressão diminui quando as espessuras das camadas poliméricas aumentam. A tensão normal varia muito quando se aplica apenas pressão interna no duto. Concluiu-se que a tensão normal de compressão se eleva à medida que os arames da armadura de pressão se afastam. Por fim, concluiu-se que o aumento das pressões aplicadas altera o resultado de tensão normal média não linearmente, mas não modifica o comportamento do modelo devido à distribuição de tensão na armadura de pressão.

7.2 Desdobramentos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se verificar a flexão no duto no modelo sólido e desconsiderar o ângulo de 90° da armadura de pressão.

Nas análises deste trabalho a camada da armadura de pressão trabalhou sempre comprimida, deve-se avaliar a possibilidade de ocorrer flambagem.

Cabe citar que, neste trabalho, verificou-se apenas o comportamento da estrutura sob ação das pressões impostas pelas cargas axissimétricas. Torna-se necessário realizar um estudo adicional inserindo a este a flexão imposta ao duto flexível.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API RP 17B, 2002, *Recommended Practice for Flexible Pipe*, 2nd ed., Washington, American Petroleum Institute.

API SP 17J, 2002, *Specification for Unbonded Flexible Pipe*, 2nd ed., Washington, American Petroleum Institute.

BAHTUI, A., BAHAI, H., ALFANO, G., 2008, "A Finite Element Analysis of Unbonded Flexible Risers under Axial Tension". In: *Proceedings of the International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE)*, 57627, Estoril, Portugal, 15-20 Junho.

BATISTA, R. C., BOGARIN, J. A., EBECKEN, N. F. F., 1989, "Local Mechanical Behavior of Multilayered Flexible Risers". In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Offshore Engineering*, pp. 494-510, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Agosto.

CRUZ, F. T. L., 1996, *Análise Estrutural de Linhas Flexíveis pelo Método de Elementos Finitos*. Dissertação M.Sc., EPUSP, São Paulo, S.P., Brasil.

CUSTÓDIO, A. B., 1999, *Modelagem Numérica do Comportamento Axissimétrico de Cabos Umbilicais Submarinos*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

FERET, J. J., MOMPLOT, G., 1991, *CAFLEX – A Program for Capacity Analysis of Flexible Pipe – User's Manual*, SINTEF Structural Engineering, Trondheim, Maio.

FERET, J. J., BOURNAZEL, C. L., 1987, "Calculation of Stresses and Slip in Structural Layers of Unbonded Flexible Pipes". In: *Journal of Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, vol. 109, pp. 263-269.

HAY, G. E., 1942, "The Finite Displacement of Thin Rods". *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 51, pp. 65-102.

GIRON, A. R. C., 2009, *Aplicação de Metodologia de Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers na Exploração de Petróleo Offshore*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

LEMONS, C. A. D., 2005, *Análise de Fadiga em Risers Flexíveis*. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

MBAYE, M., 2006, *Implementação de Ferramentas para Análise Local de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

MUÑOZ, H. E. M., 2009, *Correlação Numérica - Experimental de Dutos Flexíveis Submetidos a Cargas de Tração e Torção*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

PADILHA, J. A. P., 2009, *Análise Estrutural de Riser Flexível com Armaduras de Tração em Titânio*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Naval e Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

PETROBRAS. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem%2Dsomos/perfil/atividades/exploracao%2Dproducao%2Dpetroleo%2Dgas/>. Acesso em: novembro de 2009.

RIBEIRO, E. J. B., SOUSA, J. R. M., ELLWANGER, G. B., LIMA, E. C. P., 2003, "On the Tension-Compression Behavior of Flexible Risers". In: *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, pp. 105-112, Honolulu, Havaí, EUA, 25-30 Maio.

SAEVIK, S., 1992, *On Stress and Fatigue in Flexible Pipes*. Tese de Ph.D., Division of Marine Structures, The Norwegian Institute of Thechnology, Trondheim, Noruega.

SBM Atlantia. Disponível em: <http://www.sbmatlantia.com/semisub>. Acesso em: dezembro de 2009.

SILVA, A. P. D., 2006, *Análise da Influência da Temperatura na Rigidez à Flexão de Linhas Flexíveis*. Projeto final de conclusão de curso de graduação, Programa de Engenharia Naval e Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

SOUSA, J. R.M., ELLWANGER, G. B., LIMA, E. C. P., 2008, "Estudo de Distribuição de Tensões nas Armaduras de Pressão de Linhas Flexíveis Pressurizadas" In: *Proceedings of the Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, CIL-0219, Maceió, A.L., Brasil, Novembro.

SOUSA, J. R. M., 2005, *Análise Local de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

SOUSA, J. R. M., 2001, *Análise Numérica Local de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*. Proposta de Tese de Doutorado, Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

SOUSA, J. R. M., ELLWANGER, G. B., LIMA, E. C. P., PAPALEO, A., 2001, "A Finite Element Model for the Local Mechanical Analysis of Flexible Pipes" In: *Proceedings of the 22nd Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, CIL-205, Campinas, S.P., Brasil, Novembro.

SOUSA, J. R. M., 1999, *Análise Numérica de Risers Flexíveis*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

SUBSEA7. disponível em: http://www.subsea7.com/cms/files/File/Golfinho_%28PSS%29.pdf. Acesso em: maio de 2010.

WITZ, J. A., 1996, "A Case Study in the Cross-section Analysis of Flexible Risers", *Marine Structures*, vol. 9, pp. 885-904.

WITZ, J. A., TAN, Z., 1992, "On the Axial-Torsional Structural Behavior of Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables", *Marine Structures*, vol. 5, pp. 205-227.

ZHANG, W., TUOHY, J., 2002, "Application of Finite Element Modeling in the Qualification of Large Diameter Unbonded Flexible Risers". In: *Proceedings of the International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE)*, 28567, Oslo, Noruega, 23-28 Junho.

**Anexo 1 - RESULTADOS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES DAS
ANÁLISES DOS MODELOS EMPREGANDO ELEMENTOS PLANOS
AXISSIMÉTRICOS COMPOSTOS APENAS PELA CAMADA DE ARMADURA
DE PRESSÃO.**

A1.1 Malha de dimensão de 0,2 mm e 6 passos.

Nesta análise, foi modelado apenas a camada da armadura de pressão, com malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos, como mostra a Figura A1.1.

Modelo possui 7713 elementos, sendo 7095 axissimétrico e 618 de contato.

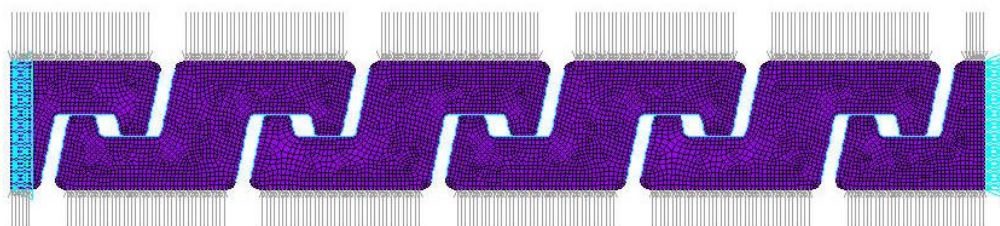


Figura A1-1.- Malha gerada ao longo da armadura de pressão, de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A1.2.

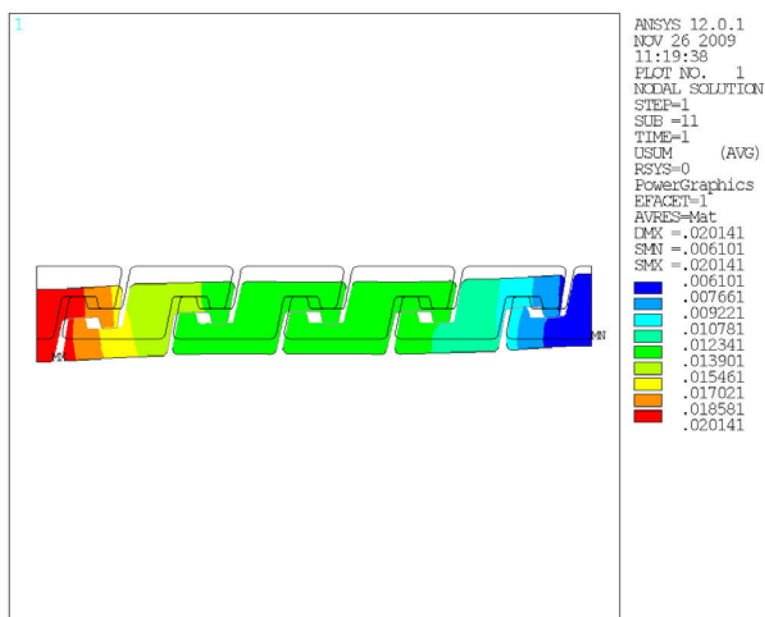


Figura A1-2.Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

As Figuras A1.3 e A1.4 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.



Figura A1-3.- Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

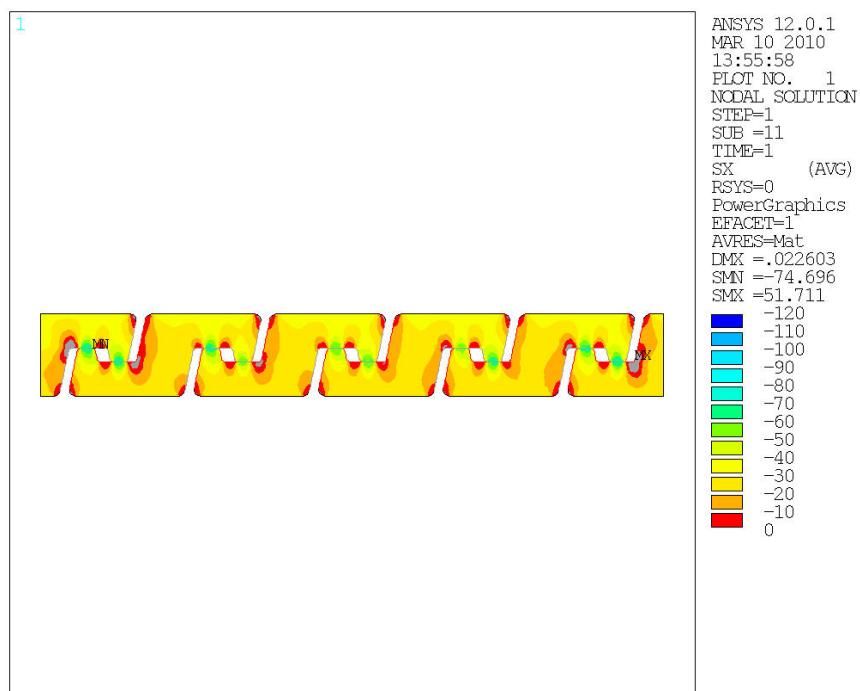


Figura A1-4.- Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

A1.2 Malha de dimensão de 0,8 mm e 6 passos.

Este modelo possui apenas a camada da armadura de pressão, com malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos, como mostra a Figura A3.5.

O modelo possui 717 elementos, sendo 527 axissimétrico e 190 de contato.

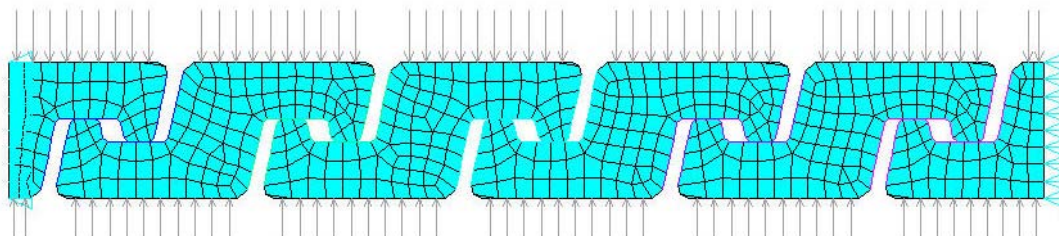


Figura A1-5.- Malha gerada ao longo da armadura de pressão, de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A1.6.

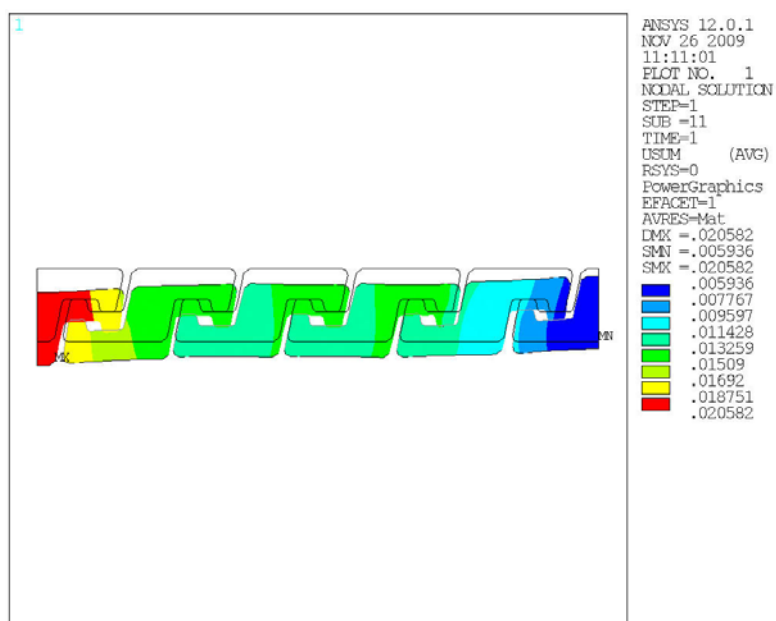


Figura A1-6.- Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

As Figuras A1.7 e A1.8 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

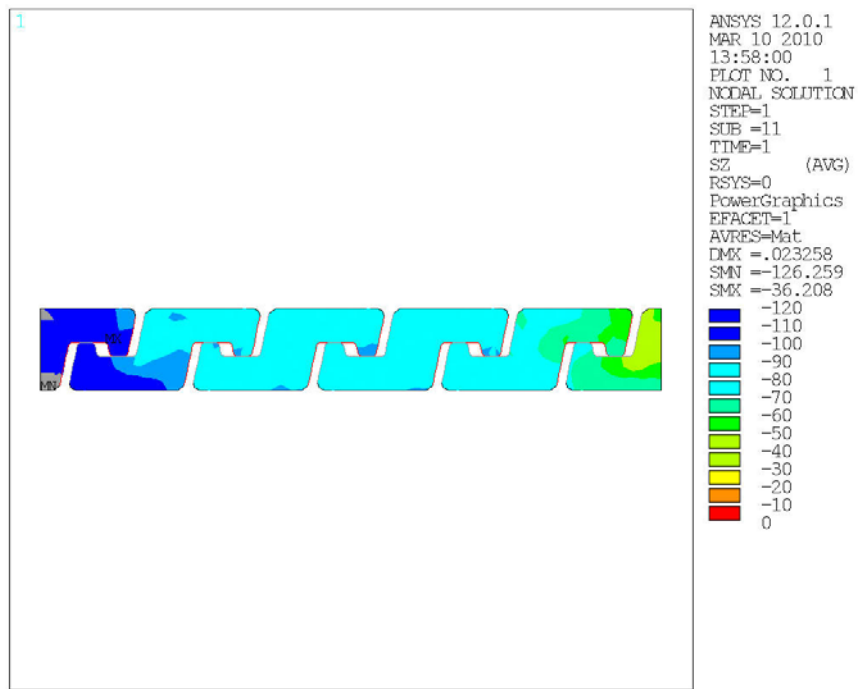


Figura A1-7.- Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

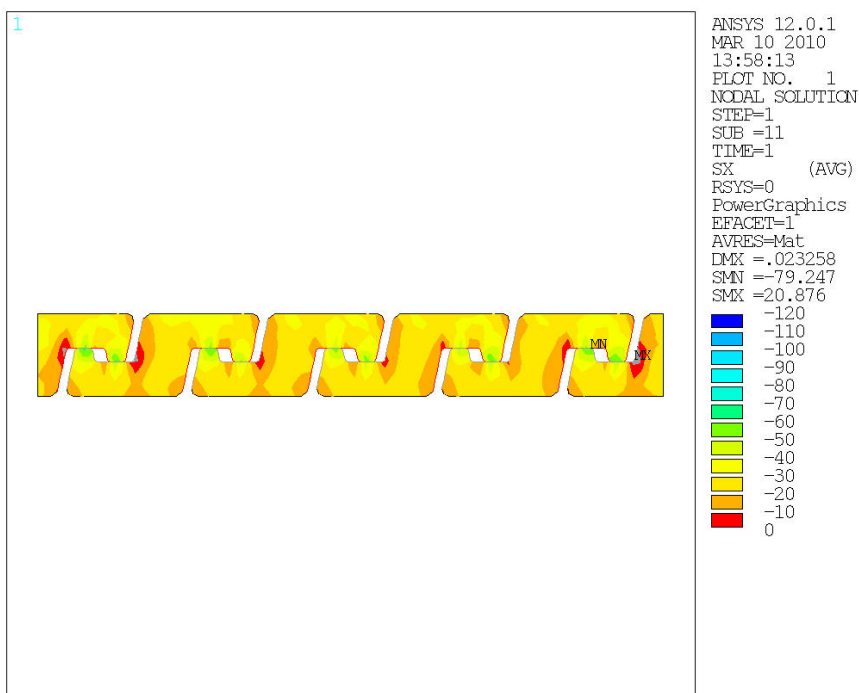


Figura A1-8.- Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

Esta malha não representa bem as regiões com concentração de tensão.

A1.3 Malha de dimensão de 0,2 mm e 10 passos.

Este modelo possui apenas a camada da armadura de pressão, com malha de dimensão 0,2 mm e 10 passos, como mostra a Figura A1.9.

O modelo possui 13967 elementos, sendo 12851 axissimétrico e 116 de contato.

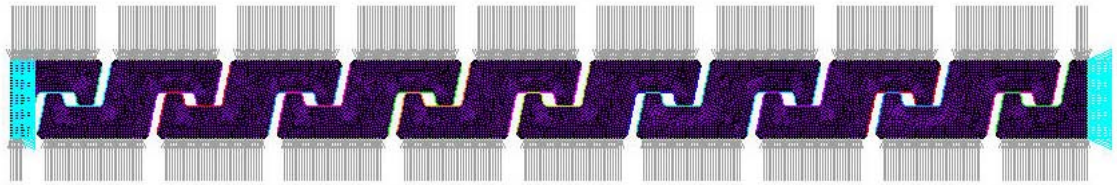


Figura A1-9.- Malha gerada ao longo da armadura de pressão, de dimensão 0,2 mm e 10 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A1-10.

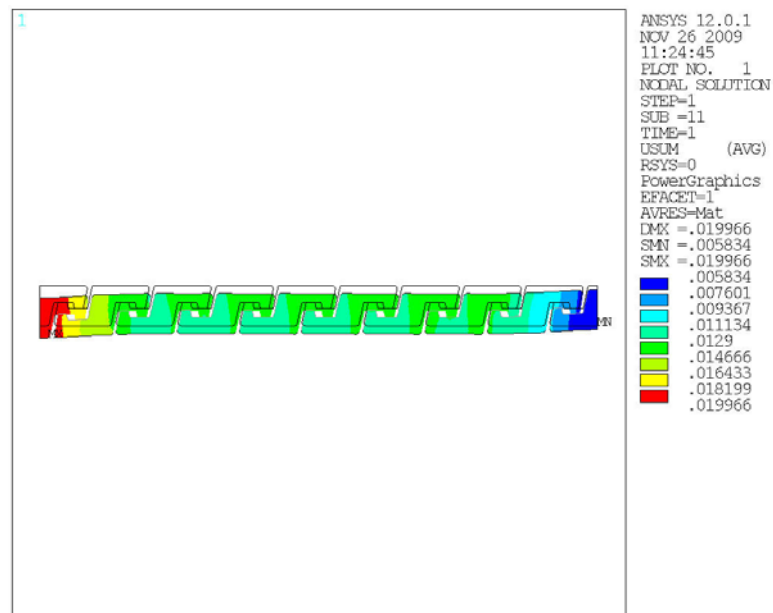


Figura A1-10. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,2 mm e 10 passos.

As Figuras A1.11 e A1.12 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

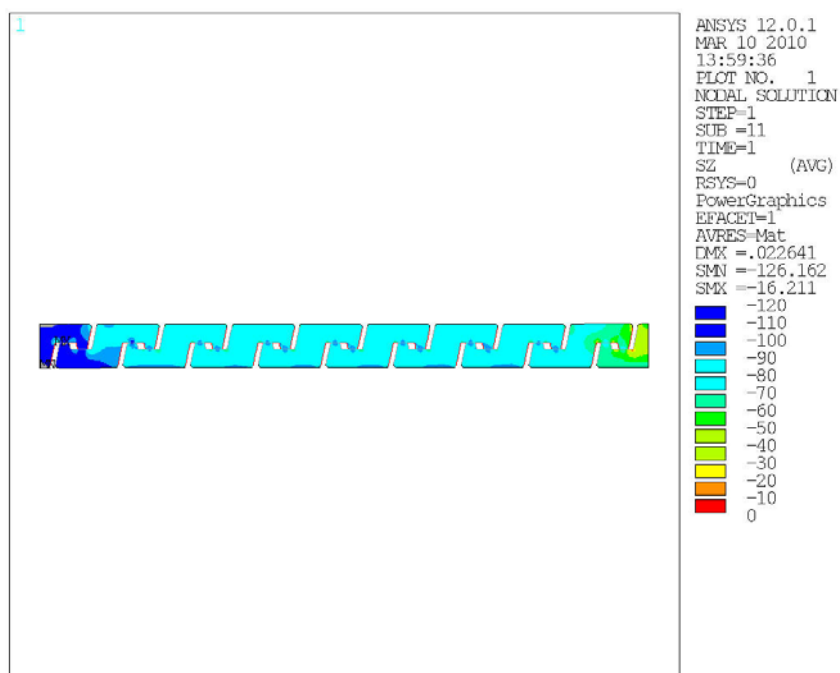


Figura A1-11. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,2 mm e 10 passos.

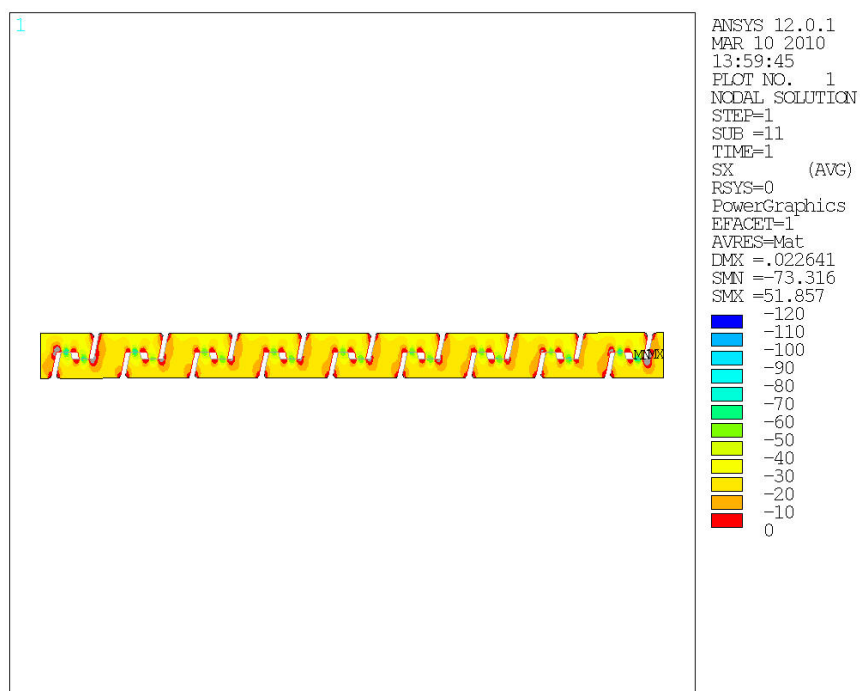


Figura A1-12. - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,2 mm e 10 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

A1.4 Malha de dimensão de 0,4 mm e 10 passos.

Este modelo possui apenas a camada da armadura de pressão, com malha de dimensão 0,4 mm e 10 passos, como mostra a Figura A3.13.

O modelo possui 4208 elementos, sendo 3632 axissimétrico e 572 de contato.

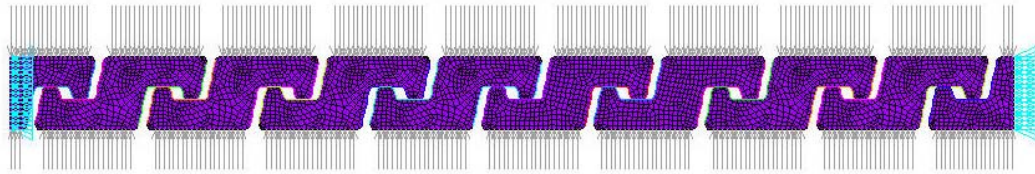


Figura A1-13. - Malha gerada ao longo da armadura de pressão, de dimensão 0,4 mm e 10 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A1.14.

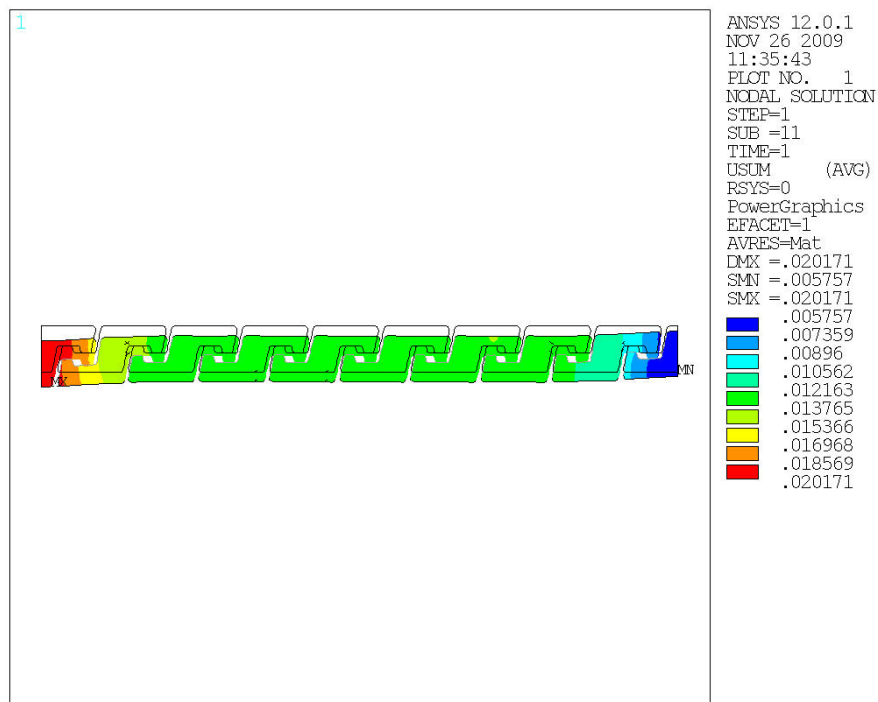


Figura A1-14. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,4 mm e 10 passos.

As Figuras A1.15 e A1.16 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

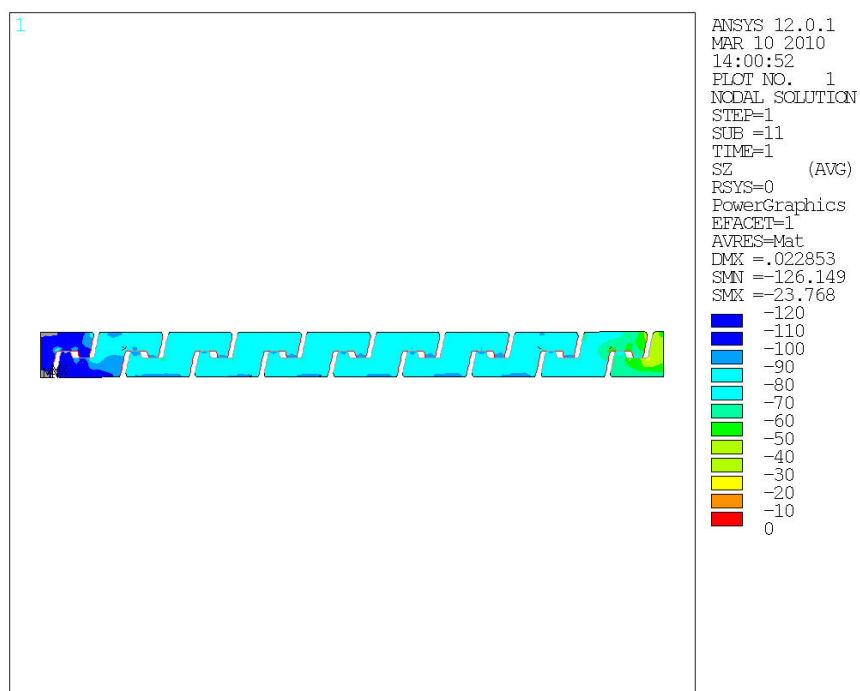


Figura A1-15. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 10 passos.

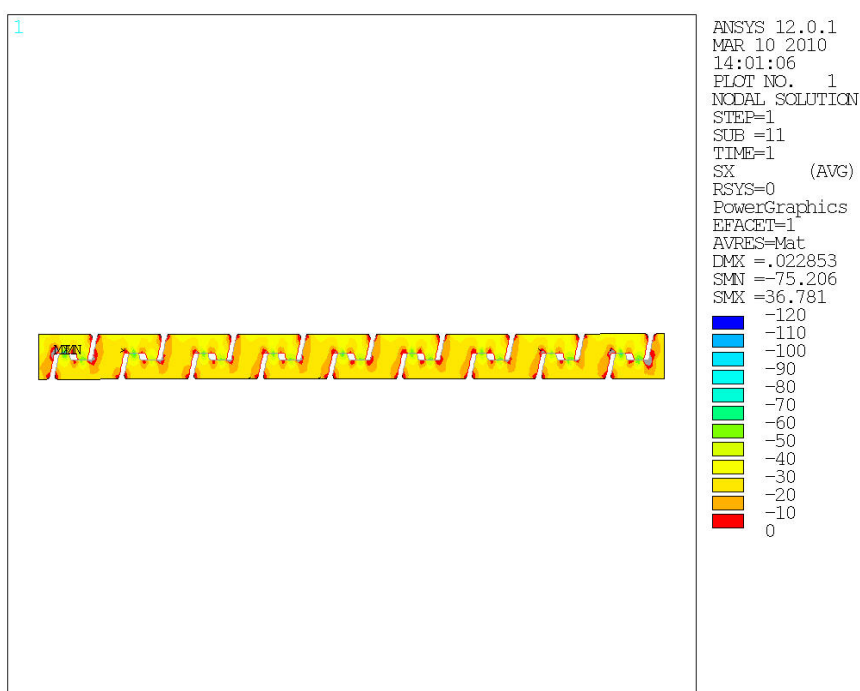


Figura A1-16. - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 10 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

A1.5 Malha de dimensão de 0,8 mm e 10 passos.

Este modelo possui apenas a camada da armadura de pressão, com malha de dimensão 0,8 mm e 10 passos, como mostra a Figura A1.17

O modelo possui 1294 elementos, sendo 952 axissimétrico e 342 de contato.

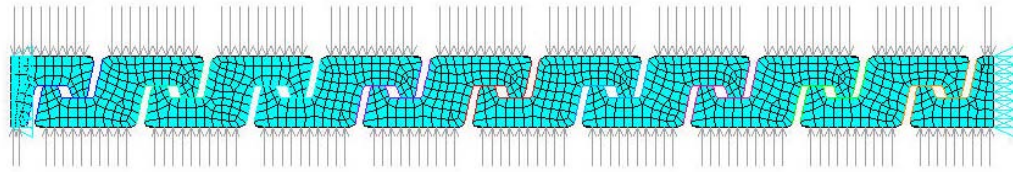


Figura A1-17. - Malha gerada ao longo da armadura de pressão, de dimensão 0,8 mm e 10 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A1.18.

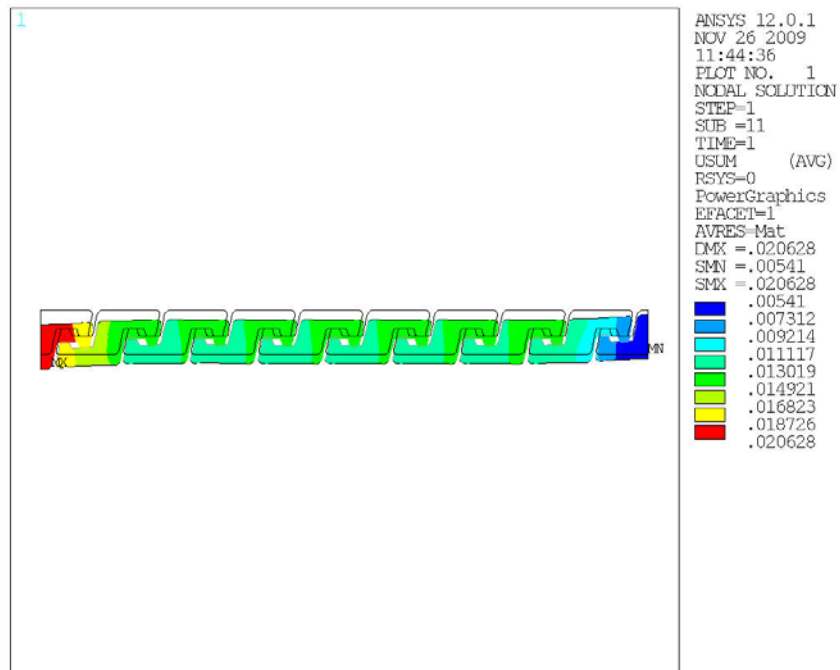


Figura A1-18. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,8 mm e 10 passos.

As Figuras A1.19 e A1.20 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

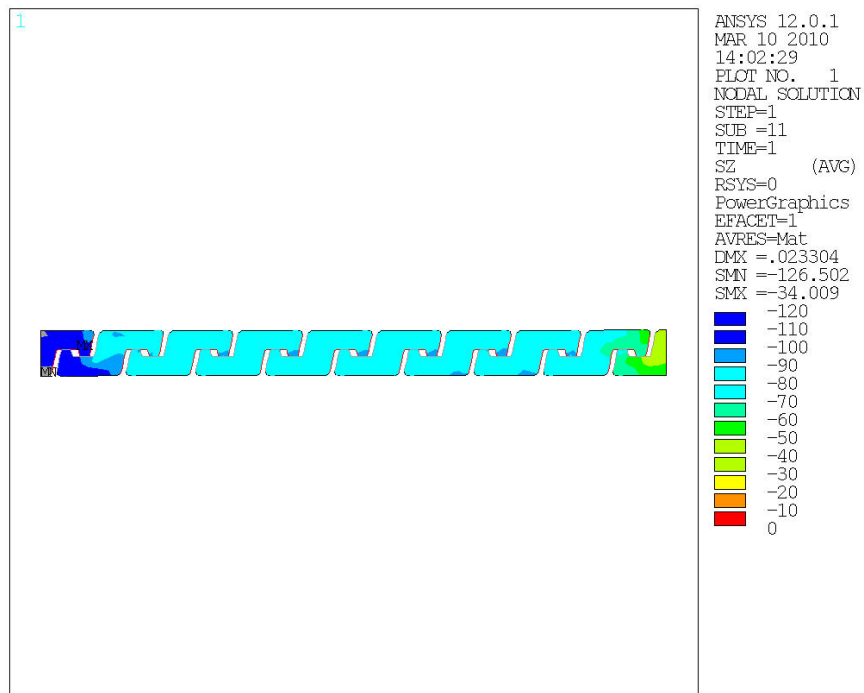


Figura A1-19. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,8 mm e 10 passos.

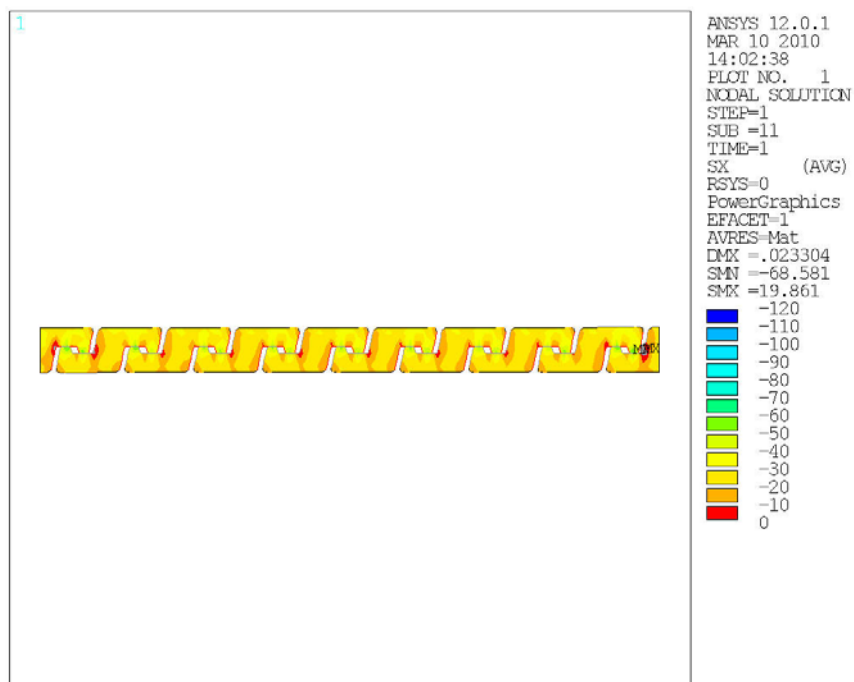


Figura A1-20. Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,8 mm e 10 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

Esta malha não representa bem as regiões com concentração de tensão.

Anexo 2 - RESULTADOS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES DAS ANÁLISES DOS MODELOS EMPREGANDO ELEMENTOS PLANOS AXISSIMÉTRICOS COMPOSTOS PELA ARMADURA DE PRESSÃO E PELAS CAMADAS POLIMÉRICAS QUE A CIRCUNDAM.

A2.1 Malha de dimensão de 0,2 mm e 6 passos.

Este modelo possui a camada da armadura de pressão e as camadas poliméricas que a circundam, com malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos, como mostra a Figura A2.1.

O modelo possui 16698 elementos, sendo 15106 axissimétrico e 1592 de contato.

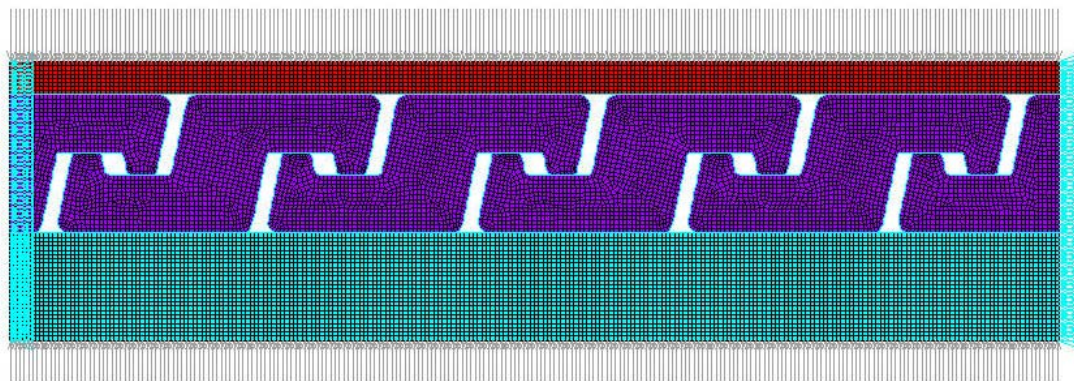


Figura A2-1. - Malha gerada de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A2.2.

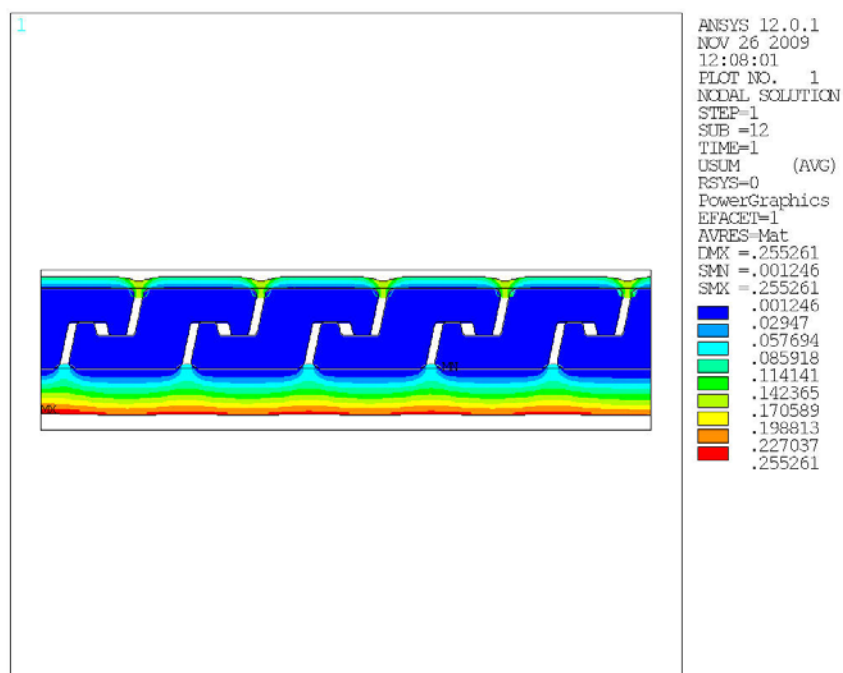


Figura A2-2. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

As Figuras A2.3 e A2.4 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

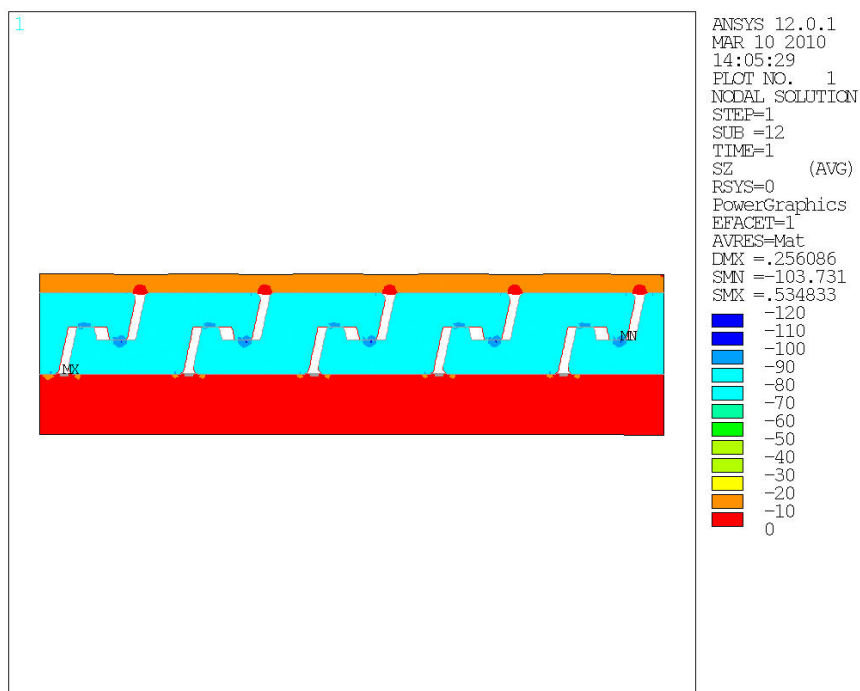


Figura A2-3. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

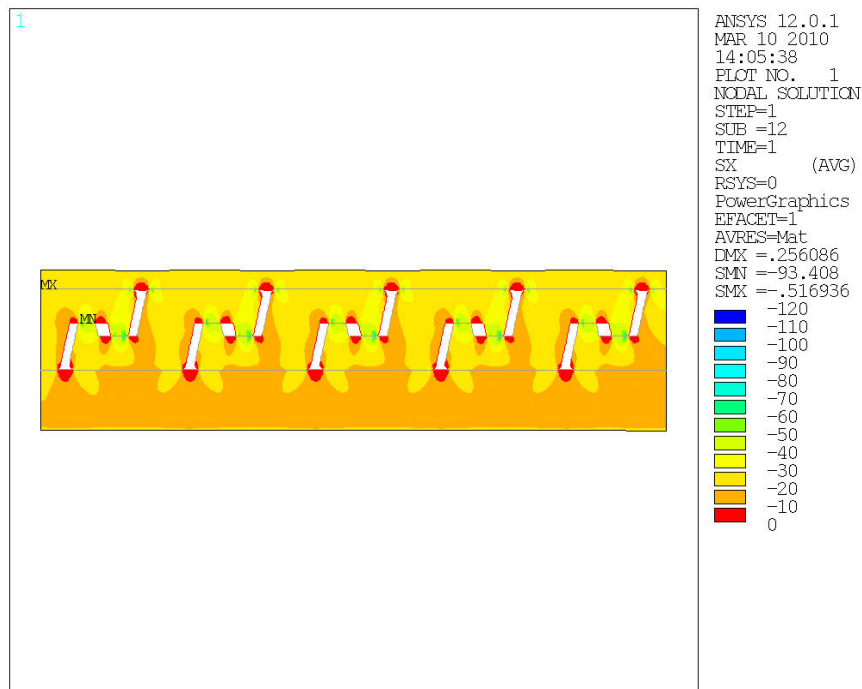


Figura A2-4. - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,2 mm e 6 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

A2.2 Malha de dimensão de 0,4 mm e 6 passos.

Este modelo possui a camada da armadura de pressão e as camadas poliméricas que a circundam, com malha de dimensão 0,4 mm e 6 passos, como mostra a Figura A2.5

O modelo possui 4812 elementos, sendo 4000 axissimétrico e 812 de contato.

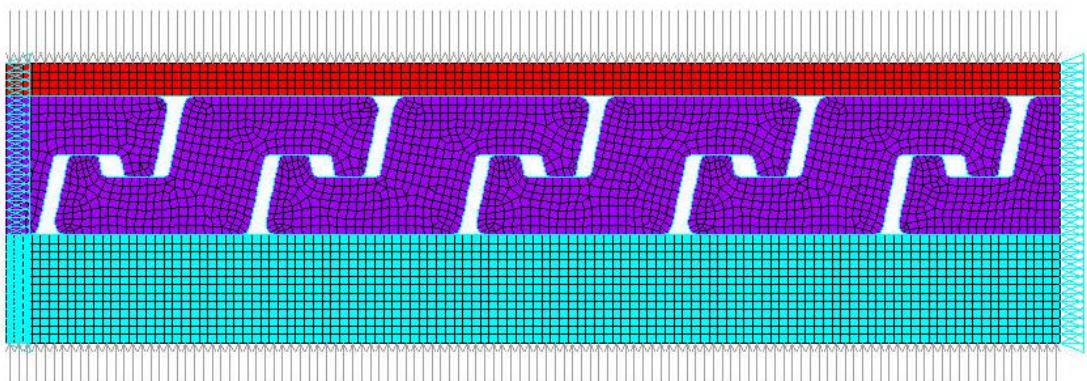


Figura A2-5. - Malha gerada de dimensão 0,4 mm de 6 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A2.6.

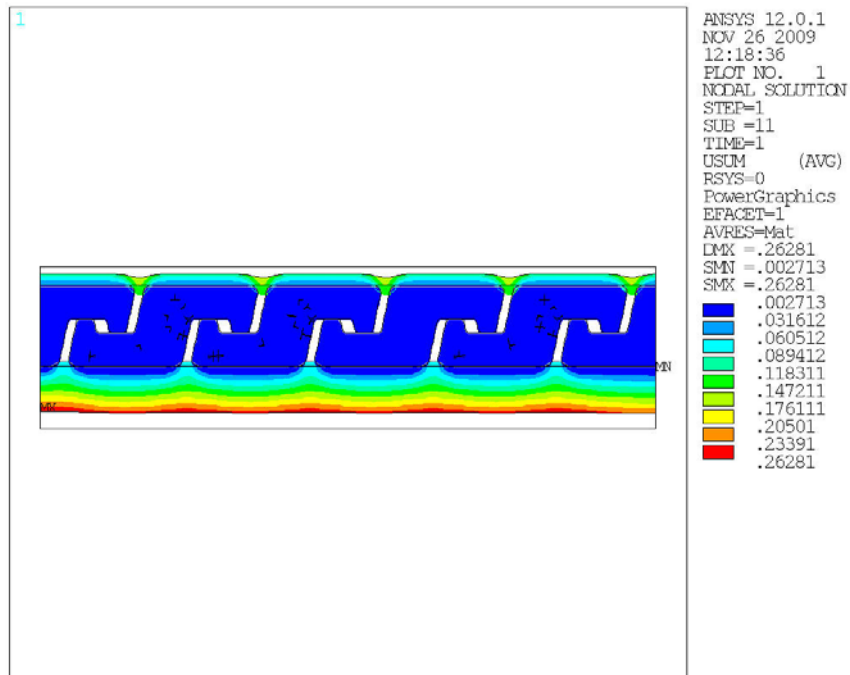


Figura A2-6. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,4 mm e 6 passos.

As Figuras A2.7 e A2.8 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

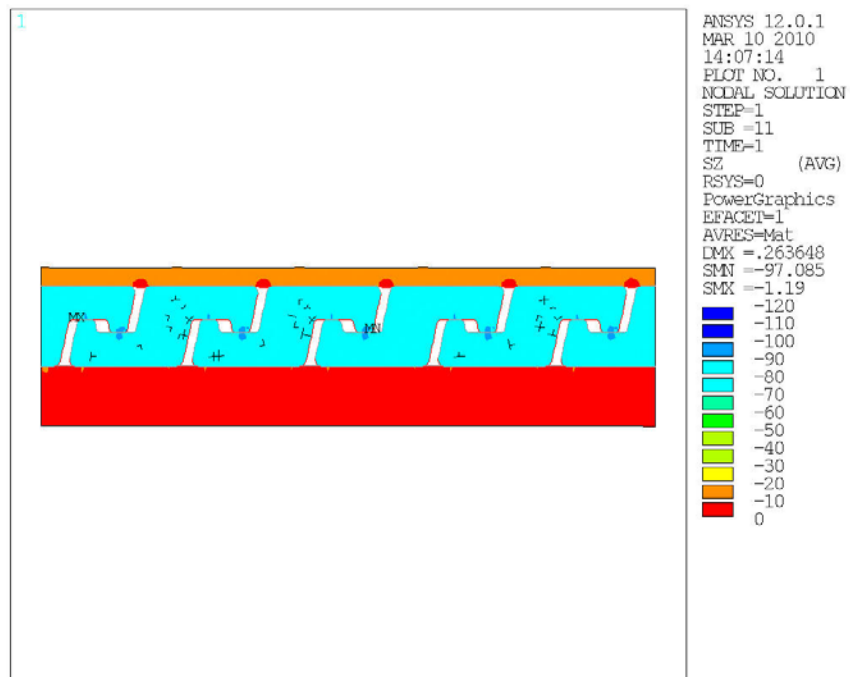


Figura A2-7. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 6 passos.

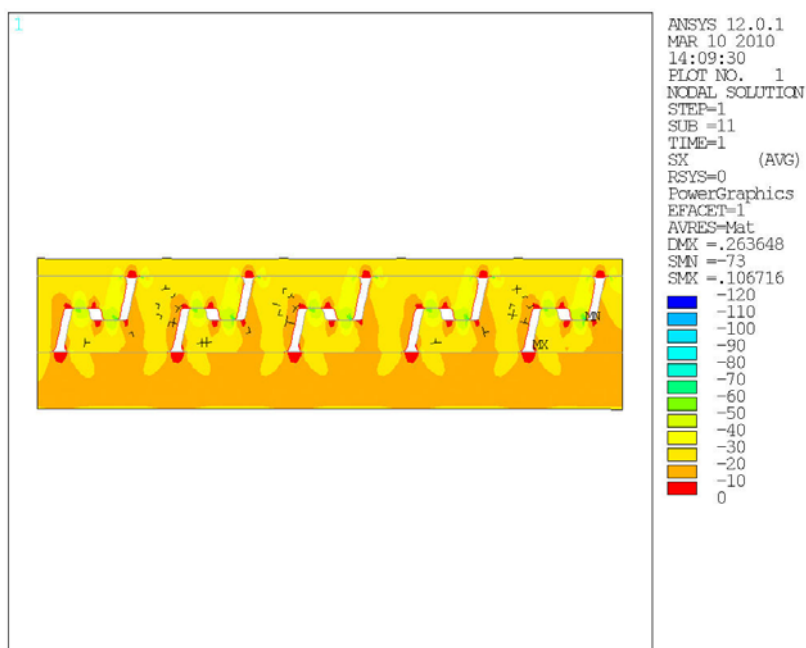


Figura A2-8. - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 6 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

A2.3 Malha de dimensão de 0,8 mm e 6 passos.

Este modelo possui a camada da armadura de pressão e as camadas poliméricas que a circundam, com malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos, como mostra a Figura A2.9.

O modelo possui 1509 elementos, sendo 1067 axissimétrico e 442 de contato.

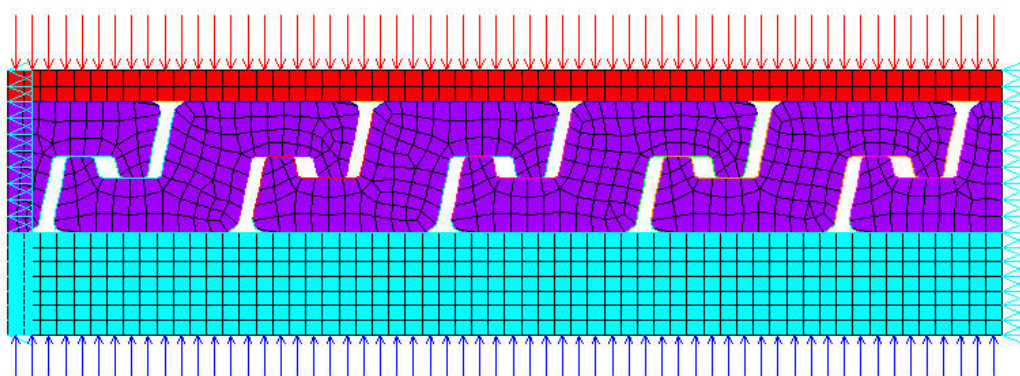


Figura A2-9. - Malha gerada de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A2.10.

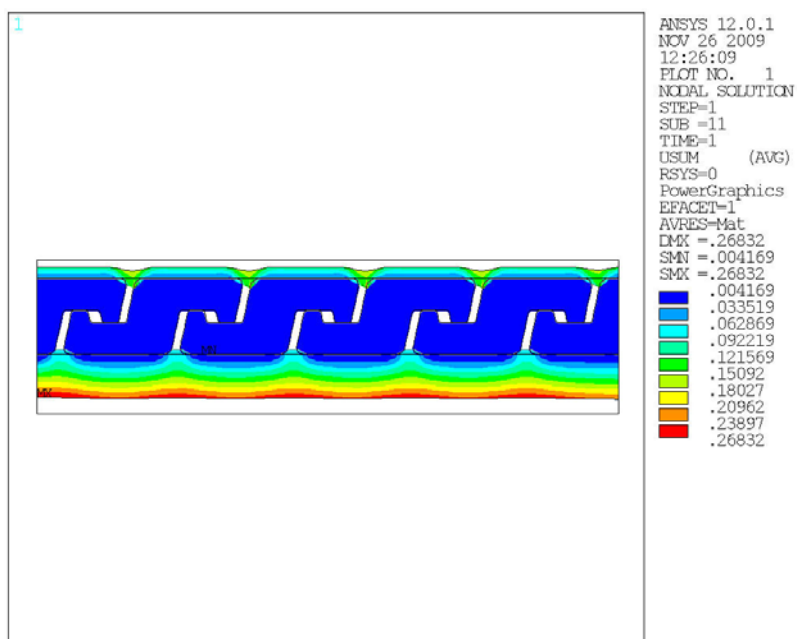


Figura A2-10. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

As Figuras A2.11 e A2.12 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

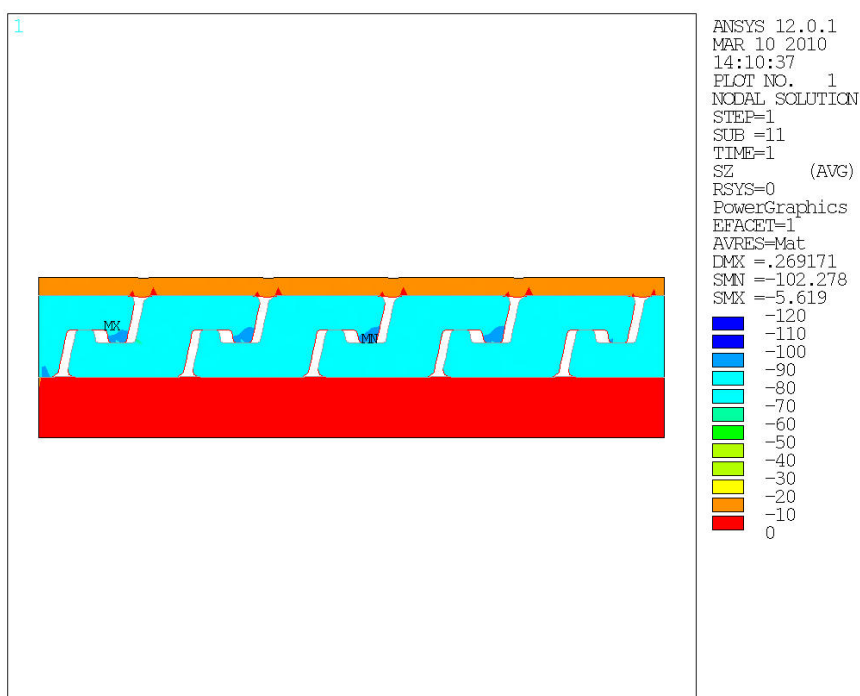


Figura A2-11. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

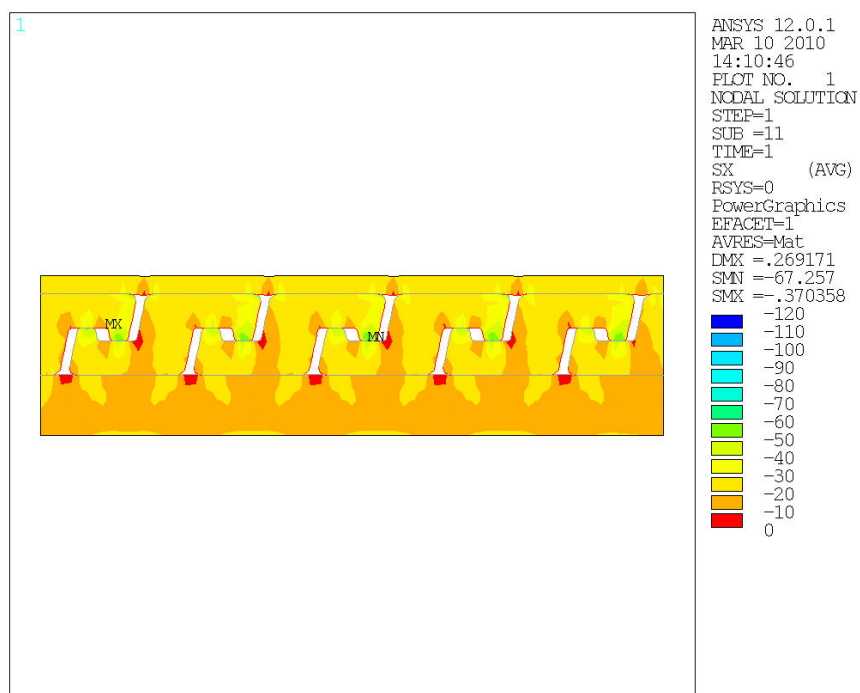


Figura A2-12. - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,8 mm e 6 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

Esta malha não representa bem as regiões com concentração de tensão.

A2.4 Malha de dimensão de 0,4 mm e 3 passos.

Este modelo possui a camada da armadura de pressão e as camadas poliméricas que a circundam, com malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos, como mostra a Figura A2.13

O modelo possui 1929 elementos, sendo 1603 axissimétrico e 326 de contato.

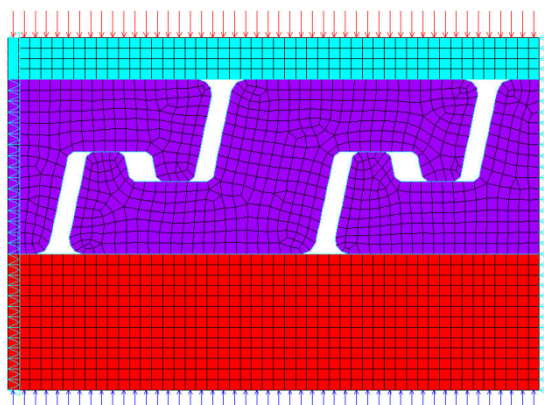


Figura A2-13. - Malha gerada de dimensão 0,4 mm de 3 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A2.14.

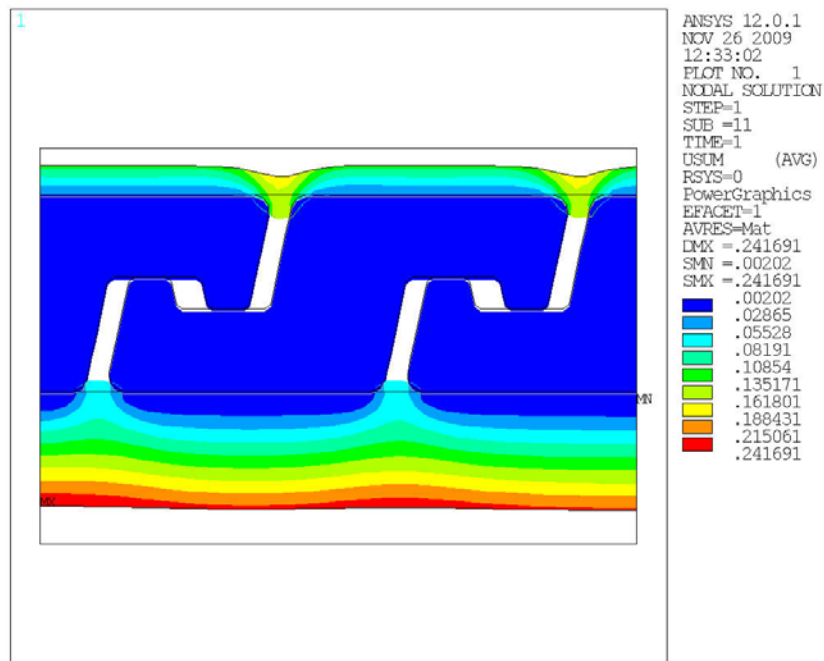


Figura A2-14. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.

As Figuras A2.15 e A2.16 ilustram as distribuições de tensões calculadas ao longo da armadura de pressão.

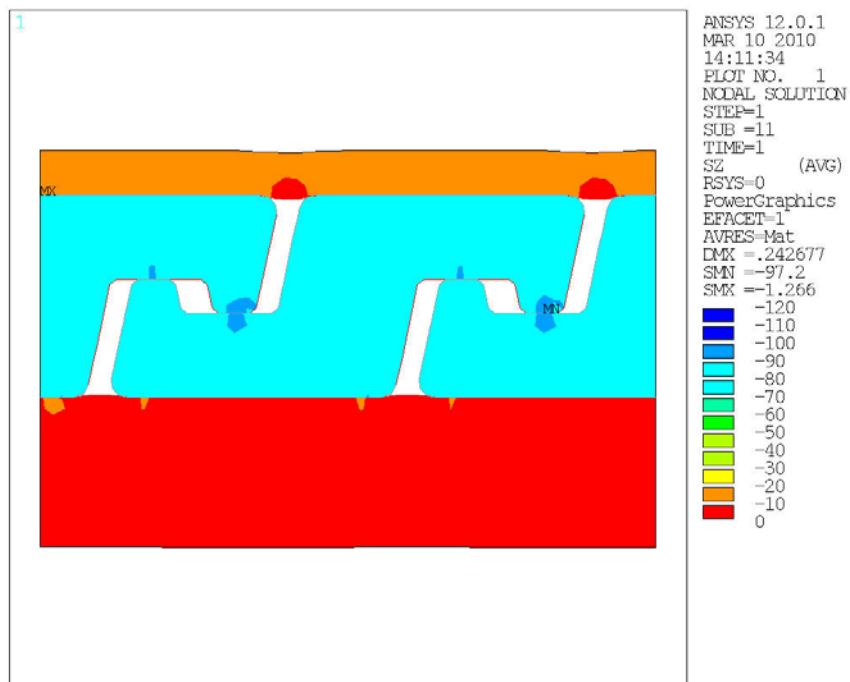


Figura A2-15. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.

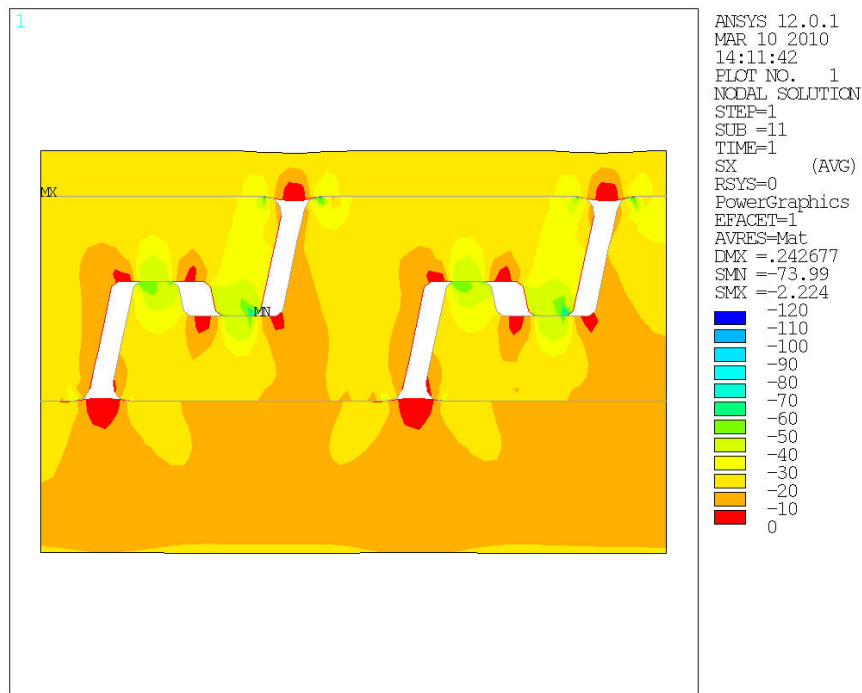


Figura A2-16. - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.

A tensão X é inferior a tensão normal ao longo da camada de armadura de pressão.

A2.5 Malha de dimensão de 0,4 mm e 4 passos.

Este modelo possui a camada da armadura de pressão e as camadas poliméricas que a circundam, com malha de dimensão 0,4 mm e 4 passos, como mostra a Figura A2.17

O modelo possui 2885 elementos, sendo 2397 axissimétrico e 488 de contato.

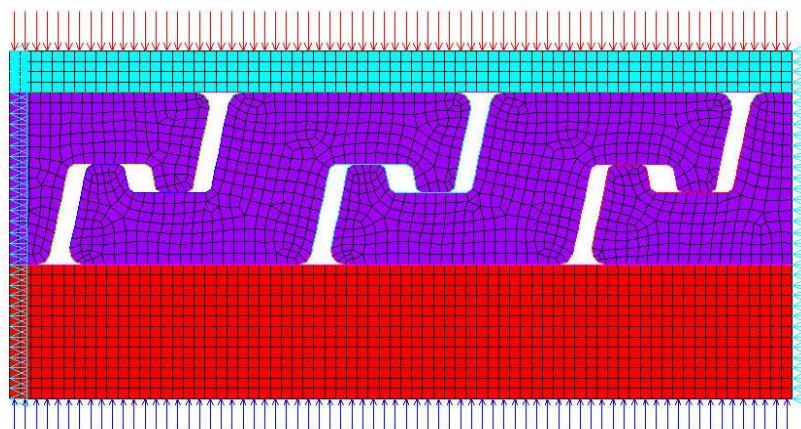


Figura A2-17. - Malha gerada de dimensão 0,4 mm de 3 passos.

Os deslocamentos obtidos no modelo devido ao carregamento aplicado estão indicados na Figura A2.18.

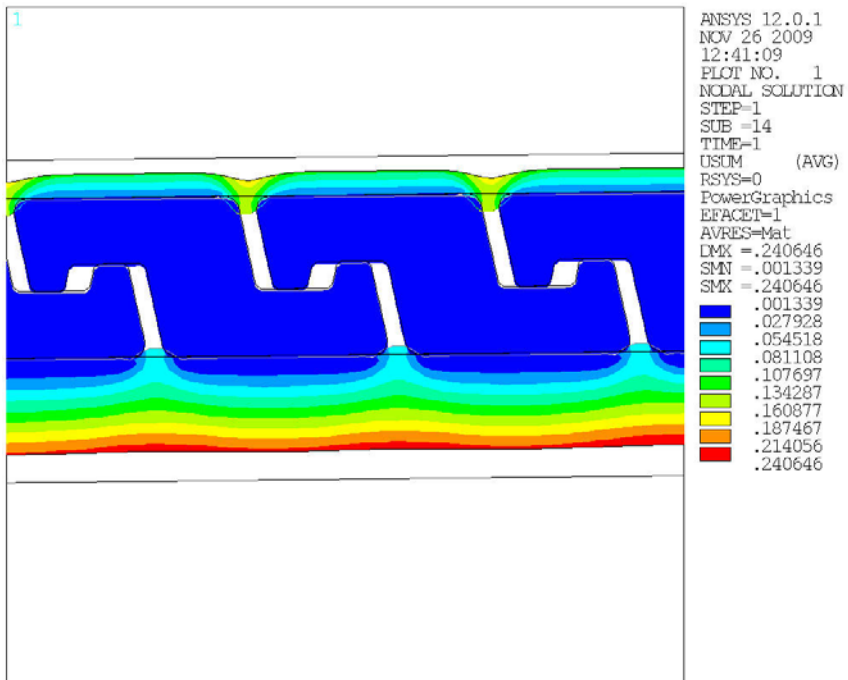


Figura A2-18. - Deslocamento (mm) da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.

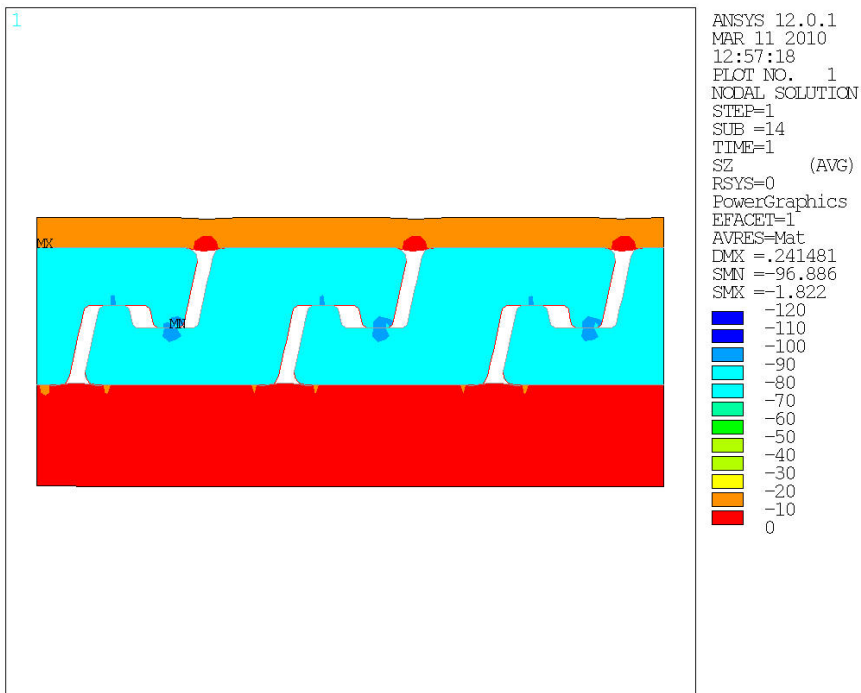


Figura A2-19. - Tensão normal (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.

Pode-se ver na Figura A2-20, que a tensão X é inferior a tensão normal e só aumentam próximo à zona de contato.

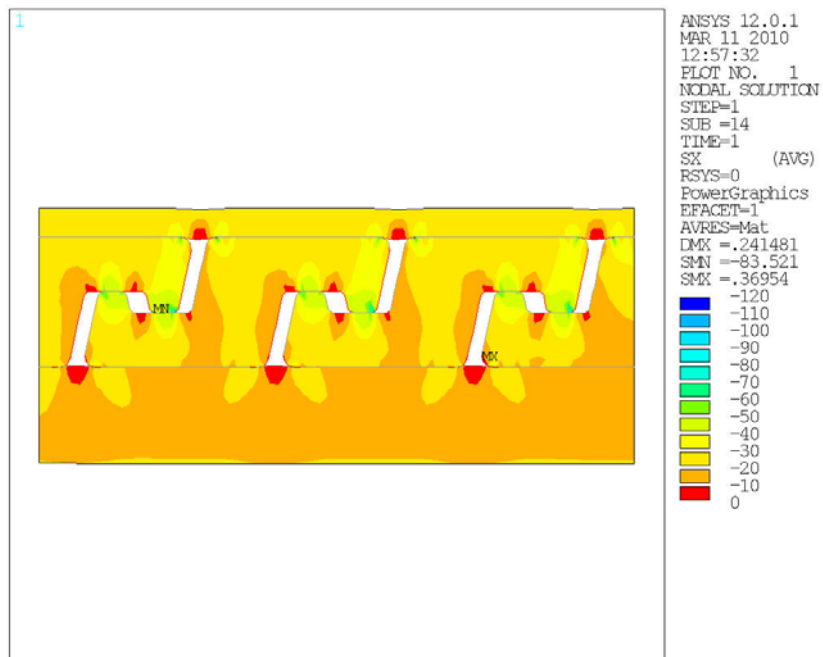


Figura A2-20. - Tensão X (MPa) da malha de dimensão 0,4 mm e 3 passos.

Anexo 3 - RESULTADOS DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES DAS ANÁLISES DOS MODELOS EMPREGANDO ELEMENTOS FINITOS SÓLIDOS ISOPARAMÉTRICOS.

Foram analisados três modelos de elementos finitos sólidos isoparamétricos variando apenas a rigidez dos elementos de contato.

A3.1 Fator de rigidez de contato 0,1

Os resultados do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 0,1 estão ilustrados nas Figuras A3.1 à A3.12.

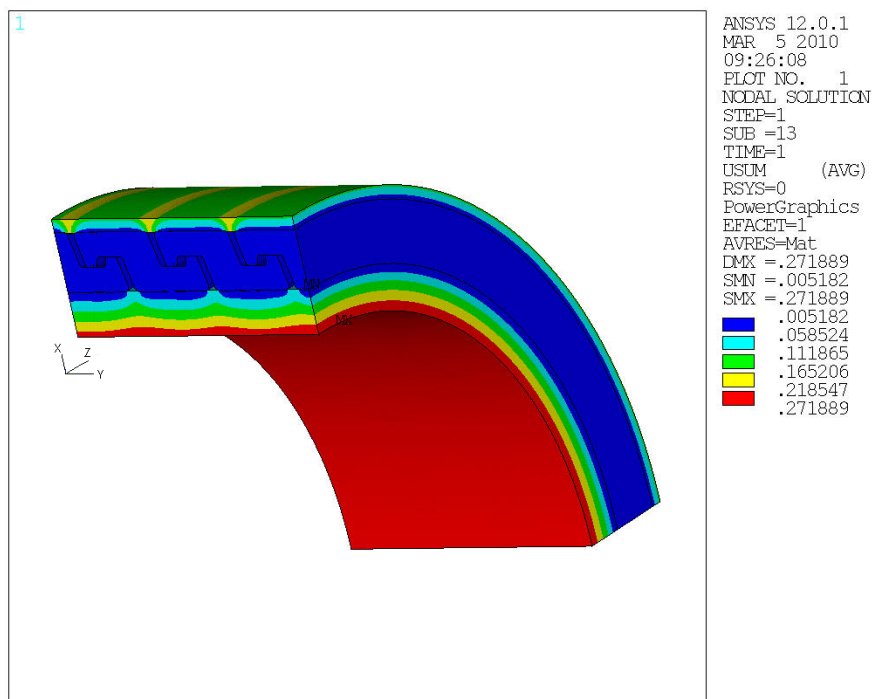


Figura A3-1. - Deslocamento (mm) do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 0,1.

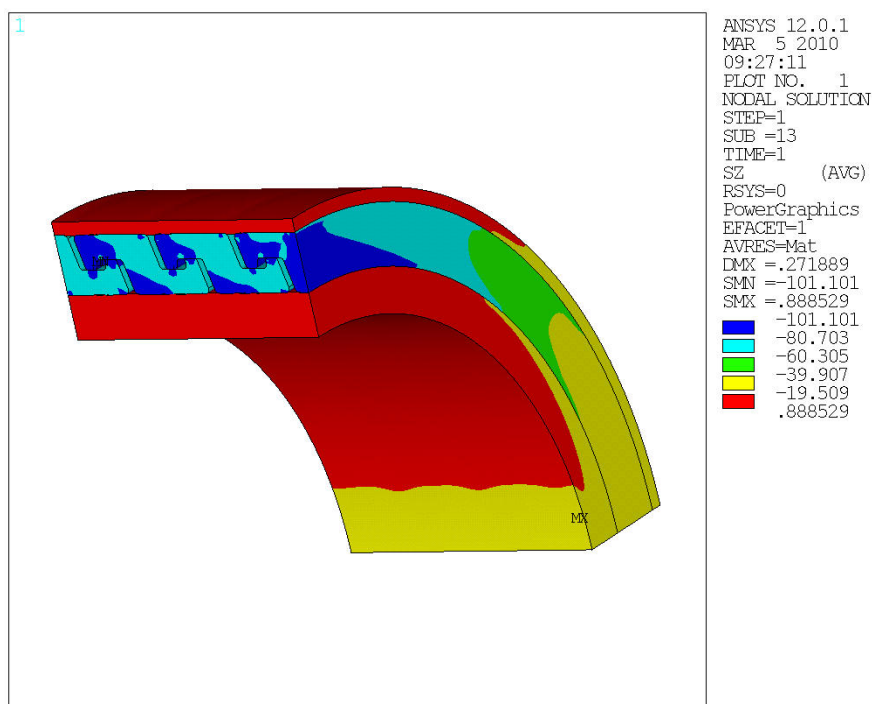


Figura A3-2. Tensão normal (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 0,1.

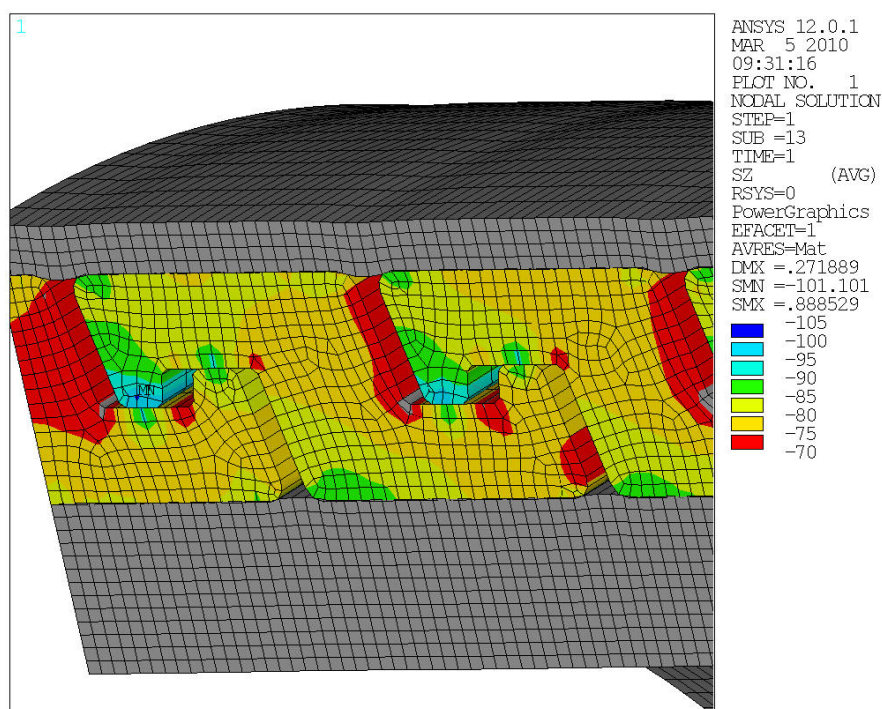


Figura A3-3. Tensão normal (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 0,1.

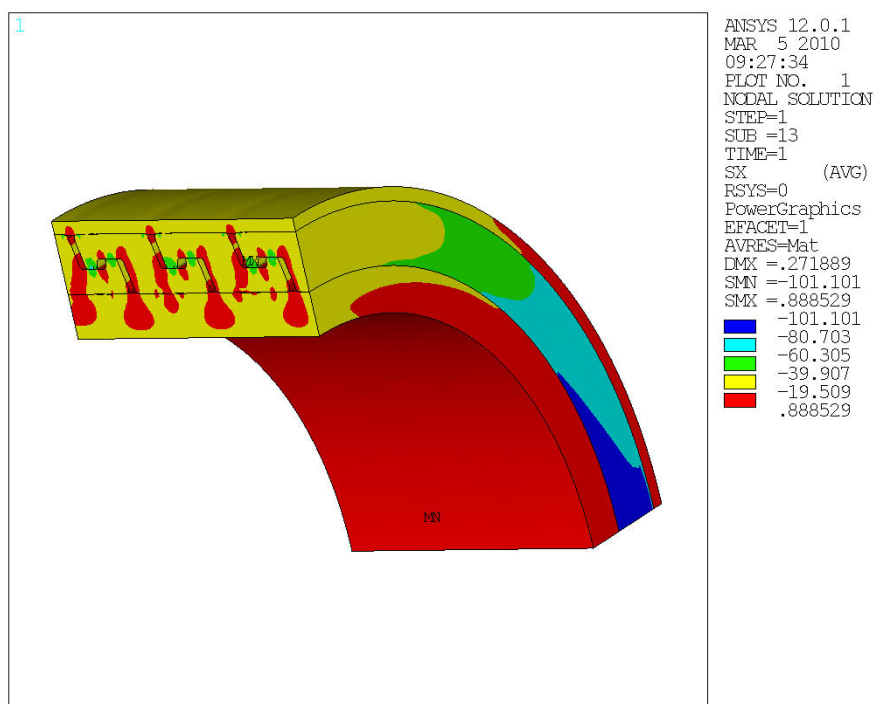


Figura A3-4. Tensão X (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 0,1.

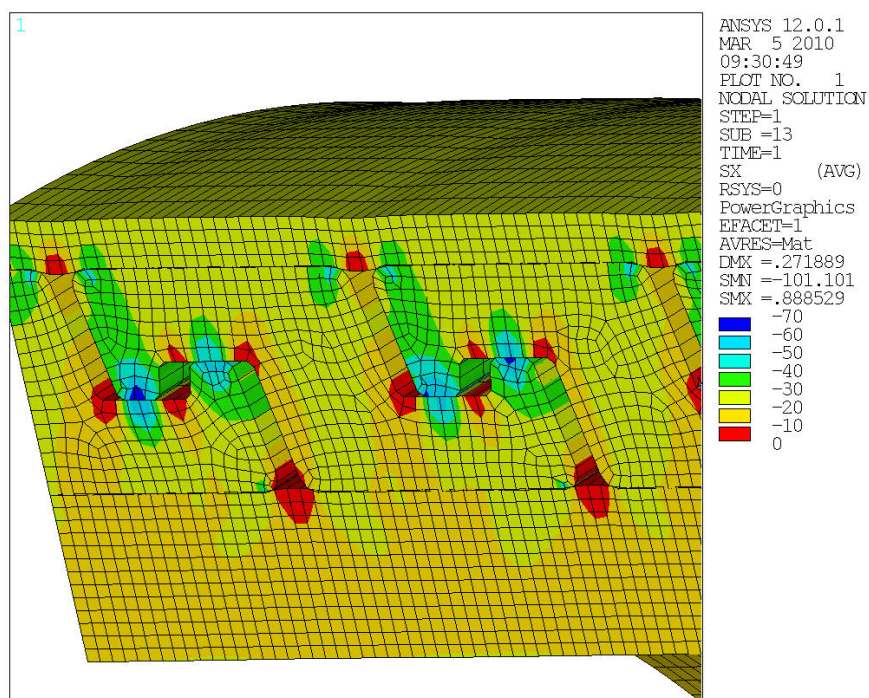


Figura A3-5. Tensão X (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 0,1.

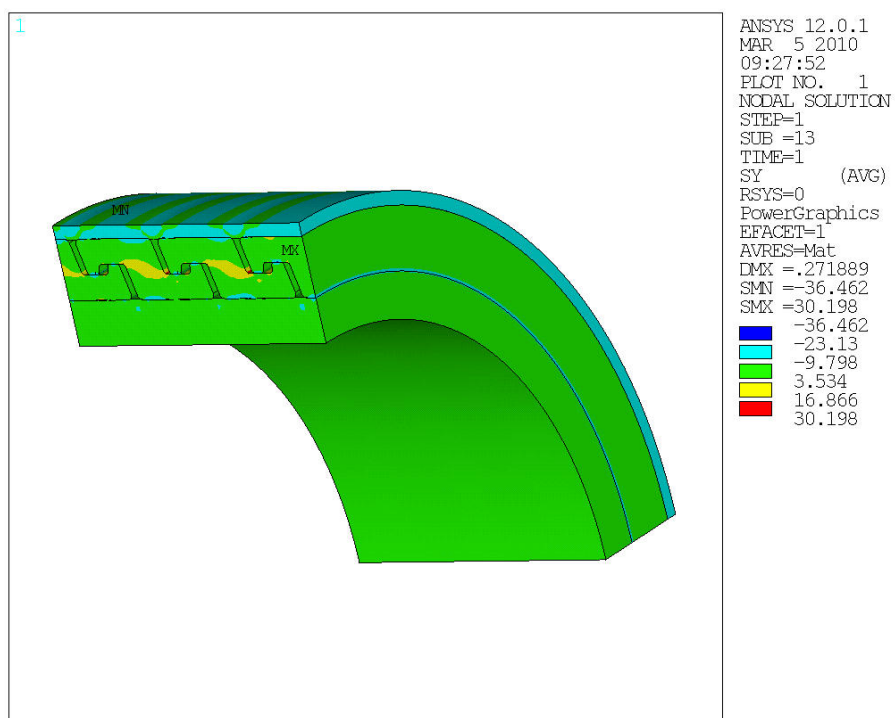


Figura A3-6. Tensão Y (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 0,1.

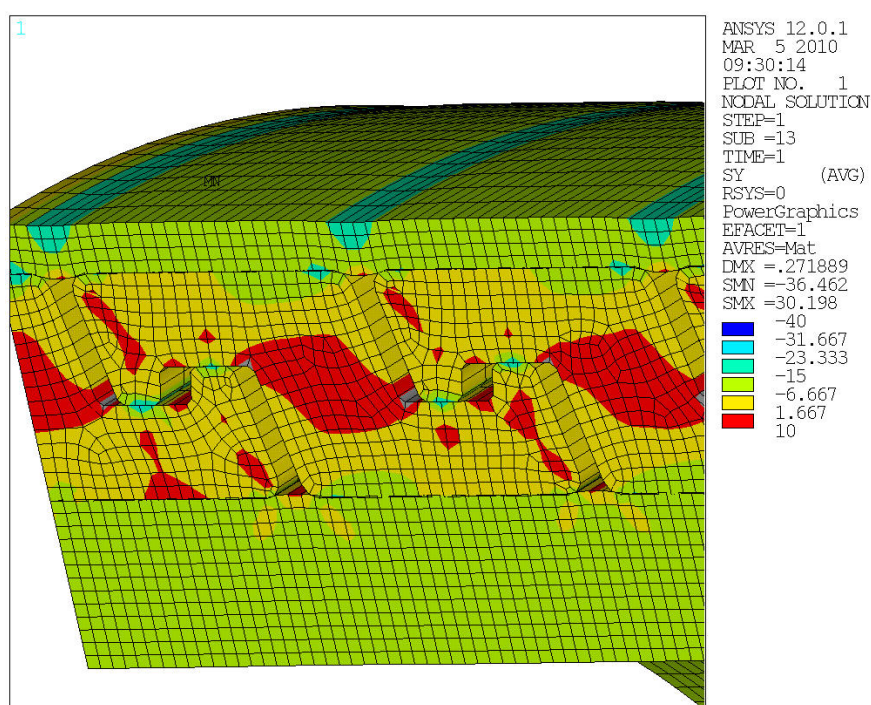


Figura A3-7. Tensão Y (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 0,1.

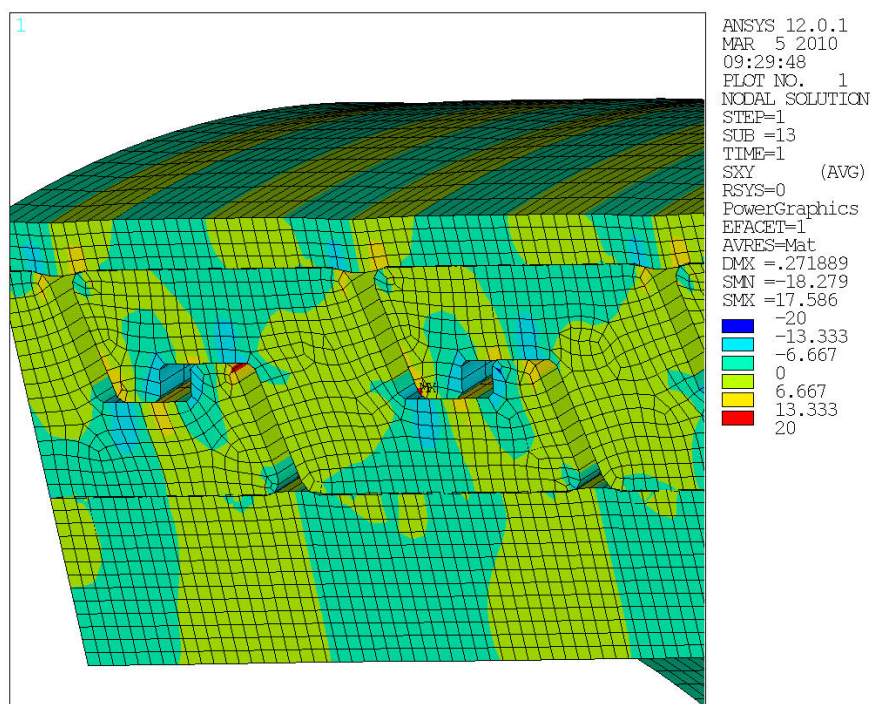


Figura A3-8. Tensão cisalhante (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 0,1.

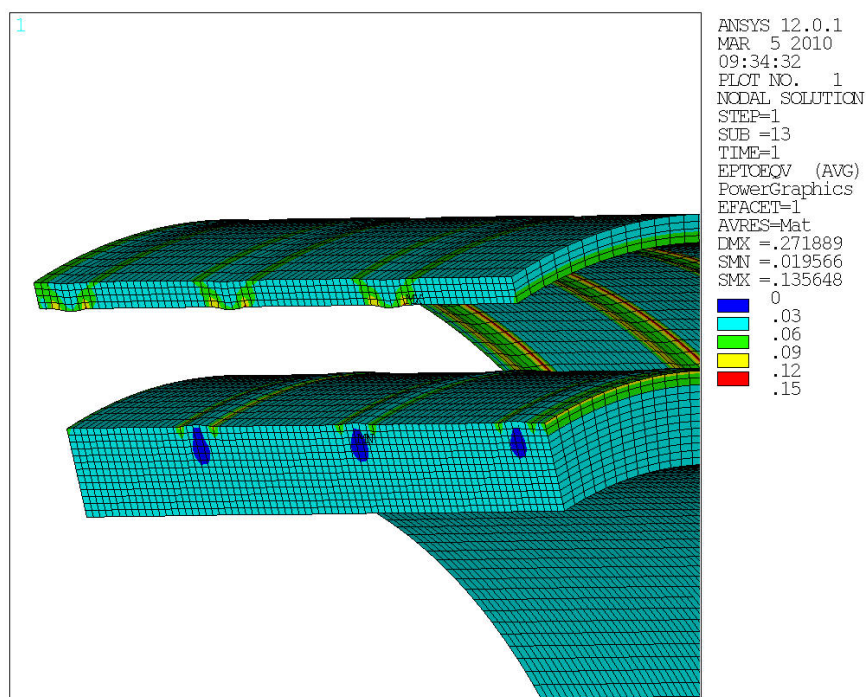


Figura A3-9. – Deformação de Von Mises (mm/mm) das camadas plásticas do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 0,1.

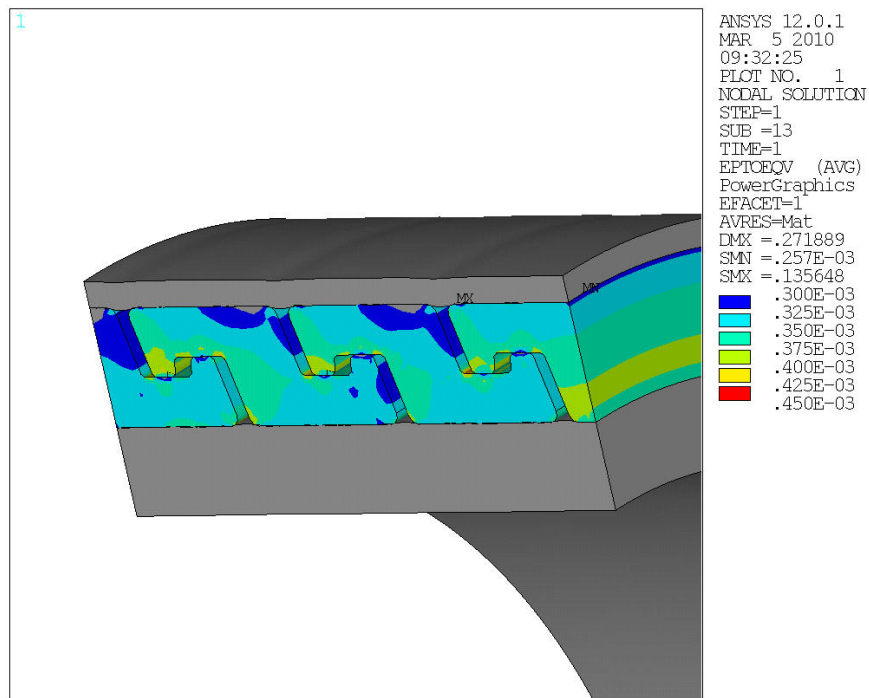


Figura A3-10. - Deformação de Von Mises (mm/mm) da camada de armadura de pressão do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 0,1.

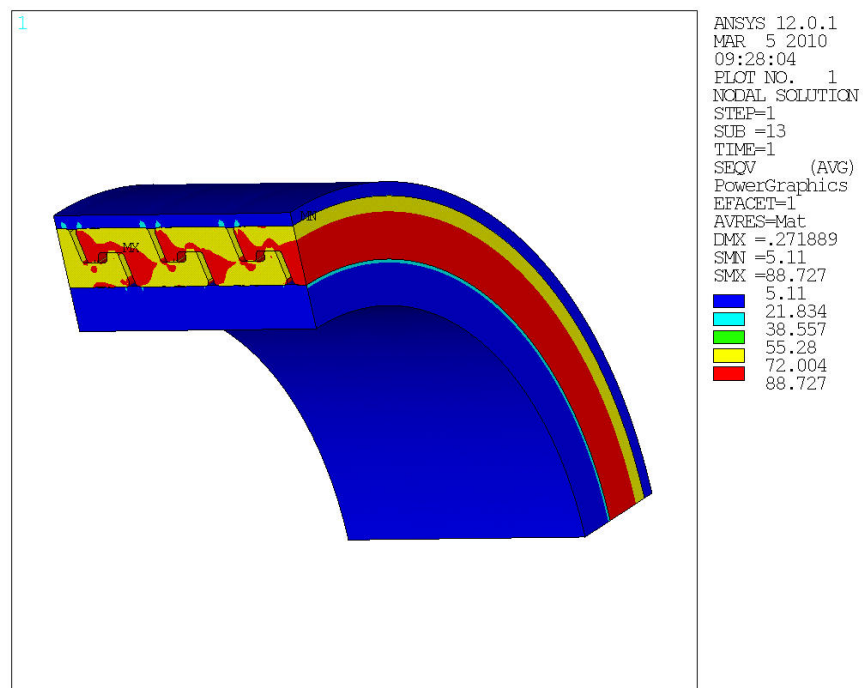


Figura A3-11. - Tensão Von Mises (MPa) do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 0,1.

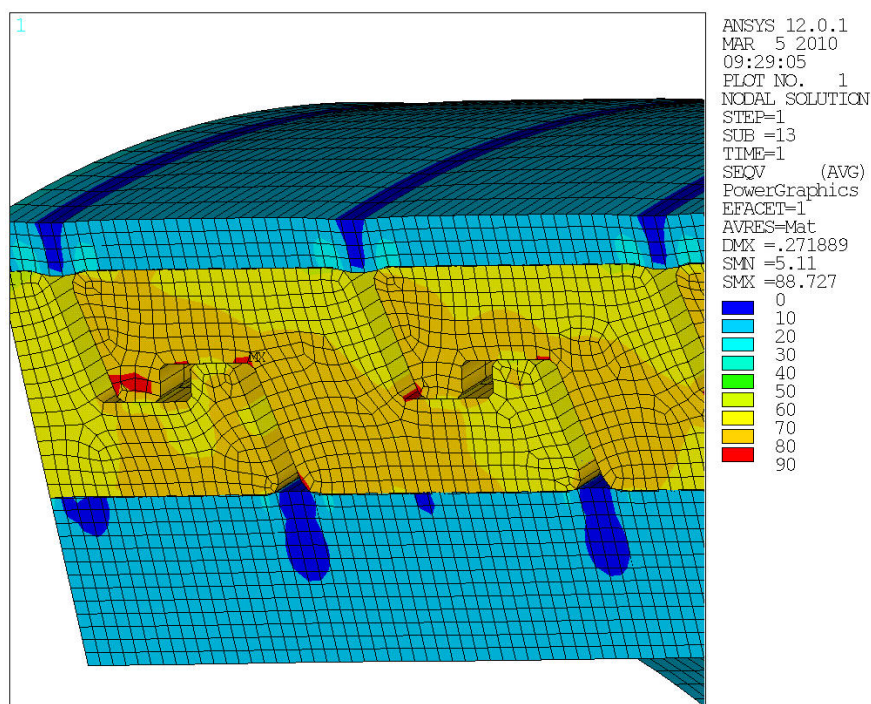


Figura A3-12. - Tensão Von Mises (MPa) da armadura de pressão do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 0,1.

A3.2 Fator de rigidez de contato 1

Os resultados do modelo com rigidez do elemento de contato 1 estão ilustrados nas Figuras A3.13 à A3.24.

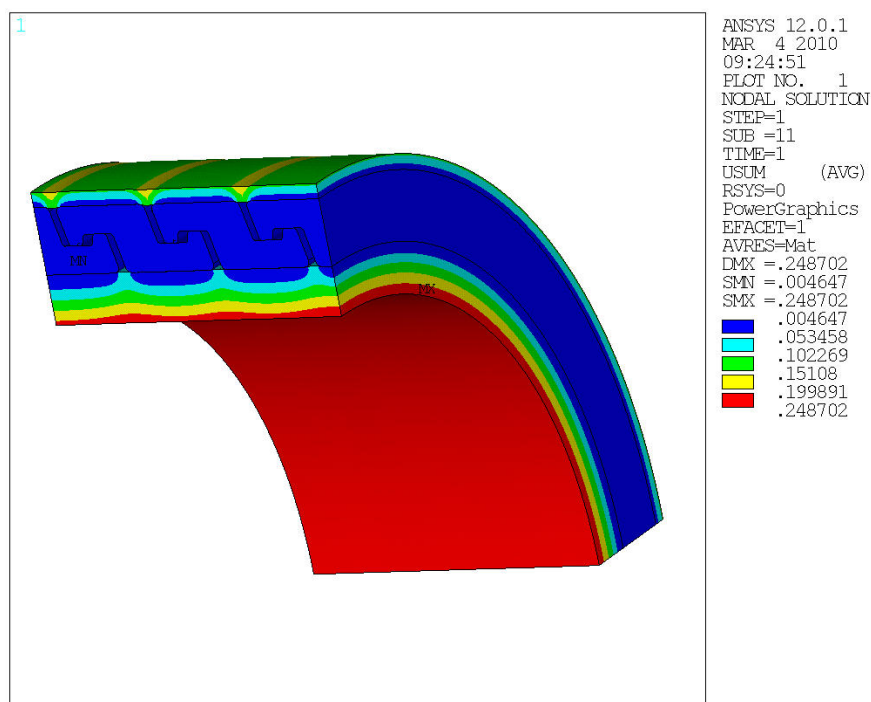


Figura A3-13. - Deslocamento (mm) do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 1.

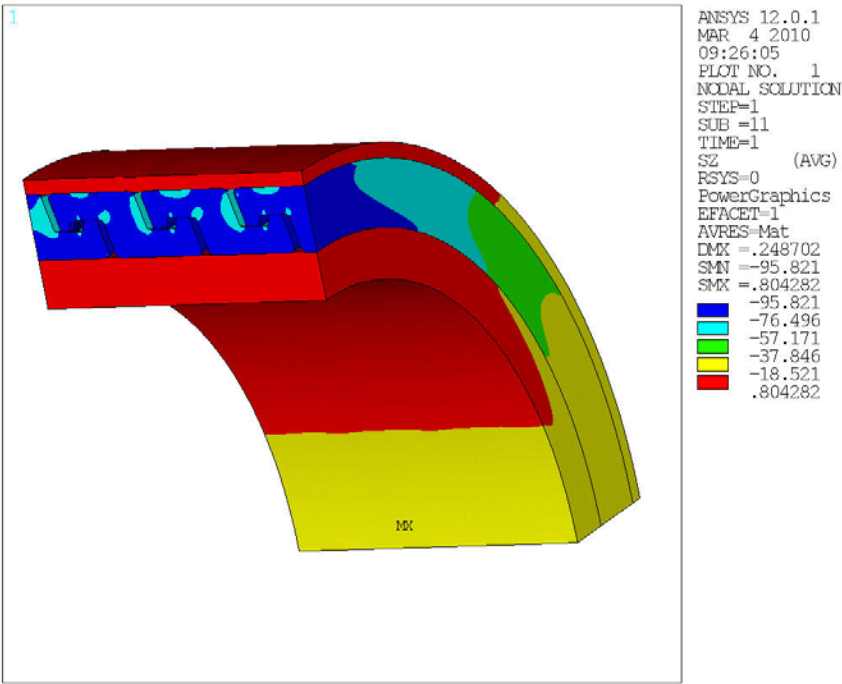


Figura A3-14. Tensão normal (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 1.

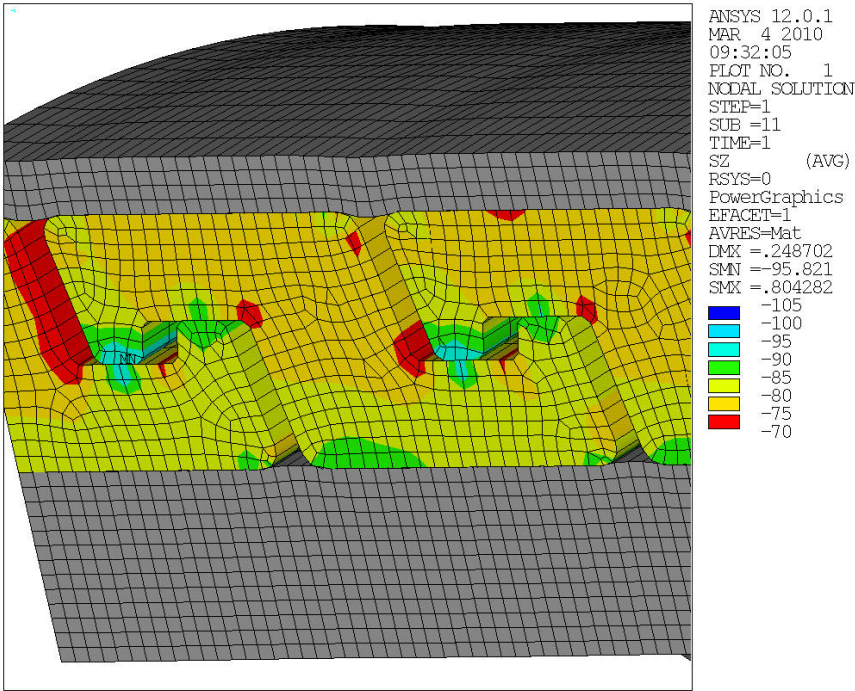


Figura A3-15. Tensão normal (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 1.

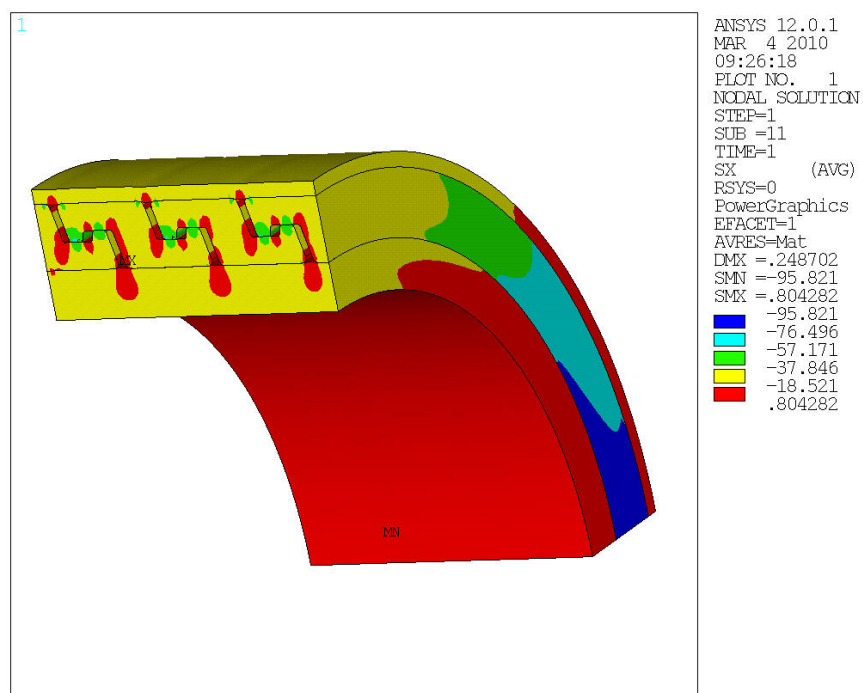


Figura A3-16. Tensão X (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 1.

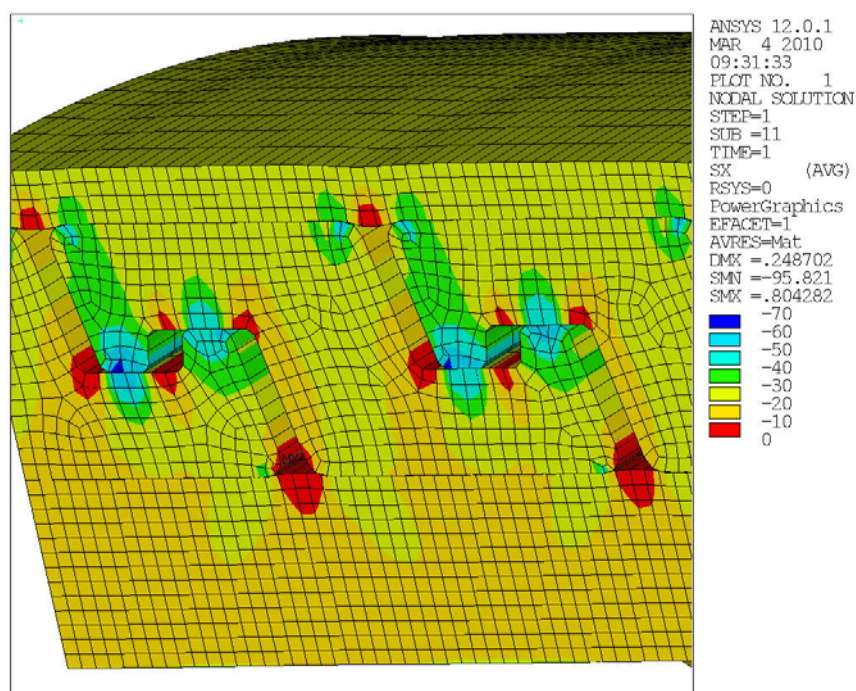


Figura A3-17. Tensão X (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 1.

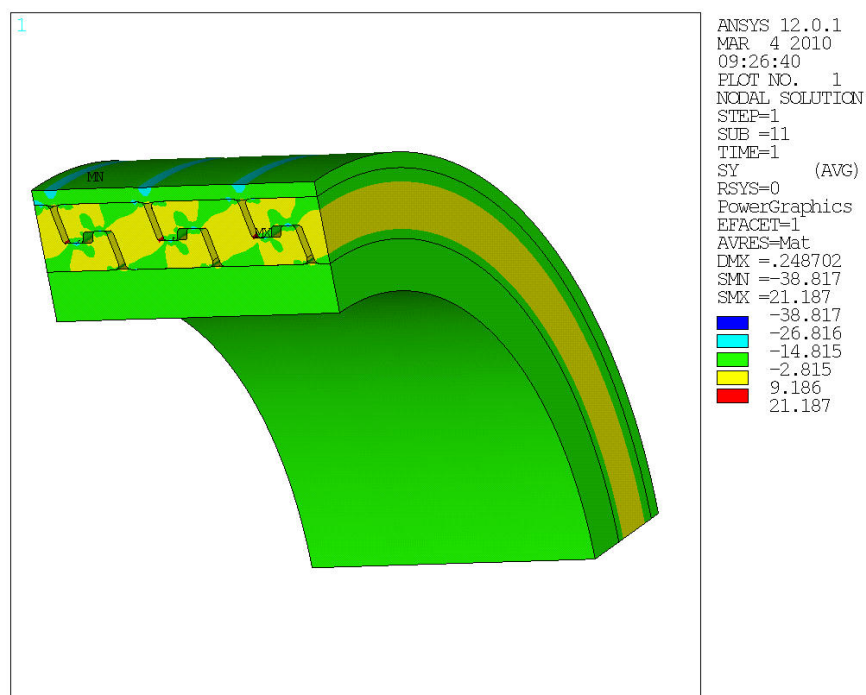


Figura A3-18. Tensão X (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 1.

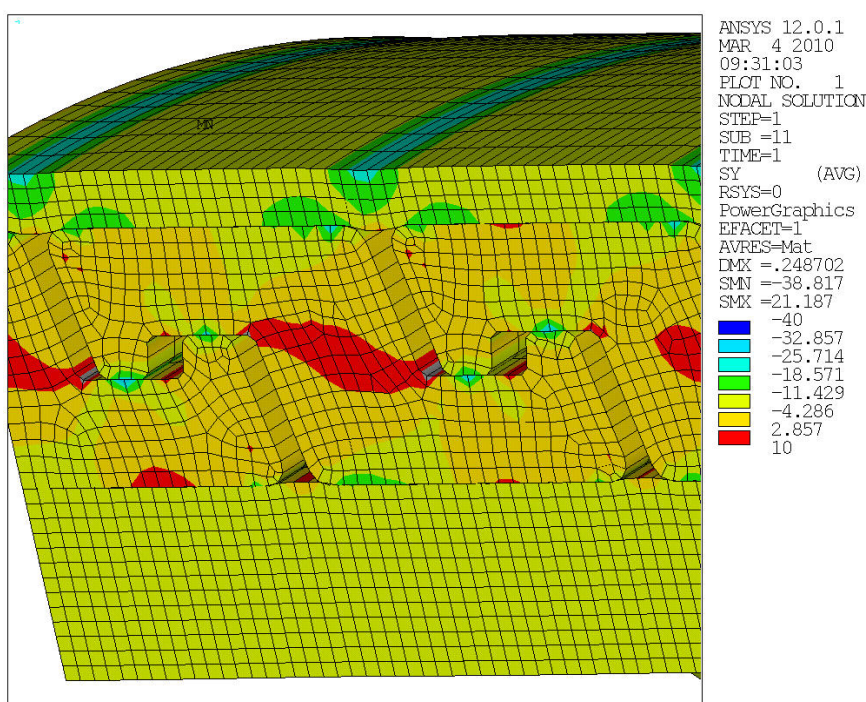


Figura A3-19. Tensão Y (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 1.

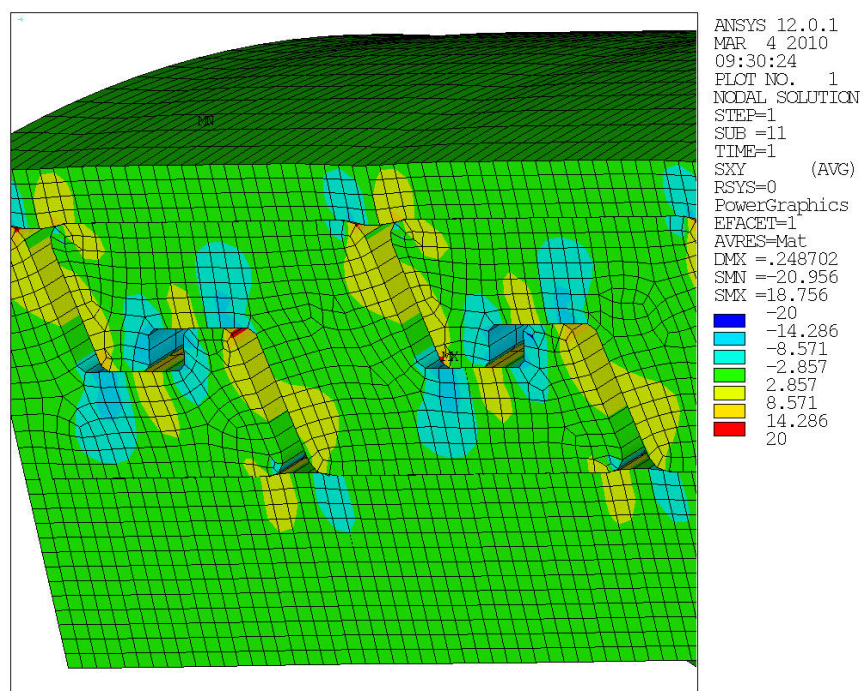


Figura A3-20. Tensão cisalhante (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 1.

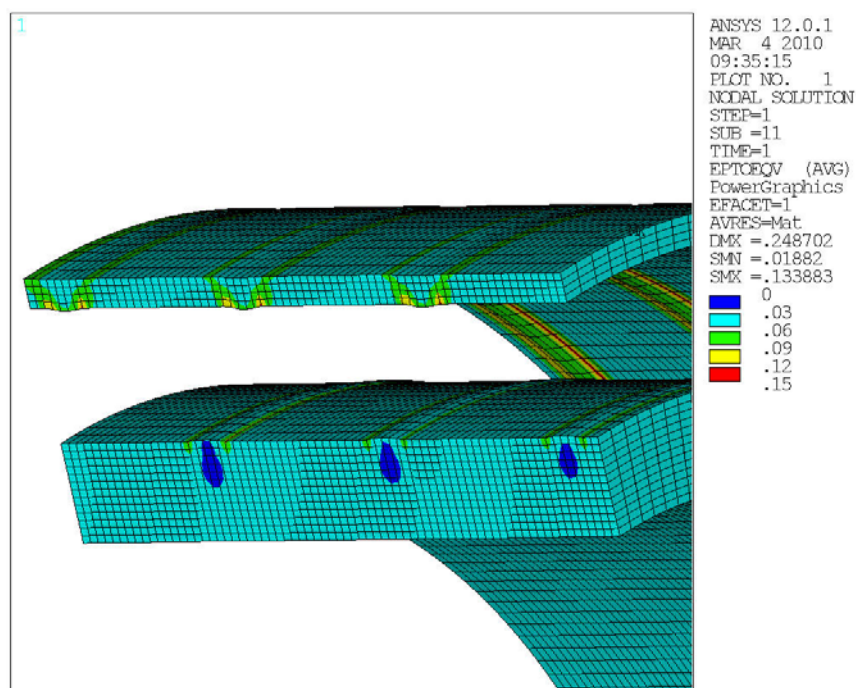


Figura A3-21. – Deformação de Von Mises (mm/mm) das camadas plásticas do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 1.

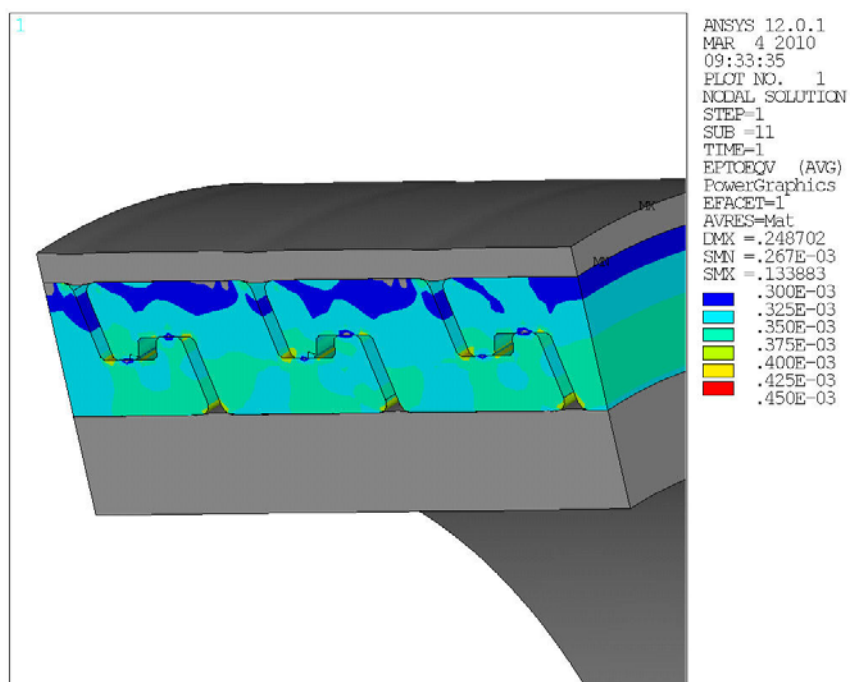


Figura A3-22. - Deformação de Von Mises (mm/mm) da camada de armadura de pressão do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 1.

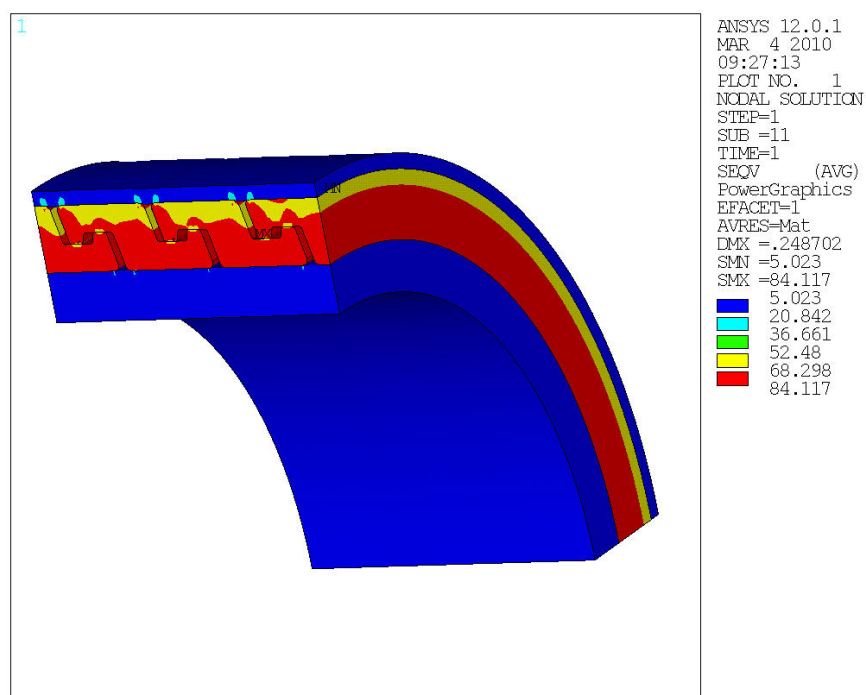


Figura A3-23. - Tensão Von Mises (MPa) do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 1.

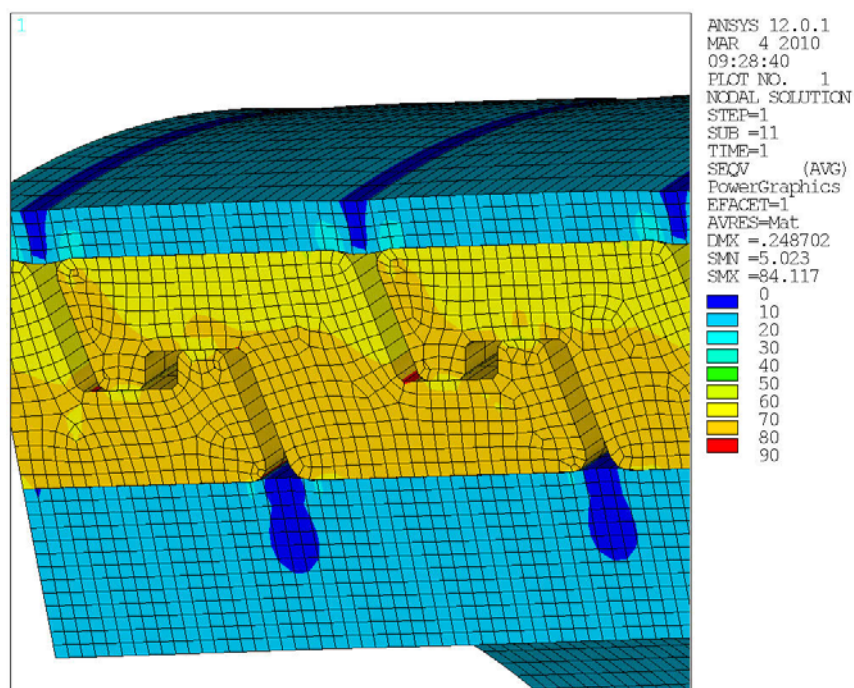


Figura A3-24. - Tensão Von Mises (MPa) da armadura de pressão do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 1.

A3.3 Fator de rigidez de contato 10

Os resultados do modelo com rigidez do elemento de contato 10 estão ilustrados nas Figuras A3.25 à A3.36.

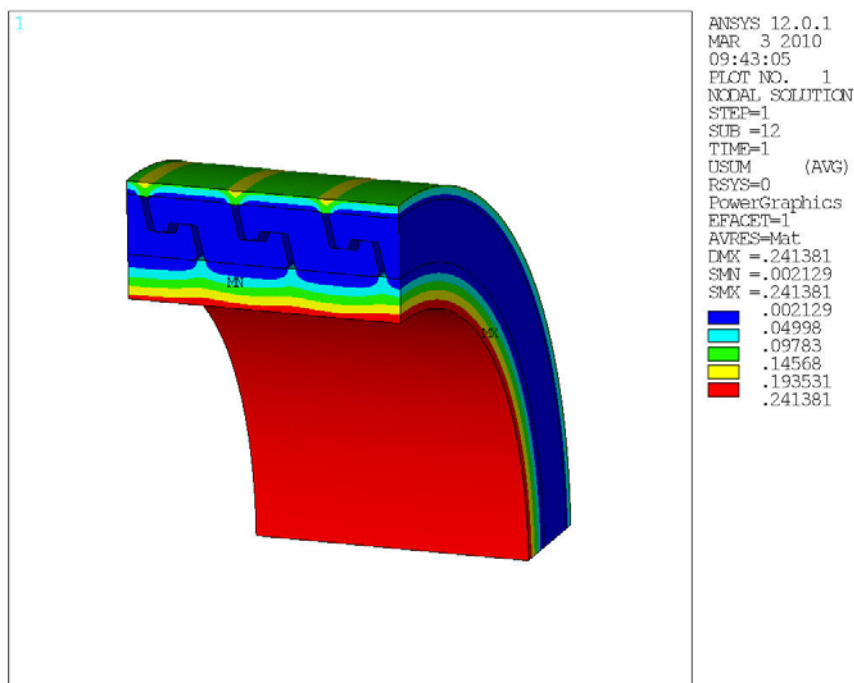


Figura A3-25. - Deslocamento (mm) do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 10.

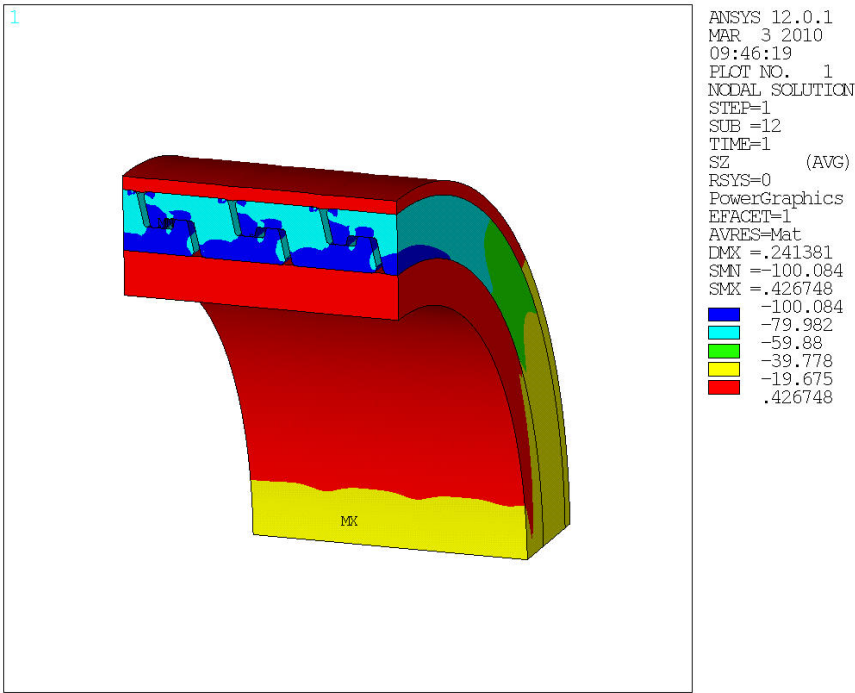


Figura A3-26. Tensão normal (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 10.

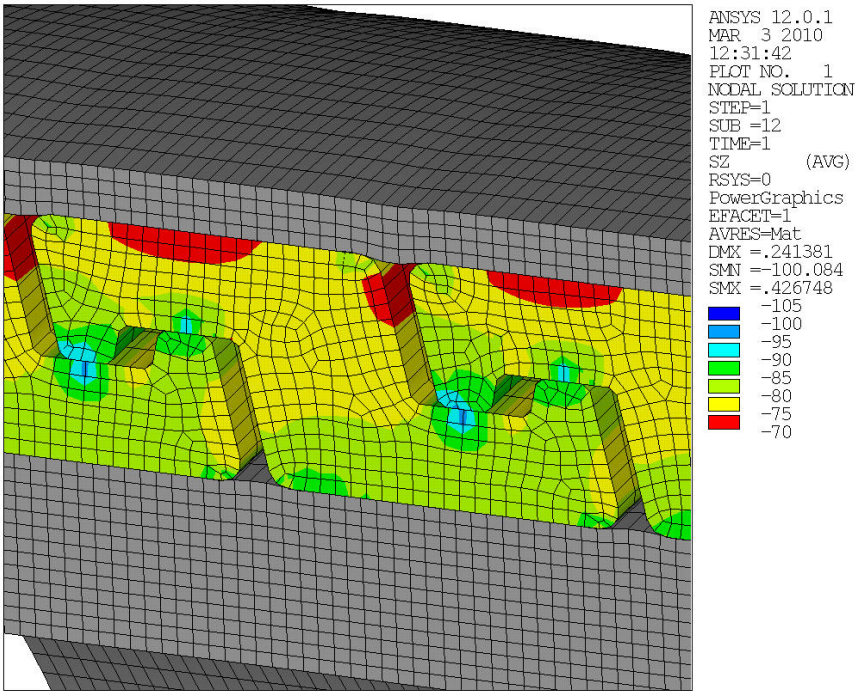


Figura A3-27. Tensão normal (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 10.

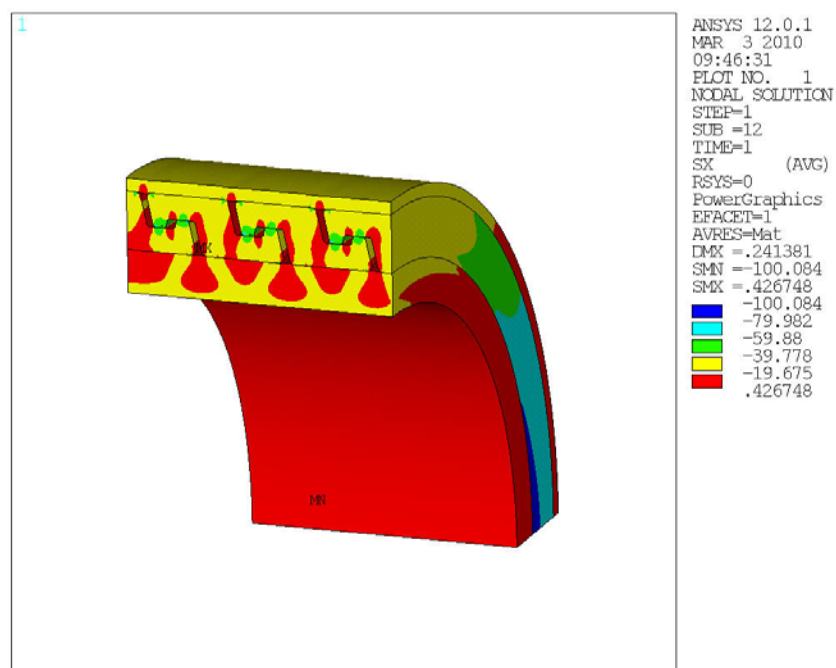


Figura A3-28. Tensão X (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 10.

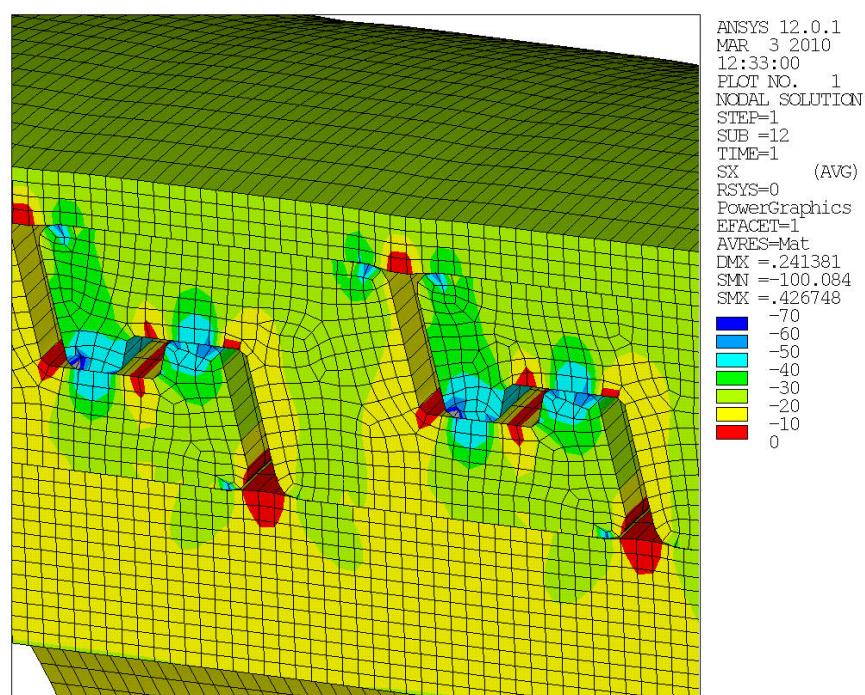


Figura A3-29. Tensão X (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 10.

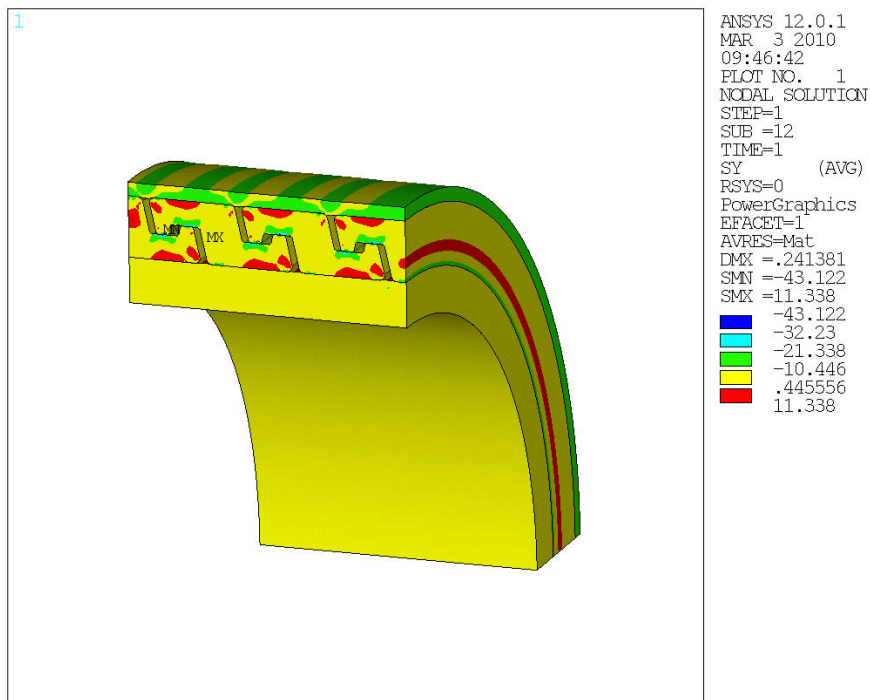


Figura A3-30. Tensão Y (MPa) do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 10.

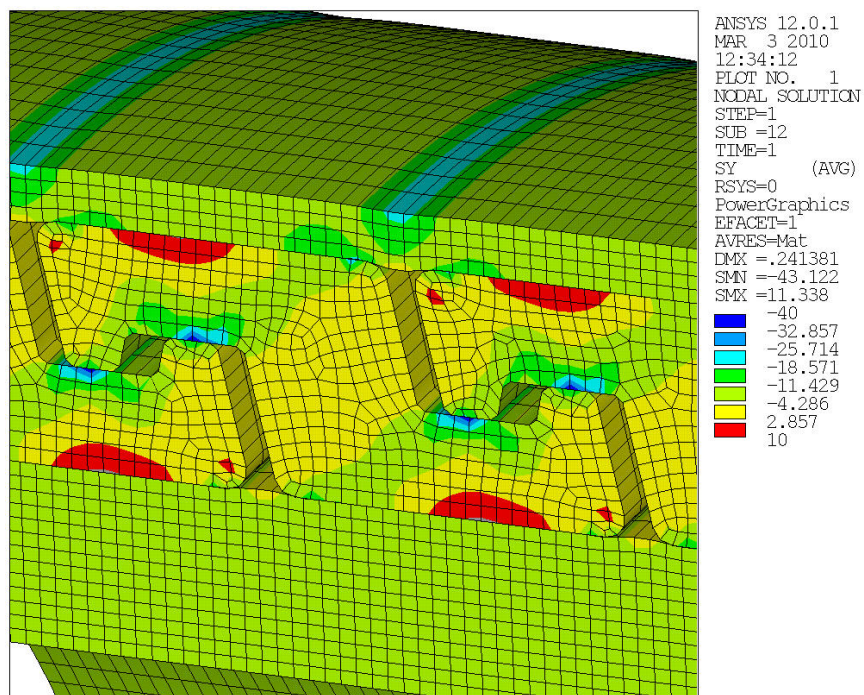


Figura A3-31. Tensão Y (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 10.

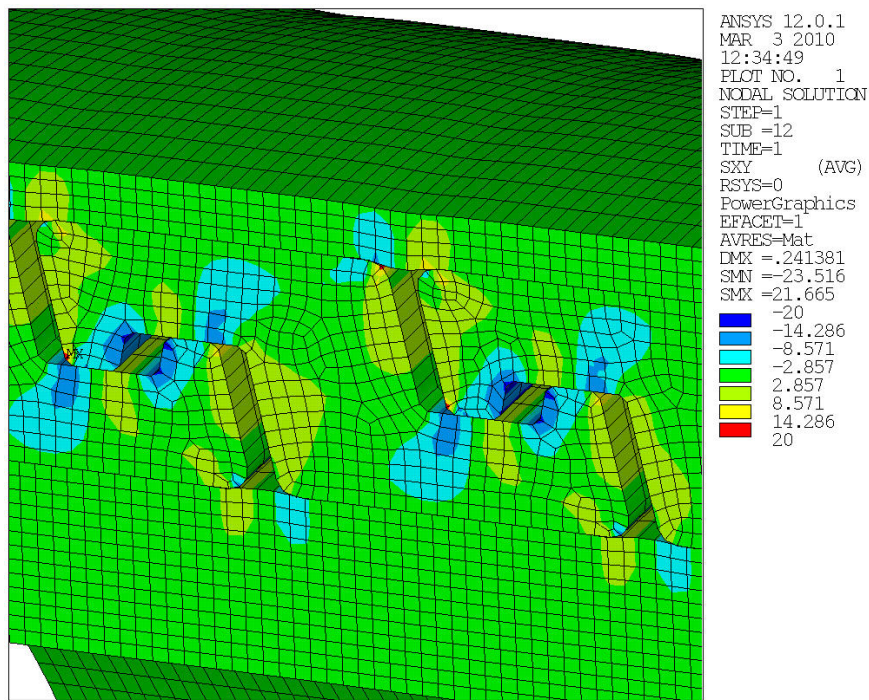


Figura A3-32. Tensão cisalhante (MPa) da armadura de pressão do modelo de elementos finitos sólidos isoparamétricos com o fator de rigidez de contato 10.

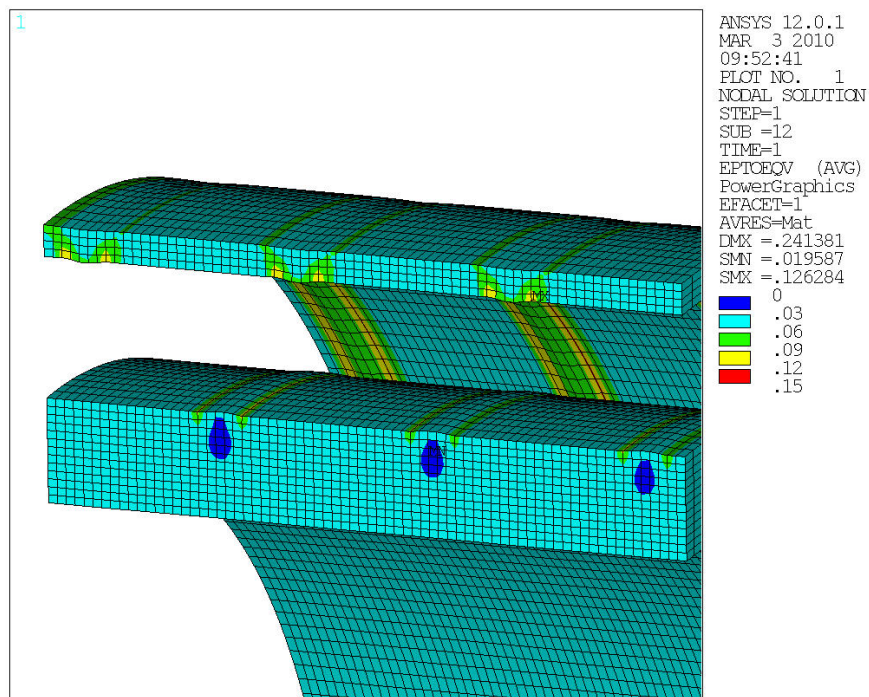


Figura A3-33. – Deformação de Von Mises (mm/mm) das camadas plásticas do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 10.

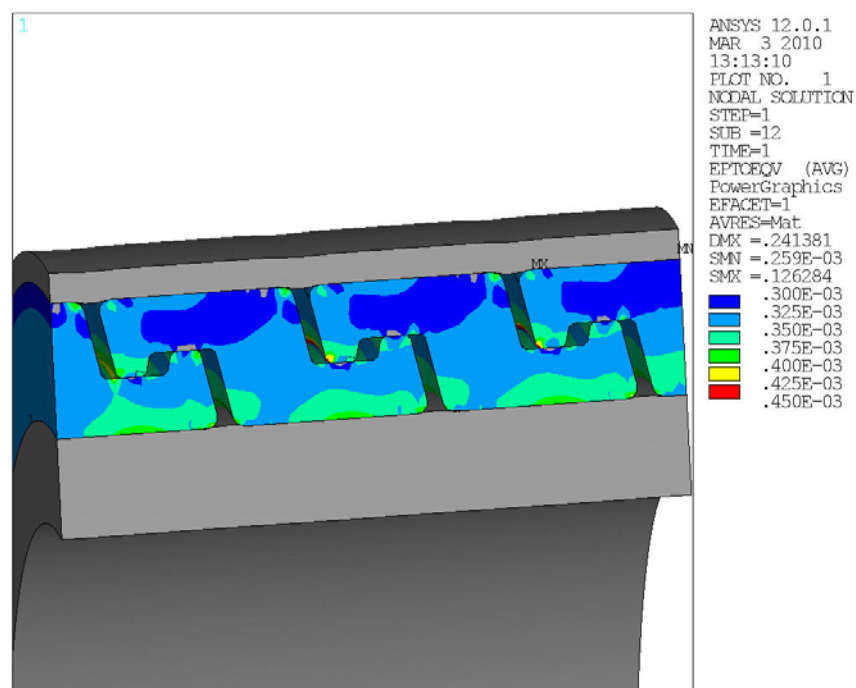


Figura A3-34. - Deformação de Von Mises (mm/mm) da camada de armadura de pressão do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 10.

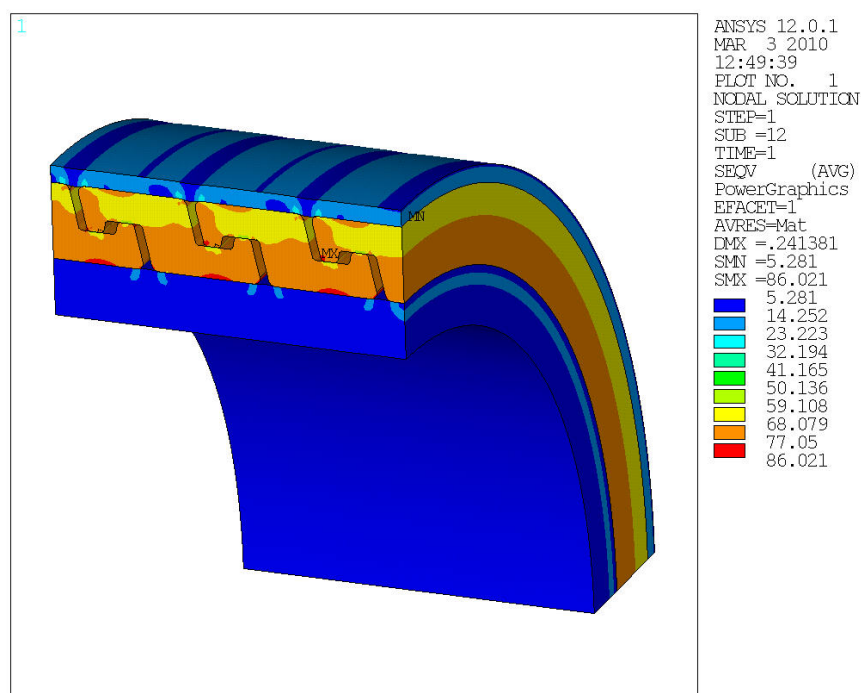


Figura A3-35. - Tensão Von Mises (MPa) do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 10.

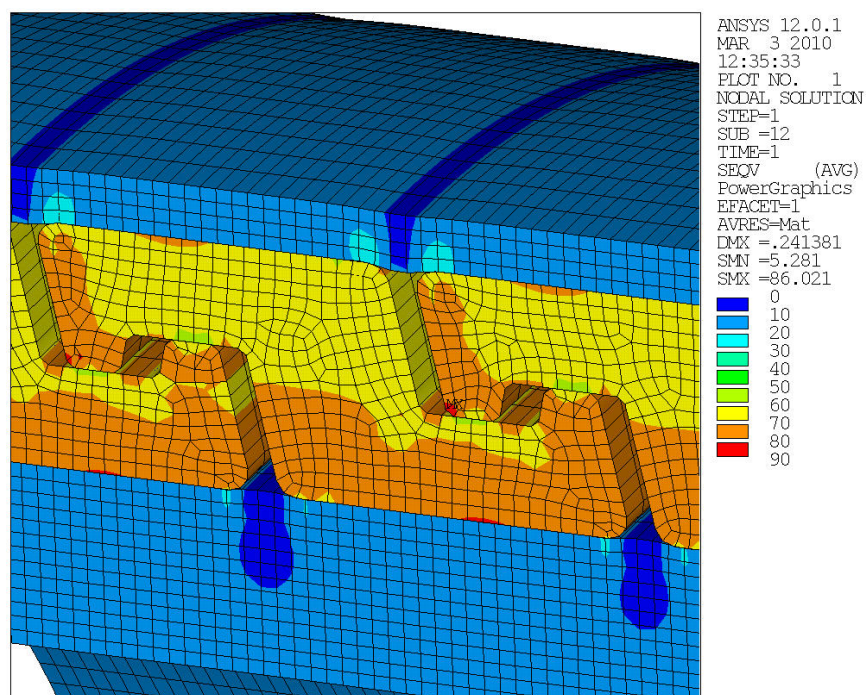


Figura A3-36. - Tensão Von Mises (MPa) da armadura de pressão do modelo com o fator de rigidez do elemento de contato 10.

Anexo 4 - DESENVOLVIMENTO DE FÓRMULAS

Neste anexo serão demonstrados desenvolvimentos de formulas necessárias para melhor clareza do trabalho.

A4.1 Fórmula aproximada de Feret e Bournazel (1987).

Dados:

Pressões

tração aplicada

$$p_i := 20 \cdot \text{MPa}$$

$$F_o := 500 \cdot \text{kN}$$

$$p_e := 10 \cdot \text{MPa}$$

ângulo de assentamento da camada de tração

$$\alpha := 35 \cdot \text{deg}$$

espessura da camada de tração

$$e_t := ee_5$$

$$e_t = 3 \cdot \text{mm}$$

espessura da camada de pressão

$$e_p := ee_3$$

$$e_p = 6.2 \cdot \text{mm}$$

Raio médio da camada de pressão

$$r_p := r_i + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}$$

Sendo:

$$F := F_o + \pi \cdot p_i \cdot r_i^2 - \pi \cdot p_e \cdot r_e^2$$

$$\Delta P := p_i - p_e$$

Fórmula aproximada de tensão na camada da armadura de pressão (item 2.3 de FERET e BOURNAZEL (1987)).

$$\sigma_p := \frac{r_p \cdot \Delta P}{e_p} \cdot \left(1 - \frac{\tan(\alpha)^2}{2} \right) - \frac{F}{\pi \cdot r_p \cdot e_p} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2}$$

$$\sigma_p = -77.979 \cdot \text{MPa}$$

A4.2 Deformação equivalente de Von Mises

A deformação equivalente de Von Mises pode ser expressa como a seguir:

$$\varepsilon_{VM}(\theta) := \frac{1}{1 + \nu} \cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot (e_x^2 + e_y^2 + e_z^2) + \frac{3}{4} \cdot (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2)}$$

Sendo:

$$e_x(\theta) := \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_x^{\text{total}}(\theta) - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_y^{\text{total}}(\theta) - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_z^{\text{total}}(\theta)$$

$$e_y(\theta) := \frac{-1}{3} \cdot \varepsilon_x^{\text{total}}(\theta) + \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_y^{\text{total}}(\theta) - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_z^{\text{total}}(\theta)$$

$$e_z(\theta) := \frac{-1}{3} \cdot \varepsilon_x^{\text{total}}(\theta) + \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_y^{\text{total}}(\theta) + \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_z^{\text{total}}(\theta)$$

Onde:

ν é o coeficiente de Poisson efetivo do material. Como as camadas plásticas estanques são assumidas como isotrópicas, o coeficiente de Poisson efetivo é igual ao coeficiente de Poisson do próprio material.

$$\varepsilon_x^{\text{total}}(\theta) = \varepsilon_x^{\text{ax}}$$

$$\varepsilon_y^{\text{total}}(\theta) = \varepsilon_y^{\text{ax}}$$

$$\varepsilon_z^{\text{total}}(\theta) = \varepsilon_z^{\text{ax}}$$

$$\gamma_{xy}^{\text{total}}(\theta) = \gamma_{xy}^{\text{ax}}$$

$$\gamma_{xz}^{\text{total}}(\theta) = \gamma_{xz}^{\text{ax}}$$

$$\gamma_{yz}^{\text{total}}(\theta) = \gamma_{yz}^{\text{ax}}$$

$\varepsilon_x^{\text{ax}}$, $\varepsilon_y^{\text{ax}}$, $\varepsilon_z^{\text{ax}}$, γ_{xy}^{ax} , γ_{xz}^{ax} e γ_{yz}^{ax} são as deformações lineares nas direções X, Y e Z e as deformações angulares nos planos XY, XZ e YZ, respectivamente.

A4.3 Ângulo de assentamento da camada da armadura de pressão

Com as fórmulas abaixo calcula-se o valor do ângulo de assentamento da armadura de pressão da Tabela 3, onde foi utilizado apenas 1 arame enrolado.

dados:			$ee := \begin{pmatrix} 3.5 \\ 4.9 \\ 6.2 \\ 1.5 \\ 3 \\ 1.5 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}$	espessuras
$DI := 2.5 \cdot \text{in}$	Diâmetro interno			
$ri := \frac{DI}{2}$	Raio interno			

$$e_p := ee_2$$

$$r_p := ri + ee_0 + ee_1 + \frac{ee_2}{2}$$

$$\alpha := 85.5 \text{ deg} \quad \text{ângulo de assentamento da camada de pressão com 2 arames}$$

$$e_p = 6.2 \text{ mm} \quad \text{espessura da camada de pressão}$$

$$r_p = 43.25 \text{ mm} \quad \text{raio médio da camada de pressão}$$

$$L_p := \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{r_p}{\tan(\alpha)} \right) \quad \text{passo da camada de pressão com 2 arames}$$

$$L_p = 21.387 \text{ mm}$$

Como neste trabalho convencionou-se trabalhar com apenas 1 arame enrolado, é necessário calcular o valor do novo ângulo de assentamento correspondente à meio passos.

$$\alpha := \text{atan} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{r_p}{\frac{L_p}{2}} \right)$$

$$\alpha = 87.747 \text{ deg} \quad \text{ângulo de assentamento da camada de pressão referente a apenas 1 arame enrolado.}$$

Anexo 5 - CÁLCULO DE FADIGA DETERMINÍSTICO

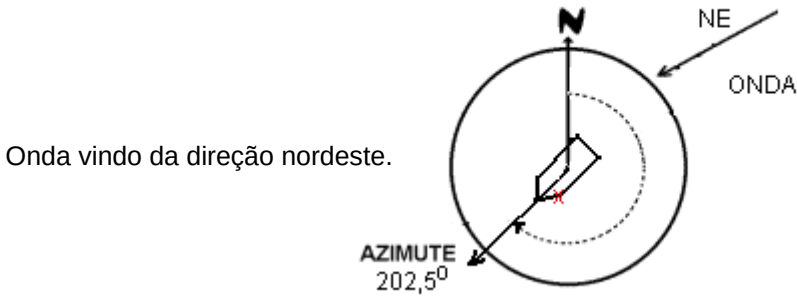
Neste anexo serão demonstrados desenvolvimentos de fórmulas necessários para melhor clareza do trabalho.

Lembrando os dados abaixo:

$$\begin{aligned}
 DI &:= 2.5 \cdot \text{in} \\
 ri &:= \frac{DI}{2} \\
 e &:= \left[ee_1 + ee_2 + (ee_3 + ee_4) + (ee_5 + ee_6) + (ee_7 + ee_8) \right] \\
 re &:= ri + e \\
 \alpha &:= 35 \cdot \text{deg} \qquad \text{ângulo de assentamento da camada de tração}
 \end{aligned}
 \qquad
 ee := \begin{pmatrix} 3.5 \\ 4.9 \\ 6.2 \\ 1.5 \\ 3 \\ 1.5 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

SCF= 1,2 Fator de concentração de tensão normal calculado para armadura de pressão do duto.
Se o comportamento do duto é linear geometricamente o SCFz poderá ser usado ao longo de todo duto.

Assume-se que o duto está instalado em um FPSO com azimuth de 202,5° localizada a 60 m a vante e 50 m a boreste e instalada em catenária livre com ângulo de topo de 7°.
Assume-se que o duto está instalado em um FPSO com azimuth de 202,5° localizada a 60 m



São apresentados os 6 estados de mar dados por um par de ondas monocromáticas equivalentes (H,T):

$$\begin{aligned}
 H &:= \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{pmatrix} \quad \text{Altura de onda (m)} \\
 T &:= \begin{pmatrix} 5 \\ 9 \\ 10.8 \\ 11.14 \\ 11.65 \\ 11.77 \end{pmatrix} \quad \text{Período da onda (s)}
 \end{aligned}$$

As ocorrências de cada estado de mar são:

$$\text{Ocorrencia} := \begin{pmatrix} 26 \\ 1.9 \\ 0.022 \\ 0.0023 \\ 0.0002 \\ 0.0001 \end{pmatrix} \cdot \%$$

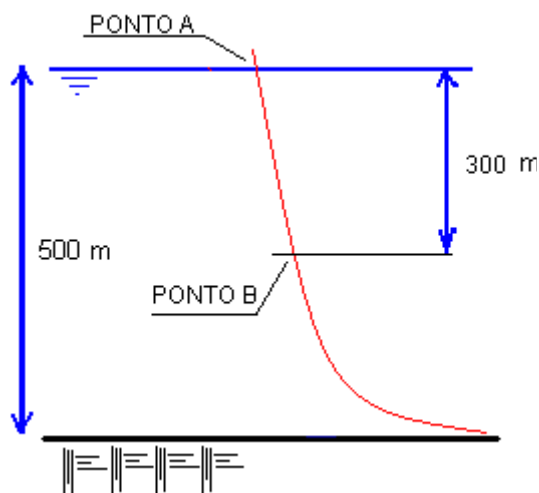
Obtêm as ondas regulares correspondentes ao parâmetros de altura significativa e período de zeros ascendentes:

onde N é o número ciclos entre dois cruzamentos positivos ascendentes de cada estado de mar, que pode ser calculado por:

$N_{\text{ciclos}} = \text{Ocorrencia} (\%) / 100 * (\text{número de segundos no ano} / \text{período da onda monocromática } (T))$

$$N_{\text{ciclos}} = \begin{pmatrix} 1639872 \\ 66576 \\ 642 \\ 65 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix}$$

O dano será calculado em 2 pontos do duto.



$$\gamma_{\text{oleo}} := 9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (\text{Peso específico do fluido interno})$$

$$\gamma_{\text{agua}} := 1025 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \quad (\text{Peso específico do fluido externo})$$

Ponto A

No topo do duto $h_a := 0 \cdot \text{m}$

$$p_{i_a} := 20 \cdot \text{MPa} + \gamma_{\text{oleo}} \cdot h_a \quad p_{i_a} = 20 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{e_a} := \gamma_{\text{agua}} \cdot h_a \quad p_{e_a} = 0 \cdot \text{MPa}$$

$$F_{m_a} := 165 \cdot \text{kN}$$

$$\Delta F_a := \begin{pmatrix} 80 \\ 1300 \\ 9000 \\ 9200 \\ 7130 \\ 6600 \end{pmatrix}$$

Ponto B

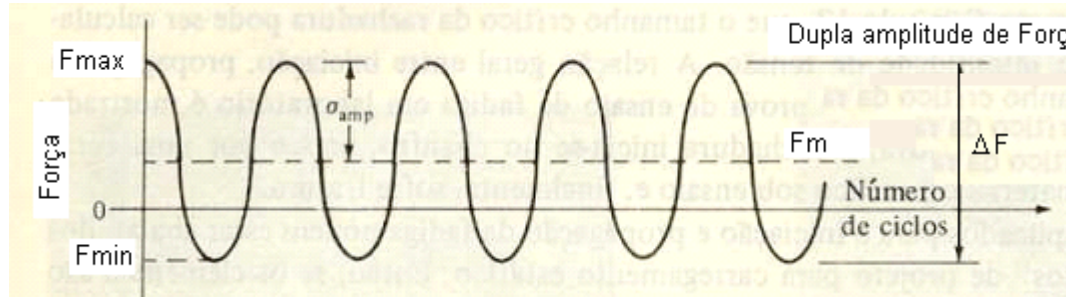
$$h_b := 300 \cdot \text{m}$$

$$p_{i_b} := 20 \cdot \text{MPa} + \gamma_{\text{oleo}} \cdot h_b \quad p_{i_b} = 22.7 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{e_b} := \gamma_{\text{agua}} \cdot h_b \quad p_{e_b} = 3.016 \cdot \text{MPa}$$

$$F_{m_b} := 80.5 \cdot \text{kN}$$

$$\Delta F_b := \begin{pmatrix} 40 \\ 610 \\ 4150 \\ 4720 \\ 3630 \\ 3380 \end{pmatrix} \cdot \text{N}$$



Fórmula aproximada de tensão na camada da armadura de pressão (Feret e Bournazel 1987, item 2.3)

$$\sigma_{amin_1} := \frac{\left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot (pi_a - pe_a) \cdot \left(1 - \frac{\tan(\alpha)^2}{2}\right) - \frac{(Fm_a + \Delta F_{a_i}) + \pi \cdot pi_a \cdot ri^2 - \pi \cdot pe_a \cdot re^2}{\pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2}}$$

$$\sigma_{amax_1} := \frac{\left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot (pi_a - pe_a) \cdot \left(1 - \frac{\tan(\alpha)^2}{2}\right) - \frac{(Fm_a - \Delta F_{a_i}) + \pi \cdot pi_a \cdot ri^2 - \pi \cdot pe_a \cdot re^2}{\pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2}}$$

$$\Delta \sigma_a := \frac{(Fm_a + \Delta F_a) + \pi \cdot pi_a \cdot ri^2 - \pi \cdot pe_a \cdot re^2}{\pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2} - \frac{(Fm_a - \Delta F_a) + \pi \cdot pi_a \cdot ri^2 - \pi \cdot pe_a \cdot re^2}{\pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2}$$

$$\Delta \sigma_{av} := \frac{\Delta F_a}{\pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2} - \frac{(-\Delta F_a)}{\pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2}$$

$$\Delta \sigma_{av} := \frac{(2\Delta F_a)}{\pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3} \cdot \frac{\tan(\alpha)^2}{2}$$

$$C1 := \frac{\tan(\alpha)^2}{2 \cdot \pi \cdot \left(ri + ee_1 + ee_2 + \frac{ee_3}{2}\right) \cdot ee_3}$$

$$\Delta\sigma_a := C1 \cdot \Delta F_a$$

variação de tensão média no ponto A

$$\Delta\sigma_a := SCF \cdot \Delta\sigma_a$$

variação de tensão no ponto A

$$\Delta\sigma_a = \begin{pmatrix} 0.028 \\ 0.454 \\ 3.143 \\ 3.213 \\ 2.49 \\ 2.305 \end{pmatrix} \cdot \frac{N}{mm^2} \quad \Delta\sigma_a := \begin{pmatrix} 0.028 \\ 0.454 \\ 3.143 \\ 3.213 \\ 2.49 \\ 2.305 \end{pmatrix} \left(\text{em } \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$\Delta\sigma_b := 2C1 \cdot \frac{\Delta F_b}{2}$$

variação de tensão média no ponto B

$$\Delta\sigma_b := SCF \cdot \Delta\sigma_b$$

variação de tensão média no ponto B

$$\Delta\sigma_b = \begin{pmatrix} 0.014 \\ 0.213 \\ 1.449 \\ 1.648 \\ 1.268 \\ 1.18 \end{pmatrix} \cdot \frac{N}{mm^2} \quad \Delta\sigma_b := \begin{pmatrix} 0.014 \\ 0.213 \\ 1.449 \\ 1.648 \\ 1.268 \\ 1.18 \end{pmatrix} \left(\text{em } \frac{N}{mm^2} \right)$$

Curva SN:

As curvas SN são obtidas em laboratório para um material e tipo de peça, como ainda não existe uma curva específica par o duto flexível, determina-se para esta análise a curva F2 do Welding Institute, pois possui parâmetros de valores baixos:

$$m := 3.0$$

considerando N e mm²

$$K := 10^{12.09}$$

A curva S-N para o duto é:

$$N_{a_i} := K \cdot (\Delta\sigma_{a_i})^{-3}$$

$$N_{b_i} := K \cdot (\Delta\sigma_{b_i})^{-3}$$

O número de ciclos da vida à fadiga para amarras em cada estado de mar, para a variação de tração considerada, é dado a seguir:

Os danos para cada estado de mar são obtidos por:

$$Dano_{a_i} := \frac{N_{ciclos_i}}{N_{a_i}}$$

$$Dano_{b_i} := \frac{N_{ciclos_i}}{N_{b_i}}$$

As condições de carregamento de amplitudes variáveis do mar podem ser tratadas como o somatório de várias condições de carregamento por amplitudes constantes para se determinar o comportamento dos elementos carregados.

$$Dano_{atotal} := \sum_i Dano_{a_i}$$

$$Dano_{btotal} := \sum_i Dano_{b_i}$$

A vida útil no ponto A do duto será:

$$Vida_{\text{útil}_a} := \frac{1}{Dano_{atotal}} \quad Vida_{\text{útil}_a} = 4.3 \times 10^7 \text{ anos}$$

A vida útil no ponto B do duto será:

$$Vida_{\text{útil}_b} := \frac{1}{Dano_{btotal}} \quad Vida_{\text{útil}_b} = 4.2 \times 10^8 \text{ anos}$$

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)