

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA - CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS
EM BARRAS CHATAS SUBMETIDAS A DIFERENTES SEQUÊNCIAS
DE CURVAMENTO**

**GUILHERME BORDALLO ESTEVAM
LUCAS RICARDO CARNEIRO MEDINA**

**RIO DE JANEIRO
Maio de 2021**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA - CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS
EM BARRAS CHATAS SUBMETIDAS A DIFERENTES SEQUÊNCIAS
DE CURVAMENTO**

**GUILHERME BORDALLO ESTEVAM
LUCAS RICARDO CARNEIRO MEDINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Paulo Pedro Kenedi

RIO DE JANEIRO

Mai de 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

- E79 Estevam, Guilherme Bordallo
Análise numérica da distribuição de tensões residuais em barras chatas submetidas a diferentes sequências de curvamento / Guilherme Bordallo Estevam [e] Lucas Ricardo Carneiro Medina – 2021.
xiv, 65f. : il.color. + apêndice ; enc.
- Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.
Bibliografia: f. 64-65
Orientador: Paulo Pedro Kenedi
1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Dutos flexíveis. I. Medina, Lucas Ricardo Carneiro. II. Kenedi, Paulo Pedro. (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

Meu mais sincero agradecimento a meus pais, minhas irmãs, minha namorada, meus(inhas) avôs(ós) e minha tia Flávia, que me deram todo tipo de suporte necessário durante a faculdade. Aos meus amigos e ao Baja, por terem me proporcionado experiências inesquecíveis, que levarei para vida toda.

- Guilherme Bordallo Estevam

Agradeço a minha mãe, Cristina, e meus queridos amigos, pilares da minha formação como ser humano. Também agradeço ao Baja, por ter me ensinado que engenharia não se aprende apenas na sala de aula. Dedico este trabalho de conclusão de curso a eles, com muita gratidão.

- Lucas Ricardo Carneiro Medina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por essa oportunidade.

Agradeço a minha mãe, Luciana, meu pai, Leonardo, minhas irmãs, Manoela e Rafaela, e a minha namorada, Maria Eduarda, meu porto seguro, pelo apoio durante toda jornada da faculdade. Sem eles não teria chegado até aqui.

Agradeço as minhas avós, Ana Lúcia e Elca, meus avôs, Gilson e Antônio Carlos, e minha tia Flávia, pelo suporte que sempre me deram.

Agradeço aos meus amigos, em especial ao Lucas Ricardo Carneiro Medina pela parceria nesse projeto final e ao longo de todos os cinco anos de curso. Amizades para a vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Paulo Pedro Kenedi, pelo conhecimento passado, pela paciência e pelas oportunidades fornecidas.

Por fim, agradeço a equipe Mud Runner Baja por ter me acolhido, proporcionado experiências incríveis e amizades de longa data.

- Guilherme Bordallo Estevam

Agradeço a Deus por me conceder serenidade para aceitar as coisas que não posso mudar, coragem para mudar o que me for possível e a sabedoria para discernir entre os dois.

A minha mãe, Cristina, por sempre estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida, durante minha formação como profissional e ser humano. Sempre te amarei.

Ao meu pai, Ricardo, por ter me ensinado de sua forma a sempre correr atrás dos meus sonhos, independente do que os outros pensam.

Aos meus irmãos, Luana, Ana Clara e Vinícius, assim como todos os meus familiares, pela parceria durante toda esta jornada que é a vida.

Aos meus amigos, especialmente o Guilherme Bordallo Estevam, por toda parceria durante as batalhas enfrentadas nos últimos 5 anos, e se Deus quiser, para o resto da vida. Tenho certeza de que se tornará um brilhante profissional no futuro.

Agradeço também ao meu professor orientador Paulo Pedro Kenedi, por todo o conhecimento e incentivo durante a elaboração deste projeto.

E por fim, a equipe Mud Runner, por ter despertado minha paixão pela Engenharia.

- Lucas Ricardo Carneiro Medina

RESUMO

A indústria do Petróleo brasileira vem se deparando com inúmeros desafios ao longo das décadas iniciais do Século XXI. É nesse contexto que as tensões residuais se encaixam, visto que são contribuintes importantes para a ocorrência do modo de falha conhecido por SCC-CO₂ (corrosão sob-tensão na presença do gás carbônico) nas armaduras metálicas de pressão e de tração dos dutos flexíveis. Este projeto visa entender de forma clara como surgem as tensões residuais, a determinação de suas intensidades ao longo da seção transversal das armaduras de tração e como sua intensidade pode ser reduzida. É apresentada a análise uma barra metálica chata submetida a diferentes sequências de carregamento de flexão através do método numérico de elementos finitos. São analisados os efeitos dos principais parâmetros que influenciam no aparecimento e na intensidade das tensões residuais, como o sentido do carregamento, valor dos momentos fletores aplicados e a presença ou não de *spring back*. Por fim, o projeto buscará formas de reduzir a intensidade dessas tensões residuais através da proposição de determinadas sequências de carregamentos.

Palavras-chave: Duto Flexível, Distribuição de Tensões Residuais, Elementos Finitos, Armaduras Metálicas de Tração, Flexão.

ABSTRACT

The Brazilian oil industry has been facing numerous challenges throughout the early decades of the 21st Century. In this scenario, residual stresses present an important role, since they have high relevance in the SCC-CO₂ failure mode (Stress Corrosion Cracking in presence of carbon dioxide) occurrence in the pressure and tensile metallic armour layers of flexible pipes. This project aims to comprehend how the residual stresses appear, how they can be calculated, how is the distribution along the cross-section area of the tensile armour layers and how the intensity of the stress could be reduced. It is presented an analysis regarding a metallic beam under different bending load sequences using the finite element numerical method. The main parameters effect on residual stress appearance and intensity were studied, as the curvature, the bending loads intensity and if there is or not spring back after the load steps. Finally, the study will search for cases that the residual stress intensity could be reduced through specific load case sequences.

Keywords: Flexible Pipes, Residual Stress Distribution, Finite Element Analysis, Metallic Tensile Armours, Bending.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo	3
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado	3
1.5 Organização do Trabalho	3
Capítulo 2	5
Dutos Flexíveis na Indústria Offshore	5
2.1 Sistemas Marítimos de Elevação e Escoamento	5
2.2 Configurações de Coleta	5
2.2.1 <i>Riser</i>	6
2.2.2 <i>Flowline</i>	6
2.2.3 <i>Jumper</i>	7
2.3 Dutos Flexíveis	7
2.3.1 Dutos Flexíveis de Coleta	8
2.3.2 Dutos Flexíveis de Exportação	8
2.4 Camadas Típicas dos Dutos Flexíveis	8
2.4.1 Carcaça	9
2.4.2 Camada de Pressão	9
2.4.3 Armadura de Pressão	10
2.4.4 Camadas Anti-Desgaste	11
2.4.5 Armadura de Tração	11
2.4.6 Fitas de Alta-Resistência	13
2.4.7 Isolamento Térmico	14
2.4.8 Capa Externa	14
2.5 Conectores	15
2.6 Principais Modos de Falha	16
Capítulo 3	17
Tensões Residuais	17
3.1 Definição	17
3.2 Mecanismos Geradores de Tensões Residuais	18
3.3 Tensões Residuais Devido a Efeitos Térmicos	19

3.4 Tensões Residuais Devido a Processos de Fabricação	20
3.5 Tensões Residuais devido a Carregamentos Mecânicos	22
3.5.1 Axial Puro	22
3.5.2 Torção Pura	24
3.5.3 Flexão Pura	25
3.6 Método Analítico para Cálculo de Tensões Residuais	26
3.7 Método Numérico para Cálculo de Tensões Residuais	28
3.8 Métodos Experimentais para Medição de Tensões Residuais	29
3.8.1 Métodos Destrutivos	30
3.8.2 Métodos Semi-destrutivos	30
3.8.3 Métodos Não Destrutivos	32
3.9 Alívio de Tensões Residuais	34
Capítulo 4	36
Metodologia e Resultados	36
4.1 Premissas de Projeto	36
4.2 Metodologia	37
4.3 Matriz de Variáveis de Entrada	39
4.4 Variáveis de Saída	42
4.5 Software Utilizado	44
4.6 Modelagem Numérica	44
4.6.1 Simplificações do Modelo	44
4.6.2 Propriedades da Malha	47
4.6.3 Modelo Constitutivo	47
4.6.4 Condições de Contorno	48
4.6.5 Análise de Convergência	49
4.6.6 Extração de Resultados	50
4.6.7 Validação do Modelo Numérico	52
4.7 Resultados	53
4.7.1 Curvatura Única ($\alpha = 1,2$)	53
4.7.2 Curvatura Única ($\alpha = 1,4$)	56
4.7.3 Casos Matriz de Variáveis de Entrada	58
4.8 Discussão dos Resultados	58
4.8.1 Sem Efeito de Memória	59
4.8.2 Com Efeito de Memória	60
4.8.3 Tabela de Análises de Resultados	62

Capítulo 5	63
Conclusões	63
Capítulo 6	64
Bibliografia	64
Apêndice A	66
Resultados obtidos a partir das simulações numéricas no <i>Ansys Workbench</i>	66
A.1 Caso 1	67
A.2 Caso 2	68
A.3 Caso 3	69
A.4 Caso 4	70
A.5 Caso 5	71
A.6 Caso 6	72
A.7 Caso 7	73
A.8 Caso 8	74
A.9 Caso 9	75
A.10 Caso 10	76
A.11 Caso 11	77
A.12 Caso 12	78
A.13 Caso 13	79
A.14 Caso 14	80
A.15 Caso 15	81
A.16 Caso 16	82
A.17 Caso 17	83
A.18 Caso 18	84

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FATORES QUE CAUSAM O SURGIMENTO DO SCC-CO ₂ . AUTORIA PRÓPRIA.	2
FIGURA 2: <i>RISERS, FLOWLINES, AND JUMPERS</i> (SUBSEA ENGINEERING HANDBOOK - SECOND EDITION, 2019) [1].....	6
FIGURA 3: DUTO FLEXÍVEL. MODIFICADO DE [14].....	7
FIGURA 4: CARÇAÇA INTERTRAVADA. MODIFICADO DE [14].....	9
FIGURA 5: CAMADA POLIMÉRICA DE PRESSÃO. MODIFICADO DE [14].....	10
FIGURA 6: ARMADURA DE PRESSÃO E EXEMPLO DE PERFIL Z E PERFIL T, DE ACORDO COM A API 17B. MODIFICADO DE [14]	11
FIGURA 7: ARMADURAS DE TRACÇÃO E PARTE DE SUA SEÇÃO TRANSVERSAL DE SEUS PERFIS. MODIFICADO DE [14]	12
FIGURA 8: EXEMPLOS (A), (B), (C) E (D) DE ETAPAS NO QUAL O ARAME METÁLICO É SUBMETIDO DURANTE FABRICAÇÃO DO DUTO FLEXÍVEL. AUTORIA PRÓPRIA.	13
FIGURA 9: EFEITO “GAIOLA DE PASSARINHO”. MODIFICADO DE [15].....	14
FIGURA 10: CAPA EXTERNA DO FLEXÍVEL. MODIFICADO DE [14]	15
FIGURA 11: EXEMPLO DE CONECTOR DE UMA LINHA FLEXÍVEL. MODIFICADO DE [14].....	15
FIGURA 12: SUPERPOSIÇÃO DE TENSÕES PARA UMA BARRA SUBMETIDA A CARREGAMENTO DE FLEXÃO. AUTORIA PRÓPRIA.	18
FIGURA 13: DISTRIBUIÇÃO DE CARREGAMENTOS INTERNOS EM UMA PEÇA TEMPERADA. AUTORIA PRÓPRIA.	19
FIGURA 14: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM UM CORDÃO DE SOLDA. AUTORIA PRÓPRIA.....	20
FIGURA 15: PERFIL DE TENSÕES EM UMA BARRA LAMINADA A FRIO. AUTORIA PRÓPRIA.....	21
FIGURA 16: COMPORTAMENTO DE UMA BARRA NO FORMATO DE “I” NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO. AUTORIA PRÓPRIA.	22
FIGURA 17: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES HOMOGÊNEA EM UMA PEÇA SOB ESFORÇO AXIAL PURO. AUTORIA PRÓPRIA.	23
FIGURA 18: CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES EM UMA BARRA FURADA SOB ESFORÇOS AXIAIS. AUTORIA PRÓPRIA.....	23
FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM UMA PEÇA SOB ESFORÇO DE TORÇÃO PURA ELÁSTICO. AUTORIA PRÓPRIA.	24
FIGURA 20: SUPERPOSIÇÃO DE TENSÕES DE UM EIXO SUBMETIDO A SEQUÊNCIA CARREGAMENTO/DESCARREGAMENTO DE TORÇÃO NO CÁLCULO DE TENSÕES RESIDUAIS. AUTORIA PRÓPRIA.	24
FIGURA 21: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM UMA BARRA SOB CARREGAMENTO ELÁSTICO DE FLEXÃO PURA. AUTORIA PRÓPRIA.....	25
FIGURA 22: SUPERPOSIÇÃO DE TENSÕES DE UMA BARRA SUBMETIDA A SEQUÊNCIA CARREGAMENTO/DESCARREGAMENTO DE FLEXÃO PURA NO CÁLCULO DE TENSÕES RESIDUAIS. AUTORIA PRÓPRIA.....	25
FIGURA 23: NÓS E ELEMENTOS EM UMA BARRA FLETIDA NO SOFTWARE ANSYS <i>MECHANICAL WORKBENCH</i> . AUTORIA PRÓPRIA.....	28
FIGURA 24: EXEMPLOS DE COMPORTAMENTOS TÍPICOS DA CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO. AUTORIA PRÓPRIA.	29
FIGURA 25: POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS NO MÉTODO DO FURO CEGO. [3].....	31
FIGURA 26: POSICIONAMENTO DO EXTENSÔMETRO NO MÉTODO <i>RING CORE</i> . [3].....	32
FIGURA 27: ESPAÇAMENTO INTERPLANAR DE UMA AMOSTRA SEM INFLUÊNCIA DE TENSÕES. [3]	33

FIGURA 28: ESPAÇAMENTO INTERPLANAR DE UMA AMOSTRA SOB INFLUÊNCIA DE TENSÕES. [3]	33
FIGURA 29: EXEMPLO DE GRÁFICO TEMPERATURA X TEMPO PARA TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO. [6]	35
FIGURA 30: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO ARAME METÁLICO. AUTORIA PRÓPRIA.	36
FIGURA 31: SENTIDOS DOS MOMENTOS FLETORES APLICADOS À BARRA METÁLICA. AUTORIA PRÓPRIA.	38
FIGURA 32: CASO EM QUE O <i>SPRING BACK</i> OCORRE APÓS O CARREGAMENTO 1 E CARREGAMENTO 2. AUTORIA PRÓPRIA.	38
FIGURA 33: CASO EM QUE O <i>SPRING BACK</i> OCORRE SOMENTE APÓS O CARREGAMENTO 1. AUTORIA PRÓPRIA.	39
FIGURA 34: EXEMPLO DE CASOS SIMÉTRICOS (CASO 1 E CASO 4 DA TABELA 5). AUTORIA PRÓPRIA.	40
FIGURA 35: DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL PARA UM CASO QUE NÃO APRESENTA <i>SPRING BACK</i> APÓS NENHUMA DAS DUAS CURVATURAS. AUTORIA PRÓPRIA.	41
FIGURA 36: EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA BARRA METÁLICA. AUTORIA PRÓPRIA.	43
FIGURA 37: EXEMPLO DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE DO ARAME METÁLICO AO LONGO DAS ETAPAS DE CARREGAMENTO. AUTORIA PRÓPRIA.	43
FIGURA 38: SEM VARIAÇÃO DAS TENSÕES AO LONGO DO COMPRIMENTO E DA LARGURA DO ARAME. AUTORIA PRÓPRIA.	44
FIGURA 39: PREMISSE DO ESTADO PLANO DE TENSÕES UTILIZADA NO MODELO. AUTORIA PRÓPRIA.	45
FIGURA 40: VARIAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO PRÓXIMO AO PONTO DE APLICAÇÃO DO MOMENTO. AUTORIA PRÓPRIA.	45
FIGURA 41: DETERMINAÇÃO DA COTA LONGITUDINAL A PARTIR DA QUAL NÃO HÁ MAIS VARIAÇÃO DA TENSÃO AO LONGO DO COMPRIMENTO DO ARAME. AUTORIA PRÓPRIA.	46
FIGURA 42: PREMISSE DE SIMETRIA APLICADA NO MODELO NUMÉRICO. AUTORIA PRÓPRIA.	46
FIGURA 43: MODELO DE MALHA GERADO UTILIZANDO ELEMENTOS QUADRADOS. AUTORIA PRÓPRIA.	47
FIGURA 44: GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO EXTRAÍDO DO ANSYS <i>MECHANICAL WORKBENCH</i> PARA O MATERIAL UTILIZADO NO MODELO. AUTORIA PRÓPRIA.	48
FIGURA 45: CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS AO MODELO NO ANSYS <i>MECHANICAL WORKBENCH</i> . AUTORIA PRÓPRIA.	49
FIGURA 46: ABORDAGEM GRÁFICA COM OS RESULTADOS OBTIDOS DE TENSÃO E O NÚMERO DE ELEMENTOS ASSOCIADOS, UTILIZADA NA ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO MODELO. AUTORIA PRÓPRIA.	50
FIGURA 47: POSICIONAMENTO DO 'PATH' AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO MODELO NUMÉRICO. AUTORIA PRÓPRIA.	51
FIGURA 48: COMPARAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS ENTRE O MODELO ANALÍTICO E NUMÉRICO. AUTORIA PRÓPRIA.	52
FIGURA 49: MODELO MEF NO INSTANTE DO CARREGAMENTO ($a = 1,2$) NO SOFTWARE ANSYS <i>MECHANICAL WORKBENCH</i> . AUTORIA PRÓPRIA.	54
FIGURA 50: MODELO MEF NO INSTANTE DO <i>SPRING BACK</i> NO SOFTWARE ANSYS <i>MECHANICAL WORKBENCH</i> . AUTORIA PRÓPRIA.	54
FIGURA 51: DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO ARAME METÁLICO PARA $a = 1,2$. AUTORIA PRÓPRIA.	55
FIGURA 52: TENSÃO E DEFORMAÇÃO RESIDUAIS NA SUPERFÍCIE DO ARAME METÁLICO PARA $a = 1,2$. AUTORIA PRÓPRIA.	55

FIGURA 53: MODELO MEF NO INSTANTE DO CARREGAMENTO ($A = 1,4$) NO SOFTWARE <i>ANSYS MECHANICAL WORKBENCH</i> . AUTORIA PRÓPRIA.....	56
FIGURA 54: MODELO MEF NO INSTANTE DO <i>SPRING BACK</i> NO SOFTWARE <i>ANSYS MECHANICAL WORKBENCH</i> . AUTORIA PRÓPRIA.....	56
FIGURA 55: DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL AO LONGO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO ARAME METÁLICO PARA $A = 1,4$. AUTORIA PRÓPRIA.....	57
FIGURA 56: TENSÃO E DEFORMAÇÃO RESIDUAIS NA SUPERFÍCIE DO ARAME METÁLICO PARA $A = 1,4$. AUTORIA PRÓPRIA.....	57
FIGURA 57: COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO RESIDUAL ENTRE AS DUAS CURVATURAS DO CASO 1. AUTORIA PRÓPRIA.	59
FIGURA 58: COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO RESIDUAL ENTRE AS DUAS CURVATURAS DO CASO 7. AUTORIA PRÓPRIA.	60
FIGURA 59: COMPARAÇÃO ENTRE OS PERFIS DE TENSÃO RESIDUAL DAS DUAS CURVATURAS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CASO 14. AUTORIA PRÓPRIA.....	61
FIGURA 60: COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO RESIDUAL ENTRE AS DUAS CURVATURAS DO CASO 14. AUTORIA PRÓPRIA.	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CAUSAS PARA O APARECIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS	19
TABELA 2: PROPRIEDADES DO ARAME METÁLICO. AUTORIA PRÓPRIA.....	36
TABELA 3: VALORES DE A E MOMENTOS FLETORES EQUIVALENTES PARA OS CASOS DE CURVATURA QUE SERÃO OBJETO DE ESTUDO. AUTORIA PRÓPRIA.....	37
TABELA 4: PARÂMETROS UTILIZADOS PARA FAZER A COMBINAÇÃO DOS CENÁRIOS POSSÍVEIS. AUTORIA PRÓPRIA.....	39
TABELA 5: EXEMPLO DE CASOS DE SIMULAÇÃO SIMÉTRICOS. AUTORIA PRÓPRIA.	39
TABELA 6: MATRIZ DE VARIÁVEIS DE ENTRADA. AUTORIA PRÓPRIA.....	42
TABELA 7: DADOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DO MODELO NUMÉRICO. AUTORIA PRÓPRIA.....	50
TABELA 8: EFEITOS OBSERVADOS NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS PARA OS CASOS SIMULADOS. AUTORIA PRÓPRIA.....	58
TABELA 9: TABELA DE ANÁLISES E RESULTADOS. AUTORIA PRÓPRIA.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

SCC	<i>Stress Corrosion Cracking</i>
PLSV	<i>Pipe Laying Support Vessel</i>
VIV	<i>Vortex Induced Vibration</i>
α	Relação entre momento aplicado e o momento necessário para iniciar o escoamento do material
b	Largura da seção transversal
c	Semi-altura da seção transversal
y	Distância vertical entre um dado ponto e a linha neutra
y_y	Fronteira elasto-plástica
E	Módulo de elasticidade
f	Fator de forma
I	Momento de inércia de área
M_{EQ}	Momento equivalente
M_P	Momento necessário para plastificar toda seção da seção transversal
M_Y	Momento necessário para iniciar o escoamento da seção transversal
ρ	Curvatura
ρ_Y	Curvatura necessária para iniciar o escoamento da seção transversal
S_Y	Tensão de escoamento
σ	Tensão
ε	Deformação
MEF	Método de Elementos Finitos

Capítulo 1

Introdução

A década de 20 dos anos 2000 trouxe consigo inúmeros desafios à indústria do Óleo e Gás, principalmente no Brasil. O descobrimento de campos de petróleo em águas submarinas brasileiras cada vez mais profundas e com fluidos que possuem altas concentrações de compostos como o gás carbônico (CO_2) e o gás sulfídrico (H_2S) contribuíram para o estudo de novas soluções e tecnologias de extração e transporte do petróleo.

Atualmente, o transporte do óleo do leito marinho até as unidades flutuadoras de produção, que ficam na superfície do oceano, é, na grande maioria das vezes, feito por dutos flexíveis. Esses dutos são compostos por camadas metálicas e poliméricas interpostas entre si, como será apresentado no Capítulo 2, e estão sujeitos a carregamentos dinâmicos e/ou estáticos devido a esforços decorrentes da pressão interna, peso da linha flexível, efeitos de ondas e correntes marítimas.

Dentre as camadas metálicas estão as armaduras de tração. Essas armaduras, por sua vez, são compostas por barras chatas, também conhecidas por fios ou arames metálicos. O processo de fabricação das armaduras de tração induz deformações plásticas nos fios chatos. Essas deformações plásticas fazem com que altos níveis de tensões residuais, que serão discutidas no Capítulo 3, surjam nas seções transversais desses fios.

A combinação das tensões residuais, dos carregamentos de operação, da água presente no fluido interno ou do oceano e do CO_2 , leva ao surgimento do fenômeno conhecido como SCC- CO_2 , ou, em português, corrosão sob-tensão na presença do gás carbônico, como mostra a Figura 1, nas armaduras metálicas, incluindo a armadura de tração. Esse fenômeno tem sido cada vez mais observado em campo e é responsável pela falha de linhas flexíveis em operação.

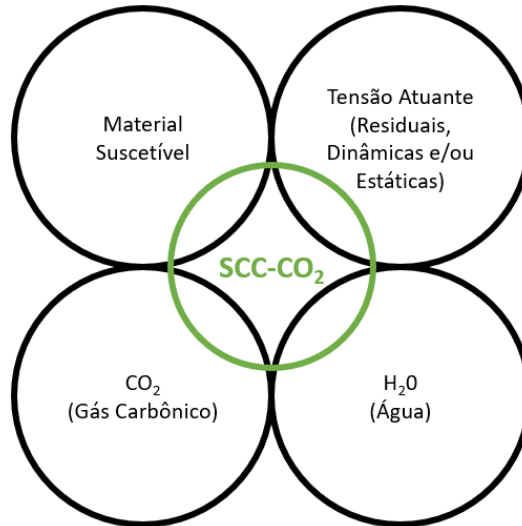


Figura 1: Fatores que causam o surgimento do SCC-CO₂. Autoria Própria.

Portanto, torna-se evidente, analisando o diagrama da Figura 1, que a engenharia mecânica pode agir de forma mais efetiva no entendimento de como as tensões residuais são geradas, em especial compreendendo como elas surgem, como suas intensidades e distribuições podem ser estimadas e possíveis soluções para que elas possam ser reduzidas a valores “seguros”, mitigando o problema do SCC-CO₂.

1.1 Motivação

O estudo das tensões residuais se torna cada vez mais necessário no cenário da indústria do Óleo e Gás, principalmente no que tange os dutos flexíveis e ao processo de fabricação de suas armaduras metálicas.

Como abordado anteriormente, as tensões residuais, quando combinadas com outros três fatores, podem induzir o aparecimento da corrosão sob-tensão nos fios metálicos presentes nas armaduras do duto flexível. Portanto, é importante compreender melhor esse tópico, sob o viés da engenharia mecânica, para que o fenômeno do SCC-CO₂ possa ser mitigado.

1.2 Justificativa

O tema das tensões residuais, ainda que seja um assunto conhecido na engenharia, é pouco estudado durante o curso de graduação. Entender como se dá o seu aparecimento, fatores que influenciam na sua distribuição ao longo da seção transversal de componentes mecânicos e como podem ser mitigadas torna-se então necessário.

Além disso, por ser tópico ainda pouco estudado, a quantidade de modelos numéricos disponíveis para a determinação das tensões residuais também é reduzida. Modelos numéricos são importantes no estudo de tópicos de engenharia já que, quando atrelados a modelos analíticos e experimentais, contribuem para a validação de uma metodologia e providenciam bom embasamento em relação ao entendimento do fenômeno.

Nesse sentido, a realização do presente estudo se justifica na medida em que busca compreender a relação que existe entre a distribuição das tensões residuais e alguns parâmetros mecânicos ligados principalmente ao carregamento e seus efeitos de sequência.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo principal a determinação e avaliação dos efeitos da distribuição de tensões residuais ao longo da seção transversal de barras chatas que estejam submetidas a carregamentos puros de flexão sucessivos utilizando um modelo numérico. Somente a sequência de dois carregamentos consecutivos serão analisados.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

Para o estudo das tensões residuais, um modelo numérico foi construído através do software ANSYS *Mechanical Workbench*. Esse modelo baseou-se em uma barra chata constituída de aço, que foi submetida a dois carregamentos consecutivos puros de flexão, variando-se a intensidade, o sentido do momento fletor aplicado e se havia ou não liberação da carga após sua aplicação. Dessa forma, foram gerados perfis de tensão residual na seção transversal do arame e curvas Tensão x Deformação. Por fim, os resultados foram avaliados e seus efeitos observados, propondo sugestões de melhoria para a organização das etapas de armazenamento e transporte de arames para dutos flexíveis no setor *offshore*.

1.5 Organização do Trabalho

Para que o entendimento do conteúdo abordado por esse projeto pudesse ser mais bem compreendido, o trabalho foi dividido em 6 capítulos e 1 Apêndice.

O Capítulo 1 conta com uma breve introdução sobre o assunto que será abordado, a fim de contextualizá-lo para o leitor. Além disso, a motivação, justificativa e o objetivo do trabalho também são descritos.

O Capítulo 2 apresenta os dutos flexíveis, suas características e como são utilizados no transporte do petróleo em campos submarinos.

O Capítulo 3 aborda o tema das tensões residuais. Suas seções farão uma revisão a respeito do que são as tensões residuais, os processos que causam seu aparecimento e como podem ser determinadas analiticamente, numericamente e experimentalmente.

O Capítulo 4 apresenta o trabalho desenvolvido pelos autores para que a distribuição das tensões residuais na seção transversal de uma barra chata pudesse ser determinada. Além disso, esse capítulo também reserva os resultados encontrados através do software numérico utilizado no estudo e realiza as principais discussões acerca dos efeitos observados.

apresenta as conclusões do projeto.

O Capítulo 6 conta com as referências bibliográficas que foram utilizadas para embasar o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, o Apêndice A apresenta a distribuição das tensões residuais ao longo da seção transversal da barra e os gráficos de tensão na superfície da barra metálica pela deformação nessa mesma superfície para todos os casos simulados numericamente no estudo.

Capítulo 2

Dutos Flexíveis na Indústria Offshore

A descoberta contínua de petróleo em lâminas d'água profundas e em ambientes cada vez mais severos tem motivado a indústria de óleo e gás a desenvolver novas tecnologias que possibilitem a exploração desse recurso. Dessa forma, os dutos flexíveis apresentam uma proposta de modernizar o cenário de extração e ampliar a esfera de atuação das operadoras em todo mundo.

2.1 Sistemas Marítimos de Elevação e Escoamento

Dentro do processo de extração de petróleo, os dutos podem exercer diferentes papéis, tais como:

- Exportação dos recursos extraídos para instalações terrestres;
- Transferência do produto de plataformas para linhas de exportação;
- Injeção de água, gases ou produtos químicos;
- Transferência do produto entre plataformas, poços ou equipamentos.

O projeto destas linhas difere dos dutos mais convencionais devido aos seus critérios mais rigorosos, a utilização de diferentes ferramentas de análise e por estarem constantemente submetidos a condições ambientais severas e carregamentos cíclicos.

2.2 Configurações de Coleta

Uma particularidade existente nos projetos de dutos marítimos é a variação de determinados modos de falha de acordo com o seu posicionamento. Por exemplo, os dutos que ligam as plataformas ao leito do mar estão submetidos à esforços variáveis no tempo devido a ação das ondas e correntes, enquanto os dutos que estão em repouso no leito marinho não são tão afetados por estes fenômenos. Assim, requisitos de qualificação são mais rigorosos em determinados trechos do duto, em detrimento de outros.

Por este motivo foi convencionado diferentes nomenclaturas para cada trecho, de forma que os projetos ocorressem separadamente, dado que suas características podem ser completamente distintas, como espessura de parede, material e até mesmo o tipo de duto. A seguir serão abordadas as características de cada um desses trechos, apresentados na Figura 2.

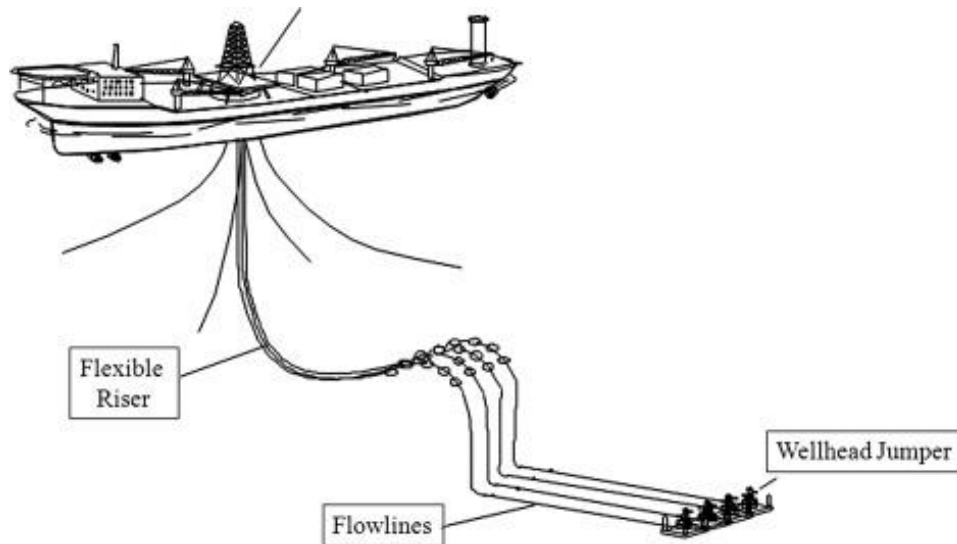


Figura 2: *Risers, flowlines, and jumpers* (Subsea Engineering Handbook - Second Edition, 2019) [1]

2.2.1 Riser

Riser é o trecho do duto que faz a ligação entre as instalações de extração no leito marinho e a superfície do oceano, onde se encontram as plataformas ou embarcações de instalação (PLSV's). O comprimento desta linha irá variar de acordo com a lâmina d'água e a configuração na qual se encontra. Devido ao seu posicionamento, este trecho sofre os maiores efeitos de ondas e correntes, que decrescem conforme a profundidade aumenta. Por isso, os danos de fadiga devem ser cuidadosamente calculados, desde a instalação até o descomissionamento do campo.

2.2.2 Flowline

Os *flowlines* geralmente são responsáveis pela conexão entre *manifolds* e poços ou pelo transporte dos fluidos até os *risers*. Seu trecho pode se estender por quilômetros até a posição de outros equipamentos ou ao terminal do *riser*. Por estarem em contato direto com o solo, *flowlines* estão sujeitos a flambagem (*birdcaging*) devido ao processo de pressurização da linha, que ao reagir com o atrito gerada pelo leito, induz esforços compressivos no duto. Além disso, a presença de vãos livres pode proporcionar o fenômeno conhecido como VIV, que induz a ressonância da linha devido a passagem de correntes marítimas.

2.2.3 Jumper

Os *jumpers* são dutos conhecidos por possuírem comprimentos curtos. Na grande maioria das vezes, são utilizados em aplicações estáticas, como por exemplo para conectar dois equipamentos do arranjo submarino. Contudo, *jumpers* também podem ser utilizados em aplicações dinâmicas. Isso ocorre quando desempenham papel de escoamento de fluidos entre Unidades de Produção ou conectam uma Unidade de Produção a uma boia flutuadora.

2.3 Dutos Flexíveis

Estruturalmente, os dutos flexíveis são compostos por uma sequência de camadas poliméricas cilíndricas e camadas metálicas, em formato de helicóide, conforme mostra a Figura 3, sendo cada uma delas responsável por uma função específica. As camadas poliméricas visam garantir a estanqueidade, distribuição homogênea de esforços e ajudar no isolamento térmico. Já as camadas metálicas possuem funções estruturais, tendo de resistir a carregamentos de pressão e tração, por exemplo.

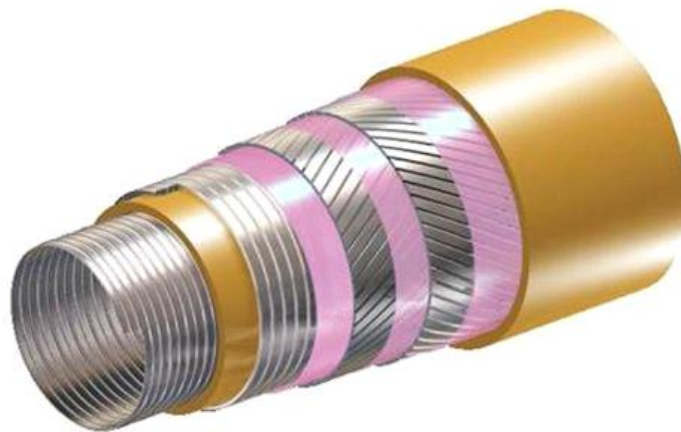


Figura 3: Duto Flexível. Modificado de [14]

As linhas flexíveis têm ganhado cada vez mais espaço dentro do cenário desafiador de exploração de petróleo do pré-sal brasileiro devido a características particulares que tornam sua aplicação válida no aspecto comercial e técnico. Essas características são, por exemplo, a sua flexibilidade estrutural, podendo ser adaptadas a diversas condições do ambiente marítimo e fluido transportado, possibilidade de serem reinstaladas diversas vezes, sem comprometimento de integridade, e o relativo baixo custo de produção e instalação quando comparadas a outras soluções, como por exemplo as linhas compostas por dutos rígidos.

Os dutos flexíveis podem ser enquadrados em dois grupos de classificação de acordo com a função que estão desempenhando em campo:

- Dutos de Coleta;
- Dutos de Exportação de Óleo e Gás.

2.3.1 Dutos Flexíveis de Coleta

Os dutos flexíveis de coleta englobam as aplicações relacionadas a produção de óleo e gás, *gas lift*, injeção de água e injeção de gás. Os dutos que operam com a função de produção de óleo e gás são responsáveis pelo escoamento do petróleo ou do gás do leito marinho até a Unidade de Produção, presente na superfície do oceano. Os dutos de coleta de *gas lift* são utilizados para injeção de gás na cabeça do poço, a fim de aumentar a velocidade do escoamento do petróleo do poço para a Unidade de Produção, otimizando a operação. Por fim, os dutos flexíveis de injeção de água e injeção de gás injetam esses fluidos no poço de petróleo, mantendo a pressão do reservatório constante durante todo o processo de produção.

2.3.2 Dutos Flexíveis de Exportação

Os dutos flexíveis de exportação são utilizados no transporte de óleo e gás de uma Unidade de Produção para outra ou para uma Unidade de Transporte. Essas operações, geralmente chamadas de *offloading*, visam liberar espaço das unidades principais de produção, para que mais óleo e/ou gás possam ser produzidos ou para que esses fluidos possam ser exportados para o continente. Esses dutos, devido à finalidade para que são empregados, geralmente possuem grandes diâmetros, otimizando a exportação do produto em questão.

2.4 Camadas Típicas dos Dutos Flexíveis

Os dutos flexíveis, como já visto na Seção 2.3 Dutos Flexíveis, são constituídos por camadas de materiais poliméricos e metálicos sobrepostas entre si. Cada camada possui finalidade bem definida e, ao combiná-las, é possível obter um duto estruturalmente adequado a determinada aplicação. A existência e o número de camadas em uma linha flexível podem variar conforme o tipo de fluido a ser transportado, valor de pressão interna, temperatura ótima de transporte do fluido interno, lâmina d'água, configuração de coleta e condições ambientais.

2.4.1 Carcaça

A carcaça é uma estrutura composta de perfis metálicos conformados que são intertravados helicoidalmente entre si durante o processo de fabricação, como ilustrado na Figura 4. Sua principal função é resistir ao colapso hidrostático e a carregamentos radiais de compressão/esmagamento no flexível, que podem ocorrer durante a instalação do duto com a ação dos tensionadores ou quando as armaduras de tração, apresentadas na Seção 2.4.5 Armadura de Tração, estão tensionadas.

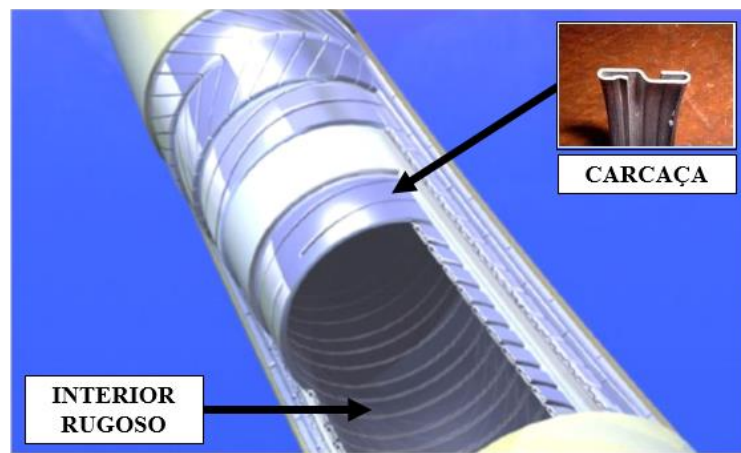


Figura 4: Carcaça Intertravada. Modificado de [14]

Normalmente, os aços inoxidáveis são os materiais escolhidos para composição da carcaça. Isso ocorre uma vez que, como essa é a camada mais interna de um duto flexível, está em contato direto com o fluido transportado, necessitando possuir boa resistência à corrosão e à efeitos erosivos.

Dutos flexíveis que possuem carcaça são chamados de *Rough Bore*, ou de interior rugoso, em português. Quando a estrutura não possui essa camada, o duto é chamado então de *Smooth Bore*, ou de interior liso, já que a camada mais interna passa a ser um tubo polimérico. Dutos *Smooth Bore* são muito utilizados para aplicação de injeção de água.

2.4.2 Camada de Pressão

A camada de pressão, em formato tubular cilíndrico, possui função de garantir a estanqueidade do flexível, impedindo que ocorra vazamento do fluido interno para as camadas subsequentes. Além disso, deve garantir a transmissão homogênea dos esforços provenientes da pressão interna para a armadura de pressão e armaduras de tração. É possível observar a camada de pressão e seu posicionamento estrutural na Figura 5.

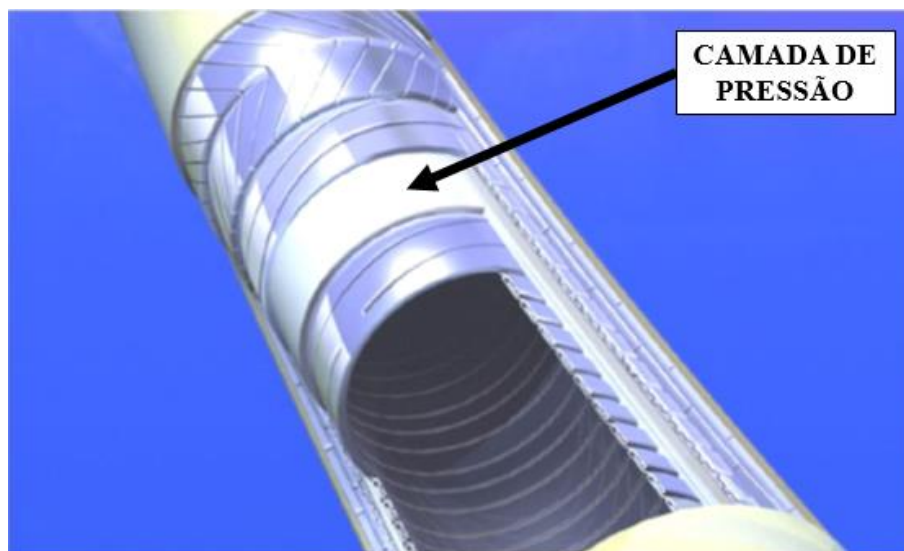


Figura 5: Camada polimérica de Pressão. Modificado de [14]

Como já explicado na seção 2.4.1 Carcaça, quando o duto flexível não possui carcaça (*Smooth Bore*), a camada de pressão torna-se a camada mais interna do flexível, estando em contato direto com o fluido transportado.

Normalmente, os materiais empregados são o polietileno (PE), a poliamida (PA) ou o fluoreto de polivinilideno (PVDF).

2.4.3 Armadura de Pressão

A armadura de pressão possui como função principal resistir aos esforços provenientes da pressão interna. Além disso, em um flexível enquadrado como *Rough Bore*, essa camada fornece resistência adicional ao colapso hidrostático. Quando se trata de um duto *Smooth Bore*, a armadura de pressão deve assumir função integral de resistir ao colapso hidrostático.

Essa camada é composta de perfis metálicos, normalmente de aço-carbono, possuindo diversos formatos de seção transversal, que podem variar de acordo com a aplicação. Esses perfis são intertravados helicoidalmente entre si durante a fabricação da estrutura. A armadura de pressão e exemplos de dois perfis empregados podem ser vistos na Figura 6.

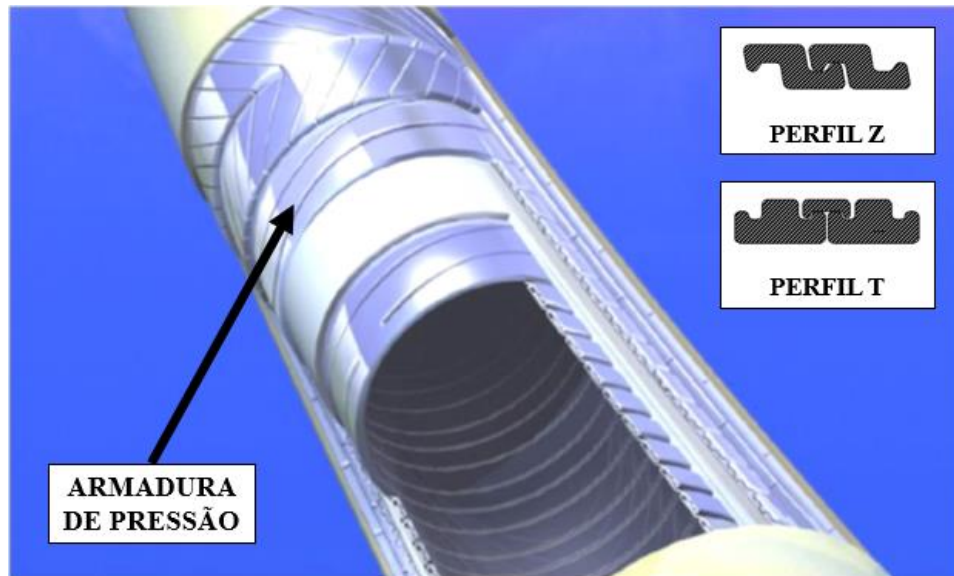


Figura 6: Armadura de Pressão e exemplo de perfil Z e perfil T, de acordo com a API 17B. Modificado de [14]

2.4.4 Camadas Anti-Desgaste

As camadas ou também chamadas de fita anti-desgaste são compostas por materiais não metálicos, podendo ser fabricadas a partir de extrusão polimérica ou do envolvimento do duto por fitas, com o propósito de reduzir o atrito e o desgaste gerados entre duas camadas metálicas adjacentes, devido aos movimentos relativos entre elas.

Sendo o desgaste originado pelo movimento entre as superfícies, as camadas anti-desgaste podem não ser utilizadas quando o duto é submetido estritamente a aplicações estáticas, como é o caso dos *flowlines*.

2.4.5 Armadura de Tração

As armaduras de tração são compostas por arames metálicos posicionados helicoidalmente no duto flexível, com ângulo de passo entre 20° e 55° , medidos em relação ao eixo longitudinal do duto. Sua geometria é projetada de forma a suportar os esforços trativos, fletores e torcionais, sem impedir o curvamento do duto.

O ângulo gerado entre os arames pode ser alterado conforme a necessidade de equilibrar a rigidez axial ou radial da estrutura, alterando dessa forma sua participação na resistência à pressão interna. No geral, são instaladas duas camadas de armaduras de tração, porém enroladas em direções diferentes, formando um par, de forma a garantir a rigidez da estrutura em ambos os sentidos, conforme mostra a Figura 7.

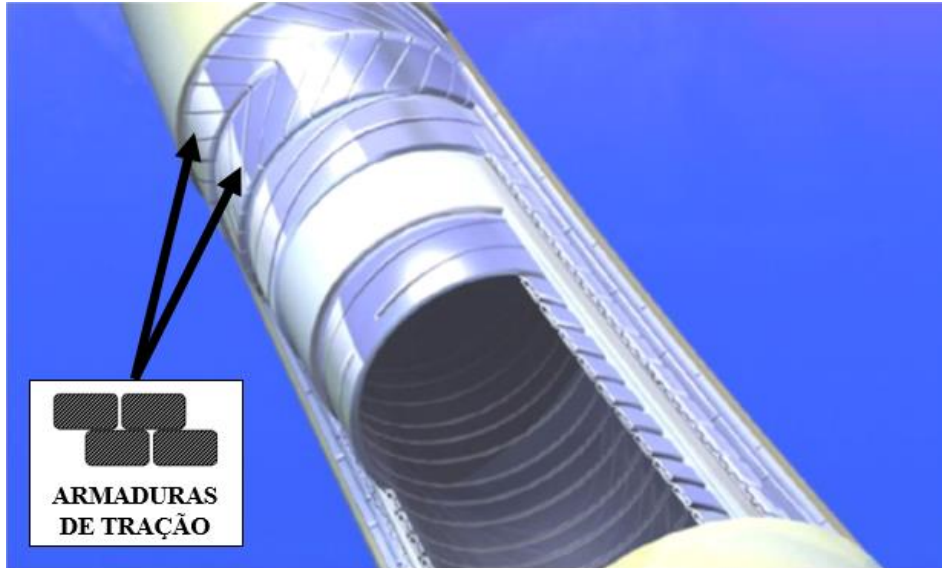


Figura 7: Armaduras de tração e parte de sua seção transversal de seus perfis. Modificado de [14]

Os arames metálicos das armaduras de tração são constituídos de barras chatas, possuindo seção transversal no formato retangular. O processo de fabricação dessas barras é a laminação. Após laminadas, são enroladas em bobinas e enviadas para a fábrica em que a linha flexível será manufaturada.

Após chegarem ao centro de manufatura, os arames metálicos passam por diversas etapas até que os fios da armadura sejam pousados na estrutura do duto flexível. Essas etapas envolvem, por exemplo, a desbobinagem dos arames metálicos e bobinagem em outros carretéis, assim como a própria etapa de posicionamento do fio sobre o duto.

Esses processos podem ocorrer de diferentes maneiras, com o arame metálico sendo passado de uma bobina ou rolete para outro(a) de formas distintas. Algumas das possibilidades de transferência são mostradas na Figura 8.

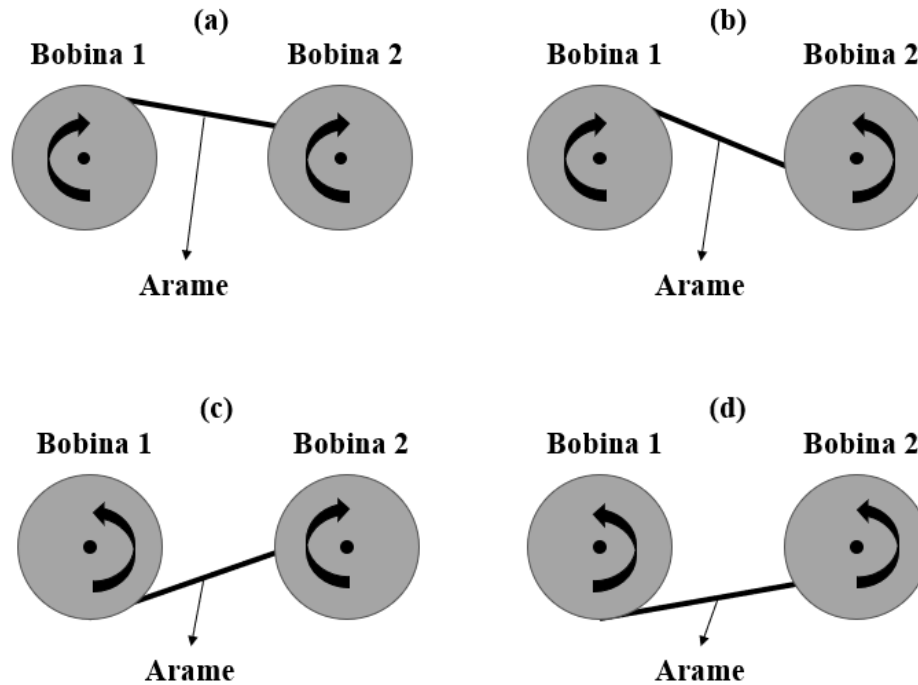


Figura 8: Exemplos (a), (b), (c) e (d) de etapas no qual o arame metálico é submetido durante fabricação do duto flexível. Autoria Própria.

Todas estas etapas do processo de fabricação das armaduras de tração induzem o aparecimento de tensões e deformações residuais nos fios metálicos. Isso se deve ao fato de que elas induzem nos arames carregamentos que plastificam parcialmente as suas seções transversais, com posterior alívio (descarregamento).

Essas tensões residuais, na grande maioria dos casos, são deletérias às armaduras, já que se somam aos carregamentos de operação (campo), podendo causar a falha dessa camada. O entendimento e a determinação dessas tensões será objeto de estudo deste trabalho.

2.4.6 Fitas de Alta-Resistência

Devido aos esforços axiais no qual o duto é submetido, quando os arames das armaduras de tração estão sujeitos à compressão, pode haver flambagem. O fenômeno de flambagem dos arames das armaduras de tração origina o defeito conhecido por “gaiola de passarinho” ou *birdcaging*, podendo ser observado na Figura 9.



Figura 9: Efeito “gaiola de passarinho”. Modificado de [15]

Dessa forma, são instaladas fitas de alta resistência em torno das armaduras de tração com o propósito de resistir o movimento de flambagem dos arames.

2.4.7 Isolamento Térmico

Esta é uma camada adicional que possui o objetivo de aumentar o isolamento térmico do duto, impedindo a perda excessiva de calor entre o fluido e o ambiente externo. Geralmente, a camada é instalada entre a armadura de tração externa e a capa externa. Sua composição pode variar entre cada projeto. Contudo, um material convencional utilizado nessas camadas é o polipropileno expandido com microesferas de vidro.

2.4.8 Capa Externa

A capa externa, ilustrada na Figura 10, é uma camada polimérica que tem como principal função assegurar a estanqueidade do flexível, impedindo que a água do mar penetre no duto, e, conseqüentemente, protegendo as camadas internas do efeito da corrosão e do envelhecimento. Além disso, outra importante função da capa externa é a de funcionar como barreira mecânica contra impactos ou danos causados por equipamentos durante o transporte e a instalação da linha.

Geralmente, essa camada possui coloração específica, que está ligada diretamente a proteção contra raio ultravioletas, já que por ser a camada mais externa do flexível, determinados trechos poderão estar em contato direto com a atmosfera e a luz solar. Os materiais mais comuns empregados são a poliamida, o TPE e o polietileno.

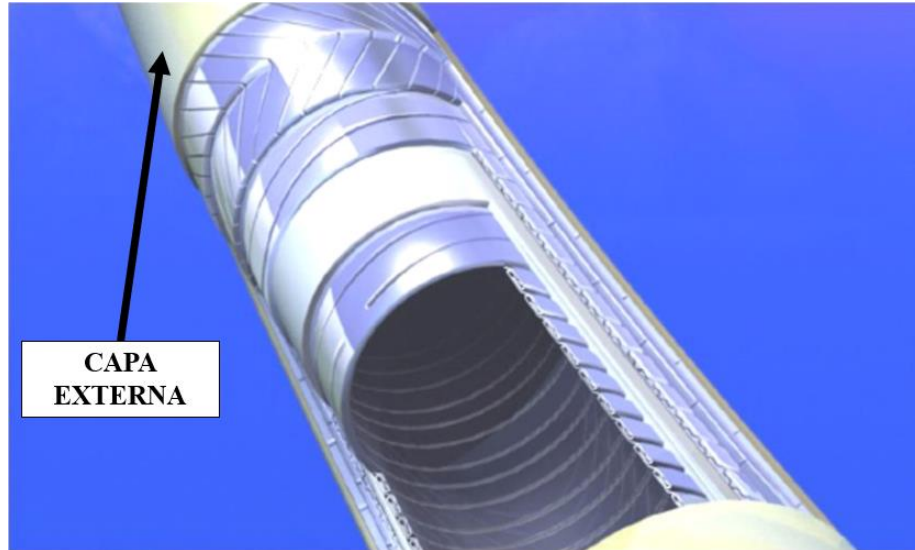


Figura 10: Capa externa do flexível. Modificado de [14]

2.5 Conectores

Os conectores são acessórios que ficam localizados sempre nas extremidades de um tramo da linha flexível. Esses acessórios têm a função de unir dois tramos da linha, como por exemplo um *riser* a um *flowline*, ou um tramo a um equipamento.

Cada camada do flexível é ancorada individualmente no conector. Por conta disso, é um acessório de projeto e montagem bastante complexos. A montagem do conector é um processo manual e, geralmente, ocorre ainda em terra, sendo a linha flexível transportada para o barco que fará a instalação já com os conectores montados.

O processo de montagem também induz o aparecimento de tensões residuais nas armaduras de tração, uma vez que deformações plásticas são impostas à essa camada. A Figura 11 mostra um exemplo de um conector de linha flexível.

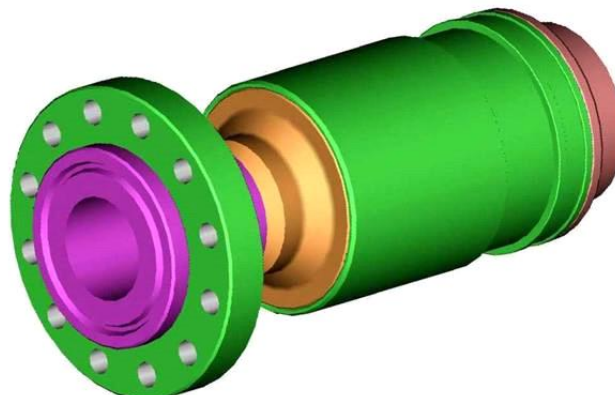


Figura 11: Exemplo de conector de uma linha flexível. Modificado de [14]

Esse equipamento deve ser capaz de garantir a estanqueidade das camadas internas, além de resistir a todos os esforços que a linha flexível estará submetida, como carregamentos de fadiga e esforços gerados pela pressão interna e externa.

2.6 Principais Modos de Falha

Os eventos que levam a linha flexível a falha ou a não atuar conforme foram projetados podem ser muitos. Geralmente, são divididos de acordo com o tipo de camada em que ocorrem.

Para as camadas metálicas, as falhas ocorrem devido a ruptura do material por conta de carregamentos trativos, torcionais, flexionais ou combinação desses. A falha por fadiga também é um problema. Outro fenômeno que vem causando a falha dessas camadas é a corrosão sob tensão na presença do gás carbônico, mais conhecido como SCC-CO₂. Esse fenômeno ainda é pouco entendido na indústria, porém sabe-se que, para ocorrer, deve haver a presença de água, gás carbônico e tensões atuantes na estrutura (estáticas ou dinâmicas). As tensões residuais têm grande influência nesse modo de falha. Daí também surge a importância do estudo dessas.

Para as camadas poliméricas, as falhas são causadas principalmente pela ruptura do material devido a esforços de pressão interna, flexão da linha, atrito entre camadas ou rasgamento quando em contato com algum objeto externo perfurante. Além disso, o envelhecimento do material, levando a degradação do polímero, também é bastante comum. Ele é causado pelo efeito químico dos fluidos em contato com essas camadas, devido ao efeito da temperatura de operação da linha, ou por conta da incidência dos raios ultravioletas nessas camadas, principalmente na capa externa.

Capítulo 3

Tensões Residuais

O estudo de resistência dos materiais tradicional é focado na região elástica da curva de Tensão x Deformação. Como será abordado a seguir, as tensões residuais são geradas somente quando carregamentos alcançam a região plástica dessa curva.

Contudo, é importante ressaltar que todos os processos de fabricação que produzem plastificação introduzem tensões residuais nos componentes mecânicos, influenciando na vida em serviço, resistência mecânica e até mesmo resistência a corrosão desses. Tal comportamento apenas evidencia a grande importância deste conceito no projeto de qualquer componente mecânico, ainda que este seja um tópico pouco estudado.

3.1 Definição

Segundo a ASM (2002), tensões residuais são definidas como aquelas que permanecem em componentes mecânicos após os carregamentos externos e gradientes térmicos terem cessado. As tensões residuais são formadas em função de deformações plásticas, precipitação, transformações de fase e deformações por expansão térmica, estando presentes em praticamente todos os componentes rígidos, sejam metálicos ou não (madeira, polímero, vidro, cerâmica etc.). Estas tensões residuais podem atingir valores da ordem do limite de escoamento do material.

As tensões residuais são adicionadas algebricamente ao carregamento operacional, podendo majorá-lo significativamente ou, dependendo de sua magnitude, sinal e distribuição, beneficiar regiões da seção transversal da estrutura. A Figura 12 ilustra um caso em que as tensões residuais se superpõem às tensões de uma barra sob flexão positiva, após um processo de laminação a frio, contribuindo dessa forma para a redução da tensão trativa na superfície da barra (extradorso), mas aumentando a compressão no intradorso.

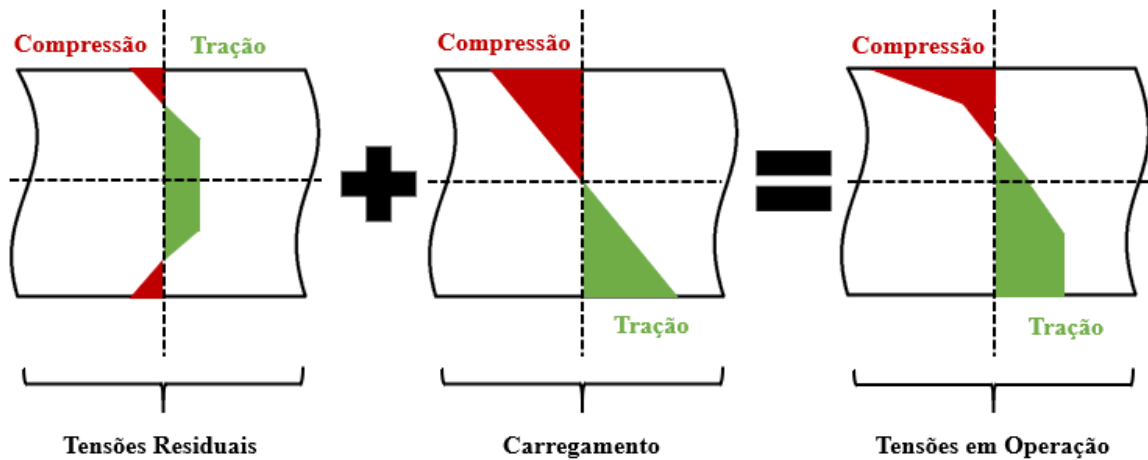


Figura 12: Superposição de tensões para uma barra submetida a carregamento de flexão.
Autoria própria.

Vale ressaltar que as tensões em operação mostradas na Figura 12 não atingiram o valor do limite de escoamento do material. As tensões em operação caracterizam-se por serem de natureza elástica.

Um dos raros exemplos de como as tensões residuais podem ser benéficas é o processo de jateamento com granalha, aplicado especialmente na indústria aeronáutica. A operação consiste na projeção de granalhas em alta velocidade na superfície do material, induzindo tensões residuais de compressão, aumento de rugosidade e endurecimento por encruamento do material.

Conforme descrito por CALLE GONZALES et al. (2004), o surgimento destas tensões residuais é função da deformação plástica que ocorre apenas na superfície do material enquanto o seu interior permanece elástico, impedindo as camadas internas de retornarem à sua geometria original. Visto que trincas não nucleiam ou propagam em campos de tensões compressivas, este processo provoca um aumento na vida útil do componente, uma vez que a maioria das falhas se originam na superfície.

3.2 Mecanismos Geradores de Tensões Residuais

Processos de fabricação, como laminação, extrusão e fundição, tratamentos térmicos e químicos, soldagem e outros processos de conformação mecânica podem induzir o surgimento de tensões residuais. Segundo SOUZA (2012), as principais causas do surgimento de tensões residuais podem ser resumidas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Causas para o aparecimento de tensões residuais

Causas	Processos
Efeitos Térmicos	Soldagem, Têmpera, Carbonetação e Nitretação
Processos de Fabricação	Laminação, Fundição, Forjamento, Trefilação e Extrusão
Carregamentos Mecânicos	Flexão, Torção e Axial

3.3 Tensões Residuais Devido a Efeitos Térmicos

De acordo com SOUZA (2012), nos tratamentos térmicos e termoquímicos as tensões residuais surgem quando o material é resfriado bruscamente, resfriando a superfície de maneira mais rápida que o centro. Logo, até o resfriamento total do corpo, o centro está tentando expandir e a superfície está comprimindo o centro da amostra. Quando o material é resfriado totalmente e a temperatura é estabilizada, ocorre uma inversão de tensões. Ou seja, o centro apresentará tensões residuais de tração e a superfície tensões residuais de compressão, conforme Figura 13.

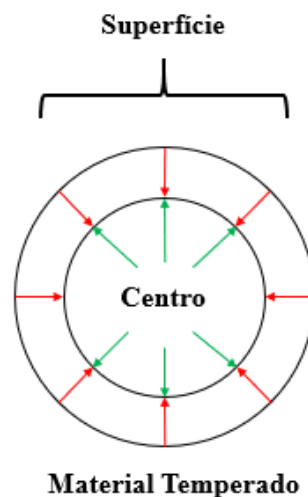


Figura 13: Distribuição de carregamentos internos em uma peça temperada. Autoria Própria.

É importante mencionar que mesmo sem considerar os fatores de expansão térmica diferencial, no caso de aços, a própria transformação de fase de austenita para ferrita, bainita ou martensita devido ao gradiente de temperatura implica em expansão volumétrica, enquanto as regiões vizinhas, frias e não transformadas, impedem essa expansão, gerando tensões residuais compressivas no material transformado, e trativas na sua vizinhança, conforme descrito por RODRIGUES (2004).

Note que ambos os fenômenos ocorrem em processos de soldagem, pois o material da zona fundida e da zona termicamente afetada, que sofre transformação de fase, tende a se expandir e será impedido pela parte do metal fria e não transformada. Dessa forma, ao avaliar o padrão de tensões residuais típico de uma chapa fina soldada, tem-se o valor máximo de tensão trativa no cordão de solda e ocorre uma inversão de sentido à medida que se afasta do cordão, conforme apresentado na Figura 14.

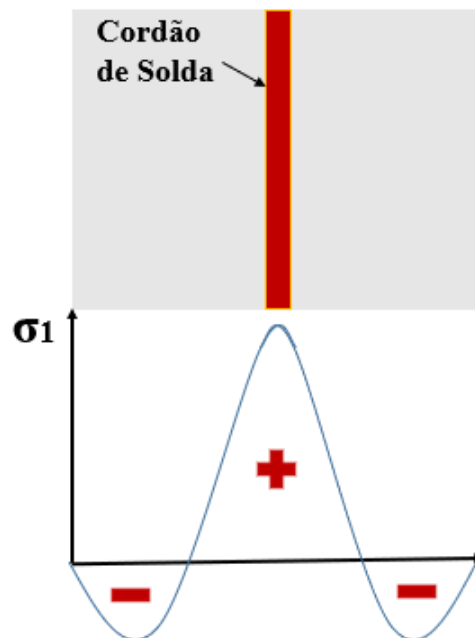


Figura 14: Distribuição de tensões residuais em um cordão de solda. Autoria Própria.

3.4 Tensões Residuais Devido a Processos de Fabricação

Processos de transformação metalúrgica produzem tensões residuais. Estes processos podem ser divididos em dois tipos, de acordo com o mecanismo gerador das tensões. Esses tipos são os processos de conformação mecânica, como laminação, forjamento, trefilação e extrusão, e processos de contração ou expansão térmica diferencial, como a fundição.

a) Processos de Conformação Mecânica

Processos de fabricação a base de conformação mecânica, como no caso da laminação, estampagem, forjamento, extrusão e trefilação são responsáveis pela geração de tensões residuais devido ao mecanismo de heterogeneidade de tensões.

De acordo com RODRIGUES (2004), quando as cargas destes processos são aliviadas, no esforço de conformar as seções de determinada peça, as fibras centrais do material, que foram menos solicitadas, tendem a voltar para o seu comprimento inicial (ou próximo dele) e forçam as fibras externas a se encurtarem mais do que elas desejariam, pois como escoaram mais, elas se acomodariam a um comprimento maior que o inicial. Assim, são geradas tensões compressivas na superfície e tensões trativas na região central da peça.

Note na Figura 15 o perfil qualitativo das tensões residuais geradas a partir de um processo de conformação mecânica como laminação.

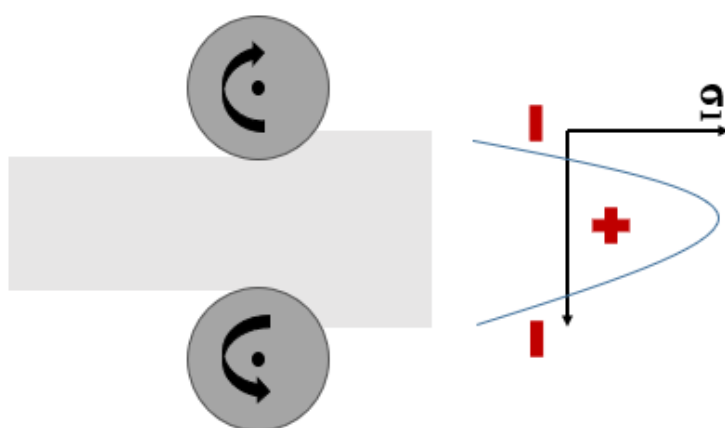


Figura 15: Perfil de tensões em uma barra laminada a frio. Autoria Própria.

b) Processos de Contração ou Expansão Térmica Diferencial

É evidente que o processo de fundição e solidificação é bastante complexo e varia para cada caso. Contudo, a restrição que o molde oferece ao fundido pode influenciar decisivamente no estado de tensões residuais resultantes. Inclusive, alguns problemas associados ao processo são originados devido as tensões residuais internas, como trincas a quente, por exemplo.

A partir de um mecanismo compartilhado pelos efeitos térmicos de tratamentos ou soldagem, a contração do material fundido ao tentar resfriar-se é impedida pela restrição do molde, gerando tensões residuais internas e o surgimento de trincas a quente. Dessa forma, é de grande importância a consideração dos fenômenos de contração e expansão do material fundido no projeto de moldes para fundição. Note na Figura 16 o comportamento qualitativo de uma barra no formato de “I” ao solidificar-se dentro do molde.

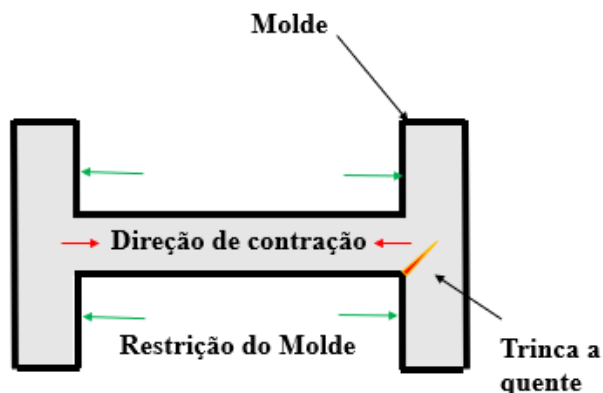


Figura 16: Comportamento de uma barra no formato de “I” no processo de fundição. Autoria Própria.

3.5 Tensões Residuais devido a Carregamentos Mecânicos

Durante a operação de determinada peça, podem surgir diferentes tipos de esforços que, após serem removidos, ação conhecida como *springback*, podem induzir o surgimento de novas tensões residuais, que podem se sobrepor aquelas já existentes oriundas das transformações metalúrgicas.

Note que a distribuição de tensões residuais pode variar conforme o tipo de carregamento no qual o componente é submetido. Assim, existem três tipos de esforços estudados na formação de tensões residuais: Flexão, Torção e Axial.

É importante mencionar que os carregamentos a seguir estão frequentemente sendo aplicados em conjunto, originando diferentes distribuições de carregamentos. Contudo, devido à complexidade destes fenômenos, só serão abordados neste trabalho o estudo de carregamentos puros, ou seja, aplicados isoladamente.

3.5.1 Axial Puro

Esforços axiais são distribuídos uniformemente em uma seção transversal e, quando excedem o limite de escoamento do material, a seção é plastificada na mesma proporção, conforme a Figura 17. Dessa forma, quando aplicado isoladamente, o requisito básico para o surgimento de tensões residuais não é atingido, visto que não há plastificação heterogênea da estrutura.

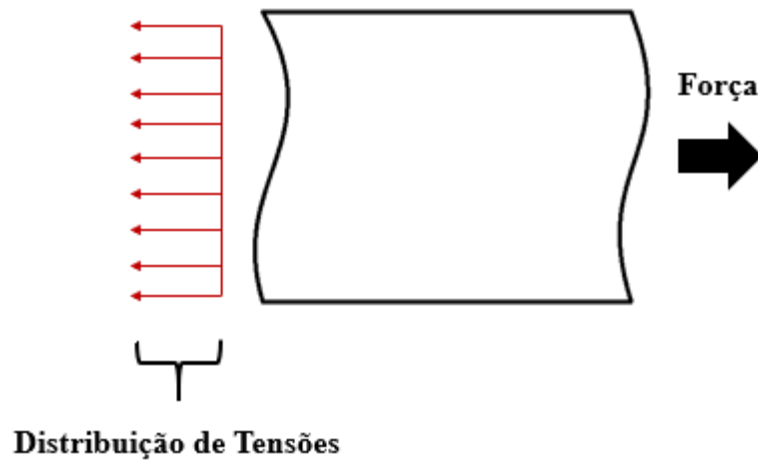


Figura 17: Distribuição de tensões homogênea em uma peça sob esforço axial puro. Autoria Própria.

Ainda assim, na existência de descontinuidades na estrutura, variações no campo de tensões podem ser observadas, levando a plastificação de regiões isoladas, que através da interação com as regiões elásticas, produzem tensões residuais. Este caso pode ser observado, por exemplo, quando uma chapa com um furo é submetida a esforços axiais. O furo nessa circunstância age como um concentrador de tensão, alterando o nível das tensões longitudinais na seção transversal da chapa, conforme mostrado esquematicamente na Figura 18.

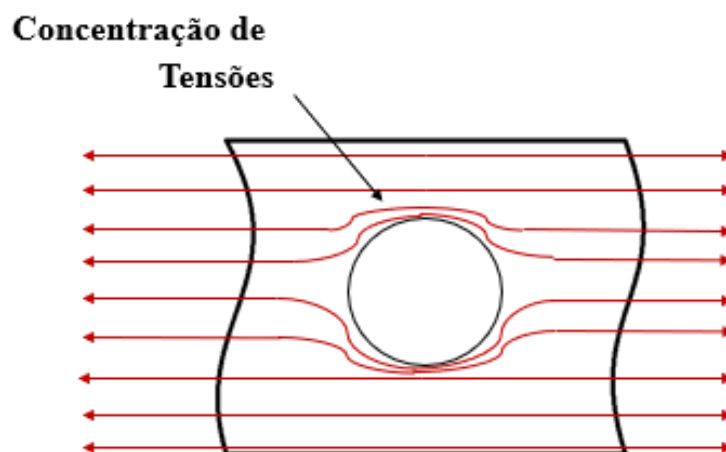


Figura 18: Concentração de tensões em uma barra furada sob esforços axiais. Autoria Própria.

3.5.2 Torção Pura

Estruturas submetidas a torção variam linearmente a deformação com a distância ao centro do eixo. Regiões mais próximas ao centro de rotação possuem valores de tensão mais baixos e conseqüentemente estão menos suscetíveis a plastificação do que as regiões mais externas, como pode ser observado esquematicamente na Figura 19.

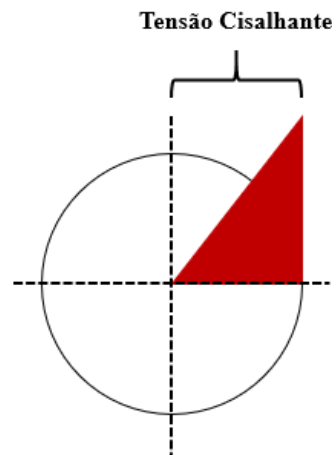


Figura 19: Distribuição de tensões em uma peça sob esforço de torção pura elástico. Autoria Própria.

Assim, ao ultrapassar a tensão de escoamento, uma região plastificada surge na região mais externa. O retorno elástico somado a plastificação parcial do carregamento gera distribuição de tensões residuais, como mostrado esquematicamente na Figura 20.

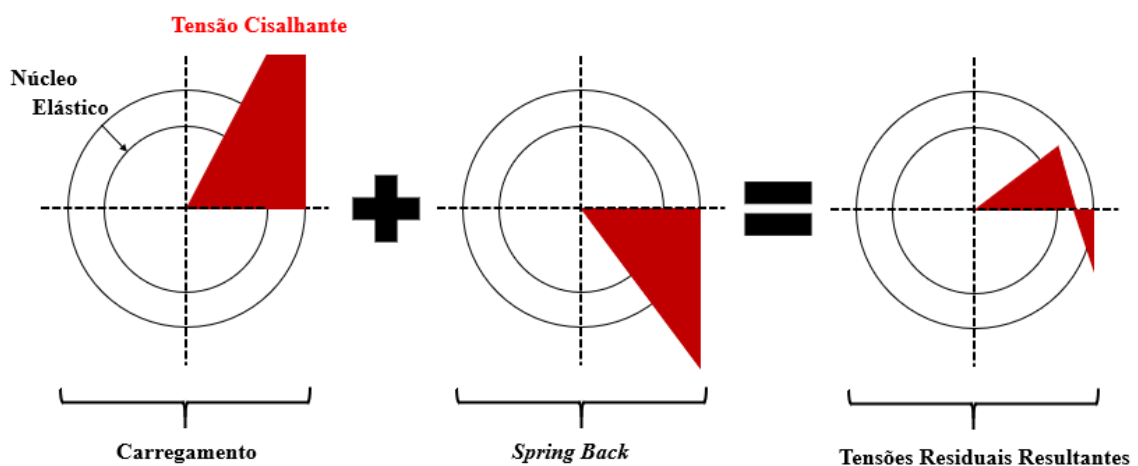


Figura 20: Superposição de tensões de um eixo submetido a sequência carregamento/descarregamento de torção no cálculo de tensões residuais. Autoria Própria.

3.5.3 Flexão Pura

Quando aplicado um carregamento fletor a uma determinada estrutura, tensões normais de sentidos opostos surgem ao longo da tensão transversal, aumentando em módulo conforme se afastam da linha neutra, conforme Figura 21.

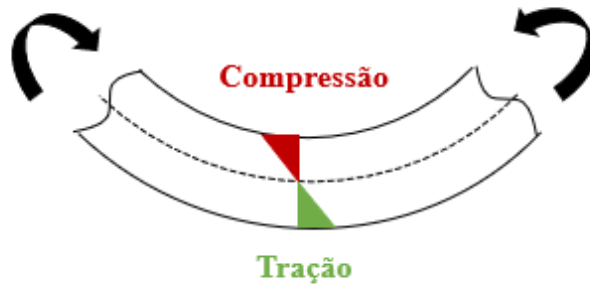


Figura 21: Distribuição de tensões em uma barra sob carregamento elástico de flexão pura.

Autoria Própria.

Aumentando o momento fletor, a seção transversal começa a plastificar, com regiões plásticas surgindo nas regiões mais distantes da linha neutra, como na Figura 22.a. O retorno elástico ocorre após a retirada da carga de momentos, como na Figura 22.b. O resultado da sequência de carregamento (complastificação parcial da seção transversal) e o descarregamento elástico, é a formação de tensões residuais como mostrada esquematicamente na Figura 22.c.

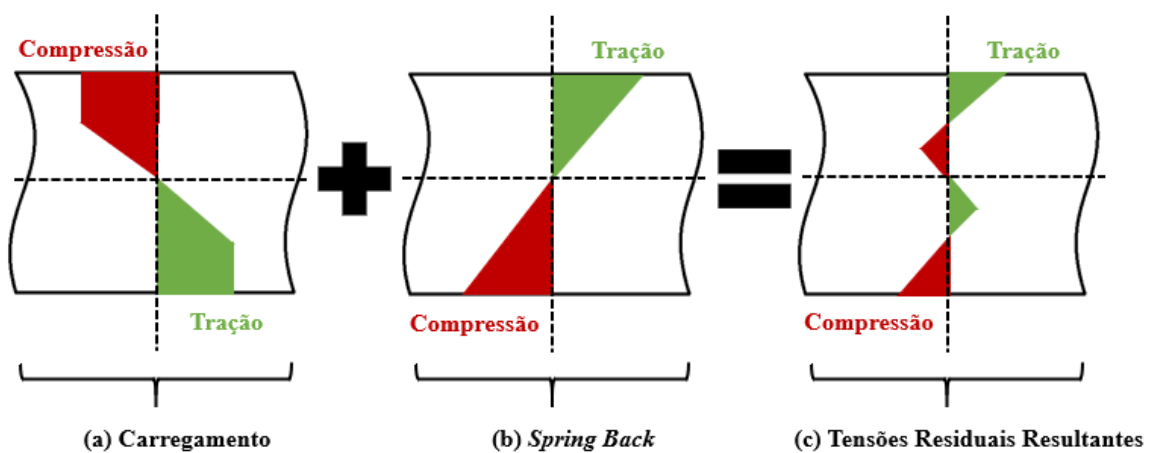


Figura 22: Superposição de tensões de uma barra submetida a sequência de carregamento/descarregamento de flexão pura no cálculo de tensões residuais. Autoria Própria.

As tensões residuais que foram estudadas e determinadas no presente estudo e que serão enunciadas a partir do Capítulo 4 se deram a partir de carregamentos de flexão pura, assim como explicado na seção 1.4 Metodologia e Trabalho Realizado.

De forma geral, durante a manufatura das armaduras de tração, os fios metálicos chatos passam por diversos roletes e bobinas que visam principalmente o pouso sobre o duto flexível e armazenamento dos fios, respectivamente. Ambos os processos têm a característica induzirem predominantemente carregamentos de flexão pura nas barras metálicas. Daí a opção do estudo de simular somente carregamentos puros de flexão.

3.6 Método Analítico para Cálculo de Tensões Residuais

De acordo com os procedimentos descritos por CASTRO et. al (2016), os valores da distribuição das tensões residuais podem ser estimados através da utilização de modelos analíticos. O presente estudo tem por interesse analisar uma viga sob flexão pura que plastifica parcialmente sua seção transversal.

Uma forma alternativa a impor momentos fletores em vigas é através da imposição de curvaturas. As equações apresentadas a seguir basearam-se na teoria contida em CASTRO (2016) considerando um modelo elástico-perfeitamente plástico. A Equação 1 apresenta uma relação direta entre a curvatura e o momento aplicados em uma viga de seção transversal retangular para a faixa de carregamentos $M_Y \leq M(\rho) \leq M_P$.

$$M(\rho) = \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 \right] M_p \quad (1)$$

Onde ρ_y é o raio de curvatura que inicia o escoamento da seção transversal, M_Y é o momento fletor que inicia o escoamento da seção transversal e M_P é o momento fletor que escoada toda a seção transversal, como mostrados na Equação 2.

$$M_y = \frac{2}{3} b c^2 S_y \quad M_p = \frac{3}{2} M_y \quad (2)$$

O mesmo raio de curvatura ρ da viga na Equação 1 é utilizado para estimar a fronteira elastoplástica $y_y(\rho)$, conforme apresentado na Equação 3.

$$y_y(\rho) = \varepsilon_y \cdot \rho \quad e \quad \varepsilon_y = \frac{S_y}{E} \quad (3)$$

Onde ε_y é a deformação do início do escoamento, S_y é a resistência ao escoamento e E é o módulo de Young. A distribuição de tensões na seção transversal da viga pode ser descrita como:

$$\sigma(\rho, y) = \begin{cases} const \cdot S_y & \text{for } y_y < y \leq c \\ const \cdot \left(\frac{y}{y_y(\rho)} S_y \right) & \text{for } -y_y \leq y \leq y_y \\ const \cdot (-S_y) & \text{for } -c \leq y < -y_y \end{cases} \quad (4)$$

Onde $const = -1$ para momento positivo e $const = +1$ para momento negativo. A distribuição de tensões de *spring back* pode ser calculada a partir da Equação 5.

$$\sigma_{sb}(\rho, y) = \frac{M(\rho) \cdot y}{I} \quad (5)$$

Onde y é a distância vertical da linha neutra a um ponto considerado e I é o momento de inércia da seção transversal em relação ao seu centroide.

A soma das Equações 4 e 5 originam o perfil de tensões residuais, como mostrado, esquematicamente, na Figura 22.c.

Existe ainda uma relação entre M_P e M_Y conhecida como fator de forma f . Para o caso da seção transversal retangular, o seu valor é igual a 1,5, número necessário para que ocorra plastificação de toda seção transversal da estrutura, fenômeno conhecido como rótula plástica. Da mesma forma, outra variável α pode ser obtida a partir da relação entre $M(\rho)$ e M_Y , conforme mostra a Equação 6, sendo que $1 \leq \alpha \leq 1,5$.

$$\alpha = \frac{M(\rho)}{M_Y} \quad (6)$$

3.7 Método Numérico para Cálculo de Tensões Residuais

Utiliza-se neste trabalho o método de elementos finitos, que é um método numérico que divide a geometria da peça que se quer analisar em pequenas partes, denominadas de elementos. Esse fracionamento em pequenos elementos permite resolver um problema complexo, como o da determinação de tensões residuais em um componente mecânico.

O método propõe que o problema seja modelado por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Estes elementos podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, a quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. A forma da divisão desses elementos é denominada de malha. Como são elementos de dimensões finitas, são chamados de “elementos finitos”, termo que nomeia o método. Os pontos que fazem a ligação entre os elementos da malha são conhecidos como nós, como mostra a Figura 23.

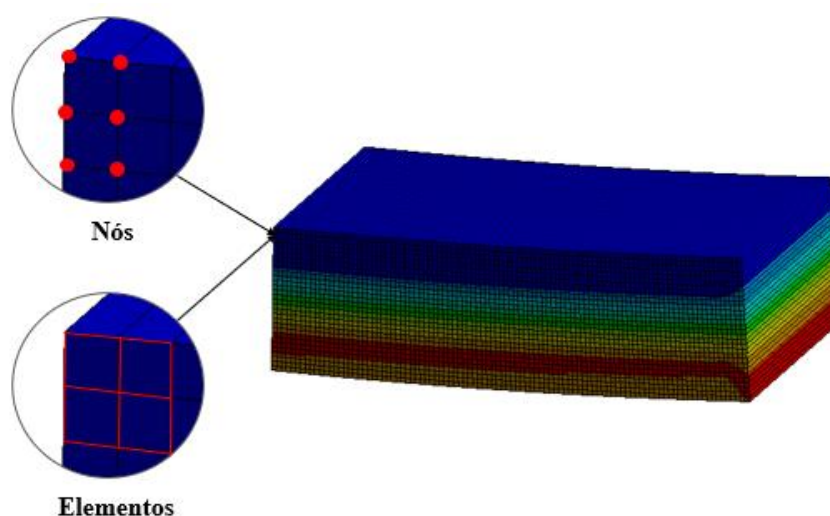


Figura 23: Nós e elementos em uma barra fletida no Software *ANSYS Mechanical Workbench*. A autoria é Própria.

Para que a determinação das tensões residuais possa ser realizada através do MEF, especificamente, algumas premissas tornam-se necessárias de serem adotadas. Conforme explicado no Item 3.1 Definição, o aparecimento de tensões residuais em um corpo só ocorre quando ele está submetido a um carregamento que induza-o a apresentar deformações plásticas. Por conta disso, durante a modelagem, a equação constitutiva deve ser selecionada.

A Figura 24 apresenta alguns tipos de comportamento idealizados para curvas Tensão x Deformação, conhecidos por modelo constitutivo do material.

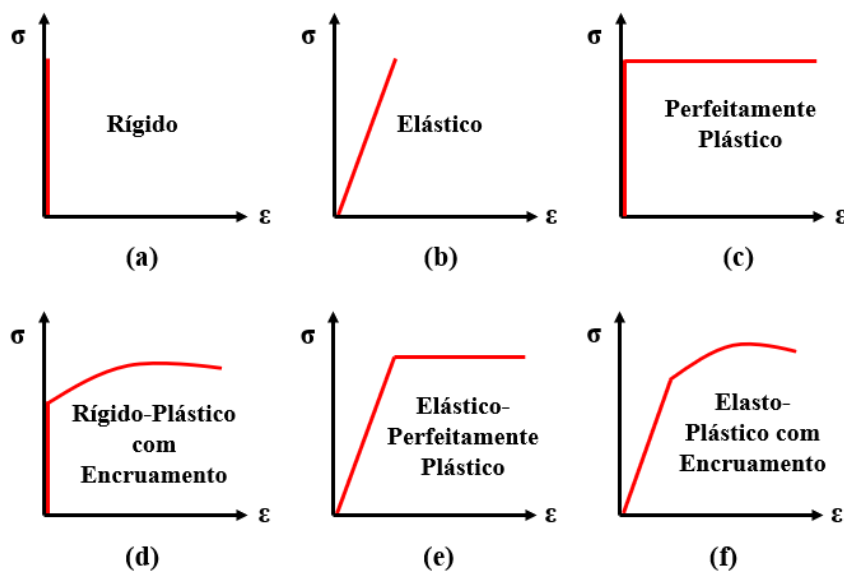


Figura 24: Exemplos de comportamentos típicos da curva Tensão x Deformação. Autoria Própria.

Note que os modelos elástico-perfeitamente plásticos apresentam infinitos valores de deformações para a mesma tensão de escoamento, gerando problemas de convergência durante a solução de softwares de elementos finitos. Nesse caso, é uma prática comum utilizar o modelo elastoplástico com encruamento, considerando um baixo módulo tangente de encruamento, reduzindo sua influência nos resultados obtidos e permitindo que a análise numérica seja realizada.

Vale ressaltar que a utilização de um material que apresente comportamento elastoplástico é conhecida por ser uma análise não-linear. As análises não-lineares são mais complexas que as análises lineares do MEF. Uma explicação mais detalhada das premissas que devem ser adotadas para análise das tensões residuais via MEF será dada nos capítulos subsequentes.

3.8 Métodos Experimentais para Medição de Tensões Residuais

Segundo MIRIM (2011), as técnicas utilizadas para medição de tensão residual podem ser classificadas de acordo com o nível de dano que induzem na peça ou material, sendo assim divididas como métodos destrutivos, semi-destrutivos ou não destrutivos.

A seguir apresenta-se os principais métodos experimentais para obtenção de tensões e deformações residuais. Vale ressaltar que cada técnica possui suas vantagens e desvantagens. Logo, cabe ao engenheiro responsável pela análise definir aquela que mais atende às suas necessidades.

3.8.1 Métodos Destrutivos

Métodos destrutivos são aqueles que introduzem danos ou defeitos que impossibilitam o posterior uso da peça ou equipamento. Dentre eles, o método de remoção e o de seccionamento são os principais. (BUENOS, 2010).

a) Remoção de Camadas

Sabe-se que uma estrutura que apresenta um perfil de distribuição de tensões residuais ao longo de sua espessura possui um somatório de momentos e forças internas que estão em equilíbrio. Após a remoção de camadas de uma amostra, há uma mudança na forma da estrutura, que podem ser medidas e correlacionadas com as tensões residuais atuantes.

Alguns cuidados devem ser tomados no que se refere ao método de remoção das camadas, pois as principais formas de usinagem aquecem a estrutura, provocando assim alterações na tensão residual. Segundo BUENOS (2010), uma forma adequada para remoção das camadas é o polimento químico ou eletrolítico.

Quanto a avaliação da deflexão de cada camada, esta pode ser feita com o auxílio de extensometria, microscopia ótica, perfilometria e escaneamento a *laser*.

b) Método do Seccionamento

Com o objetivo de avaliar o relaxamento das tensões residuais em determinada região de uma peça, é realizado o seccionamento de várias regiões, até que não haja mais relaxamento do local a ser medido.

Da mesma forma que o método da remoção de camadas, o seccionamento geralmente é feito através do polimento químico ou eletrolítico, de forma a não alterar as tensões residuais internas através do aquecimento. As medições podem ser feitas com o auxílio de um extensômetro no local de interesse.

Este método, contudo, possui um custo elevado e um procedimento demorado, sendo geralmente substituído por métodos semi-destrutivos (BUENOS, 2010).

3.8.2 Métodos Semi-destrutivos

Métodos semi-destrutivos são aqueles que introduzem algum dano no componente ou peça mecânica, porém não a ponto de comprometerem sua integridade mecânica para uso posterior.

Assim, geralmente métodos semi-destrutivos são mais utilizados em inspeções de controle de qualidade e testes de laboratório. Dentre eles, o método do furo cego e o *Ring Core* são os principais (BUENOS, 2010).

a) Método do Furo Cego

O método do furo cego, como o próprio nome sugere, consiste na remoção de material através da furação superficial de uma estrutura. Durante a furação, extensômetros são utilizados para medir a deformação da estrutura no momento do relaxamento da região previamente tensionada. Estes extensômetros são posicionados no formato de uma roseta, permitindo a avaliação das três deformações principais necessárias para determinar as tensões residuais na região, conforme a Figura 25.

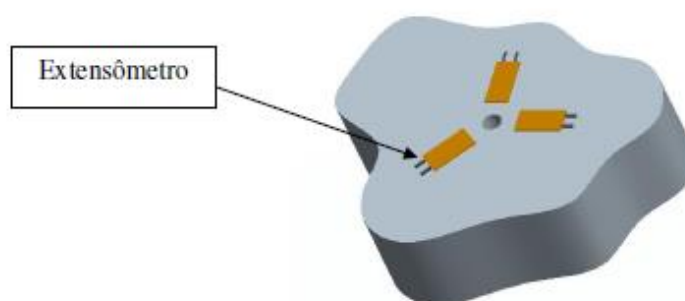


Figura 25: Posicionamento dos extensômetros no método do furo cego. [3]

Geralmente, a profundidade do furo é a mesma do diâmetro, que varia entre 1 e 4 mm. Dessa forma, a estrutura não sofre grandes alterações, possibilitando que a região seja reparada e retorne ao serviço. Este método é um dos mais utilizados na indústria, devido aos diversos estudos que garantem sua eficácia (BUENOS, 2010).

b) Método *Ring Core*

Semelhante ao método do furo cego, o método *Ring Core* consiste na remoção de material através de um processo de usinagem e subsequente medição das deformações. Contudo, ao invés de um furo, o material é removido em um formato de anel, como pode ser observado na Figura 26.

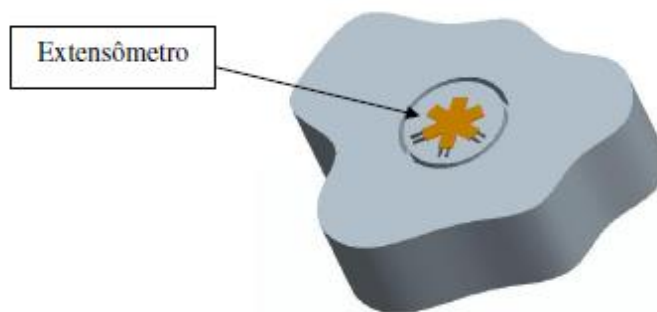


Figura 26: Posicionamento do extensômetro no método *Ring Core*. [3]

A medição é realizada da mesma forma que o método do furo cego, através de extensômetros no formato de uma roseta. Este método, por outro lado, provoca mais danos a peça devido as dimensões da ferramenta de corte, que variam entre 15 e 150 mm dependendo da necessidade (BUENOS, 2010).

3.8.3 Métodos Não Destrutivos

Métodos não destrutivos não necessitam de remoção de material e, portanto, não introduzem qualquer tipo de dano na peça, mantendo-a intacta e pronta para uso após a medição. Ainda assim, estes geralmente requerem equipamentos especializados, condições controladas e dificilmente são capazes de obter resultados muito abaixo da superfície. Dentre eles, o método da difração de raio X, o método de ultrassom, método magnético e o método de difração de nêutrons são os principais (BUENOS, 2010).

a) Método da Difração de Raio X

Segundo a Lei de Bragg, feixes de raio X aplicados na superfície de materiais sofrem influência do espaçamento entre planos cristalinos, resultando em diferentes ângulos de incidência. Visto que materiais policristalinos possuem espaçamento interplanares alterados na presença de tensões, o método de difração de raio X pode ser utilizado para através da correlação destes espaços com as tensões atuantes. Na Figura 27 e Figura 28, é possível observar a diferença do espaçamento cristalino entre duas amostras, onde uma está sujeita a tensões, enquanto a outra não está sob as mesmas condições.

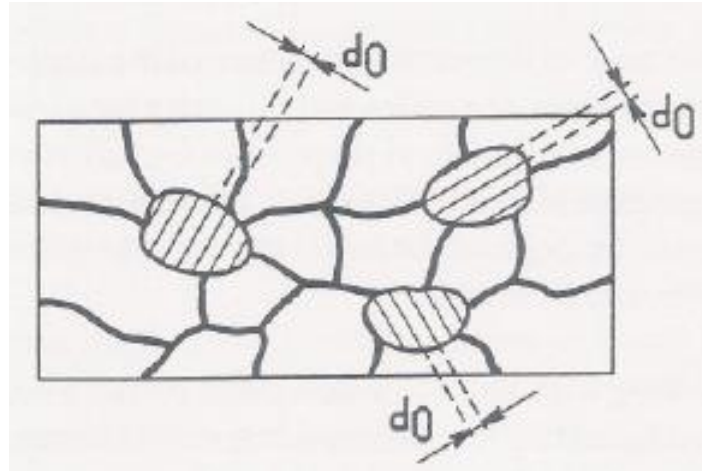


Figura 27: Espaçamento interplanar de uma amostra sem influência de tensões. [3]

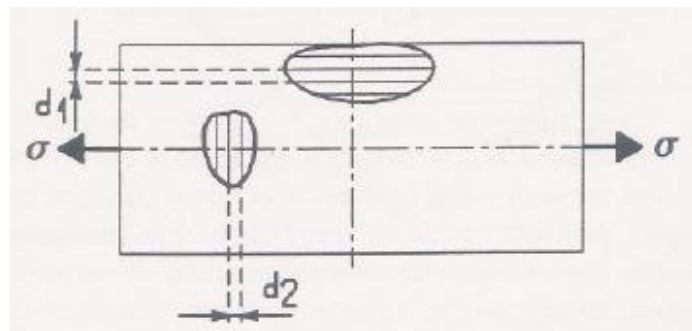


Figura 28: Espaçamento interplanar de uma amostra sob influência de tensões. [3]

Em um material policristalino com granulometria fina e livre de tensões o espaçamento entre os planos cristalinos (d_0) não varia com a orientação destes planos. Já o espaçamento interplanar entre os planos cristalinos deste mesmo material sofre alterações quando este material está sob tensão, ou seja, d_1 é diferente de d_2 .

É importante mencionar que, devido a penetração limitada dos feixes de raio X, variando de 30 a 40 μm , este método é utilizado apenas para avaliar tensões residuais superficiais. (BUENOS, 2010)

b) Método de Ultrassom

De acordo com a teoria acustoelástica, a velocidade de uma onda ultrassônica é influenciada pela deformação do meio em que se propaga. A tensão é medida por indução de uma onda sonora na frequência de vários MHz dentro do material do espécime e medindo o tempo de retorno ou outros parâmetros relacionados à velocidade (BUENOS, 2010).

c) Método Magnético

Também conhecido como técnica do ruído Barkhausen, este método é baseado na medição do número e magnitude das bruscas reorientações magnéticas causadas pela expansão e contração dos domínios magnéticos em um metal ferromagnético.

Segundo BUENOS (2010), a aplicação de um campo magnético ou de tensões mecânicas provoca um rearranjo na orientação magnética dos domínios. Este rearranjo acontece de forma que, à medida que o material assume uma magnetização, as regiões se unem formando áreas maiores de mesma orientação magnética. Este crescimento da área igualmente orientada magneticamente ocorre de forma incremental e rápida, gerando o que é conhecido por “Ruído de Barkhausen”. A técnica tem como princípio a medição da amplitude desses ruídos.

A medição de tensões residuais com este método é baseada em curvas de calibração obtidas através da aplicação de tensões conhecidas em corpos de prova. Dessa forma, as principais aplicações deste método são qualitativas (BUENOS, 2010).

d) Método da Difração de Nêutrons

O método da difração de nêutrons possui princípios físicos semelhantes aos do método de difração de raio X. Contudo, apesar da similaridade, o método de difração de nêutrons é capaz de avaliar as tensões residuais superficiais bem como em profundidades um pouco maiores.

Sua principal limitação é a utilização de reatores nucleares como fontes de nêutrons, tornando difícil sua aplicação em campo. Ainda assim, possui ótimos resultados e, solucionando as questões relativas à questão de aplicação, tem grande potencial de se tornar referência no estudo de tensões residuais (BUENOS, 2010).

3.9 Alívio de Tensões Residuais

Conforme descrito por KWOFIE (2009), os métodos para que se obtenha o alívio das tensões residuais podem ser divididos em térmicos e mecânicos. Os métodos mecânicos necessitam introduzir deformações plásticas adicionais na peça ou equipamento para as tensões residuais de natureza elástica sejam atenuadas.

Um exemplo é o alívio de tensões por vibração mecânica. Este é um método baseado na ressonância vibratória, em que as peças são submetidas a vibrações de baixa frequência por um período. As tensões dinâmicas se combinam com tensões residuais e podem exceder o limite de escoamento do material, induzindo deformações plásticas em partes da estrutura e

realinhando a estrutura cristalina, o que provoca redução dos campos de tensões residuais tornando-os mais baixos, ou seja, aliviando-os.

Outro exemplo de método mecânico para alívio de tensões residuais é aquele realizado em peças soldadas. Após o resfriamento da zona soldada, aplicam-se sucessivos golpes com um martelo nessa mesma zona, induzindo deformações plásticas ali e, dessa forma, aliviando as tensões residuais geradas durante o resfriamento da peça.

Já os métodos térmicos utilizam-se da temperatura para aliviar as tensões residuais. Um dos métodos mais tradicionais é o recozimento, também conhecido como tratamento térmico de alívio de tensões, no qual as peças são aquecidas a temperaturas elevadas por um período e resfriadas lentamente até a temperatura ambiente (KWOFIE, 2009).

A Figura 29 mostra um exemplo de gráfico Temperatura x Tempo para o tratamento térmico de recozimento.

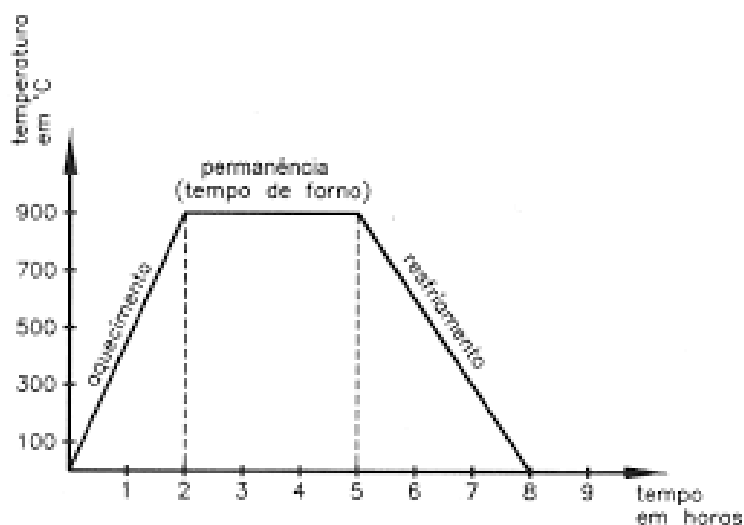


Figura 29: Exemplo de gráfico Temperatura x Tempo para tratamento térmico de recozimento. [6]

A dinâmica do tratamento térmico para alívio de tensões é simples: em temperaturas elevadas, a tensão de escoamento do material se torna muito baixa, de modo a não suportar as tensões internas dos componentes, assim, com as microdeformações plásticas que ocorrem, as tensões residuais são relaxadas. Para evitar reintrodução de tensões residuais devido a contração térmica diferencial, é realizado o resfriamento lento, restando no material um estado de tensão residual baixo ou nulo (KWOFIE, 2009) (CHUVAS, 2012).

Capítulo 4

Metodologia e Resultados

Para determinação da distribuição das tensões residuais através de análises numéricas, diversos parâmetros precisam ser estabelecidos para obtenção dos resultados. Neste capítulo são apresentadas a metodologia utilizada durante as análises numéricas, os resultados encontrados e as principais discussões acerca dos efeitos observados.

4.1 Premissas de Projeto

Para o presente trabalho, foi utilizado como objeto de estudo as propriedades geométricas e mecânicas, mostradas na Tabela 2 e Figura 30, similares a de um dos perfis de arame das armaduras de tração utilizados nos dutos flexíveis da *TechnipFMC*.

Tabela 2: Propriedades do arame metálico. Autoria Própria.

Propriedade	Valor
Espessura (mm)	6
Largura (mm)	12
Comprimento (mm)	Variável
E (GPa)	200
S_Y (MPa)	1100
Coefficiente de Poisson	0,3

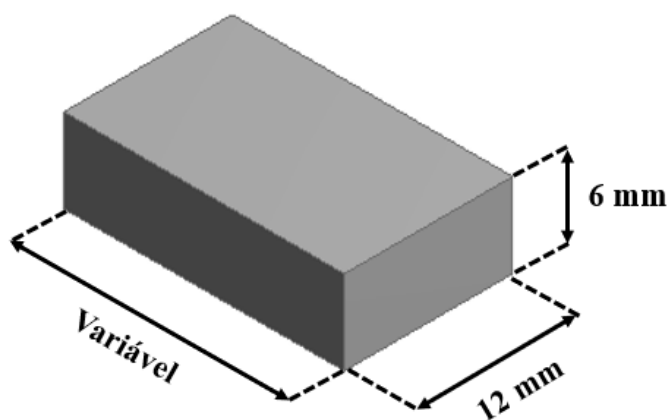


Figura 30: Características geométricas do arame metálico. Autoria Própria.

Para determinação das tensões atuantes no arame durante as curvaturas, foi considerado como hipótese a aplicação esforços de flexão pura, conforme explicado no Capítulo 3.

Contudo, visto que os valores de curvatura aos quais os arames são submetidos durante todo processo de fabricação e instalação da linha flexível não são conhecidos, diferentes valores de curvatura foram assumidos durante o estudo dos casos. Esses valores, bem como toda a metodologia adotada, serão discutidos a seguir.

4.2 Metodologia

Sabe-se que os valores de tensões residuais são influenciados por diferentes parâmetros. Para este estudo, três variáveis de entrada foram consideradas: intensidade de carregamento, sentido de curvatura e presença ou não de *spring back*.

a) Intensidade de Carregamento (α)

Conforme descrito no Capítulo 3, seção 3.6 Método Analítico para Cálculo de Tensões Residuais, as intensidades de carregamento podem ser parametrizadas em função do variável α . Assim, a fim de determinar dois valores distintos que representassem grandes e pequenos raios de curvatura, foram assumidos para α os valores apresentados na Tabela 3. É possível observar que os valores de momento equivalente também foram calculados, através da Equação 1, visto que são esses que serão considerados como variáveis de entrada nas análises numéricas.

Tabela 3: Valores de α e momentos fletores equivalentes para os casos de curvatura que serão objeto de estudo. Autoria Própria.

Casos de Curvatura	α	M_{EQ} (N.m)
1	1,4	110,88
2	1,2	95,04

Sabe-se que as tensões residuais só surgem quando um carregamento é capaz de levar o material à região plástica da curva de Tensão x Deformação. Portanto, α necessariamente tem de ser maior que 1. Além disso, toda seção transversal do arame metálico irá plastificar caso α atinja valor igual a 1,5 (fator de forma f). Tendo isso em vista, foram propostos dois valores de α intermediários, entre 1 e 1,5, visando analisar a influência de curvaturas com raios maiores (menos severas) e menores (mais severas), similares às que são vistas pelo arame durante a fase de fabricação do duto flexível, na distribuição das tensões residuais.

b) Diferenças no Sentido das Curvaturas

Conforme descrito no Capítulo 2, seção 2.4.5 Armadura de Tração, o sentido de curvatura pode variar dependendo da forma que o arame é fabricado ou transportado. Dessa forma, os sentidos podem ser determinados através de valores positivos e negativos associados aos momentos fletores aos quais o arame metálico estará submetido, como pode ser observado na Figura 31.

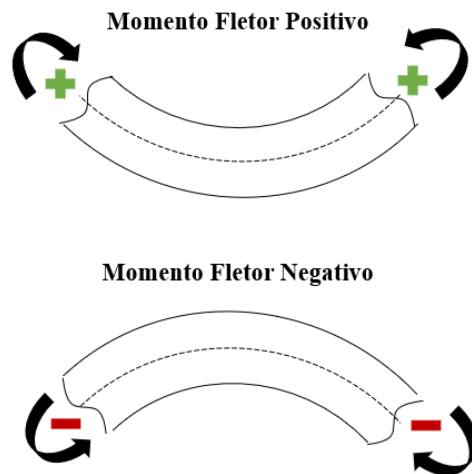


Figura 31: Sentidos dos momentos fletores aplicados à barra metálica. Autoria Própria.

c) *Spring Back*

O *spring back* pode influenciar na geração da distribuição de tensões residuais. Para duas curvaturas em sequência, o descarregamento pode ocorrer simultaneamente nas duas curvaturas ou isoladamente em apenas uma delas, como ilustrado nas Figura 32 e Figura 33, respectivamente.

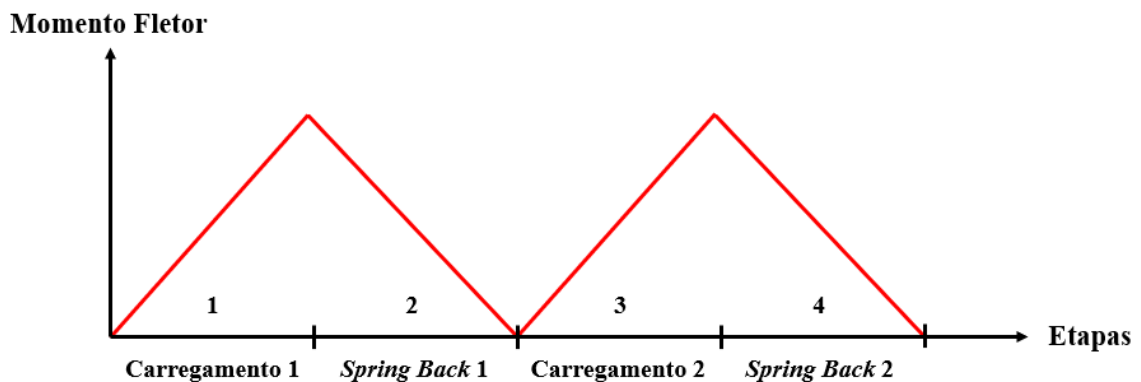


Figura 32: Caso em que o *spring back* ocorre após o carregamento 1 e carregamento 2. Autoria Própria.

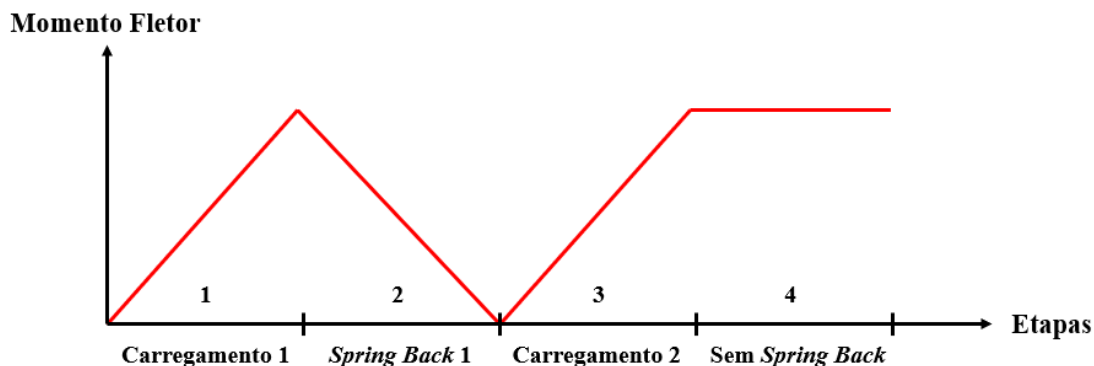


Figura 33: Caso em que o *spring back* ocorre somente após o carregamento 1. Autoria Própria.

4.3 Matriz de Variáveis de Entrada

Foi então realizada uma análise iterativa de todas as três variáveis previamente mencionadas com o intuito de simular os cenários possíveis a partir das diferentes combinações dos parâmetros, conforme a Tabela 4 indica.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para fazer a combinação dos cenários possíveis. Autoria Própria.

Variável	1ª Curvatura	2ª Curvatura
Intensidade de Carregamento (α)	1,2 ou 1,4	1,2 ou 1,4
Sentido de Curvatura	Positivo ou Negativo	Positivo ou Negativo
<i>Spring Back</i>	Sim ou Não	Sim ou Não

Desta forma, através da análise combinatória dos dados mostrados na Tabela 4, sabe-se que existem 64 combinações possíveis a serem avaliadas numericamente. Contudo, dentre essas combinações, há casos que são simétricos. A Tabela 5 busca exemplificar a situação em que isso ocorre. Nessa tabela, os casos que apresentam a mesma cor são simétricos.

Tabela 5: Exemplo de casos de simulação simétricos. Autoria Própria.

Caso	Curvatura 1				Curvatura 2			
	α	M_{EQ} (N.m)	Sentido	<i>Spring Back?</i>	α	M_{EQ} (N.m)	Sentido	<i>Spring Back?</i>
1	1,2	95,04	Positiva	Sim	1,4	110,88	Positiva	Sim
2	1,2	95,04	Positiva	Sim	1,4	110,88	Negativa	Sim
3	1,2	95,04	Negativa	Sim	1,4	110,88	Positiva	Sim
4	1,2	95,04	Negativa	Sim	1,4	110,88	Negativa	Sim

Casos simétricos têm por característica apresentarem o mesmo resultado em módulo para a distribuição das tensões residuais ao longo da seção transversal do arame, porém, com a distribuição simétrica ou “invertida”. Portanto, quando casos simétricos eram identificados no estudo, não eram simulados, visando a economia de tempo.

Para fins de exemplificação, os Casos 1 e 4 da Tabela 5 foram simulados numericamente e tiveram as suas distribuições de tensões residuais determinadas. Os resultados encontrados são mostrados na Figura 34 e mostram a simetria descrita no parágrafo anterior.

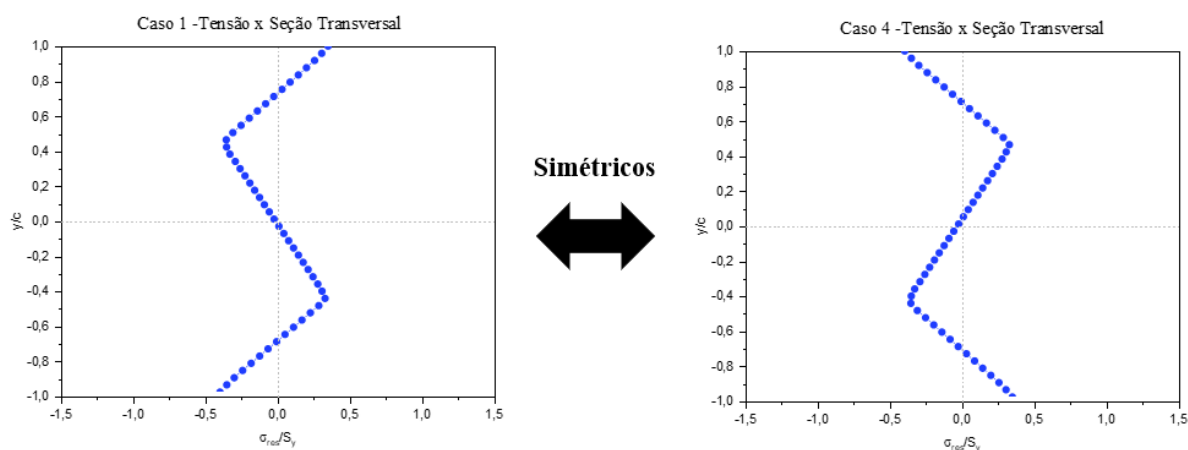


Figura 34: Exemplo de casos simétricos (Caso 1 e Caso 4 da Tabela 5). Autoria Própria.

Além da simetria, casos que não apresentam *spring back* após nenhuma das duas curvaturas não possuem distribuição de tensão residual ao longo da seção transversal do arame metálico. Isso ocorre porque o descarregamento é necessário para que elas surjam, conforme explicado na seção 3.5 Tensões Residuais devido a Carregamentos Mecânicos. Por conta disso, casos que apresentavam essa condição também foram excluídos das análises.

Para fins de exemplificação, a Figura 35 mostra um exemplo da distribuição de tensões residuais para um caso em que não ocorre *spring back* após nenhuma das duas curvaturas. É possível perceber que a distribuição de tensões mostra que a barra metálica está mecanicamente carregada.

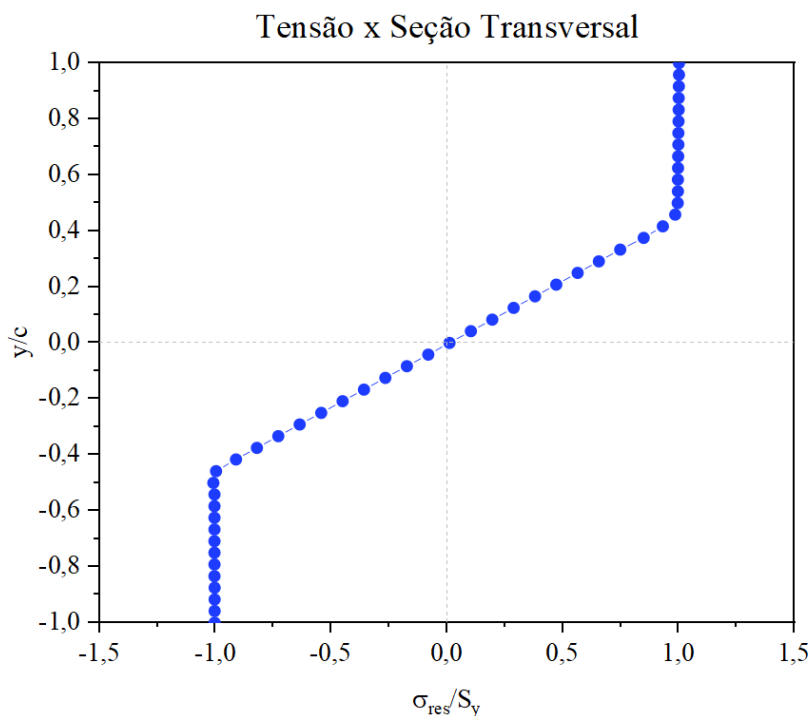


Figura 35: Distribuição das tensões residuais ao longo da seção transversal para um caso que não apresenta *spring back* após nenhuma das duas curvaturas. Autoria Própria.

Por fim, também foram eliminados das análises os casos em que ambas as curvaturas possuíam valor de $\alpha = 1,2$. A justificativa para tal ação é a de que esses casos apresentariam distribuições de tensões residuais similares aos casos em que ambas as curvaturas possuísem $\alpha = 1,4$, porém com intensidades menores.

Logo, após excluir-se todos os casos que se enquadravam em alguma das duas situações exemplificadas anteriormente, os 18 casos restantes deram origem a Matriz de Variáveis de Entrada, mostrada na Tabela 6. Esses casos foram simulados e utilizados para as análises do presente estudo.

Tabela 6: Matriz de Variáveis de Entrada. Autoria Própria.

Sequência	Caso	Curvatura 1				Curvatura 2			
		α	M _{EQ} (N.m)	Sentido	Spring Back?	α	M _{EQ} (N.m)	Sentido	Spring Back?
$\alpha_1 < \alpha_2$	1	1,2	95,04	Positiva	Sim	1,4	110,88	Positiva	Sim
	2			Positiva	Sim			Negativa	Sim
	3			Positiva	Sim			Positiva	Não
	4			Positiva	Sim			Negativa	Não
	5			Positiva	Não			Positiva	Sim
	6			Positiva	Não			Negativa	Sim
$\alpha_1 = \alpha_2$	7	1,4	110,88	Positiva	Sim	1,4	110,88	Positiva	Sim
	8			Positiva	Sim			Negativa	Sim
	9			Positiva	Sim			Positiva	Não
	10			Positiva	Sim			Negativa	Não
	11			Positiva	Não			Positiva	Sim
	12			Positiva	Não			Negativa	Sim
$\alpha_1 > \alpha_2$	13	1,4	110,88	Positiva	Sim	1,2	95,04	Positiva	Sim
	14			Positiva	Sim			Negativa	Sim
	15			Positiva	Sim			Positiva	Não
	16			Positiva	Sim			Negativa	Não
	17			Positiva	Não			Positiva	Sim
	18			Positiva	Não			Negativa	Sim

4.4 Variáveis de Saída

Para cada simulação numérica realizada, as variáveis de saída de interesse foram a distribuição da tensão residual ao longo da seção transversal do arame metálico, vide Figura 36 como exemplo, e a determinação da evolução das deformações e das tensões residuais na superfície inferior do arame metálico, vide Figura 37, como exemplo. O ponto para acompanhamento das tensões foi escolhido como sendo na parte inferior do arame.

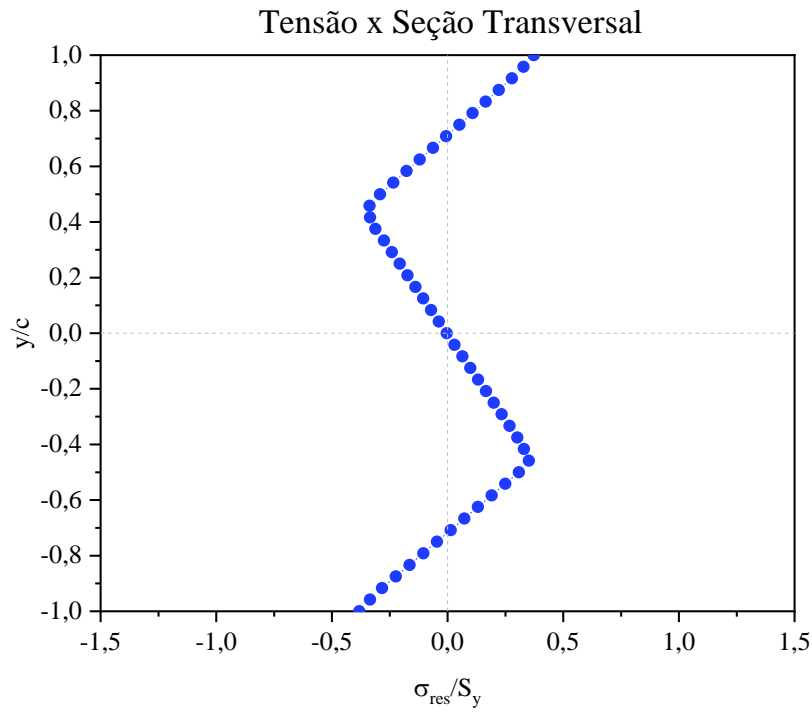


Figura 36: Exemplo de distribuição da tensão residual ao longo da seção transversal da barra metálica. Autoria Própria.

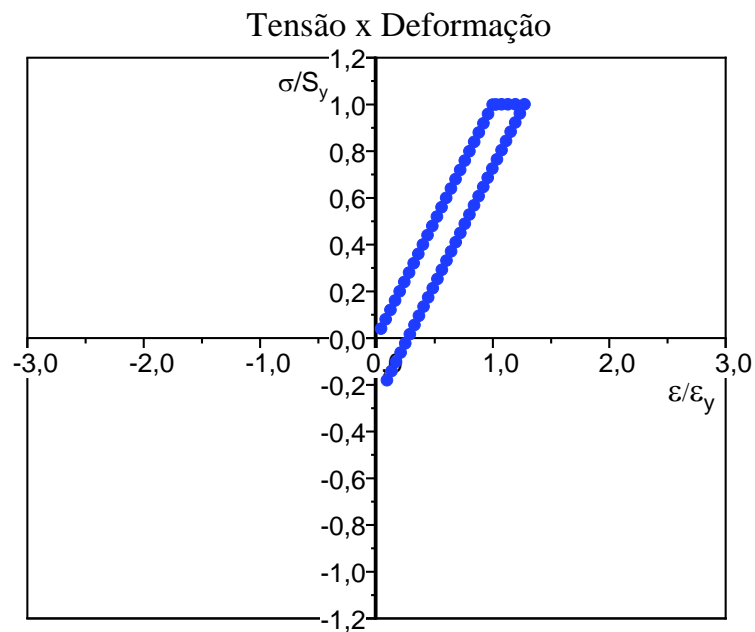


Figura 37: Exemplo da evolução das tensões e deformações na superfície do arame metálico ao longo das etapas de carregamento. Autoria Própria.

4.5 Software Utilizado

Para a realização das análises numéricas pela abordagem do método dos elementos finitos, foi utilizado o software comercial ANSYS *Mechanical Workbench*. De acordo com a ESSS, o ANSYS *Mechanical Workbench* é uma ferramenta amigável de simulação, utilizada em conjunto com sistemas de CAD para a verificação de desempenho do produto no início de sua concepção e desenvolvimento.

Dessa forma, sua aplicação no presente estudo foi motivada devido a facilidade que a ferramenta proporciona na modelagem do arame e na realização de análises não-lineares com diversas etapas de carregamento.

4.6 Modelagem Numérica

A modelagem do arame no ANSYS *Mechanical Workbench* foi realizada considerando uma série de simplificações que reduziriam o tempo operacional sem comprometer a qualidade dos resultados.

4.6.1 Simplificações do Modelo

Em análises de elementos finitos, é comum realizar uma série de simplificações na modelagem de estruturas que reduzam o tempo de processamento através da redução do número de elementos.

a) Estado Plano de Tensões

Visto que a barra metálica está submetida a esforços de flexão pura, por definição, as tensões resultantes não devem apresentar variação ao longo de seu comprimento e largura, conforme a Figura 38.

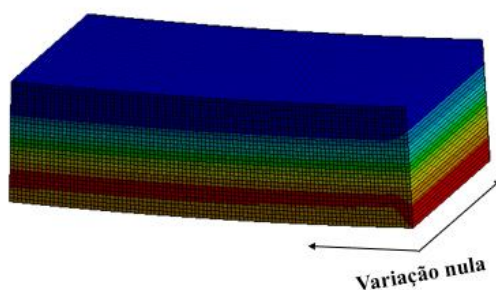


Figura 38: Sem variação das tensões ao longo do comprimento e da largura do arame.
Autoria Própria.

Este fenômeno é conhecido como estado plano de tensões, o que permite simplificar o modelo à um plano sem largura, com o menor comprimento possível, mas que ainda assim apresente rigidez equivalente ao componente original, assim como mostra a Figura 39. Note que dessa maneira o modelo apresentará menos elementos, reduzindo o tempo computacional gasto com a análise.



Figura 39: Premissa do estado plano de tensões utilizada no modelo. Autoria Própria.

Para definição do comprimento, foi necessário avaliar o perfil de distribuição de tensões ao longo da barra, de forma que os resultados não fossem afetados pelos efeitos de borda. Conforme apresentado na Figura 40, existe uma variação na distribuição de tensões próximas ao ponto de aplicação do momento. Portanto, para definição do valor mínimo, foi necessário avaliar o comprimento necessário para que a distribuição de tensões fosse homogênea. Assim, conforme Figura 40 e Figura 41, foi definido um valor de 6 mm, no semi-comprimento do modelo, suficiente para que à partir desse valor os efeitos de borda não interferissem nos resultados obtidos.

Variação na distribuição de tensões

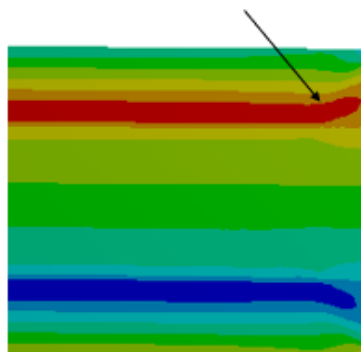


Figura 40: Variação na distribuição de tensão próximo ao ponto de aplicação do momento. Autoria Própria.

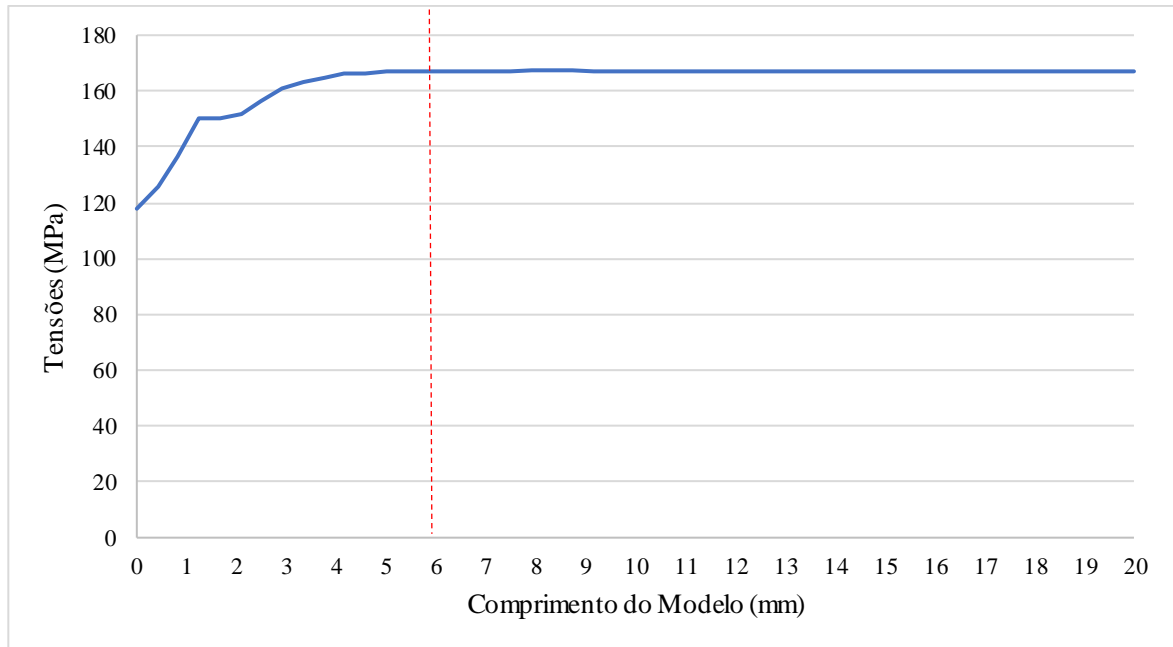


Figura 41: Determinação da cota longitudinal a partir da qual não há mais variação da tensão ao longo do comprimento do arame. Autoria Própria.

b) Simetria

A segunda simplificação leva em conta a característica geométrica de simetria do arame metálico e dos esforços nesses aplicados. Essa simplificação se aproveita do eixo de simetria da peça, de forma a manter apenas metade da geometria e das condições de contorno, vide Figura 42. Por conta disso, assim como a premissa de estado plano de tensões permite, é possível também contribuir para redução do tempo de análise numérica.

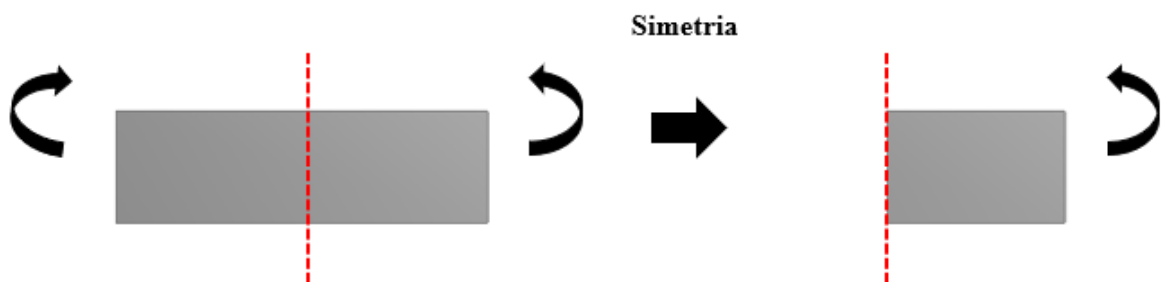


Figura 42: Premissa de simetria aplicada no modelo numérico. Autoria Própria.

4.6.2 Propriedades da Malha

A escolha do tipo de elemento baseou-se na compatibilidade geométrica do elemento com o arame. Visto que o modelo se apresenta como um prisma quadrangular, a utilização de elementos quadrados representa a melhor razão de aspecto com baixo grau de deformidade dos ângulos de vértice, mostrando-se como a melhor solução. A Figura 43 apresenta o modelo com a malha gerada a partir desse tipo de elemento.

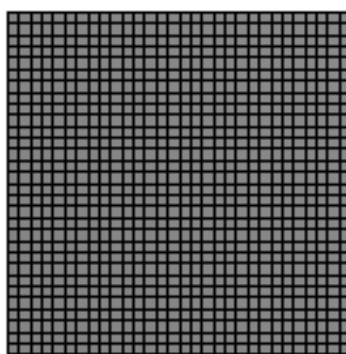


Figura 43: Modelo de malha gerado utilizando elementos quadrados. Autoria Própria.

4.6.3 Modelo Constitutivo

Conforme mencionado no Capítulo 3, Item 3.7 Método Numérico para Cálculo de Tensões Residuais, para obtenção das tensões residuais, é necessário avaliar os efeitos de plastificação do arame através da utilização de modelos elastoplásticos.

Existem dois modelos elastoplásticos comumente utilizados, o modelo elástico-perfeitamente plástico e o elastoplástico com endurecimento. Para este estudo, seria considerado o modelo elástico-perfeitamente plástico, visto que os modelos analíticos normalmente disponíveis através das literaturas não consideram efeitos do encruamento.

Contudo, foi necessário considerar um pequeno valor de módulo tangente de 0,5 GPa de encruamento na construção do modelo, pois a ausência deste valor gerava infinitas soluções e conseqüentemente levava a um problema indeterminado. O gráfico de Tensão x Deformação do modelo, extraído do ANSYS *Mechanical Workbench* pode ser observada na Figura 44.

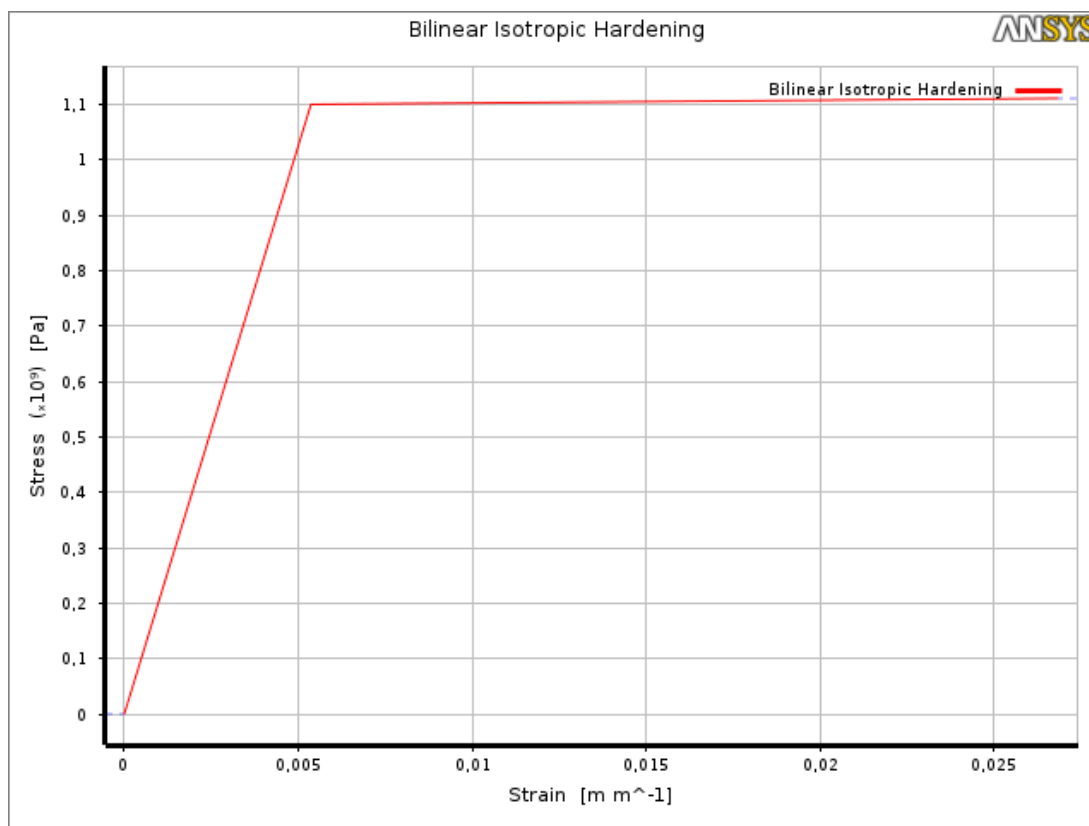


Figura 44: Gráfico Tensão x Deformação extraído do ANSYS *Mechanical Workbench* para o material utilizado no modelo. Autoria Própria.

É importante mencionar que a presença de um modelo elastoplástico configura uma análise não-linear. Além disso, os valores de momento aplicados na estrutura provocam grandes deslocamentos, outra não-linearidade geométrica que teve de ser levada em conta durante as simulações.

4.6.4 Condições de Contorno

Para aplicação das condições de contorno, primeiro foram definidas as posições dos pontos de fixação no modelo. Para isto, o ponto A da Figura 45 foi restringido nos eixos horizontais e verticais, enquanto a região B foi fixada apenas no sentido horizontal, permitindo a expansão geométrica devido ao efeito *Poisson*. Caso as regiões A e B fossem fixadas em todas as direções, tensões localizadas próximas ao engaste devido a restrição desta expansão surgiriam, induzindo a falsos resultados.

O momento fletor, por sua vez, foi aplicado na extremidade oposta aos pontos de fixação, na região C. Note que, dessa forma, o esforço foi aplicado apenas em um lado do arame, devido aos efeitos de simetria.

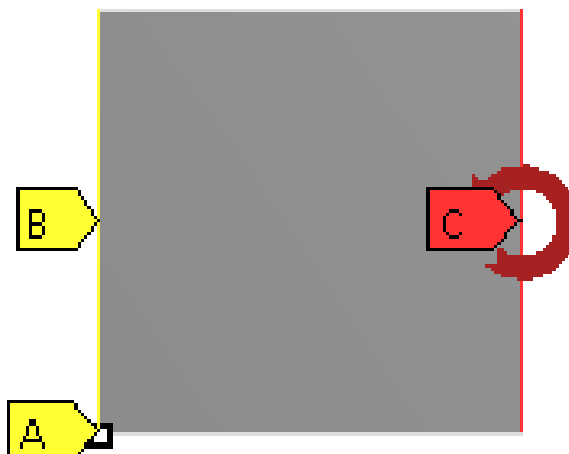


Figura 45: Condições de contorno aplicadas ao modelo no ANSYS *Mechanical Workbench*.
Autoria Própria.

Dessa forma, conforme comentado no subitem “c” da Seção 4.2 Metodologia, a simulação foi realizada em quatro etapas alternadas, duas de aplicações de carregamento e duas de *spring back* (onde o carregamento foi removido ou mantido, nos casos em que ocorreu ou não *spring back*, respectivamente).

4.6.5 Análise de Convergência

Após aplicar as simplificações no modelo, escolher o tipo de elemento, o modelo constitutivo e definir as condições de contorno, foi necessário averiguar o refino de malha ideal que garantisse a confiabilidade do resultado, sem, no entanto, elevar em demasia o tempo computacional gasto com ela. Apesar de não existir um número exato que represente o tamanho do elemento ideal, é uma prática comum a realização de uma análise de convergência na qual o tamanho dos elementos é sequencialmente reduzido e os valores resultantes de tensão associados são registrados. Essa redução se dá até que a diferença percentual entre os dois últimos valores de tensão seja inferior a um valor pré-estabelecido.

A análise de convergência para o presente estudo considerou uma diferença percentual mínima de 5%, utilizando o mesmo modelo constitutivo e não-linearidades, obtendo assim o número ideal de elementos, como pode ser observado na Tabela 7 e Figura 46.

Tabela 7: Dados utilizados para análise de convergência do modelo numérico. Autoria Própria.

Análise de Convergência			
Tamanho	N° de Elementos	Tensão (MPa)	Diferença
2,00	9	292,59	-
1,00	36	346,26	15,5%
0,50	144	386,49	10,4%
0,25	576	414,14	6,7%
0,20	900	419,67	1,3%

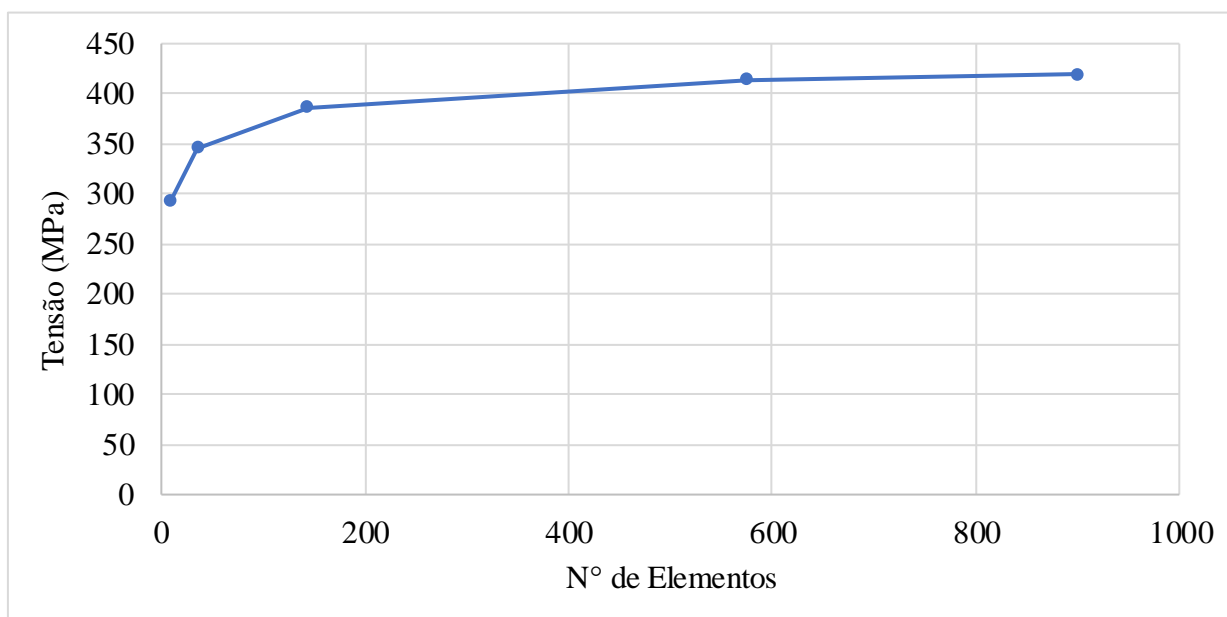


Figura 46: Abordagem gráfica com os resultados obtidos de tensão e o número de elementos associados, utilizada na análise de convergência do modelo. Autoria Própria.

4.6.6 Extração de Resultados

Para extração da distribuição de tensões residuais ao longo da seção, foi utilizado a função 'Path' do ANSYS *Mechanical Workbench*, que permite avaliar a distribuição de tensões residuais ao longo da seção transversal do arame metálico. A Figura 47 apresenta o posicionamento do 'Path' ao longo do modelo.

Path

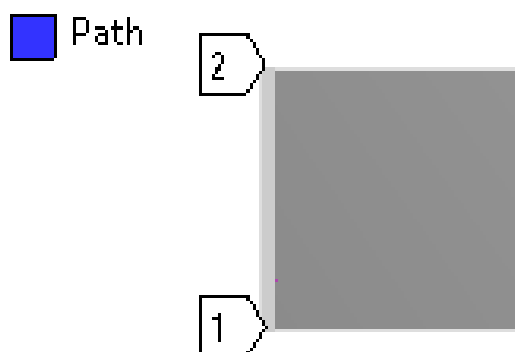


Figura 47: Posicionamento do ‘Path’ ao longo da seção transversal do modelo numérico.
Autoria Própria.

Os valores disponibilizados para as tensões residuais ao longo da seção transversal da barra foram exportados do ANSYS *Mechanical Workbench* para o *Excel*. Ao todo, para cada simulação realizada da Matriz de Variáveis de Entrada, vide Tabela 6, foram exportados em média 49 pares ordenados do tipo (Tensão Residual; Profundidade do Arame).

Além desses 49 pontos, também foram exportados para o *Excel* pares ordenados do tipo (Tensão principal do arame; Deformação principal do arame) para a um ponto presente na superfície inferior do arame metálico. Esses pares descrevem todo histórico de tensões experimentadas para esse ponto durante todas as etapas de carregamento aos quais foi submetido (1º carregamento, 1º *spring back*, 2º carregamento, 2º *spring back*). Aqui, foram exportados em média cerca de 120 pares ordenados por caso apresentado na Matriz de Variáveis de Entrada (Tabela 6).

O *Excel* foi utilizado como banco para registro dos dados exportados do ANSYS. Cada um dos 18 casos simulados da Matriz de Variáveis de Entrada possuía uma aba específica em que as informações acima eram registradas. Além disso, foi feito o tratamento desses dados, como por exemplo para poder-se parametrizar as tensões encontradas em função da tensão limite de escoamento do material ou as deformações encontradas em função da deformação limite de escoamento do material.

Após a consolidação dos dados no *Excel*, foi então utilizado o software *Origin*. Esse teve papel importante na geração dos gráficos apresentados nesta pesquisa. Os dados parametrizados através do *Excel* foram importados para o *Origin* e a partir deles os gráficos “Tensão x Seção Transversal” e “Tensão x Deformação” foram construídos.

4.6.7 Validação do Modelo Numérico

Para que a validação do modelo numérico fosse consolidada, foi feita a comparação entre o resultado obtido numericamente e analiticamente. Ambas as análises foram realizadas para um caso de curvatura única, de $\alpha = 1,4$ ($M_{EQ} = 110,88 \text{ N.m}$), sentido positivo e presença de *spring back*. A análise numérica considerou a modelagem descrita neste Item (4.6 Modelagem Numérica), enquanto a análise analítica foi realizada por meio das equações descritas no Item 3.6 Método Analítico para Cálculo de Tensões Residuais.

A Figura 48 mostra a comparação entre a distribuição de tensões residuais encontradas para o método analítico e o método numérico.

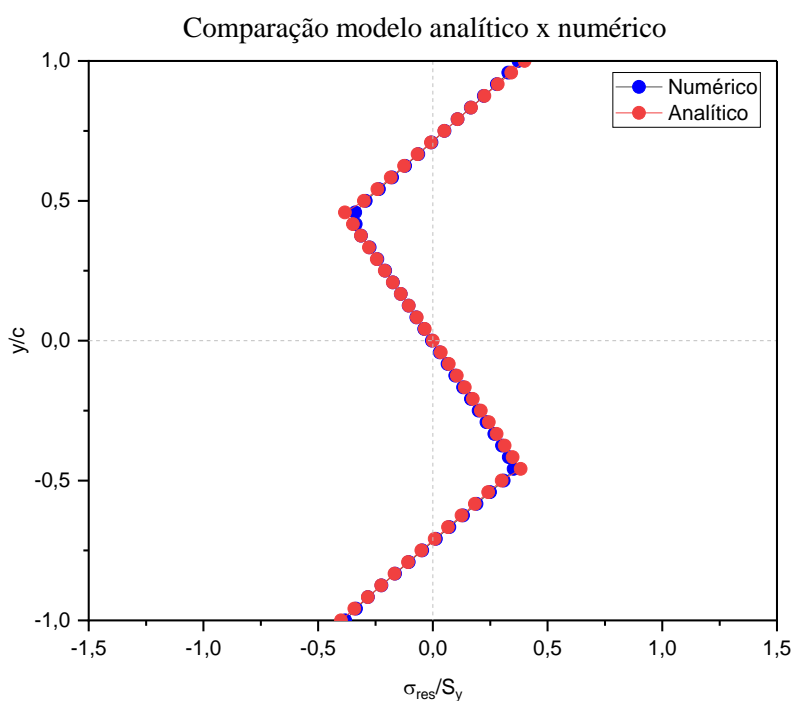


Figura 48: Comparação da distribuição de tensões residuais entre o modelo analítico e numérico. Autoria Própria.

É possível concluir, através da comparação de resultados enunciada na Figura 48, que os valores das tensões residuais ao longo de toda seção transversal da barra metálica estão próximos quando se compara o resultado obtido com os dois modelos. Enquanto o valor máximo para o método analítico foi igual a 40% do S_Y (440 MPa), o valor encontrado para o método numérico foi de cerca de 37% do S_Y (411 MPa), uma diferença de cerca de 7% (Analítico x Numérico), valor aceitável quando se compara modelos numéricos com analíticos.

Além disso, a média da diferença percentual encontrada para cada cota da seção transversal, quando se compara a tensão residual utilizando os dois modelos, é menor que 2%. Esse valor também é bastante satisfatório e mostra a confiança nos resultados encontrados numericamente.

Por fim, nota-se que o cálculo analítico apresenta um modelo constitutivo elástico-perfeitamente plástico enquanto o cálculo numérico apresenta um modelo elastoplástico com encruamento, fato esse que também pode explicar a diferença entre os resultados apresentados.

4.7 Resultados

Primeiramente, foram realizadas duas análises preliminares, considerando apenas uma única curvatura, com intensidades de carregamento possuindo valores de α iguais a 1,2 e 1,4. O objetivo da realização dessas foi de servirem como base para a comparação das tensões residuais após as análises com sequência de dois carregamentos. Dessa forma, foi possível entender, dependendo do caso, se as tensões residuais foram minimizadas, mantidas iguais ou majoradas.

Após isso, o modelo foi simulado e os resultados numéricos foram extraídos para cada um dos 18 casos informados na Tabela 6 (Matriz de Variáveis de Entrada) da seção 4.3 Matriz de Variáveis de Entrada.

4.7.1 Curvatura Única ($\alpha = 1,2$)

Para ilustração do modelo de elementos finitos no software *ANSYS Workbench*, a Figura 49 e Figura 50 mostram a distribuição de tensões ao longo da seção transversal do arame metálico quando ele é submetido à uma única curvatura no sentido positivo, com valor de $\alpha = 1,2$, e presença de *spring back* após esse carregamento.

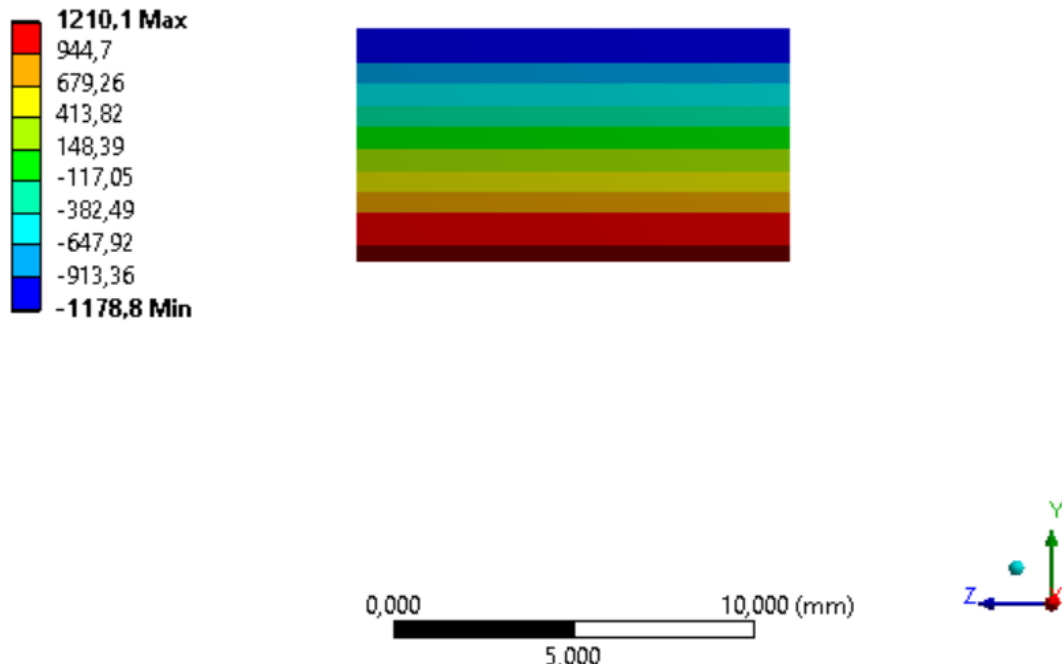


Figura 49: Modelo MEF no instante do carregamento ($\alpha = 1,2$) no software ANSYS *Mechanical Workbench*. Autoria Própria.

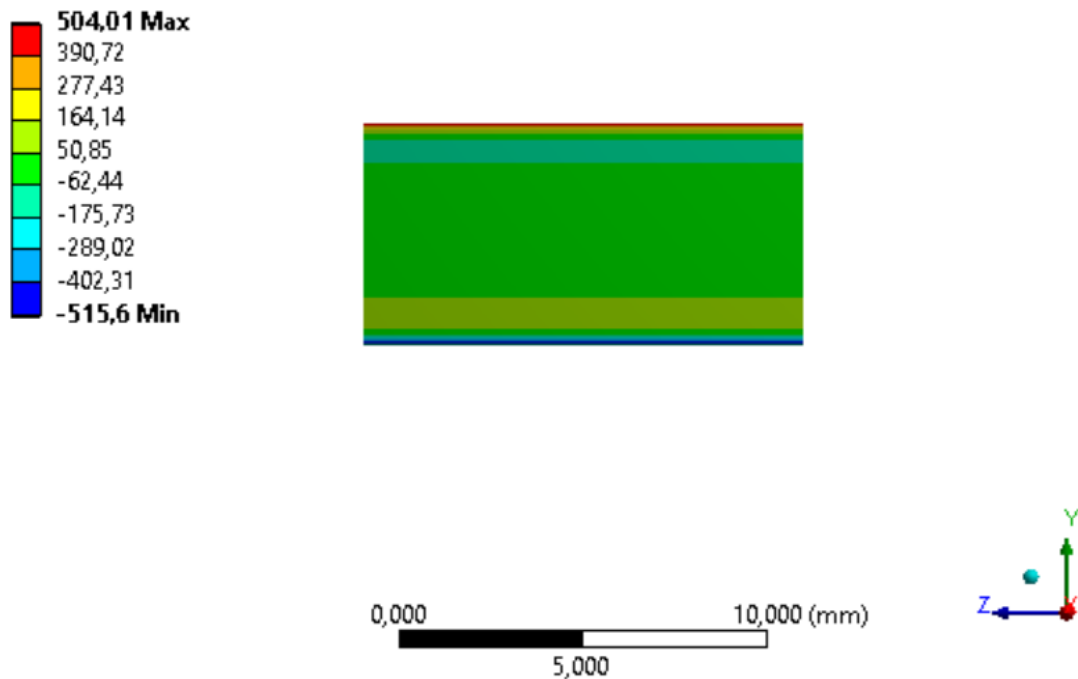


Figura 50: Modelo MEF no instante do *spring back* no software ANSYS *Mechanical Workbench*. Autoria Própria.

A Figura 51 e Figura 52 apresentam os resultados obtidos para α igual a 1,2.

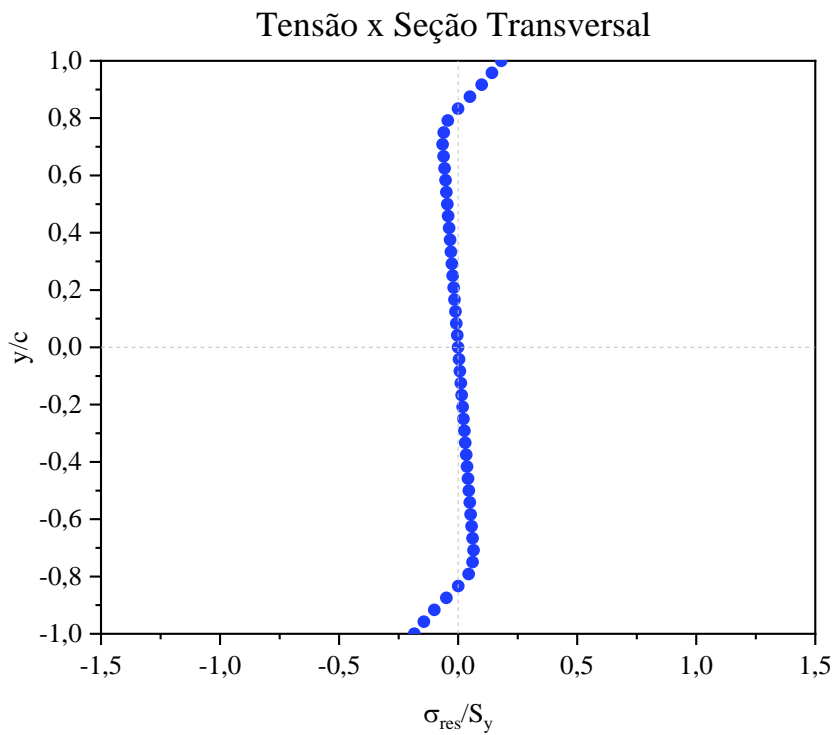


Figura 51: Distribuição da tensão residual ao longo da seção transversal do arame metálico para $\alpha = 1,2$. Autoria Própria.

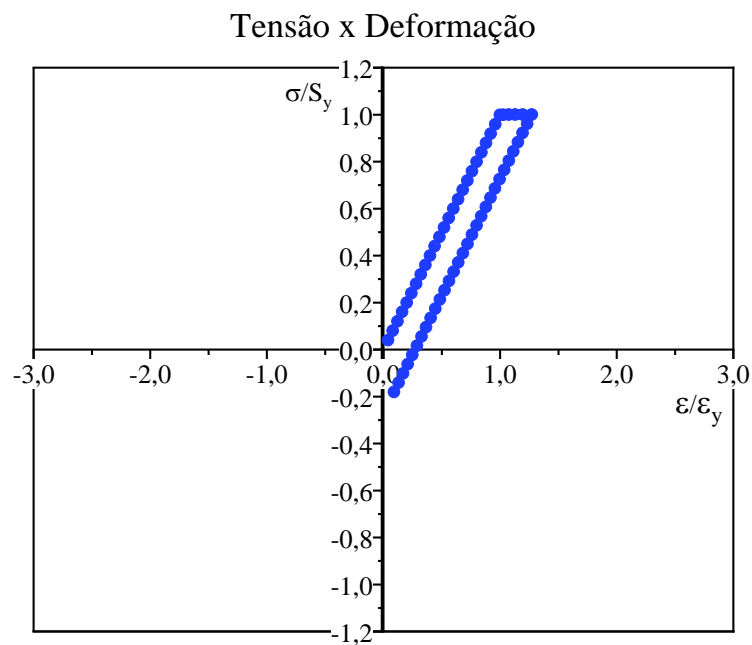


Figura 52: Tensão e deformação residuais na superfície do arame metálico para $\alpha = 1,2$. Autoria Própria.

4.7.2 Curvatura Única ($\alpha = 1,4$)

Novamente para ilustração do modelo de elementos finitos no software *ANSYS Workbench*, a Figura 53 e Figura 54 mostram a distribuição de tensões ao longo da seção transversal do arame metálico quando ele é submetido à uma única curvatura no sentido positivo, agora com valor de $\alpha = 1,4$, e presença de *spring back* após esse carregamento.

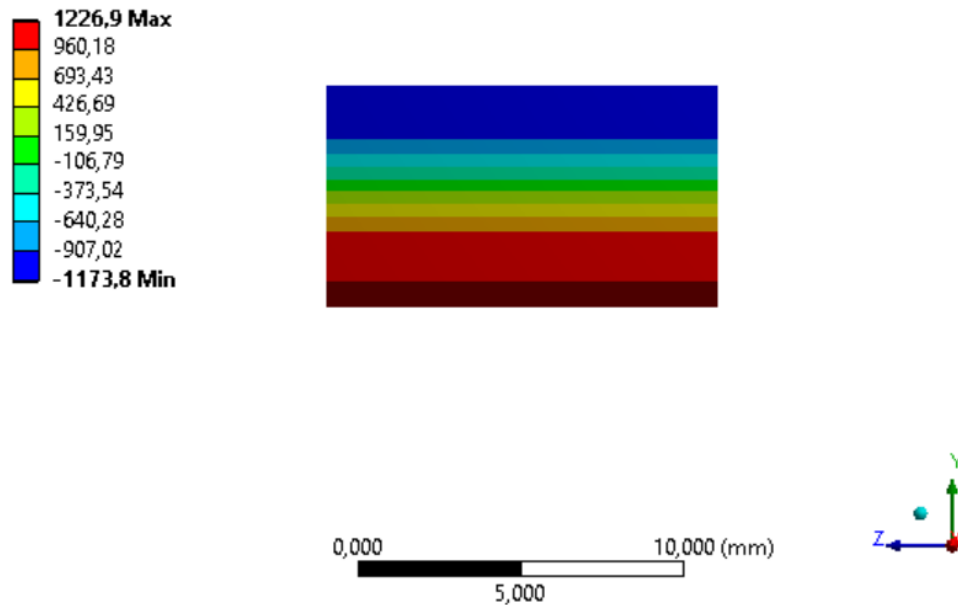


Figura 53: Modelo MEF no instante do carregamento ($\alpha = 1,4$) no software *ANSYS Mechanical Workbench*. Autoria Própria.

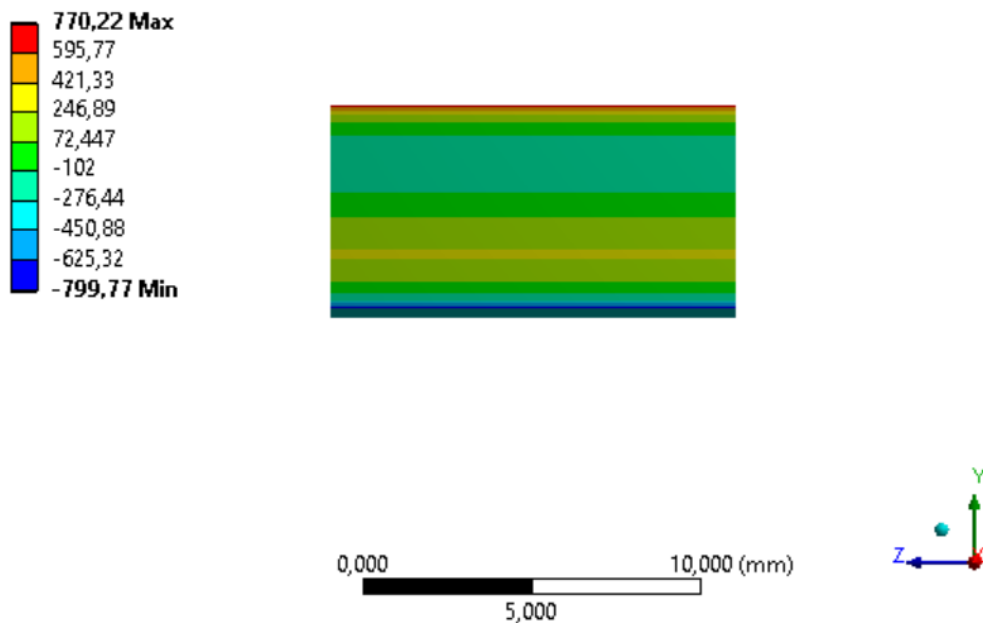


Figura 54: Modelo MEF no instante do *spring back* no software *ANSYS Mechanical Workbench*. Autoria Própria.

A Figura 55 e Figura 56 apresentam os resultados obtidos para α igual a 1,4.

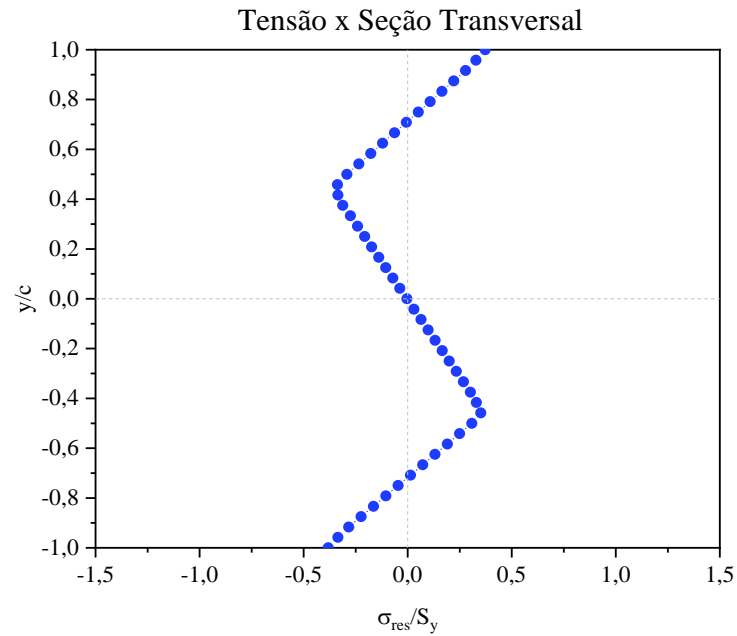


Figura 55: Distribuição da tensão residual ao longo da seção transversal do arame metálico para $\alpha = 1,4$. Autoria Própria.

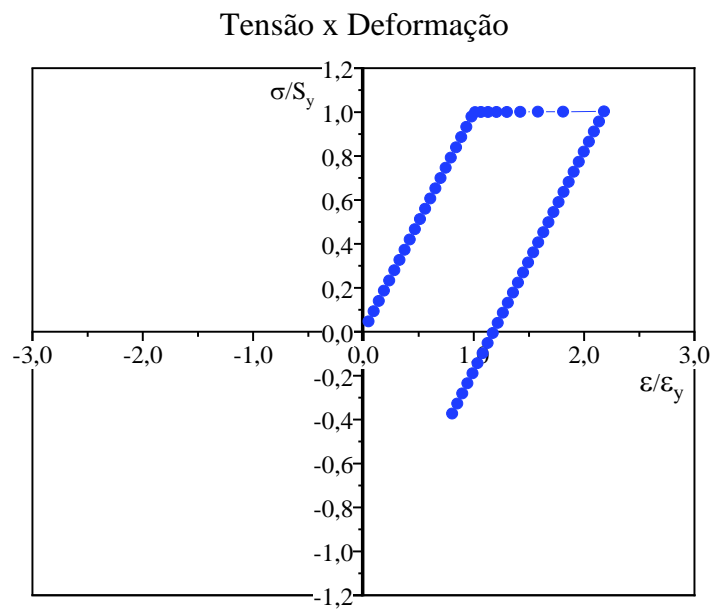


Figura 56: Tensão e deformação residuais na superfície do arame metálico para $\alpha = 1,4$. Autoria Própria.

4.7.3 Casos Matriz de Variáveis de Entrada

Para todos os 18 casos enunciados na Tabela 6 (Matriz de Variáveis de Entrada) foram gerados os gráficos da distribuição da tensão residual ao longo da seção transversal do arame metálico e da tensão principal pela deformação principal para um ponto da superfície inferior da barra. Todos esses resultados estão disponíveis no Apêndice A.

4.8 Discussão dos Resultados

De posse dos resultados obtidos, foi possível realizar a comparação entre as tensões residuais que as barras inicialmente possuíam, para ciclos únicos de curvatura, conforme mostrado nas seções 4.7.1 Curvatura Única ($\alpha = 1,2$) e 4.7.2 Curvatura Única ($\alpha = 1,4$), e as tensões residuais após a segunda curvatura, casos presentes na Tabela 6.

A avaliação permitiu a identificação de dois comportamentos distintos para a distribuição da tensão residual após a segunda curvatura, sendo eles: sem efeito de memória, onde uma das curvaturas não influencia no perfil de distribuição final, e com efeito de memória, onde ambas as curvaturas influenciam nesse perfil. Os efeitos observados para cada caso simulado numericamente podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8: Efeitos observados na distribuição de tensões residuais para os casos simulados. Autoria Própria.

Sequência	Caso	Efeito Observado
$\alpha_1 < \alpha_2$	1	Sem Efeito de Memória
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
$\alpha_1 = \alpha_2$	7	Sem Efeito de Memória
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	
$\alpha_1 > \alpha_2$	13	Com Efeito de Memória
	14	
	15	
	16	
	17	
	18	

4.8.1 Sem Efeito de Memória

As combinações sem efeito de memória têm como característica principal o fato de a tensão residual originada ser equivalente ao perfil de tensão criado caso houvesse apenas uma única curvatura, onde a primeira delas não provoca efeito nenhum no resultado. Além disso, pode-se afirmar que nestes casos a tensão residual após os dois ciclos de curvatura é majorada ou mantém-se no nível.

A Figura 57 mostra os resultados obtidos para o Caso 1. Aqui, é possível perceber que o perfil de distribuição de tensões residuais após o descarregamento da primeira curvatura é majorado quando comparado ao perfil de distribuição das tensões residuais após o descarregamento do segundo ciclo.

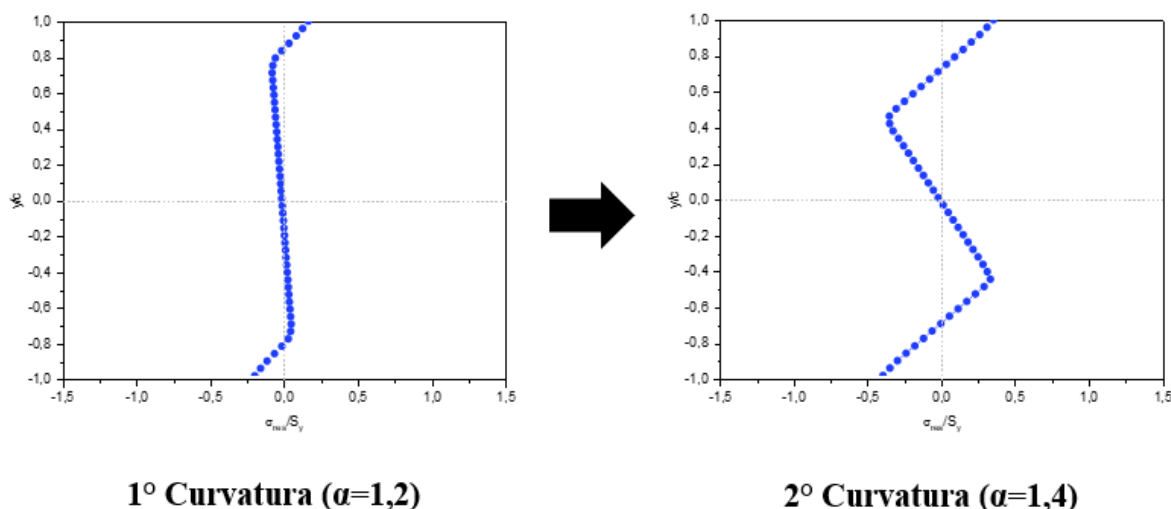


Figura 57: Comparação dos perfis de tensão residual entre as duas curvaturas do Caso 1.
Autoria Própria.

A Figura 58 mostra um exemplo (Caso 7) em que o perfil de distribuição de tensão residual é mantido após o descarregamento da primeira curvatura em comparação com a distribuição observada para o descarregamento da segunda curvatura.

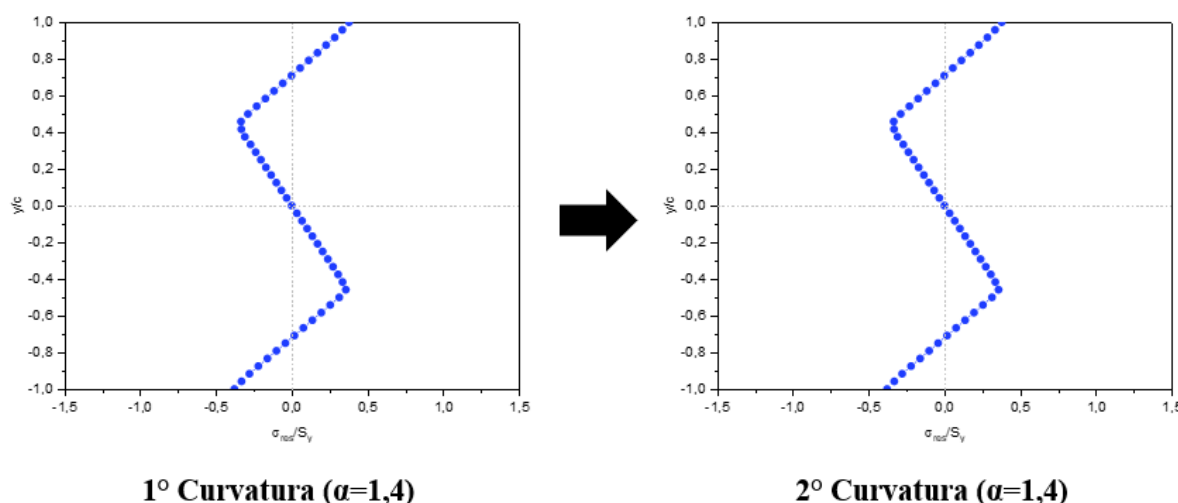


Figura 58: Comparação dos perfis de tensão residual entre as duas curvaturas do Caso 7. Autoria Própria.

A partir da análise da Figura 57 e Figura 58 é possível afirmar que casos que possuem $\alpha_1 < \alpha_2$ ou $\alpha_1 = \alpha_2$ comportam-se como casos de apenas uma única curvatura.

Pode-se concluir que caso o último ciclo de curvatura apresente um valor maior ou igual de momento fletor do primeiro ciclo, como por exemplo a passagem do fio por um rolete ou bobina de menor raio de curvatura, haverá um efeito de "apagamento" da tensão residual em relação a todas as curvaturas realizadas anteriormente.

4.8.2 Com Efeito de Memória

Foi observado que alguns casos apresentaram o efeito de memória das tensões residuais originadas pela primeira curvatura. Este fenômeno pode ser bastante benéfico em aplicações práticas da indústria, pois possibilita a escolha de parâmetros ideais que reduzam o perfil final de tensões residuais, aumentando assim a vida útil de materiais e trazendo mais qualidade para os projetos de componentes.

A Figura 59 apresenta uma comparação entre os perfis de tensão residual distribuídos na seção transversal do modelo para as duas curvaturas sequenciais do Caso 14. Dessa forma, é possível afirmar que houve uma redução de aproximadamente 47% da tensão residual gerada pelo primeiro carregamento.

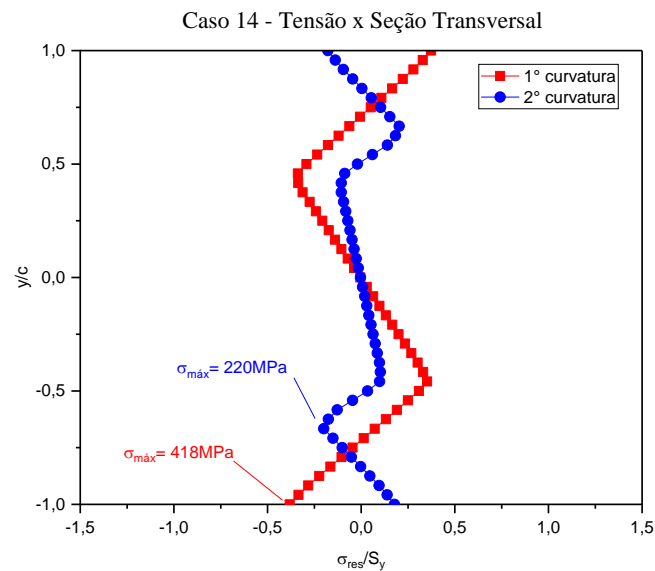


Figura 59: Comparação entre os perfis de tensão residual das duas curvaturas na seção transversal do Caso 14. Autoria Própria.

Este fenômeno só pode ser observado nos casos em que $\alpha_1 > \alpha_2$, com curvaturas em sentidos opostos. Quando uma das duas condições não é respeitada, há apenas o efeito sem memória, como comentado no Item 4.8.1.

Além da redução da tensão residual máxima, é possível observar uma mudança no perfil resultante da segunda curvatura. Enquanto a primeira curvatura apresenta duas mudanças de sentido ao longo da seção transversal, a segunda passa a apresentar quatro mudanças, conforme representado na Figura 60.

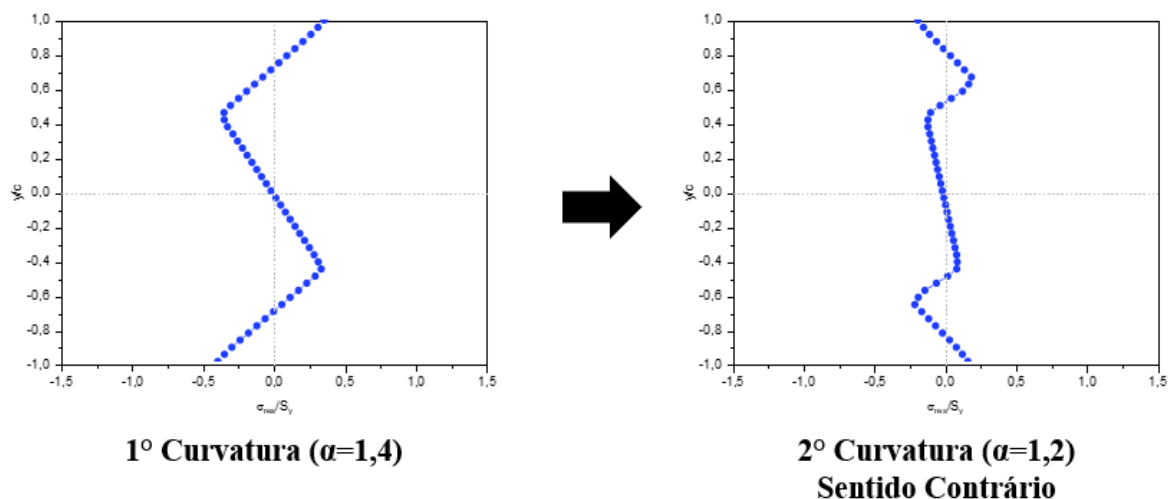


Figura 60: Comparação dos perfis de tensão residual entre as duas curvaturas do Caso 14. Autoria Própria.

Este efeito de minimização pode ser bastante explorado na indústria *offshore*, pois arames são submetidos a roletes e/ou bobinas para transporte e armazenamento de diferentes diâmetros e seus perfis de tensão residual são alterados constantemente.

4.8.3 Tabela de Análises de Resultados

Por fim, na Tabela 9 é apresentado um fluxograma de todas as análises geradas, tendo em vista suas possíveis combinações, e os efeitos observados.

Tabela 9: Tabela de Análises e Resultados. Autoria Própria.

Sequência	Caso	Sentido	<i>Spring Back?</i>	Sentido	<i>Spring Back?</i>	Efeito Observado
$\alpha_1 < \alpha_2$	1	Positiva	Sim	Positiva	Sim	Sem Efeito de Memória
	2	Positiva	Sim	Negativa	Sim	
	3	Positiva	Sim	Positiva	Não	
	4	Positiva	Sim	Negativa	Não	
	5	Positiva	Não	Positiva	Sim	
	6	Positiva	Não	Negativa	Sim	
$\alpha_1 = \alpha_2$	7	Positiva	Sim	Positiva	Sim	Sem Efeito de Memória
	8	Positiva	Sim	Negativa	Sim	
	9	Positiva	Sim	Positiva	Não	
	10	Positiva	Sim	Negativa	Não	
	11	Positiva	Não	Positiva	Sim	
	12	Positiva	Não	Negativa	Sim	
$\alpha_1 > \alpha_2$	13	Positiva	Sim	Positiva	Sim	Com Efeito de Memória
	14	Positiva	Sim	Negativa	Sim	
	15	Positiva	Sim	Positiva	Não	
	16	Positiva	Sim	Negativa	Não	
	17	Positiva	Não	Positiva	Sim	
	18	Positiva	Não	Negativa	Sim	

Capítulo 5

Conclusões

O presente estudo determinou os perfis de distribuição de tensão residual em arames metálicos submetidos a duas curvaturas sequenciais pelo método dos elementos finitos. Buscou-se ainda avaliar o impacto da primeira curvatura no perfil de tensões residuais gerado na segunda curvatura.

Após a simulação dos resultados numéricos, foi possível observar dois efeitos distintos da distribuição de tensão residual após as curvaturas sequenciais. A maior parte dos casos apresentou o efeito sem memória, em que a primeira curvatura não influencia no perfil final de distribuição das tensões residuais. Contudo, nos casos em que $\alpha_1 > \alpha_2$, com curvamentos em sentidos opostos e *spring back* no segundo ciclo, chamado de casos com efeito de memória, houve minimização da tensão residual máxima gerada pela primeira curvatura, com redução de aproximadamente 47%, para os casos analisados.

Esta observação pode ser utilizada, por exemplo, para determinar uma sequência de enrolamentos e de bobinas e/ou roletes no transporte e armazenamento de arames metálicos para fabricação de flexíveis, que minimize as tensões residuais existentes.

Por fim, para trabalhos futuros, podem ser analisados sequências de carregamento com mais de dois ciclos de curvatura, como por exemplo, três ou quatro ciclos. Dessa maneira, será possível compreender se há possibilidade de minimizar de forma mais significativa as tensões residuais para determinadas configurações. Além disso, pode-se também analisar a influência de outros valores do fator α nas curvaturas realizadas, a fim de se entender de maneira mais clara o impacto da magnitude do carregamento na distribuição das tensões residuais finais de cada caso de curvatura.

Capítulo 6

Bibliografia

- [1] ASM; “Residual Stress and Deformation of Steel Handbook”. Materials Park, Ohio, American Society for Metals, 2002.
- [2] BAI, Young, BAI, Quiang; “Subsea Pipelines and Risers”, 1 ed. Elsevier, 2005.
- [3] BUENOS, Alexandre Aparecido; “Avaliação de Tensão Residual gerada pelo Processo de Usinagem utilizando Acustoelasticidade”, dissertação de mestrado, Campinas, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2010.
- [4] CALLE GONZALES, Miguel Angel; GONÇALVES, Edison; “Análise numérico-computacional das tensões residuais induzidas pelo jateamento com granalha.”, dissertação de mestrado, São Paulo, Universidade de São Paulo, SP, 2004.
- [5] CASTRO, Jaime Tupiassú Pinho, MEGGIOLARO, Marco Antonio; “Fatigue Design Technics Under Real Service Loads”, vol. 2, Createspace Independent Publishing Platform, 2016.
- [6] CHUVAS, Tatiane; “Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma”, dissertação de mestrado, Rio de Janeiro, Universidade Federal Fluminense, RJ, 2012.
- [7] COSTA REIS, Frederico Aires Rodrigo.; “Medição de tensões residuais com indentador instrumentado e interferômetro radial”, dissertação de mestrado, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2012.
- [8] KWOFIE S.; “Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief” Materials Science and Engineering A v. 516, pp.154–161, Mar. 2009.
- [9] MIRIM, D.C; “Investigação da tensão residual na soldagem a laser entre o aço carbono AISI 1010 e o aço inoxidável AISI 304”, dissertação de mestrado, São Paulo, Universidade de São Paulo, SP, 2011.
- [10] OGATA, Humberto Toshiaki da Silva.; “Determinação da influência das tensões residuais nas propriedades de fadiga em aço SAE 8620 processado com diferentes profundidades de camada de cementação”, dissertação de mestrado, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, PR, 2003.
- [11] PELIZZARI, Elisangela; “Estudo da incerteza de medição na análise das tensões residuais através do método do furo cego”, dissertação de mestrado, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2013.
- [12] RODRIGUES, Leonardo Dantas; “Medição de Tensões Residuais em Tubos Visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados”, dissertação de mestrado, Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica, RJ, 2007.

- [13] SOUZA, Diogo Antônio.; “Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza”, dissertação de mestrado, São João Del-Rei, Universidade Federal de São João Del-Rei, RS, 2012.
- [14] TECHNIPFMC, Banco de dados da Technip FMC. Acesso em: 10/07/2020
- [15] ZHOU, Chongyao et. al. “Effect of Lay Angle of Anti-Buckling Tape on Lateral Buckling Behavior of Tensile Armors”, ASME 2015 34th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Paper, 2015.

Apêndice A

Resultados obtidos a partir das simulações numéricas no *Ansys Workbench*

A.1 Caso 1

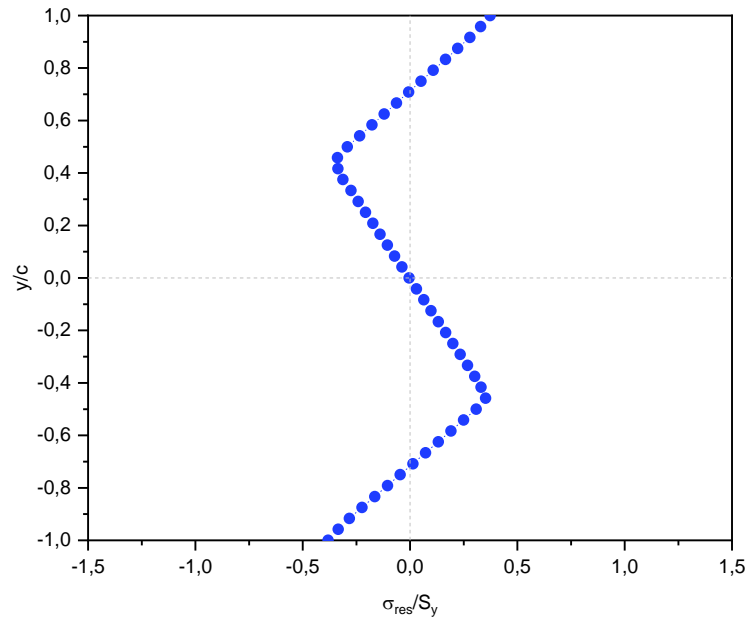


Figura A-1: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 1. Autoria Própria.

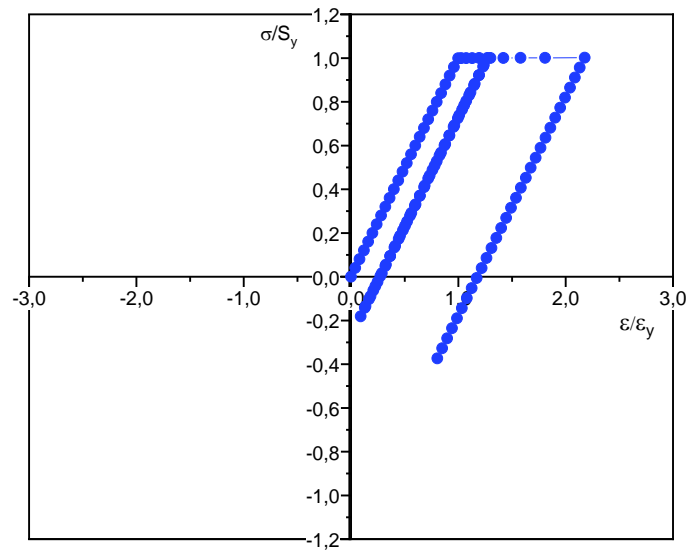


Figura A-2: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 1. Autoria Própria.

A.2 Caso 2

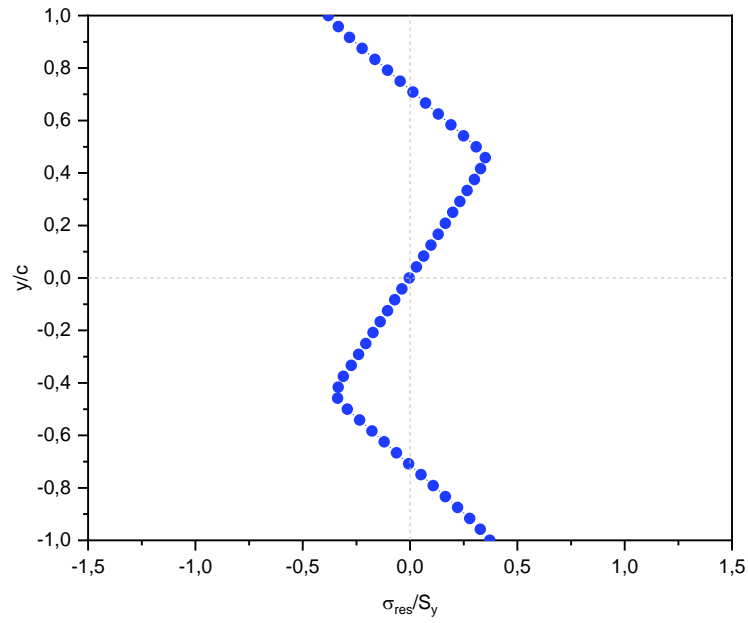


Figura A-3: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 2. Autoria Própria.

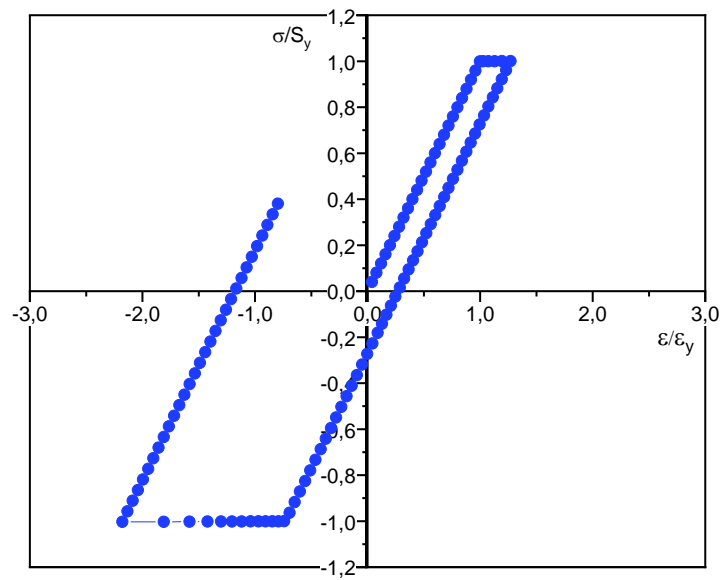


Figura A-4: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 2. Autoria Própria.

A.3 Caso 3

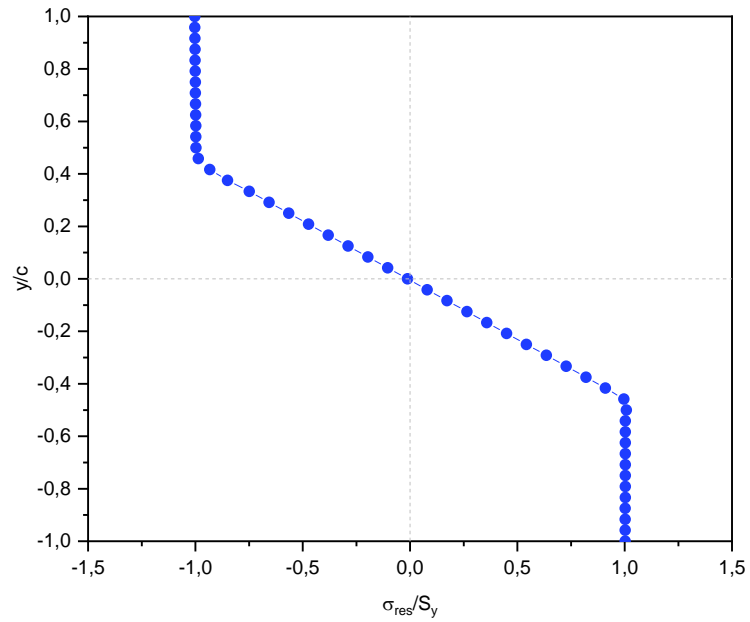


Figura A-5: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 3. Autoria Própria.

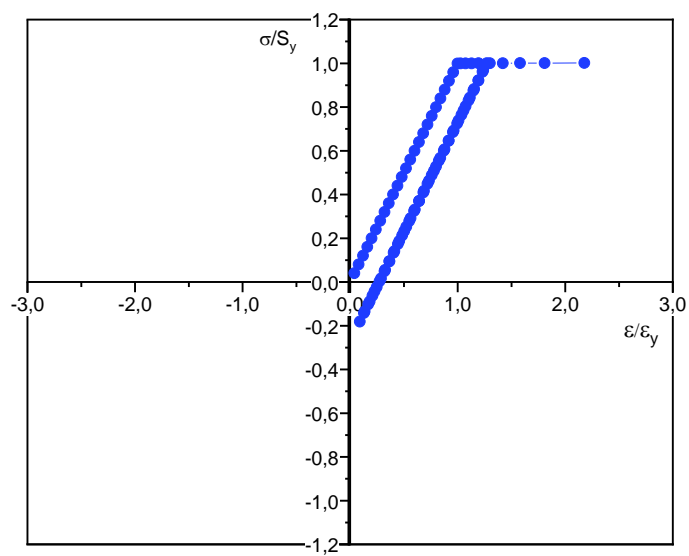


Figura A-6: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 3. Autoria Própria.

A.4 Caso 4

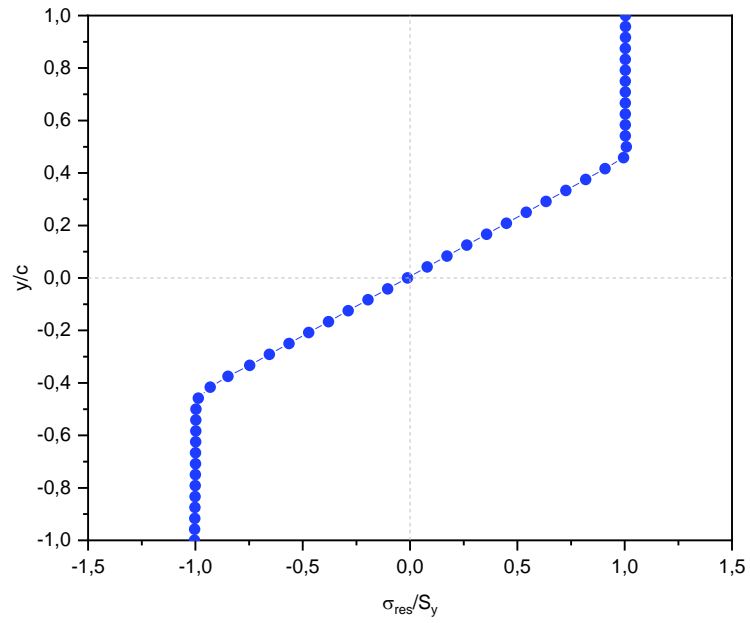


Figura A-7: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 4. Autoria Própria.

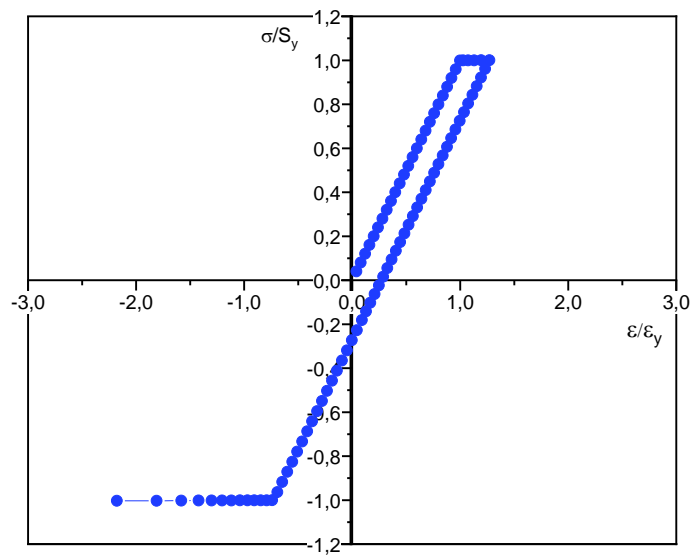


Figura A-8: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 4. Autoria Própria.

A.5 Caso 5

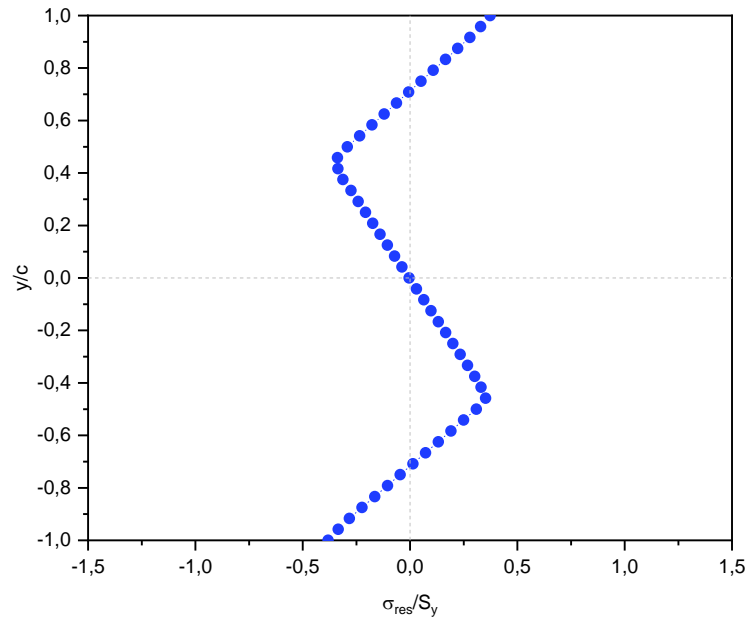


Figura A-9: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 5. Autoria Própria.

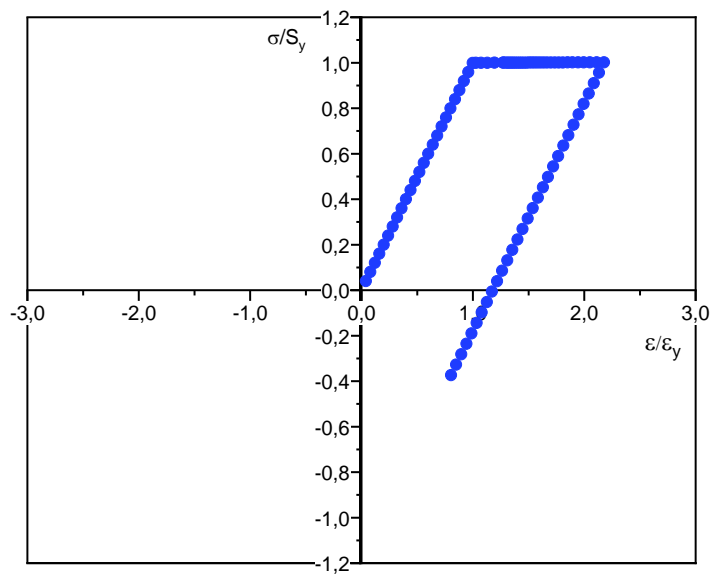


Figura A-10: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 5. Autoria Própria.

A.6 Caso 6

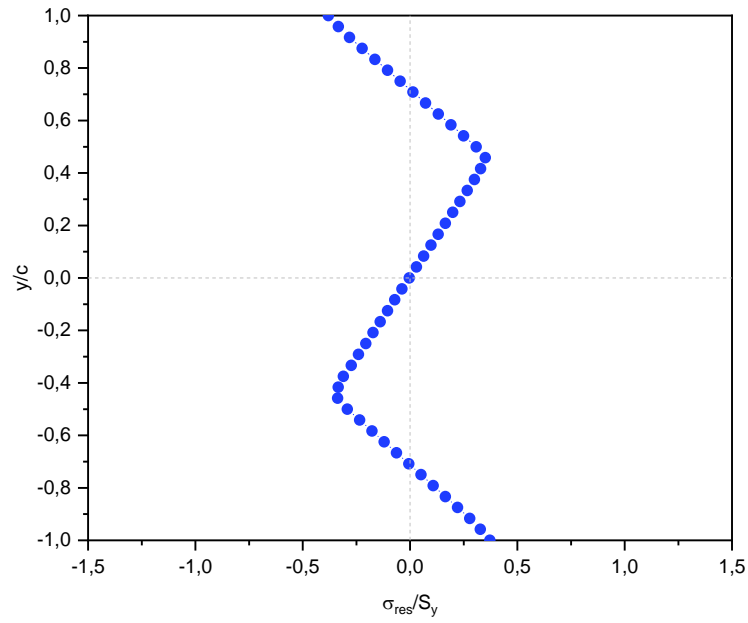


Figura A-11: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 6. Autoria Própria.

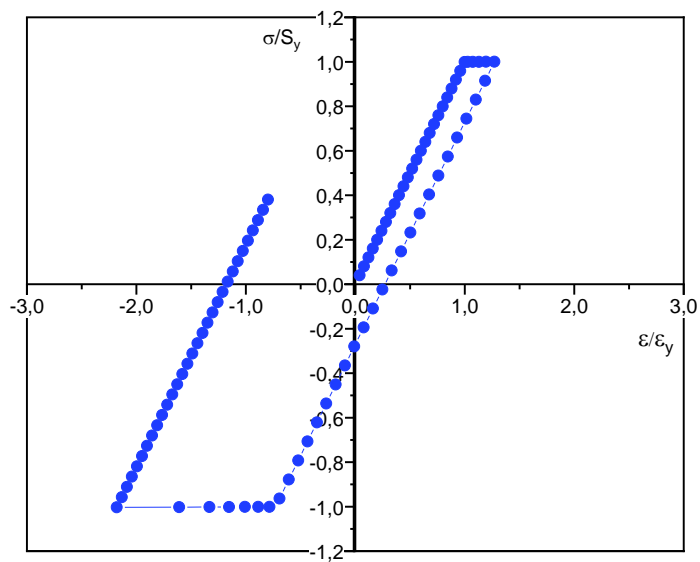


Figura A-12: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 6. Autoria Própria.

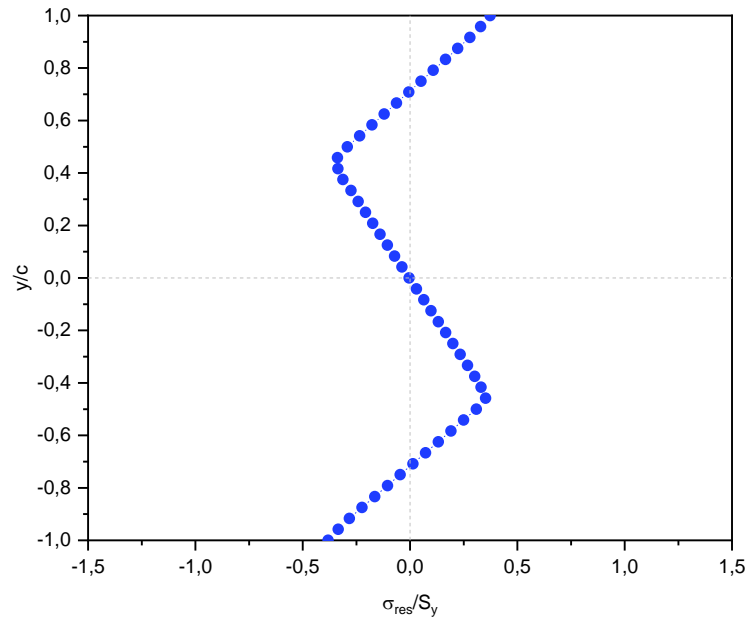
A.7 Caso 7

Figura A-13: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 7. Autoria Própria.

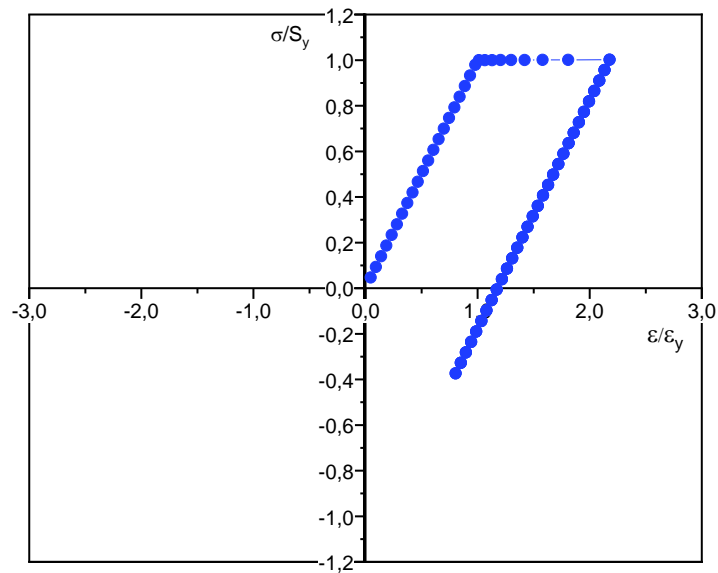


Figura A-14: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 7. Autoria Própria.

A.8 Caso 8

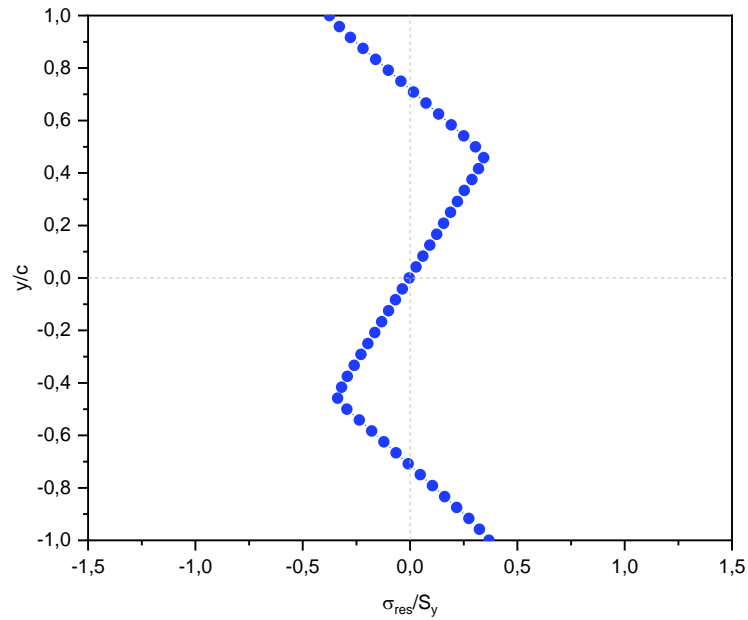


Figura A-15: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 8. Autoria Própria.

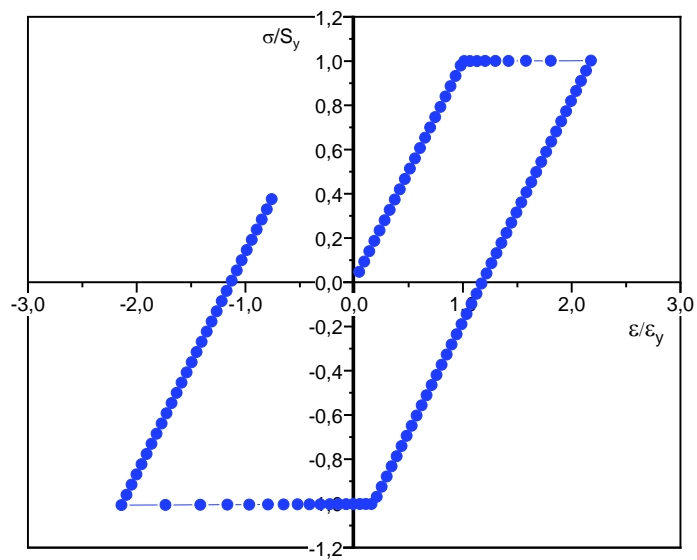


Figura A-16: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 8. Autoria Própria.

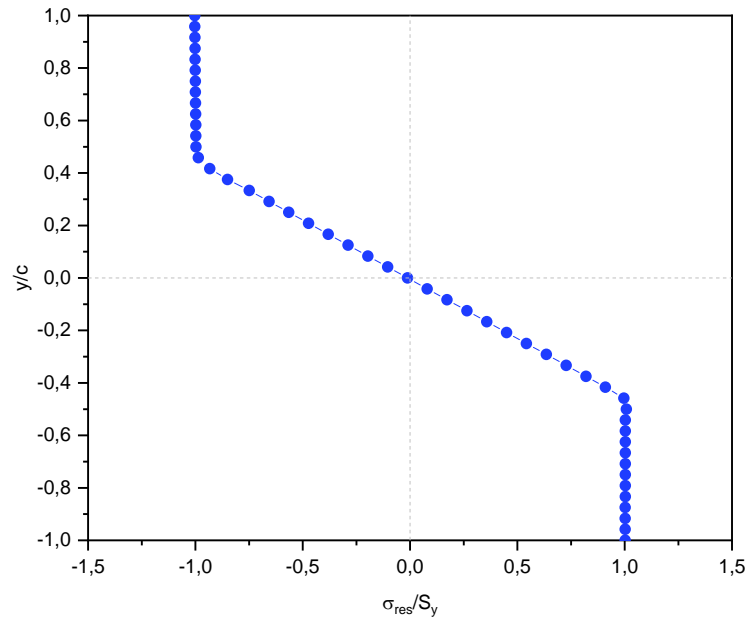
A.9 Caso 9

Figura A-17: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 9. Autoria Própria.

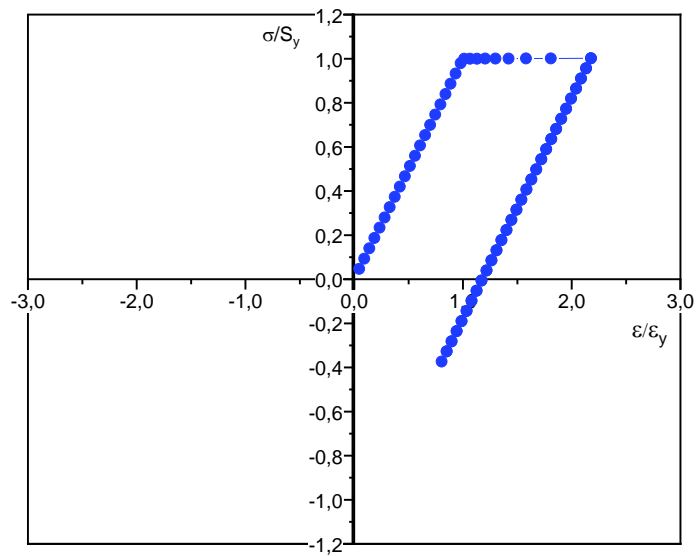


Figura A-18: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 9. Autoria Própria.

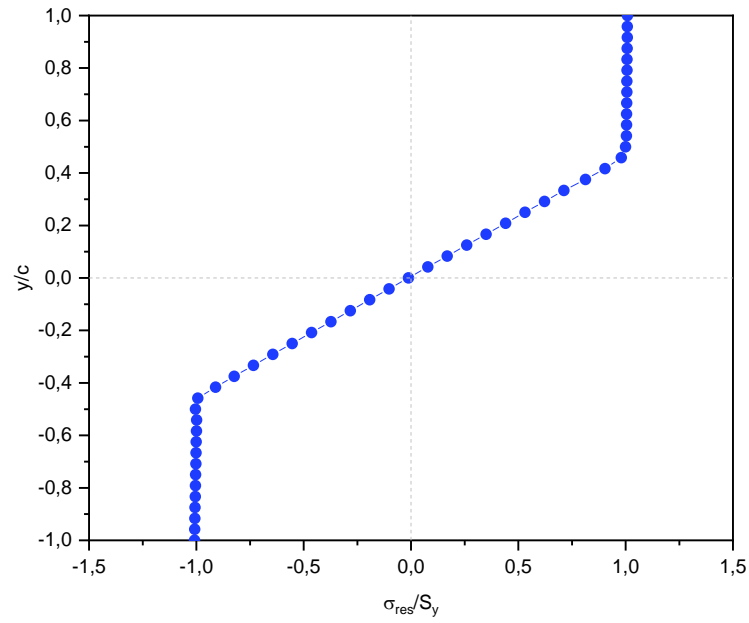
A.10 Caso 10

Figura A-19: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 10. Autoria Própria.

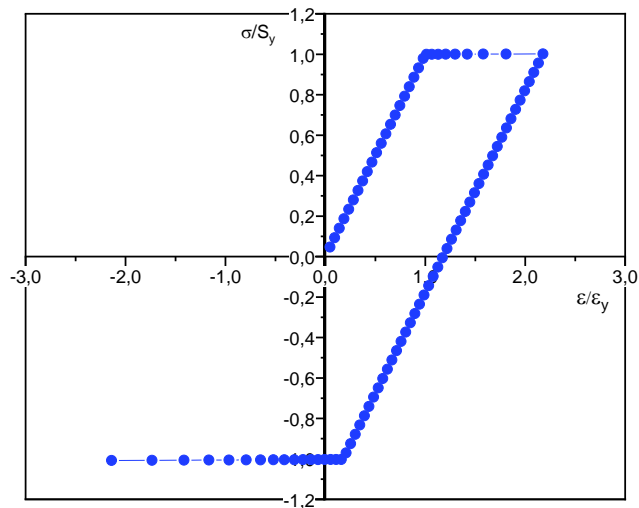


Figura A-20: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 10. Autoria Própria.

A.11 Caso 11

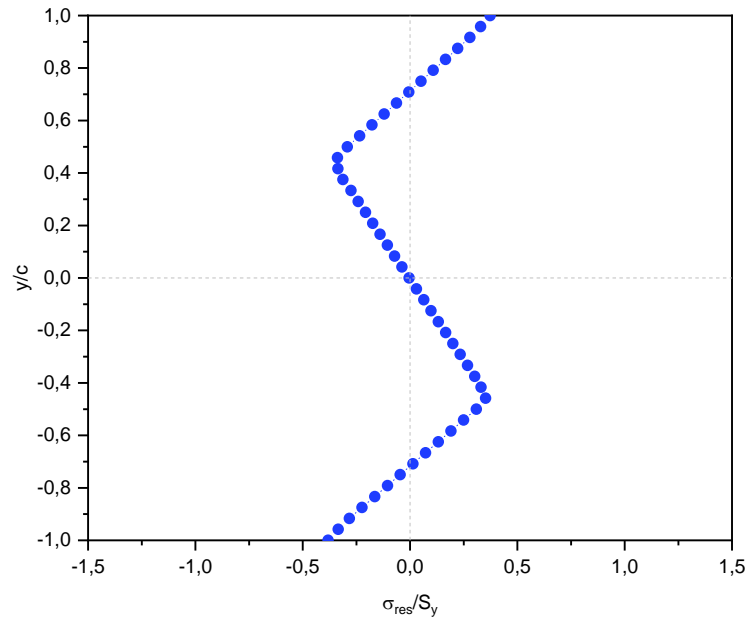


Figura A-21: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 11. Autoria Própria.

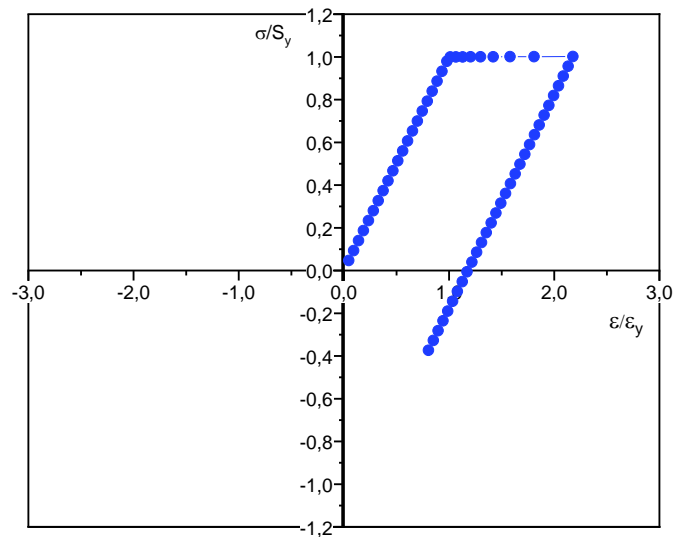


Figura A-22: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 11. Autoria Própria.

A.12 Caso 12

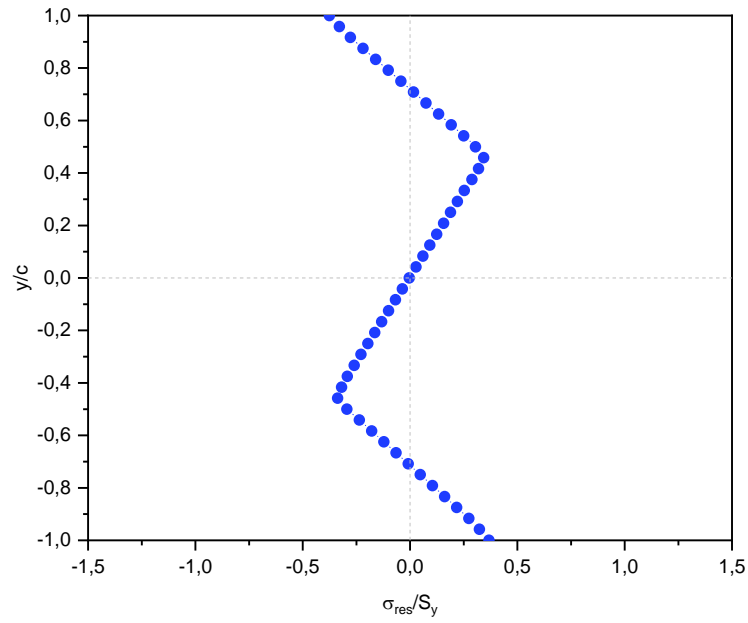


Figura A-23: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 12. Autoria Própria.

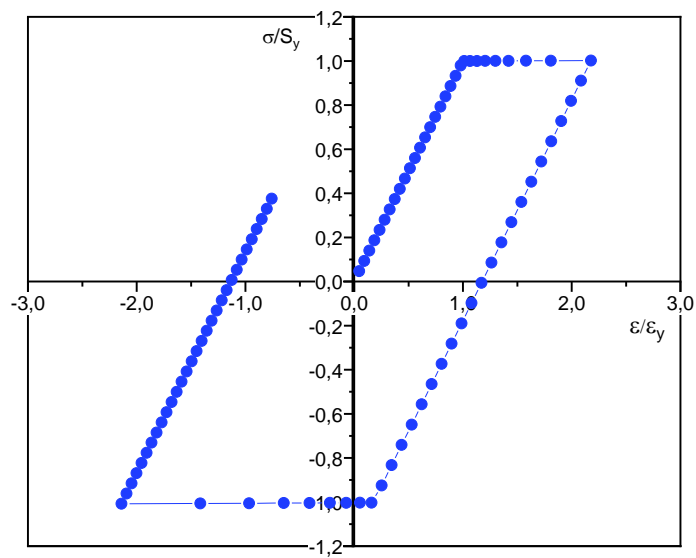


Figura A-24: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 12. Autoria Própria.

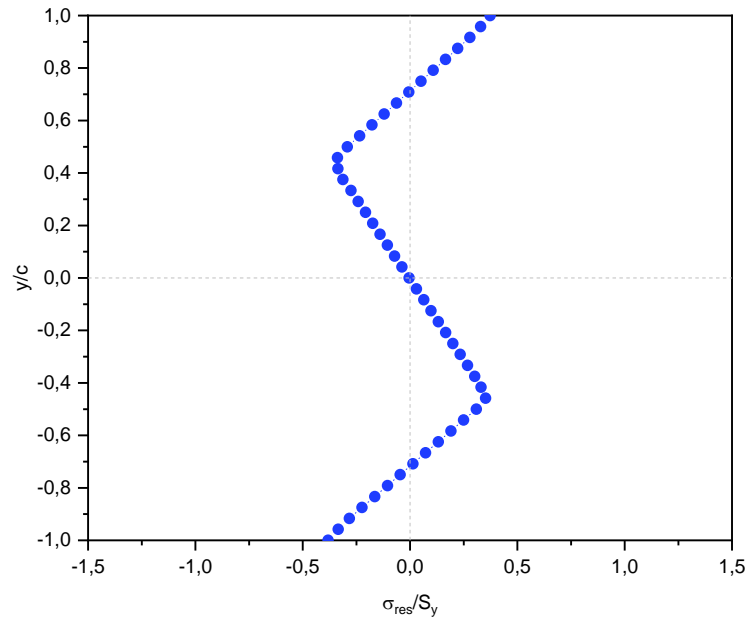
A.13 Caso 13

Figura A-53: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 13. Autoria Própria.

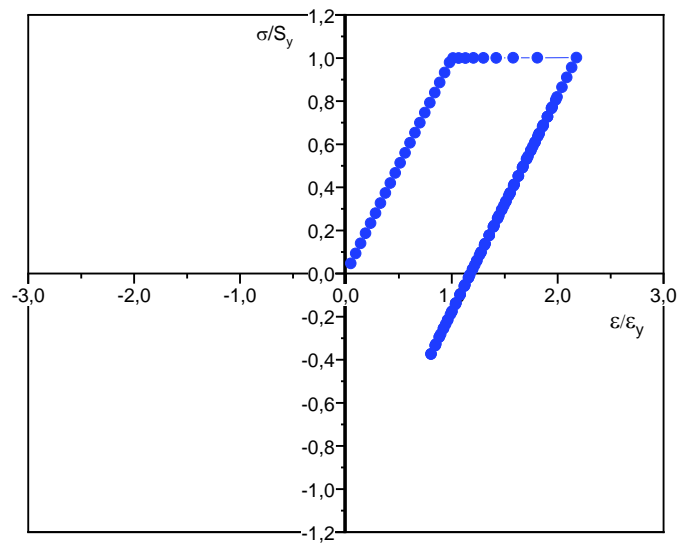


Figura A-54: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 13. Autoria Própria.

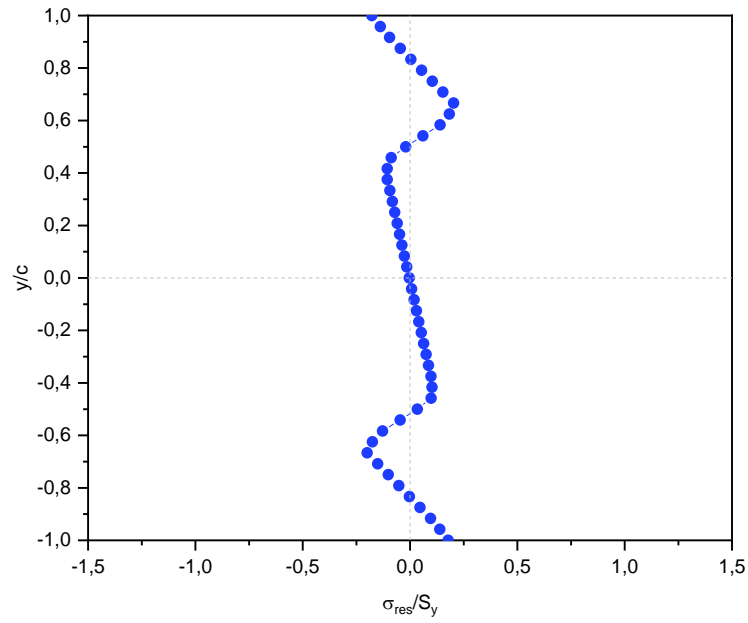
A.14 Caso 14

Figura A-25: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 14. Autoria Própria.

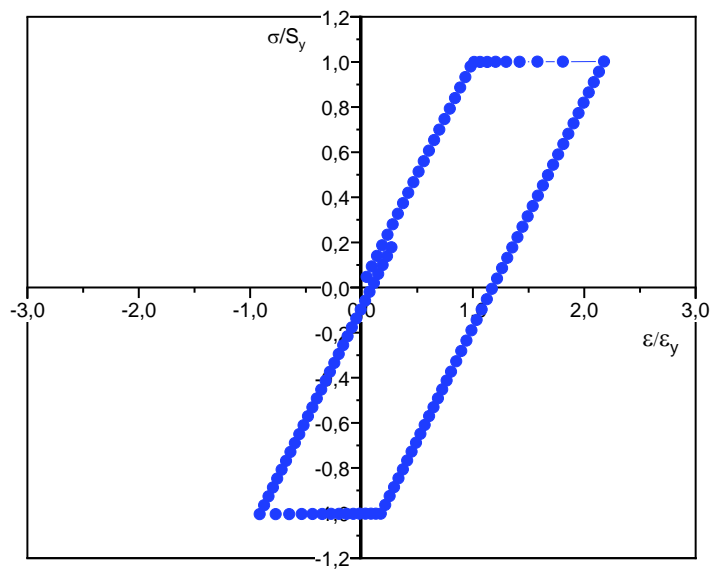


Figura A-26: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 14. Autoria Própria.

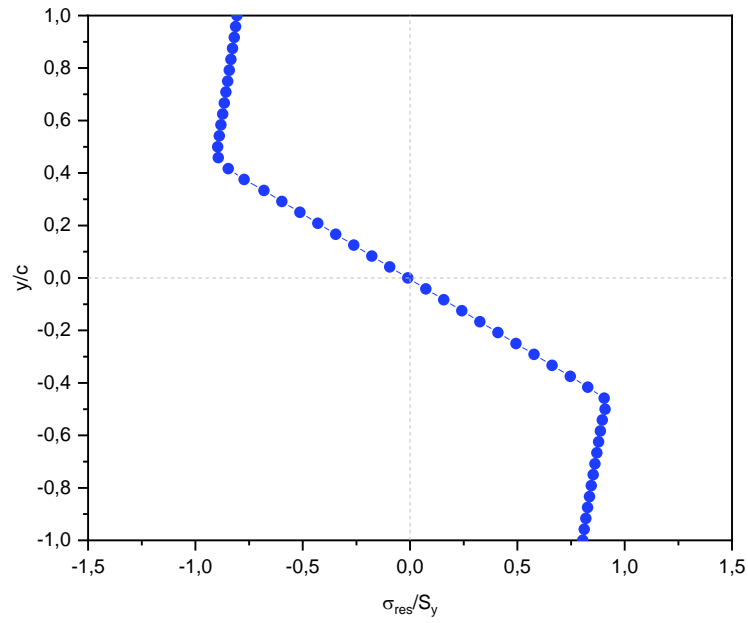
A.15 Caso 15

Figura A-61: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 15. Autoria Própria.

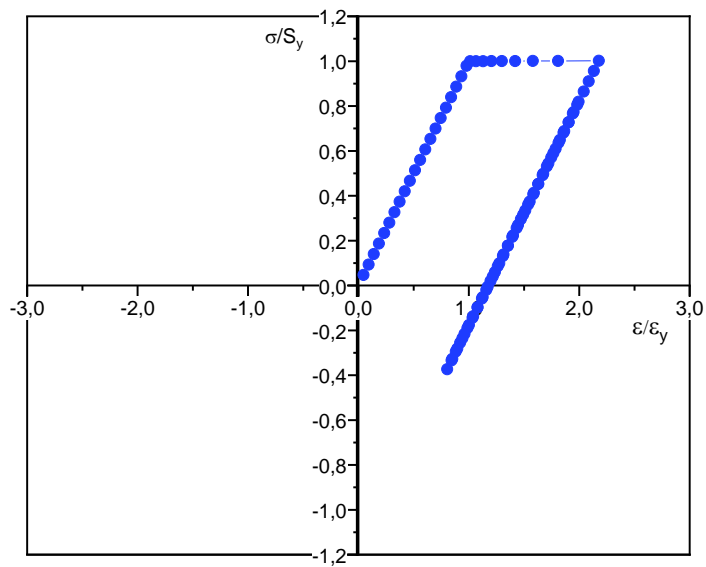


Figura A-62: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 15. Autoria Própria.

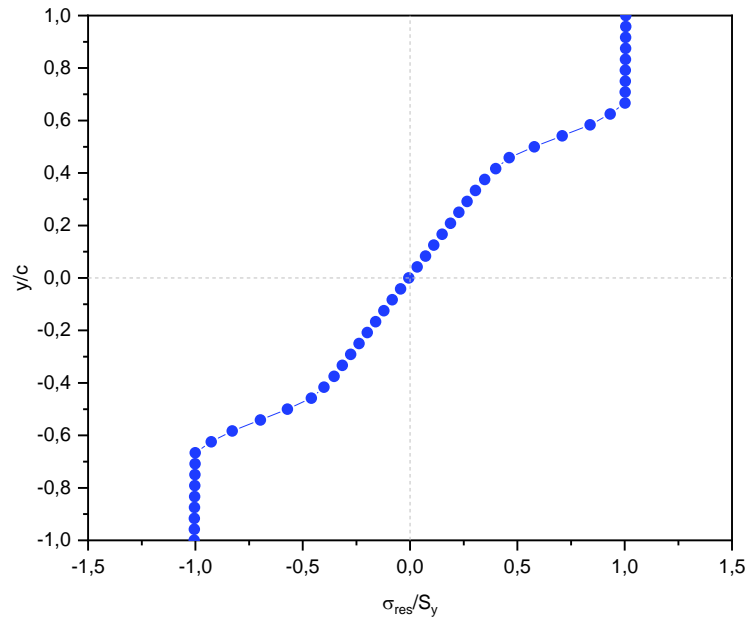
A.16 Caso 16

Figura A-27: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 16. Autoria Própria.

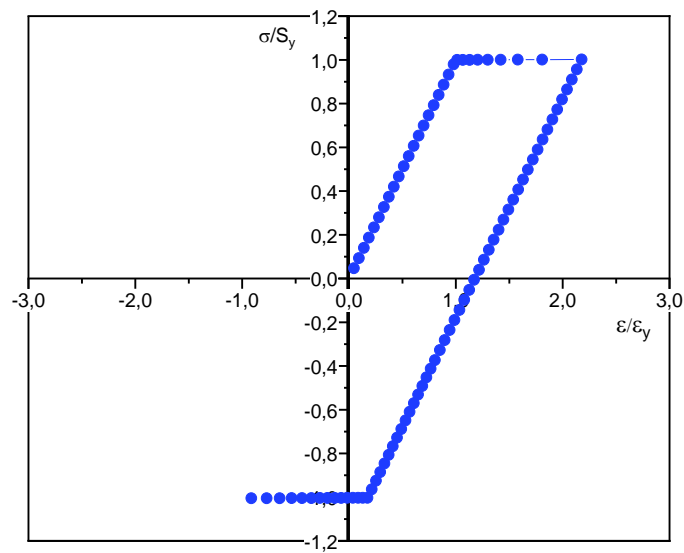


Figura A-28: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 16. Autoria Própria.

A.17 Caso 17

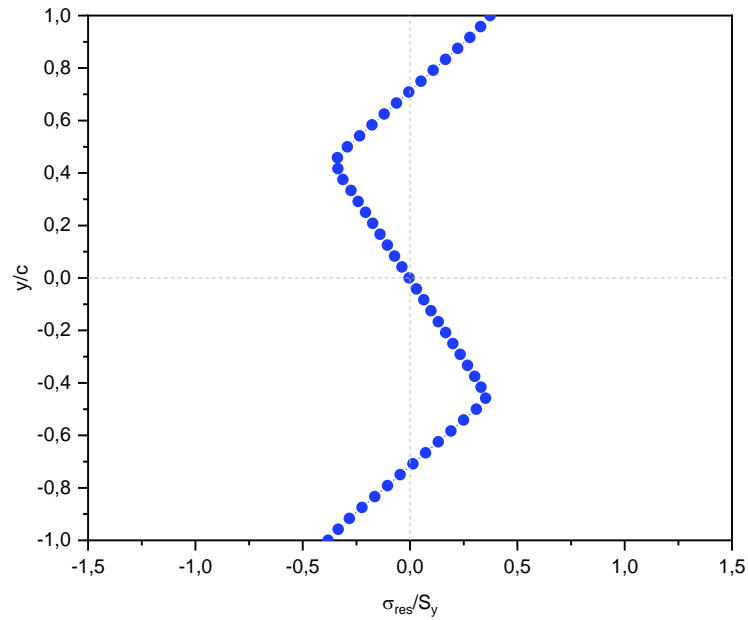


Figura A-29: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 17. Autoria Própria.

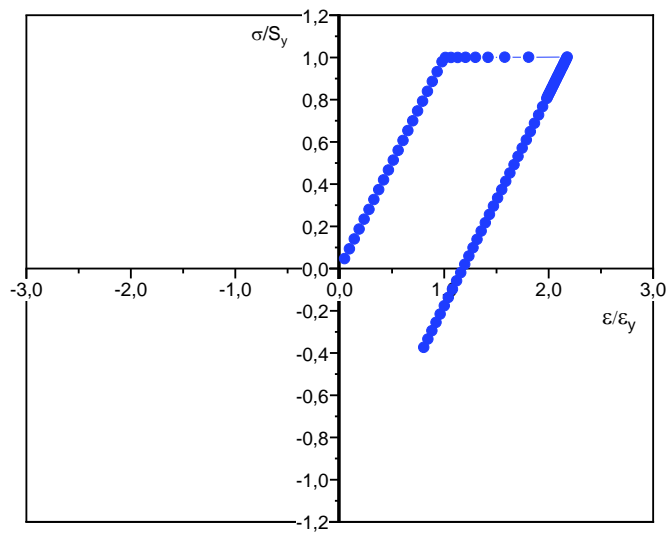


Figura A-30: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 17. Autoria Própria.

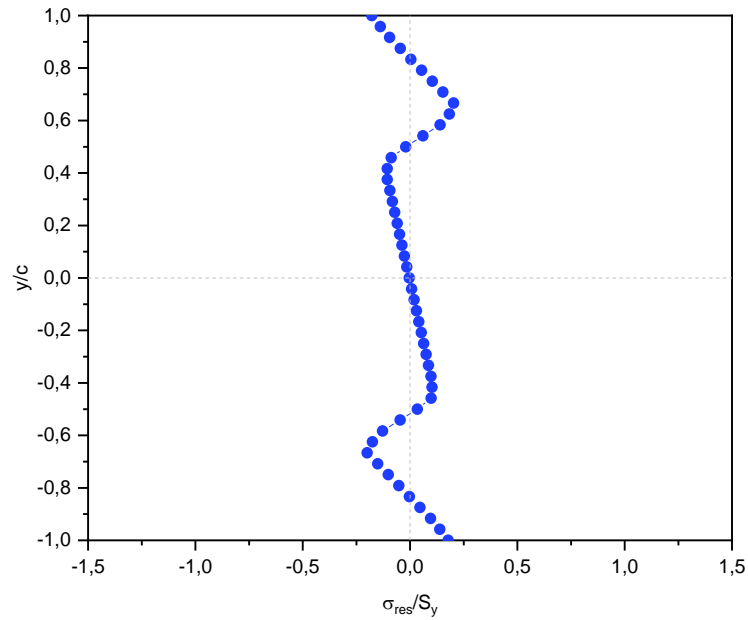
A.18 Caso 18

Figura A-31: Distribuição de tensão residual na seção transversal do Caso 18. Autoria Própria.

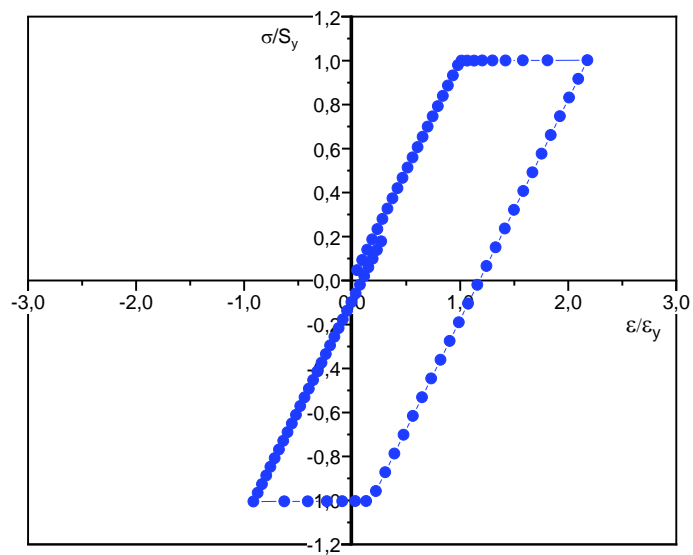


Figura A-32: Gráfico parametrizado de Tensão x Deformação do Caso 18. Autoria Própria.