CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS PELO MÉTODO EXPERIMENTAL DA REDE DE BRAGG

Felipe Arêas Vargas

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador:

Paulo Pedro Kenedi, D.Sc.

Rio de Janeiro
Setembro/2014

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS PELO MÉTODO EXPERIMENTAL DA REDE DE BRAGG

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Felipe Arêas Vargas

Aprovada por:

_____

Presidente, Prof. Paulo Pedro Kenedi, D. Sc. (Orientador)

_____

Prof. Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

_____

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc.

_____

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D. (UFRJ)

Rio de Janeiro
Setembro/2014

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

V297 Vargas, Felipe Arêas
Avaliação das tensões residuais em armaduras de tração de dutos flexíveis pelo método experimental da rede Bragg / Felipe Arêas Vargas.—2014.
xv, 102f. :il. color. , grafs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2014.
Bibliografia : f. 101-102
Orientador : Paulo Pedro Kenedi

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Dutos flexíveis. 4. Fibras ópticas. I. Kenedi, Paulo Pedro (Orient.). II. Título.

CDD 621.8

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,

Fernando César dos Santos Vargas e
Margareth Rose Moore Arêas Vargas.

AGRADECIMENTOS

Ao grupo de Tecnologia da GE Wellstream, pelo companheirismo e amizade. Em especial agradeço a Fabio Pires e Italo Souza pelas ideias e orientações recebidas ao longo do desenvolvimento deste projeto.

A Judimar Clevelario, diretor global de Tecnologia da GE Wellstream, por acreditar e investir na idéia desta dissertação.

Ao meu orientador, Paulo Pedro Kenedi, pelosincentivos, conversas, conselhos, confiança, e por todos os conhecimentos adquiridos ao longo desta dissertação.

Ao amigo Diogo Garcia Lopes, engenheiro de testes da GE Wellstream, pelo compartilhamento de conhecimentos e ajuda no desenvolvimento da dissertação.

Ao amigo Duilio Kubiki, coordenador de instrumentação da GE Wellstrem, pelo empenho e ajuda na realização dos ensaios.

À minha namorada, Lia Raposo de Assis Martins, pelo incentivo, companheirismo, compreensão e por sempre estar presente na minha vida.

Aos meus pais, Margareth Rose Moore Arêas Vargas e Fernando César dos Santos Vargas, pelo exemplo de integridade, justiça, e por todo suporte e ensinamentos dados durante toda a minha vida.

RESUMO

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS PELO MÉTODO EXPERIMENTAL DA REDE DE BRAGG

Felipe Arêas Vargas

Orientador:

Paulo Pedro Kenedi, D.Sc.

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

O duto flexível possui uma complexidade estrutural baseada em multicamadas interindependentes de materiais tanto poliméricos quanto metálicos com funções variadas. Cada camada exerce uma função específica. A camada responsável pela resistência à tração do duto é a armadura de tração, composta por arames de aço dispostos helicoidalmente em duas camadas em sentidos opostos. Essa camada necessita ser ancorada no conector durante o processo de montagem do mesmo e, para essa ancoragem, é necessário realizar uma curvatura acentuada nos arames aplicando-se altos níveis de deformação, gerando assim tensões residuais no material que, por sua vez, podem alterar a vida à fadiga do duto. O objetivo deste trabalho é avaliar o nível dessas deformações provocadas pelo processo de curvatura dos arames pelo método experimental óptico da rede Bragg, fazendo uma comparação do mesmo com a metodologia de extensometria elétrica por “strain gages”. E por fim propor um modelo analítico de tensões residuais, onde a distribuição de tensões residuais na seção transversal do arame está baseada nas deformações encontradas experimentalmente. A metodologia de teste usada apresentou resultados coerentes e mostrou poder detectar altos níveis de deformação residual que são introduzidas nos arames da armadura de tração dos dutos flexíveis durante sua fabricação. Os resultados do modelo analítico implementado pelo software Visual Basic monstram que a distribuição de tensões residuais na seção transversal do arame está diretamente relacionada com a sequência de curvaturas aplicada.Os dutos flexíveis são estruturas tubulares, formadas pela superposição de camadas metálicas (com função estrutural) e poliméricas (impermeabilizantes), que lhes conferem a capacidade de resistir às pressões do fluido interno, à pressão hidrostática devido à profundidade e às cargas dinâmicas de operação.

Palavras-Chave:

Dutos flexíveis; Conectores; Tensão residual; Fibra ótica; Rede de Bragg; Strain gages

Rio de Janeiro
Setembro/2014

ABSTRACT

EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN FLEXIBLE PIPES TENSILE ARMOR WIRES THROUGH FIBER BRAGG GRATING EXPERIMENTAL METHOD

Felipe Arêas Vargas

Advisor:

Paulo Pedro Kenedi, D.Sc.

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology.

The flexible pipe has a structural complexity based on multilayers of independent metallic and polymeric materials with varied functions. Each layer performs a specific function. The responsible layer for the tensile strength of the pipe is the tensile armour, consisting of steel wires helically arranged in two layers in opposite directions. This layer needs to be anchored into connector during its assembly process and for that anchor is necessary to perform a severe bend in the wires, which applying high strain levels, generating residual stresses in the material which may change the fatigue life of the flexible pipe. The main goal of this study is to assess the level of these strain levels caused by the bending process in the wires by optical experimental method called Fiber Bragg grating, making a comparison with the electrical methodology called "Strain gages". Finally propose an analytical model for residual stress distribution estimation through wire cross section, based on the strains found experimentally. The test methodology used showed consistent results and proved to be able to detect high levels of residual strain that are introduced into armour wire layers of the flexible pipes during its manufacture. The results of the analytical model implemented by Visual Basic software showed that the distribution of residual stresses along wire cross section is directly related to the applied bending sequence.

Keywords:

Flexible pipelines; Connectors; Residual stress; Fiber optics; Fiber Bragg Grating; Strain gages

Rio de Janeiro
September/2014

Sumário

Capítulo I Introdução 1
Capítulo II Revisão Bibliográfica 4
II.1 A Dutos Flexíveis 4
II.1.1 Tipos de Aplicações Offshore dos Dutos Flexíveis 5
II.1.2 Camadas de um Tubo Flexível do Tipo “Unbonded 9
II.1.2.1 Carcaça 11
II.1.2.2 Barreira de Vedação 12
II.1.2.3 Armadura de pressão 13
II.1.2.4 Armadura de Tração 14
II.1.2.5 Fitas de alta resistência 15
II.1.2.6 Isolamento térmico 16
II.1.2.7 Capa externa 17
II.1.3 Terminal Conector e seus modos de falha 18
II.2 Tensões Residuais 20
II.2.1 Origem das Tensões Residuais 20
II.2.2 Efeitos das Tensões Residuais 20
II.2.2.1 Sobrecarga 23
II.3 Redes de Bragg gravadas em fibras óticas 24
II.3.1 Sensores à Rede de Bragg 25
II.3.2 Monitoramento de Deformação por FBG 25
II.4 Extensometria Elétrica –“ Strain Gages” 29
II.4.1 Ponte de Wheatstone 29
II.4.1.1 Circuito ¼ de ponte com 3 fios 30
Capítulo III Modelo Analítico de Distribuição de Tensões residuais 32
III.1 Introdução 32
III.2 Cargas elastoplásticas cíclicas 34
III.3 Desenvolvimento do modelo analítico 38
III.3.1 Desenvolvimento do modelo analítico 41
III.3.2 Estimativa da distribuição das tensões residuais dos casos abordados 46
Capítulo IV Programa Experimental e Metodologia 54
IV.1 Preparação para os Ensaios 54
IV.1.1 Ensaio utilizando método óptico da rede de Bragg 54
IV.1.1.1 Instalação dos sensores de Bragg 54
IV.1.1.2 Configuração do ensaio 63
IV.1.1.3 Procedimento de ensaio 65

IV.1.2 Ensaio utilizando método de extensometria elétrica 68
IV.1.2.1 Ensaios adicionais para levantamento de condição aceitável..... 70
Capítulo V Resultados Experimentais e Metodologia 72
V.1 introdução 72
V.2 Deformações Experimentais de Rede de Bragg 72
V.2.1 Deformações com a amostra curvada até o 3° pino..... 74
V.2.2 Deformações com a amostra curvada até o 6° pino..... 74
V.2.3 Deformações com a amostra curvada até o 9° pino..... 75
V.2.4 Deformações com a amostra curvada até o 12° pino..... 75
V.2.5 Deformações com a amostra curvada até o 14° pino..... 76
V.2.6 Deformações após descarregamento elástico da amostra (efeito “spring back”) .. 76
V.2.7 Deformações apóstravamento do arame na base do dispositivo 77
V.2.8 Deformações após alívio do arame a partir do travamento do mesmo na base do dispositivo..... 77
V.3 Análise Comparativa das Deformações Experimentais 79
V.3.1 Comparação das deformações com a amostra curvada até o 9° pino 79
V.3.2 Comparação das deformações com a amostra curvada até o 12° pino 80
V.3.3 Comparação das deformações com a amostra curvada até o 14° pino 81
V.3.4 Comparação das deformações após travamento do arame na base do dispositivo82
V.3.5 Comparação das deformações após alívio do arame a partir do travamento do mesmo na base do dispositivo..... 83
V.4 Análise das Deformações Experimentais dos Ensaios para Condição Aceitável 84
V.4.1 Deformações com a amostra curvada 84
V.4.2 Deformações após descarregamento elástico da amostra (efeito “spring back”) .. 85
V.4.3 Deformações após fixação do arame na base do dispositivo..... 86
V.5 Análise das Tensões Residuais..... 87
V.5.1 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 1 88
V.5.2 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 2 89
V.5.3 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 3 90
V.5.4 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 4 91
V.5.5 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 5 92
V.5.6 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 6 93
V.5.7 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 7 94
V.5.8 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 8 95
Capítulo VI Conclusões 99
Sugestões para trabalhos futuros 100
Referências Bibliográficas 101

Lista de Figuras

Figura II.1 - Duto flexível do tipo “bonded”. [2]..... 5
Figura II.2 - Duto flexível do tipo “unbonded”. [3]..... 5
Figura II.3 - Dutos Flexíveis do tipo Flowlines para aplicações estáticas [4]..... 6
Figura II.4 - Risers para aplicações dinâmicas. [4]..... 7
Figura II.5–Configurações de um Riser flexível no sistema offshore. [4]..... 8
Figura II.6–Jumpers para aplicações de interligações entre unidades e equipamentos.[4]..... 9
Figura II.7 – Carcaça. [6]..... 11
Figura II.8 – Perfil da carcaça após conformação [7]..... 11
Figura II.9 – Barreira de vedação. [6]..... 12
Figura II.10 – Armadura de pressão. [6]..... 13
Figura II.11 – Intertravamento da armadura de pressão. [7]..... 13
Figura II.12 – Armadura de tração. [6]..... 14
Figura II.13 - Fitas de alta resistência. [8]..... 15
Figura II.14 - Isolamento térmico. [8]..... 16
Figura II.15 - Capa externa. [6]..... 17
Figura II.16 – Conector. [7]..... 18
Figura II.17–Superposição das tensões residuais e das tensões de serviço. [11]..... 21
Figura II.18–Propriedades dos materiais afetadas pela tensão residual [11]..... 22
Figura II.19– Estrutura de uma fibra óptica monomodo (SMF) - (a) em perspectiva e (b) seção transversal. [15]..... 24
Figura II.20– Princípio de operação de um sensor baseado na técnica da Rede de Bragg. 25
Figura II.21 – Relação entre a força aplicada, a variação do comprimento de onda refletido e deformação [16]..... 26
Figura II.22 – Protótipos dos despositivos de monitormanto de alongamento axial (a) e de torção (b) [19]..... 27
Figura II.23 – Sensores embutidos no arame da armadura de tração do duto flexível [20]..... 28
Figura II.24 – Pontos chaves de sensoriamento no riser de topo [20]..... 28
Figura II-25 – Ponte de Wheatstone [21]..... 30
Figura II-26 – Circuito ¼ de ponte com três fios. [22]..... 30
Figura III-1 – (a) Viga mono-engastada com um carga vertical na extremidade livre e (b) Curva σxε de um material EPSE [24]..... 32
Figura III-2 – Distribuição de tensões elásticas (a) e plásticas (b) da seção crítica [24]..... 33
Figura III-3 – Distribuição de tensões elastoplásticas [24]..... 34
Figura III.4– Laço elastoplástico gerado pela carga Fapl = {0 →αFy →0} [24]..... 35
Figura III.5– Perfil de tensões residuais gerado pelo ciclo de carga Fapl = {0 →αFy →0} [24]. 36

Figura III.6– Perfil de tensões residuais gerado pelo ciclo de carga Fapl = {0 →αFy →βFy } com α = 1.4, em função da variação β [24]. 37
Figura III.7 – Referência dos raios de curvatura. [25] 38
Figura III.8 – Carregamento elastoplástico 39
Figura III.9 – Sentido do momento 42
Figura III.10 – Fluxograma analítico de deformações 44
Figura III.11 – Fluxograma analítico de tensões residuais [23]Adaptado 45
Figura III.12 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 1 (Tabela III.1) 46
Figura III.13 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 2 (Tabela III.1) 46
Figura III.14 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3 (Tabela III.1) 47
Figura III.15 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4 (Tabela III.1) 47
Figura III.16 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3a (α > β) (Tabela III.2) 48
Figura III.17 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3a (α >> β) (Tabela III.2) 48
Figura III.18 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3b (α < β) (Tabela III.2) 49
Figura III.19 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3c (α > β) (Tabela III.2) 49
Figura III.20 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3d (α <β) (Tabela III.2) 50
Figura III.21 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4a (α > β) (Tabela III.2) 50
Figura III.22 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4b (α < β) (Tabela III.2) 51
Figura III.23 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4b (α << β) (Tabela III.2) 51
Figura III.24 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4c (α > β) (Tabela III.2) 52
Figura III.25 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4d (α < β) (Tabela III.2) 52
Figura IV.1 – Desenho esquemático da disposição dos sensores no arame. 56
Figura IV.2 – Lixamento do arame na região de um dos sensores. 57
Figura 4.3 – Ferramentas e materiais básicos para a instalação dos sensores ópticos. 57
Figura IV.4 – Processo de posicionamento do sensor e delimitação da região de monitoração. 59
Figura IV.5 – Aplicação da resina adesiva. 59

Figura IV.6 – Configuração final da instalação do sensor de Bragg. 60
Figura IV.7 – Remoção do revestimento da fibra do conector óptico..... 60
Figura IV.8 – Fibra do sensor sendo clivada. 61
Figura IV.9 – Pontas das fibras posicionadas para a realização das emendas. 61
Figura IV.10 – Protetor de emendas sendo aquecido para fixação. 62
Figura IV.11 – Protetor de emendas instalado. 62
Figura IV.12 – Amostra após execução de toda instrumentação e emendas. 63
Figura IV.13 – Configuração do sistema utilizado para o monitoramento pelos sensores FBG. 64
Figura IV.14 – Configuração geral do ensaio. 65
Figura 4.15 - Curvamento até 3º pino..... 65
Figura IV.16 - Curvamento até 6º pino. 66
Figura IV.17 - Curvamento até 9º pino. 66
Figura IV.18 - Curvamento até 12º pino. 66
Figura 4.19 - Curvamento até 14º pino..... 67
Figura 4.20 - Alívio da carga de curvameto imposta no14º pino. 67
Figura 4.21 -Travamento do arame na base. 67
Figura 4.22 –Alívio após travamento do arame na base 68
Figura 4.23 - Curvamento até 14º pino. [23]..... 68
Figura IV.24 - Travamento do arame na base 69
Figura IV.25 - Posicionamento dos “strain gages” no corpo de prova – (a) detalhe e (b) visão geral. [23]..... 69
Figura IV.26 - Posicionamento esquemático dos “strain gages”. [23] 70
Figura IV.27 - Curvamento até 1º pino. 71
Figura IV.28 - Curvamento até 3º pino. 71
Figura IV.29 - Curvamento até 6º pino. 71
Figura V.1- Seção transversal retangular de cantos arrendondados. 72
Figura V.2 – Curvamento inicial αMy seguido de curvamento reverso βMy, em relação à um ponto..... 73
Figura V.3 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 3° pino..... 74
Figura V.4 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 6° pino..... 74
Figura V.5 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 9° pino..... 75
Figura V.6 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 12° pino..... 75

Figura V.7 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 14° pino..... 76
Figura V.8 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame após descarregamento elástico 76
Figura V.9 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame na base do dispositivo..... 77
Figura V.10 – Distribuição das deformações proporcionais ao longo do arame após alívio a partir da base do dispositivo..... 78
Figura V.11 – Gráfico comparativo das deformações, em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, na posição do 9° pino..... 79
Figura V.12 – Gráfico comparativo das deformações, em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, na posição do 12° pino..... 80
Figura V.13 – Gráfico comparativo das deformações, em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, na posição do 14° pino..... 81
Figura V.14 – Gráfico comparativo das deformações , em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, com a amostra curvada até a base do dispositivo..... 82
Figura V.15 – Gráfico comparativo das deformações , em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, após o alívio do arame a partir do curvamento até a base do dispositivo..... 83
Figura V.16 – Deformações, em função do escoamento do material, nos pontos 175 e 210 do arame após o curvamento até os pinos 1, 3 e 6..... 84
Figura V.17 – Deformações, em função do escoamento do material, nos pontos 175 e 210 do arame após o descarregamento elástico..... 85
Figura V.18 – Deformações, em função do escoamento do material, nos pontos 175 e 210 do arame após o assentamento na base do dispositivo..... 86
Figura V.19 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 1 88
Figura V.20 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 2 89
Figura V.21 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 3 90
Figura V.22 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 4 91
Figura V.23 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 5 92
Figura V.24 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 6 93
Figura V.25 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 7 94
Figura V.26 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 8 95
Figura V.27– Gráfico tensão x deformação analítica/experimental para a sequência de curvamento 2 para um ponto da superfície da amostra..... 96

Figura V.28– Gráfico tensão x deformação analítica para a sequência de curvamento 2 para um ponto do interior da amostra. 97

Lista de Tabelas

Tabela II.1 – Possíveis modos de falha na região do terminal conector de um duto flexível [9] 19
Tabela III.1 – Possibilidades de curvaturas com um carregamento 42
Tabela III.2 – Possibilidades de curvaturas com carregamento inicial e reverso 43
Tabela IV.1 – Nomenclatura e disposição dos sensores nos equipamentos 55
Tabela IV.2 –Materiais para preparação superficial do arame..... 56
Tabela IV.3 – Materiais para instalação do conjunto sensor na amostra 58
Tabela V.1 – Dados geométricos, de material e variáveis básicas 72
Tabela V.2 – Sequência de curvamentos para análise das tensões residuais 87

Capítulo I Introdução

Com o crescente desafio de exploração do petróleo em lâminas d'água ultraprofundas, os dutos flexíveis ganharam espaço devido à sua capacidade de curvatura em relação à sua rigidez axial e integridade estrutural. Este tipo de duto possui instalação bastante simples e com custo reduzido quando comparado ao duto rígido.

Os dutos flexíveis podem ser utilizados em diversas aplicações como, na produção de óleo/gás, na injeção de água/gás, em transporte de óleo/gás semi-processado e em serviços de controle de fluidos. Dependendo da aplicação em que o duto flexível está sendo usado, existem os "Risers", os "Flowlines" e os "Jumpers".

Os "Flowlines" são dutos projetados para aplicações estáticas, os "Risers" para aplicações dinâmicas. Já os "Jumpers" são trechos curtos de dutos para aplicações tanto dinâmicas quanto estáticas e são geralmente utilizados para interligar duas unidades ou dois equipamentos.

O duto flexível possui uma complexidade estrutural baseada em multicamadas independentes de materiais tanto poliméricos quanto metálicos com funções variadas. Cada camada exerce uma função específica, tendo os materiais poliméricos função de vedação e os materiais metálicos de resistência mecânica da estrutura.

A camada responsável pela resistência à tração do duto é a armadura de tração, composta por arames de aço dispostos helicoidalmente em duas camadas em sentidos opostos. Essa camada necessita ser ancorada dentro do terminal conector do duto através do processo de montagem do mesmo e, para essa ancoragem, é necessário realizar uma curvatura acentuada nos arames aplicando-se altos níveis de deformação, gerando assim tensões residuais no material que, por sua vez, podem reduzir a vida à fadiga do duto.

A conexão de topo de tubos flexíveis com as unidades de exploração de petróleo é um ponto crítico em relação à vida em fadiga, já que a região é muito suscetível a altas tensões causadas por carregamentos estáticos e dinâmicos.

Como esses níveis de tensão e deformação não são conhecidos gera-se o interesse de aprofundar os estudos nessa área de conhecimento. Uma vez com esses dados, seria possível o aperfeiçoamento do dimensionamento do duto flexível à fadiga, gerando condições de projeto cada vez mais confiáveis.

Dentre as metodologias difundidas para o monitoramento e obtenção dos valores deformação resultantes nos materiais, neste trabalho, serão utilizados o métodos de extensometria elétrica por "strain gages" e o óptico da rede de Bragg, conhecido como "Fiber Bragg Grating" (FBG).

Esta dissertação tem como objetivo a medição das deformações residuais geradas nos arames da armadura de tração durante o processo de montagem do conector de um duto

flexível por intermédio da técnica de instrumentação ótica da rede de Bragg. É feita uma abordagem comparativa, com a instrumentação convencional com “strain gages”. E através de modelamento analitico são estimados a distribuição das tensões residuais nas seções transversais geradas nos ensaios.

Para tal, são realizados testes utilizando um dispositivo que simula uma montagem real de um arame onde são impostas curvaturas que geram distribuição de deformações compatíveis com a montagem real.om o crescente desafio de exploração do petróleo em lâminas d’água ultraprofundas, os dutos flexíveis ganharam espaço devido à sua capacidade de curvatura em relação à sua rigidez axial e integridade estrutural. Este tipo de duto possui instalação bastante simples e com custo reduzido quando comparado ao duto rígido.

Os dutos flexíveis podem ser utilizados em diversas aplicações como, na produção de óleo/gás, na injeção de água/gás, em transporte de óleo/gás semi-processado e em serviços de controle de fluidos. Dependendo da aplicação em que o duto flexível está sendo usado, existem os “Risers”, os “Flowlines” e os “Jumpers”.

Os “Flowlines” são dutos projetados para aplicações estáticas, os “Risers” para aplicações dinâmicas. Já os “Jumpers” são trechos curtos de dutos para aplicações tanto dinâmicas quanto estáticas e são geralmente utilizados para interligar duas unidades ou dois equipamentos.

O duto flexível possui uma complexidade estrutural baseada em multicamadas independentes de materiais tanto poliméricos quanto metálicos com funções variadas. Cada camada exerce uma função específica, tendo os materiais poliméricos função de vedação e os materiais metálicos de resistência mecânica da estrutura.

A camada responsável pela resistência à tração do duto é a armadura de tração, composta por arames de aço dispostos helicoidalmente em duas camadas em sentidos opostos. Essa camada necessita ser ancorada dentro do terminal conector do duto através do processo de montagem do mesmo e, para essa ancoragem, é necessário realizar uma curvatura acentuada nos arames aplicando-se altos níveis de deformação, gerando assim tensões residuais no material que, por sua vez, podem reduzir a vida à fadiga do duto.

A conexão de topo de tubos flexíveis com as unidades de exploração de petróleo é um ponto crítico em relação à vida em fadiga, já que a região é muito suscetível a altas tensões causadas por carregamentos estáticos e dinâmicos.

Como esses níveis de tensão e deformação não são conhecidos gera-se o interesse de aprofundar os estudos nessa área de conhecimento. Uma vez com esses dados, seria possível o aperfeiçoamento do dimensionamento do duto flexível à fadiga, gerando condições de projeto cada vez mais confiáveis.

Dentre as metodologias difundidas para o monitoramento e obtenção dos valores deformação resultantes nos materiais, neste trabalho, serão utilizados o métodos de

extensometria elétrica por “strain gages” e o óptico da rede de Bragg, conhecido como “Fiber Bragg Grating” (FBG).

Esta dissertação tem como objetivo a medição das deformações residuais geradas nos arames da armadura de tração durante o processo de montagem do conector de um duto flexível por intermédio da técnica de instrumentação ótica da rede de Bragg. É feita uma abordagem comparativa, com a instrumentação convencional com “strain gages”. E através de modelamento analitico são estimados a distribuição das tensões residuais nas seções transversais geradas nos ensaios.

Para tal, são realizados testes utilizando um dispositivo que simula uma montagem real de um arame onde são impostas curvaturas que geram distribuição de deformações compatíveis com a montagem real.

Capítulo II Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados todos os assuntos que envolvem esta dissertação, apresentando os principais conceitos da teoria que envolve as tensões residuais, e dos métodos de medição por extensometria óptica e elétrica.

Uma revisão bibliográfica de dutos flexíveis também é apresentada, detalhando as camadas internas, o conceito de terminal conector, assim como critérios de projeto e seus modos de falha.

II.1 A Dutos Flexíveis

Os dutos flexíveis são linhas que possuem a função de transportar fluídos através da interligação dos poços petrolíferos com unidades estacionárias de produção, as UEP's, popularmente chamadas de plataformas, com objetivo de transportar óleo, fluidos de injeção, água ou gás.

Estes dutos possuem estrutura multicamadas e se caracterizam pela relativa capacidade de atingir grandes curvaturas e, geralmente, de combinar alta rigidez axial e baixa rigidez à flexão. Por essas características o duto flexível possui vantagens em aplicações dinâmicas quando comparados ao duto rígido.

Um duto flexível possui construção composta de multicamadas tanto metálicas dispostas helicoidalmente, quanto poliméricas extrudadas não aderidas uma às outras. Cada camada da estrutura de um duto flexível possui características e função específicas.

Outra vantagem que o torna mais competitivo é o processo de instalação caracterizado por ser mais simples, rápido e com custos reduzidos se comparado aos sistemas convencionais de dutos rígidos. [1]

Existem dois tipos de dutos flexíveis, os dutos do tipo *"bonded"* (Figura II.1) e *"unbonded"* (Figura II.2). Os do tipo *"bonded"* se caracterizam por camadas aderidas umas as outras, onde as camadas impermeabilizantes ocupam os espaços entre as partes metálicas, não ocorrendo deslocamento relativo entre camadas. Já os do tipo *"unbonded"* se caracterizam pela interindependência entre as camadas, permintindo assim o movimento relativo entre elas. Neste último as camadas são montadas umas sobre as outras. Neste trabalho será dada ênfase em dutos flexíveis do tipo *"unbonded"*. [1]



Figura II.1 - Duto flexível do tipo “bonded”. [2]



Figura II.2 - Duto flexível do tipo “unbonded”. [3]

II.1.1 Tipos de Aplicações Offshore dos Dutos Flexíveis

Na configuração de exploração offshore existem vários tipos de aplicações dos dutos flexíveis, que vão diferenciar o projeto do duto, assim como sua disposição no sistema offshore.

As aplicações dos dutos flexíveis são divididas em estáticas e dinâmicas. Para ambas as aplicações os dutos flexíveis requerem longa vida útil, resistência mecânica, resistência a danos internos e externos, e para as aplicações dinâmicas o duto deve ter alta resistência à fadiga.

Dependendo de suas aplicações os dutos flexíveis podem ser conhecidos como, “Flowlines”, os “Risers”,e os “Jumpers”.

Os “Flowlines” são dutos projetados para aplicações estáticas no qual ficam dispostos no leito marinho interligando dois equipamentos submarinos, como, por exemplo, risers flexíveis ou rígidos, manifolds, árvores de natal ou quaisquer combinações entre estes equipamentos. Estes dutos simplificam as instalações e reduzem as cargas e momentos nas conexões.

A seguir são listados alguns exemplos onde o uso de Flowlines Flexíveis resulta na simplificação do projeto de instalação:

- Aplicações com leito marinho desigual para evitar preparação do mesmo;
- Situações envolvendo severos movimentos e danos ao flowline rígido por deslizamentos de terra, onde podem ser usadas algumas seções de flowline flexível para reduzir tal problema;
- Aplicações nos campos em que a localização do flowline altera com as características de produção do campo, no qual a recuperação e o reuso do Flowline podem ser necessários.
- Em utilização em águas profundas ou ambientes severos, onde a instalação de um tubo flexível é economicamente atrativa em relação ao duto rígido. [4]

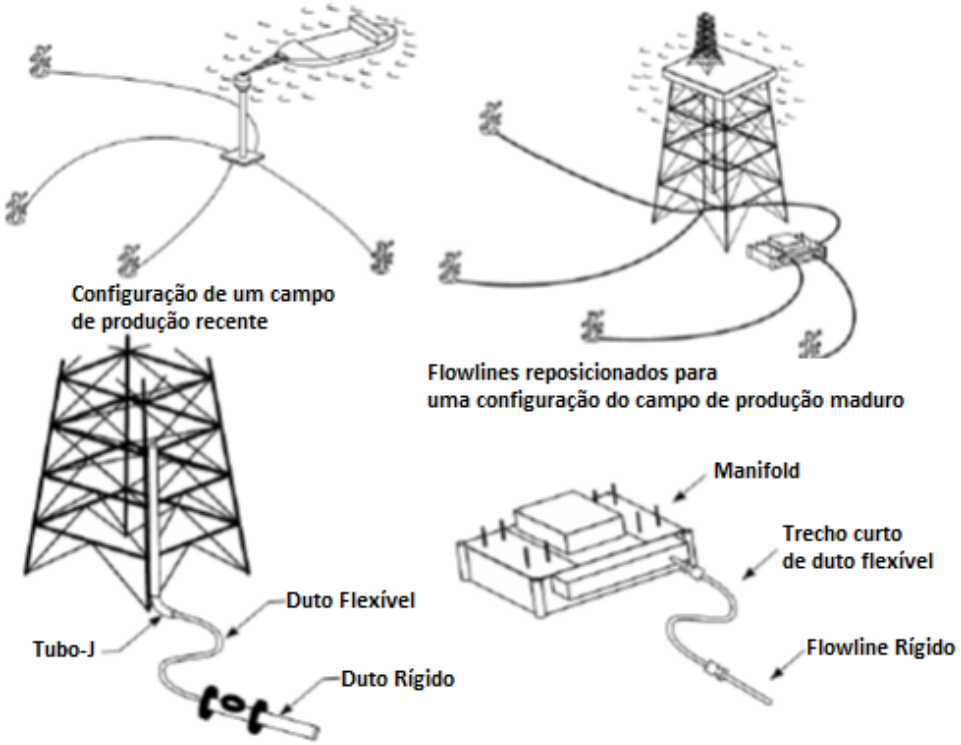


Figura II.3 - Dutos Flexíveis do tipo Flowlines para aplicações estáticas [4].

Os “Risers” são dutos projetados para as aplicações dinâmicas, onde há movimento relativo entre as duas extremidades de conexão. Estes devem resistir esforços dinâmicos, tanto de carga alternada de tração quanto de tração e flexão combinados e podem ser instalados em diversas formas, onde ficam dispostos na lâmina d’água conectados a

equipamentos e a unidades estacionárias de produção. A Figura 2.4 mostra exemplos de instalações de risers flexíveis. [4]

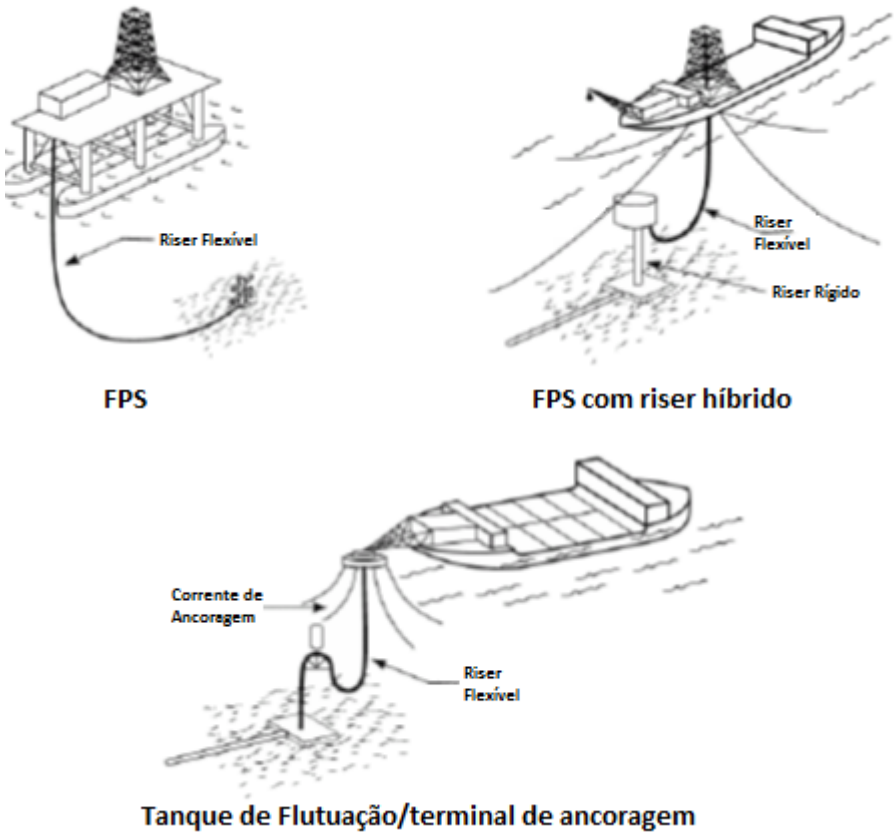


Figura II.4 - Risers para aplicações dinâmicas. [4]

Os trechos mais críticos de um riser em sua atuação em serviço são no topo, onde o riser é conectado à unidade de exploração, e no fundo onde toca o leito marinho. No trecho de topo são impostos elevados níveis de cargas de tração que alternam de valor de acordo com as condições do mar, caracterizando o efeito da fadiga. Já no trecho de fundo são impostas grandes curvaturas oriundas do lançamento do duto flexível, que aliado à pressão hidrostática externa da lâmina d'água geram cargas axiais de compressão nos arames da aramadura de tração, podendo ocorrer flambagem dos mesmos.

Os risers podem ser dispostos em algumas configurações como mostra a Figura 2.5.

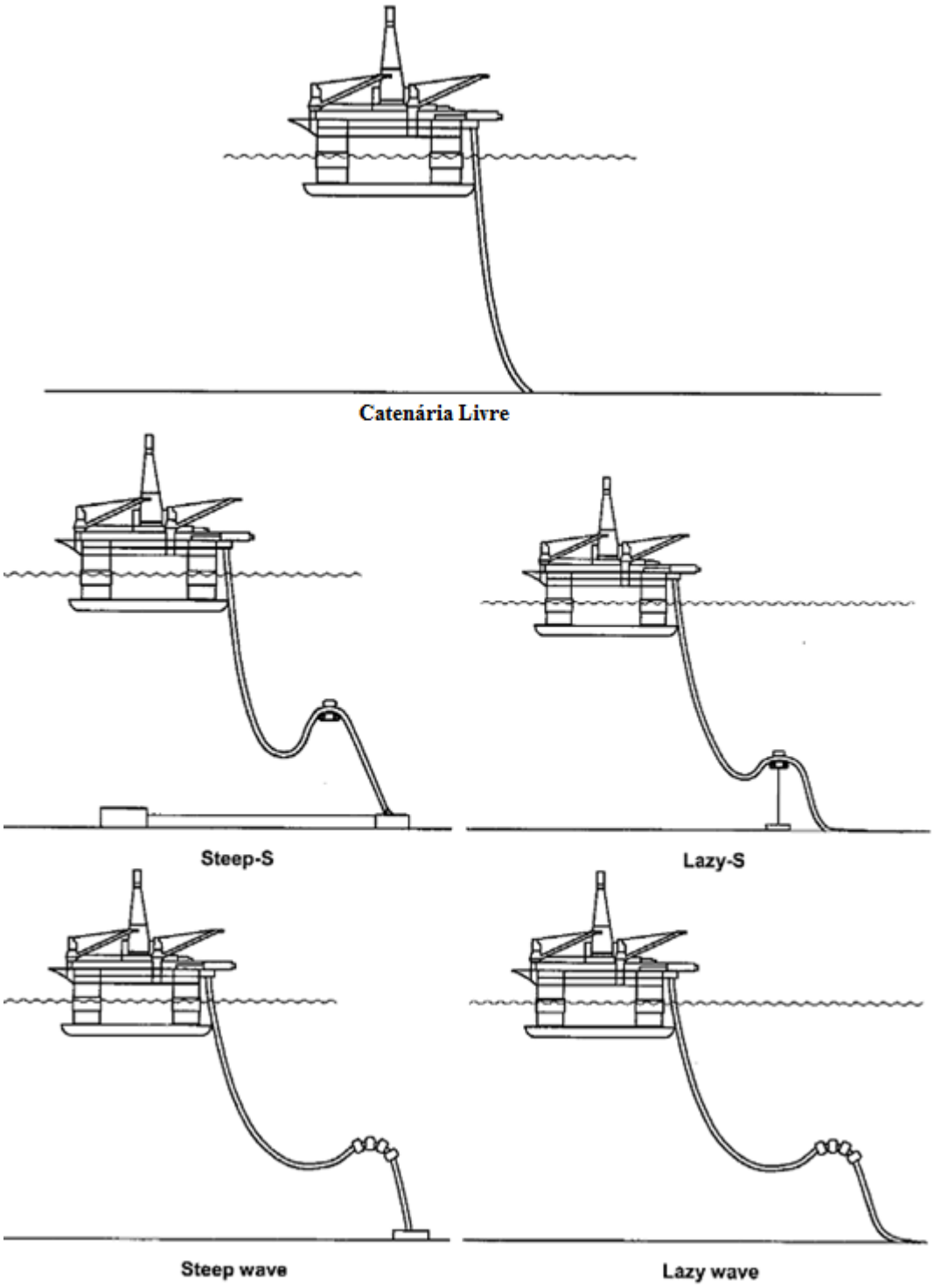


Figura II.5–Configurações de um Riser flexível no sistema offshore. [4]

Os jumpers flexíveis, que são trechos relativamente curtos de dutos, utilizados para fazer interligações entre equipamentos ou unidades, podem ter aplicação tanto estática como dinâmica. [4]

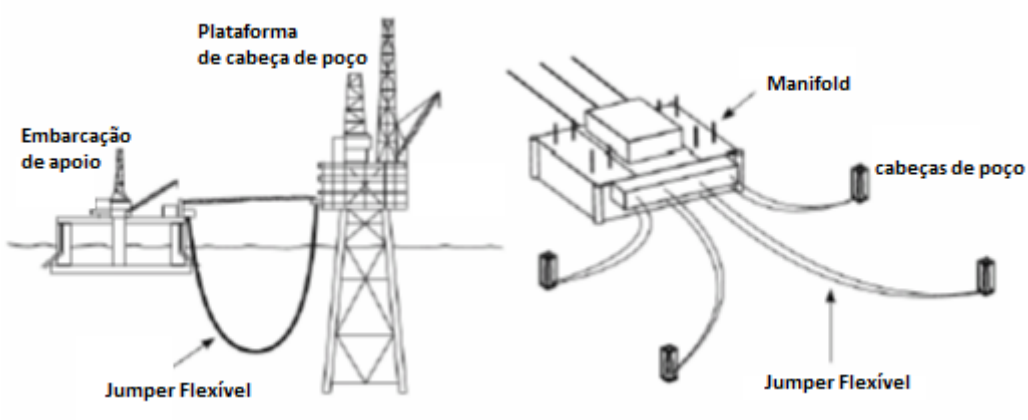


Figura II.6–Jumpers para aplicações de interligações entre unidades e equipamentos.[4]

Os dutos flexíveis possuem vantagens básicas comparação ao duto rígido, como elevada resistência à tração aliada à reduzida rigidez à flexão e um menor coeficiente de troca térmica. Essas características são geradas por suas camadas sobrepostas e concêntricas de diversos materiais. [5]

II.1.2 Camadas de um Tubo Flexível do Tipo “Unbonded

Um duto flexível do tipo “unbonded” possui diversas camadas independentes que exercem funções diferenciadas durante sua vida em serviço. O projeto de um duto flexível é dependente das condições de serviço que este será utilizado, o que compreende o dimensionamento de cada camada do duto.

Como as solicitações do duto flexível variam de acordo com o campo e condições de serviço em que o duto será utilizado, então, um critério de projeto é comumente adotado para se dimensionar corretamente o duto. Os estágios mais importantes do projeto de um duto flexível são [4]:

- Seleção de materiais: esta seleção é feita baseada nos ambientes interno e externo do duto em operação, ou seja, nas características dos fluidos transportados e do campo.
- Projeto da configuração da seção transversal: esta etapa esta baseada nas condições de serviço em que o duto flexível estará sujeito, dimensionando cada camada e definindo sua configuração para fabricação.
- Projeto da configuração do sistema: compreende o projeto de conectores e quaisquer requesitos para acomodar movimento relativo. Em alguns casos são necessárias análises térmicas e de estabilidade.
- Análise dinâmica (somente para aplicações dinâmicas): engloba as análises dinâmicas necessárias para o projeto de um riser, considerando as cargas dinâmicas impostas a ele, oriundas de condições normais e anormais de sua

vida em serviço. Para essas análises, geralmente são utilizados softwares de análises dinâmicas por elementos finitos.

- Projeto de detalhamento e vida em serviço: envolve projeto detalhado dos componentes auxiliares e proteção a corrosão. Análises de vida em serviço também são realizadas.
- Projeto de instalação: envolve escolha do navio, equipamentos, metodologia e condições de ambiente. Esta etapa requer também análises globais e locais para confirmar viabilidade do sistema de instalação escolhido. [4]

II.1.2.1 Carcaça

É a camada metálica que fica em contato com o fluido de trabalho e tem a função de resistência ao colapso do tubo submetido à pressão externa proveniente da lâmina d'água em que o mesmo é instalado. Esta camada também deve ser especificada em material resistente ao fluido de trabalho e é fabricada a partir da conformação de tiras planas até que atinjam o perfil helicoidal intertravado. A Figura II.7 e a Figura II.8 apresentam, respectivamente, a identificação da carcaça em uma estrutura padrão de duto flexível e o perfil final de intertravamento da camada após conformação.

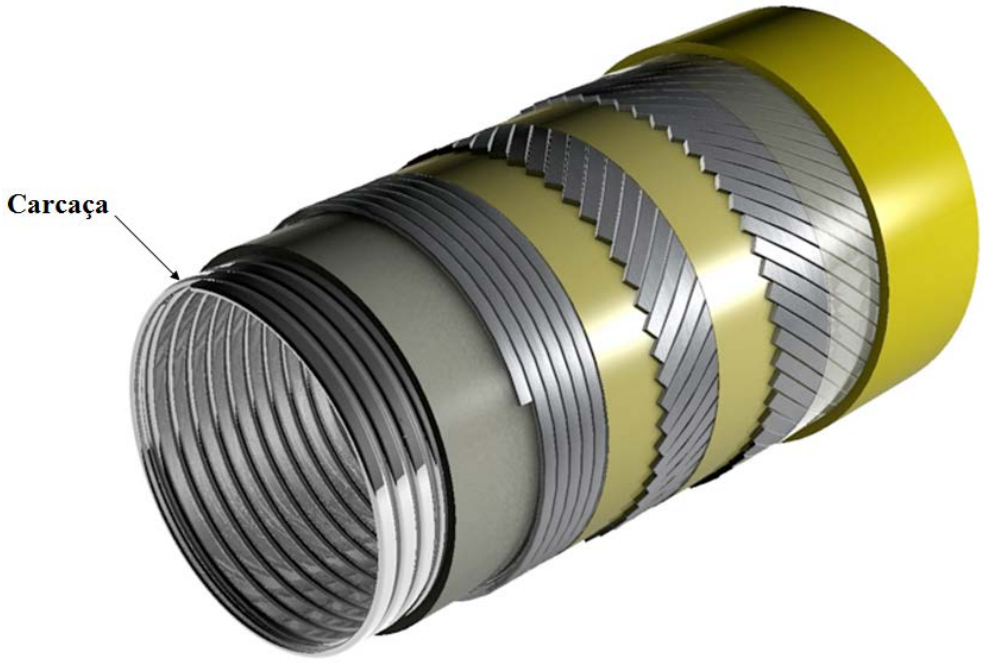


Figura II.7 – Carcaça. [6]



Figura II.8 – Perfil da carcaça após conformação [7]

II.1.2.2 Barreira de Vedação

É uma camada polimérica extrudada sobre a camada carcaça, que possui a função de tornar o duto estanque para o transporte do fluido de trabalho. Esta camada deve ser especificada para resistir químicamente ao fluido e térmicamente às condições de transporte. A Figura 2.9 apresenta a identificação da barreira de vedação em uma estrutura padrão de duto flexível.

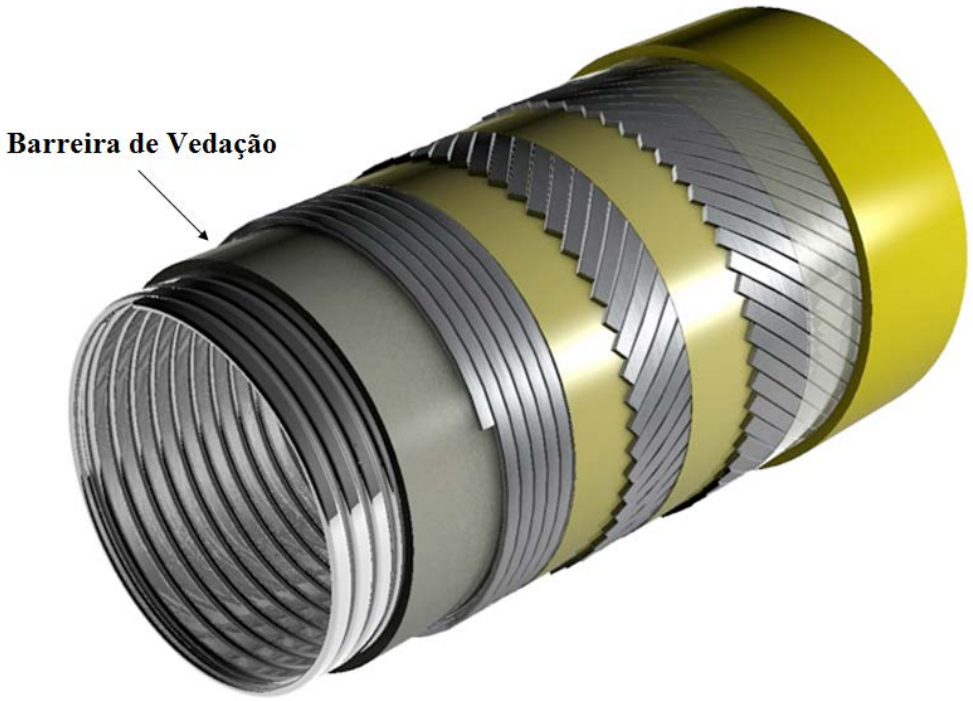


Figura II.9 – Barreira de vedação. [6]

II.1.2.3 Armadura de pressão

É uma camada metálica com perfil em “z”, conformada em hélice de forma que cada passo seja intertravado ao anterior. Esta possui a função de suporte da barreira de vedação, de modo a resistir as pressões internas de projeto, provenientes do fluido transportado. A Figura 2.10 e a Figura 2.11 apresentam, respectivamente, a identificação da armadura de pressão em uma estrutura padrão de duto flexível e o perfil dos arames intertravados após conformação.

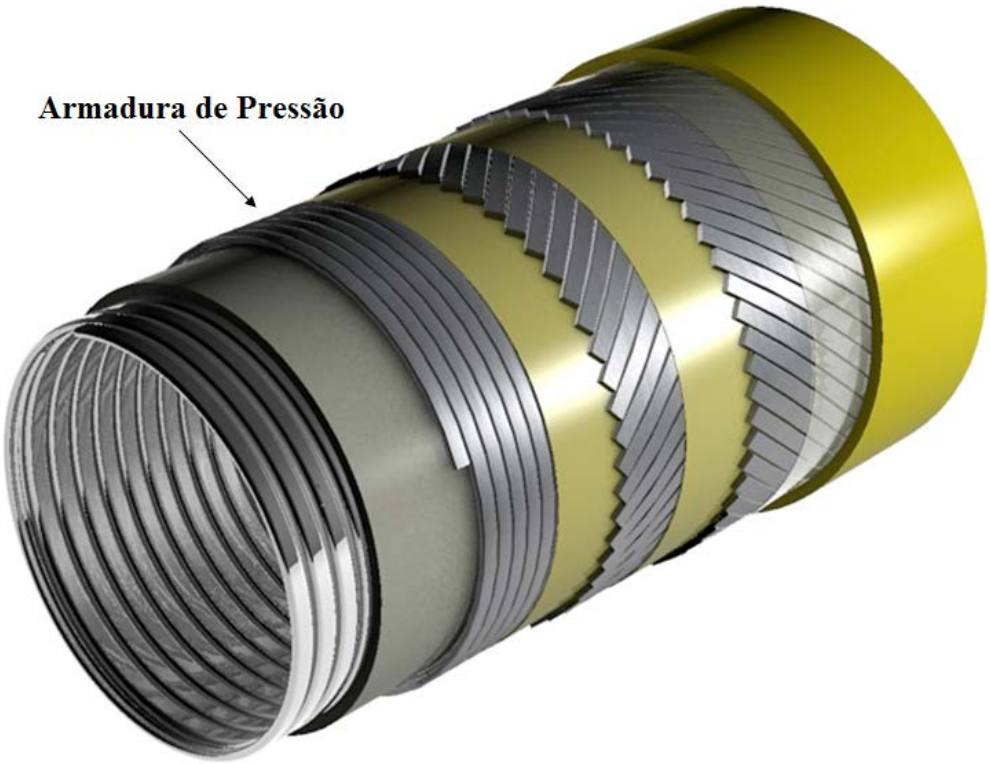


Figura II.10 – Armadura de pressão. [6]

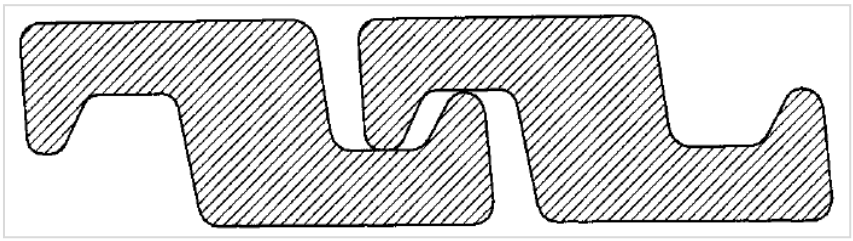


Figura II.11 – Intertravamento da armadura de pressão. [7]

II.1.2.4 Armadura de Tração

As armaduras de tração são camadas compostas por arames de aço carbono com perfil retangular com bordas arendodas, dispostos helicoidalmente no duto flexível. Estas possuem função de resistir aos carregamentos axiais trativos dinâmicos impostos aos risers, cujo modo de falha é caracteristico de ruptura dos arames por fadiga, e também os carregamentos axiais compressivos, cujo modo de falha pode ser caracterizado por flambagem da camada durante instalação. A disposição helicoidal de cada camada da armadura de tração é feita em sentidos opostas, com uma fração de preenchimento da seção equivalente entre as duas camadas opostas, de modo a balancear o duto para que quando seja carregado axialmente, não sofra torção. A Figura 2.12 apresenta a identificação das armaduras de tração em uma estrutura padrão de duto flexível.

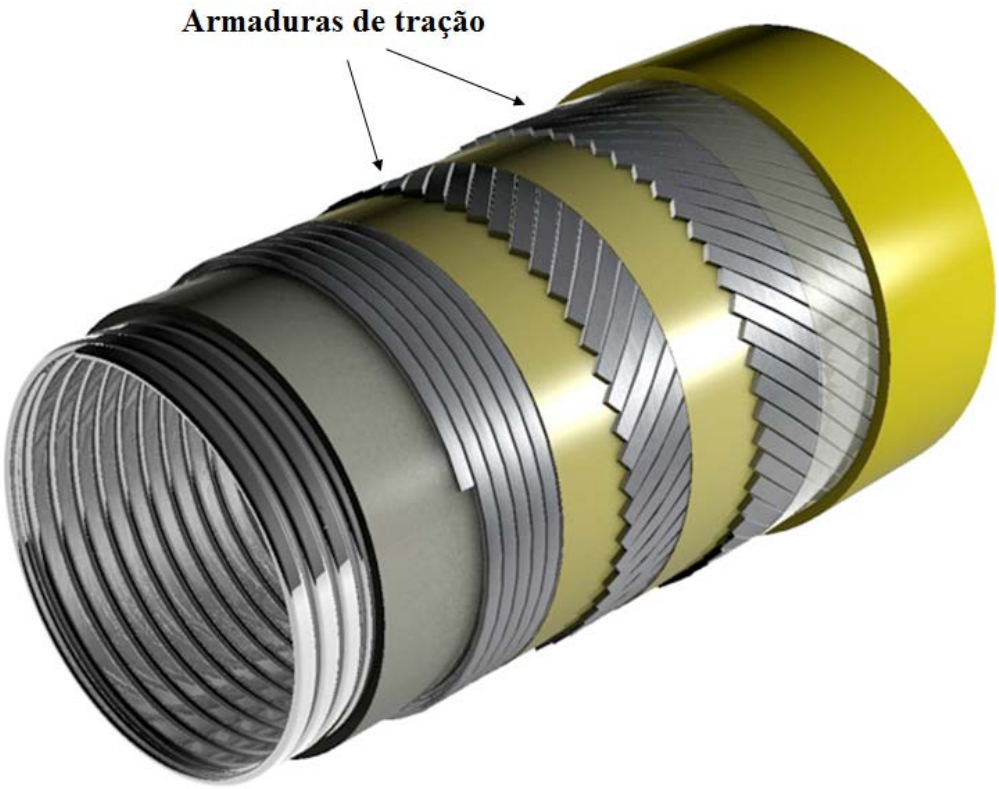


Figura II.12 – Armadura de tração. [6]

II.1.2.5 Fitas de alta resistência

As fitas de alta resistência são aplicadas sobre as camadas armaduras de tração com a finalidade de aumentar a resistência destas à flambagem radial (modo de falha comumente chamado de “birdcaging”) quando submetidas às cargas compressivas durante a instalação de um duto flexível. Outra função das fitas de alta resistência é a de evitar o desgaste por atrito entre as armaduras de tração. A Figura 2.13 apresenta a identificação das fitas de alta resistência em uma estrutura de um duto flexível.

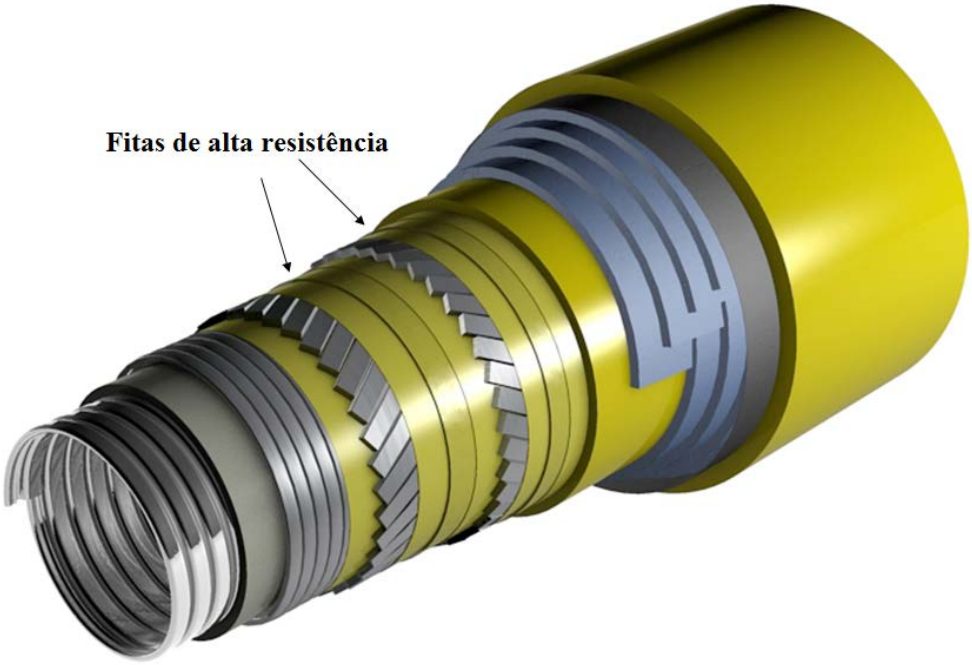


Figura II.13 - Fitas de alta resistência. [8]

II.1.2.6 Isolamento térmico

As camadas de isolamento térmico possuem a função de reduzir a troca térmica entre o meio interno no duto e o meio externo. Esta necessidade se dá pelo fato de que em algumas situações o petróleo pode parafinar pela redução de calor oriunda da troca térmica entre os meios, assim, com a utilização dessas camadas evita-se a perda excessiva de calor pela parede do duto. A Figura 2.14 apresenta a identificação das camadas de isolamento térmico em uma estrutura de um duto flexível.

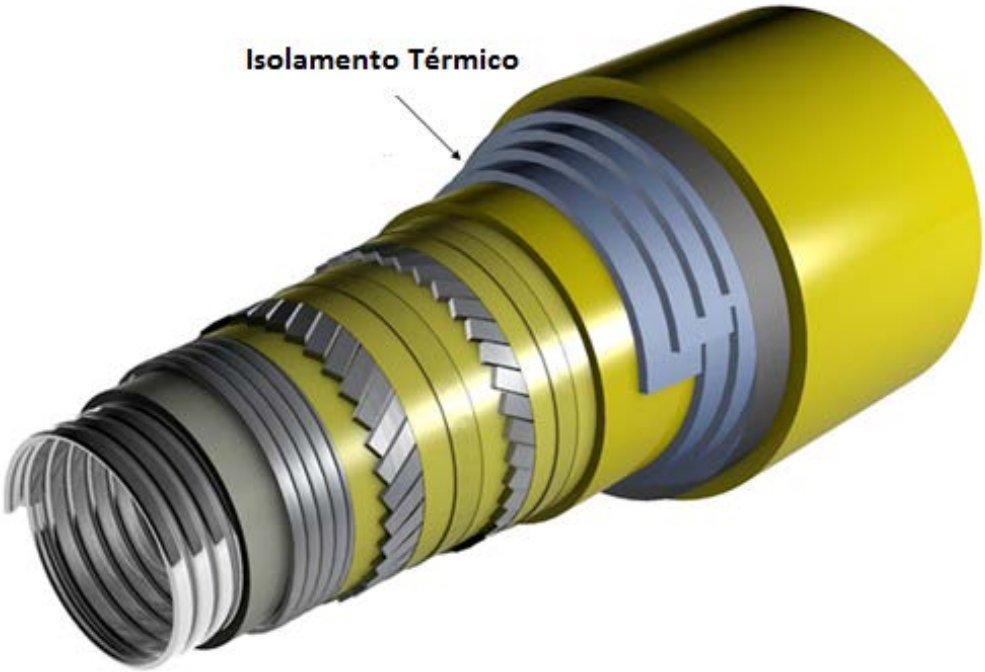


Figura II.14 - Isolamento térmico. [8]

II.1.2.7 Capa externa

A capa externa é uma camada polimérica extrudada que possui a função de proteção mecânica para o duto flexível, garantindo também a estanqueidade deste contra entrada de água do mar para o espaço anular do duto. A Figura 2.15 apresenta a identificação da capa externa em uma estrutura padrão de duto flexível.

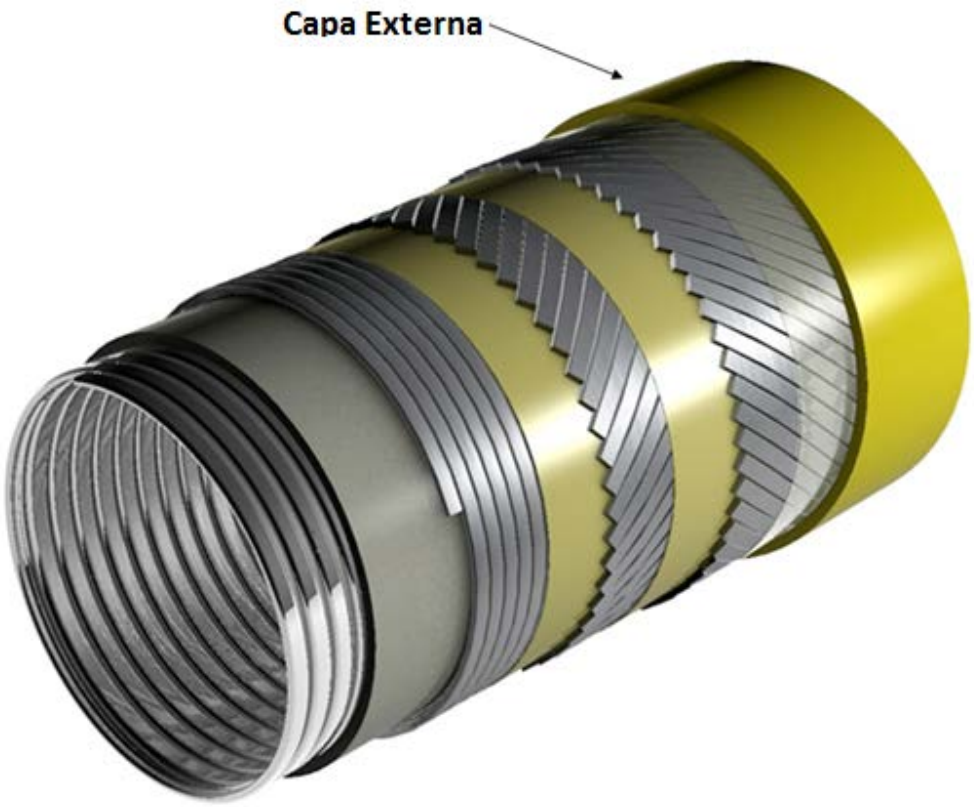


Figura II.15 - Capa externa. [6]

II.1.3 Terminal Conector e seus modos de falha

O terminal conector é um componente do duto flexível que tem a função de interligação do próprio duto com unidades de exploração, com outros dutos ou com outros equipamentos que compõem a exploração offshore de petróleo.

O projeto de um terminal conector deve prever a estanqueidade do duto flexível quanto ao fluido transportado, assim como a ancoragem e sustentação estrutural do duto resistindo aos carregamentos transferidos da tubulação para o sistema de conexão.

A interação entre as diversas camadas do duto dentro de um terminal conector requer a adição de acessórios com diferentes funções para que se tenha a acomodação de cada camada do duto flexível individualmente dentro do conector. Dentre os acessórios existentes em um terminal conector estão, selos, luvas e acessórios para ancoragem. [4]

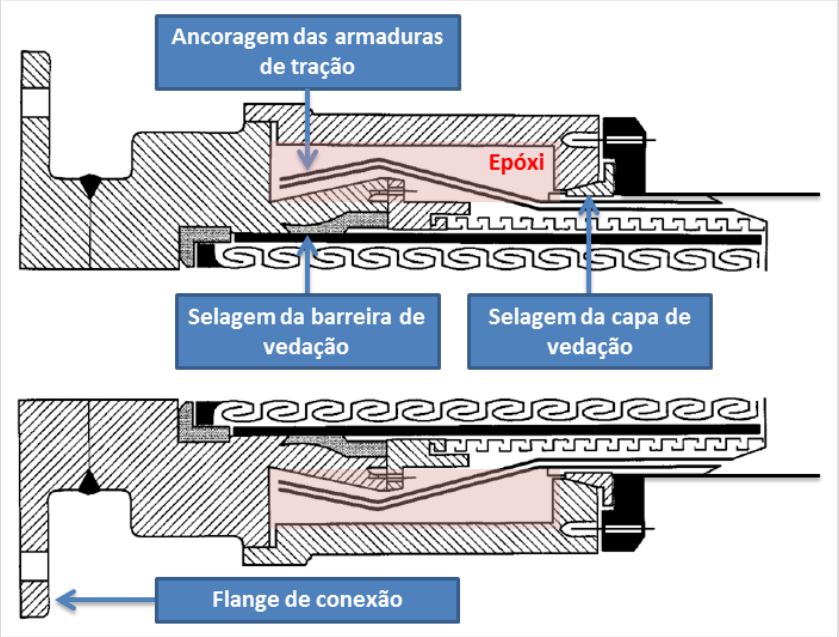


Figura II.16 – Conector. [7]

Os dutos flexíveis apresentam uma grande gama de possibilidades de falha uma vez que possuem diversos materiais empregados e uma complexa interação entre suas diversas camadas. Estes modos de falha podem estar relacionados à uma camada isolada, à mais de uma camada ao mesmo tempo ou até ao próprio terminal conector. [9]

A API 17B (2008) [4], reserva um subitem que descreve os possíveis modos de falha na região do terminal conector de um duto flexível. Neste trecho da norma é apresentada uma tabela que faz associação entre potenciais defeitos em aplicações dinâmicas e estáticas, as respectivas consequências e as suas possíveis causas/mecanismos de falha. Uma vez que o terminal conector requer uma atenção especial, foi feita uma adaptação de parte do descritivo dos possíveis modos de falha, que podem ser vistos na Tabela II.1.

Tabela II.1 – Possíveis modos de falha na região do terminal conector de um duto flexível [9]

Camada do Duto	Defeito	Conseqüência	Possíveis Causas de Falhas
TERMINAL CONECTOR (END FITTING)	1 Camada de pressão interna rompida	Vazamento do interior para o anular, falha.	a. Perda da aderência (deformação da carcaça) b. Ruptura c. Contração da camada devido a ciclos de temperatura d. Deformação (Creep)
	2 Armadura de tração rompida (todos os arames)	Falha, ruptura.	a. Ruptura do arame dentro do terminal conector b. Falha no Epóxi (em serviço ácido) c. Falha no Epóxi (envelhecimento por alta temperatura) d. Perda de aderência e. Excesso de tração
	3 Camada externa rompida	Entrada de água do mar (pressão hidrostática)	a. Pressão adcional no anular b. Deformação (Creep)
	4 Bloqueio da válvula de respiro	Ruptura da camada externa (se ocorrer o bloqueio de todas as válvulas de respiro)	a. Fragmentos b. Crescimento de incrustações marinhas c. Mecanismos de falha (corrosão, etc.) d. Falhas de fabricação
	5 Vazamento na válvula de respiro	Possível entrada de água do mar no anular.	a. Corrosão b. Falha de mecanismos (falha no selo, etc.)
	6 Ruptura individual dos arames da armadura de tração	Capacidade estrutural reduzida	a. Ruptura do arame dentro do terminal conector b. Falha no Epóxi (em serviço ácido) c. Falha no Epóxi (envelhecimento por alta temperatura) d. Perda de aderência e. Excesso de tração
	7 Falha no sistema de selagem (aneis de selagem, etc.)	Vazamento de dentro para o anular, válvula de bloqueio possivelmente bloqueada, Possível rompimento da camada externa e vazamento no duto (falha)	a. Erros na fabricação – selos ineficientes da camada interna de pressão b. Projeto inadequado c. Excesso de pressão interna d. Excesso de tração ou torção e. Instalação inadequada f. Temperatura excessivamente baixa de produção
	8 Trincamento ou ruptura da armadura de pressão ou da barreira de pressão	Possível ruptura do duto ou reduzida capacidade de pressão	a. Corrosão b. Trincamento por H_2S c. Trincamento por indução de hidrogênio d. Excesso de pressão interna e. Falha na camada da armadura de tração (excesso de tração ou pressão interna)
	9 Trincamento ou ruptura da armadura de tração	Possível ruptura progressiva e falha do duto ou reduzida capacidade estrutural	a. Corrosão b. Trincamento por H_2S c. Trincamento por indução de hidrogênio d. Excesso de pressão interna e. Falha na camada da armadura de tração (excesso de tração ou pressão interna)
	10 Falha estrutural do terminal conector ou da flange	Ruptura do duto/falha catastrófica	a. Excesso de pressão interna b. Projeto inadequado c. Excesso de cargas de tração ou torção d. Colapso hidrostático e. Corrosão/degradação química f. Fratura frágil g. Fadiga

II.2 Tensões Residuais

Tensões residuais são usualmente definidas como as tensões elásticas presentes em um material quando este não está submetido a tensões externas ou gradientes de temperatura, onde estas se encontram em equilíbrio no corpo sendo o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos é zero. Essas tensões existem em praticamente todo material rígido sendo ele metálico ou não como, por exemplo, madeira, polímero, vidro, cerâmico, entre outros e estas se superpõem às cargas de serviço, podendo ser benéficas ou deletérias às estruturas e equipamentos, dependendo de sua magnitude, sinal e distribuição.[10]

Existem três tipos principais de tensões residuais:

- Tensões residuais do tipo 1 ou macro tensões residuais: são tensões distribuídas ao longo do material por vários grãos.
- Tensões residuais do tipo 2 ou micro tensões residuais: são tensões presentes em um grão total ou parcialmente, sendo originada por deformação plástica intergranular.
- Tensões residuais do tipo 3 ou micro tensões localizadas: são tensões sub-microscópicas que alcançam distâncias interatômicas e que são originadas por defeitos cristalinos e movimentação de discordâncias. [12]

II.2.1 Origem das Tensões Residuais

Em geral, as tensões residuais são geradas por deformações plásticas, não homogênea se são introduzidas nos materiais durante os processos de fabricação. A produção de tensões residuais está relacionada a processos químicos, mecânicos e térmicos como, soldagem, usinagem, fundição, conformação mecânica, tratamentos térmicos, tratamentos termoquímicos, entre outros. [13]

Este trabalho tem como principal abordagem o processo de conformação mecânica por flexão pura, originando tensões residuais do tipo 1.

II.2.2 Efeitos das Tensões Residuais

Avaliação das tensões residuais em componentes mecânicos é muito importante para o aprimoramento do projeto dos mesmos, uma vez que essas tensões afetam diretamente as propriedades do material em relação à resistência a fadiga, resistência a corrosão e resistência a ruptura e que há vários casos em que as tensões residuais foram a causa principal de falha de equipamentos, sendo essas na maioria das vezes não quantificadas desde a fabricação até

a falha. Ao conhecer como essas tensões estão distribuídas nos materiais, estas podem até se tornar favoráveis à vida em serviço dos componentes mecânicos. [13]

O estado de tensões residuais está sempre em equilíbrio, tendo a resultante das forças e de momentos produzidos igual a zero e seu valor máximo em módulo igual a tensão de escoamento do material. Uma vez atingidos valores acima da tensão de escoamento, ocorrerá deformação plástica no material e haverá uma redistribuição das tensões residuais com valores até o limite de escoamento. [11]

Quando um componente é submetido à um campo de tensões residuais elástico σR, e a este é superposto um campo de tensões de serviço σS (tensões externas oriundas por carregamentos de serviço para o qual o componente foi projetado), o campo de tensão real a que este componente está submetido é caracterizado pela a soma das duas distribuições de tensões mencionadas σR+σS, conforme esquematicamente exemplificado na Figura 2.17.

Caso esta tensão residual seja trativa quando somada a uma tensão trativa de serviço, o componente será localmente sobrecarregado, podendo ocasionar redução da vida em fadiga deste componente. Se a tensão residual for compressiva, a tensão real será reduzida localmente, inibindo a iniciação e a propagação de trincas de fadiga. [11]

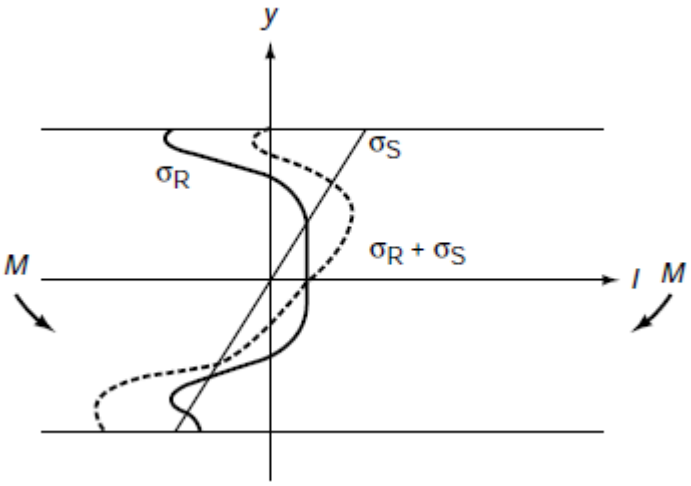


Figura II.17–Superposição das tensões residuais e das tensões de serviço. [11]

A Figura II.18 mostra esquematicamente em que propriedades dos materiais as tensões residuais exercem influência, afetando assim o desempenho destes. [11]

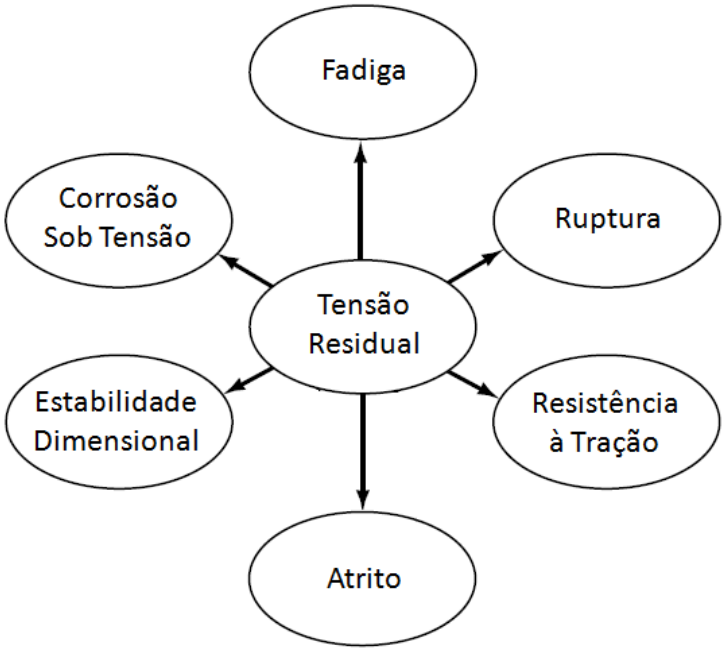


Figura II.18–Propriedades dos materiais afetadas pela tensão residual [11]

Em contrapartida, as tensões residuais podem ter o seu lado benéfico para os materiais. Uma vez essas tensões sendo compressivas na superfície de componentes mecânicos, resulta em uma diminuição local da tensão real trativa aplicada, ocorrendo uma inibição da iniciação e propagação de trincas de fadiga, reforçando assim a resistência à fadiga, a resistência à corrosão sob-tensão e a resistência à fadiga intragranular.

Tensões residuais compressivas podem ser introduzidas por processos mecânicos ou tratamentos térmicos e são bastante empregadas em elementos vitais de projeto, sujeitos à condições severas de serviço. Dentre os processos térmicos utilizados para introdução de tensões residuais compressivas na superfície de componentes mecânicos estão a têmpera e o tratamento a laser. Estes processos geram tensões compressivas na superfície provenientes do resfriamento térmico, da deformação plástica e de mudanças de volume devido a transformações de fase. Já dentre os processos mecânicos estão a sobrecarga do equipamento, a autofretagem, o jateamento por granalha e a expansão a frio. O princípio de introdução das tensões compressivas para os processos mecânicos consiste em gerar deformação plástica heterogênea, a fim de induzir o aparecimento de tensões trativas na superfície. Após o descarregamento do material, as camadas internas que se deformaram apenas elasticamente, impedem que as camadas externas continuem trativas, resultando assim tensões compressivas na superfície. [12]

II.2.2.1 Sobrecarga

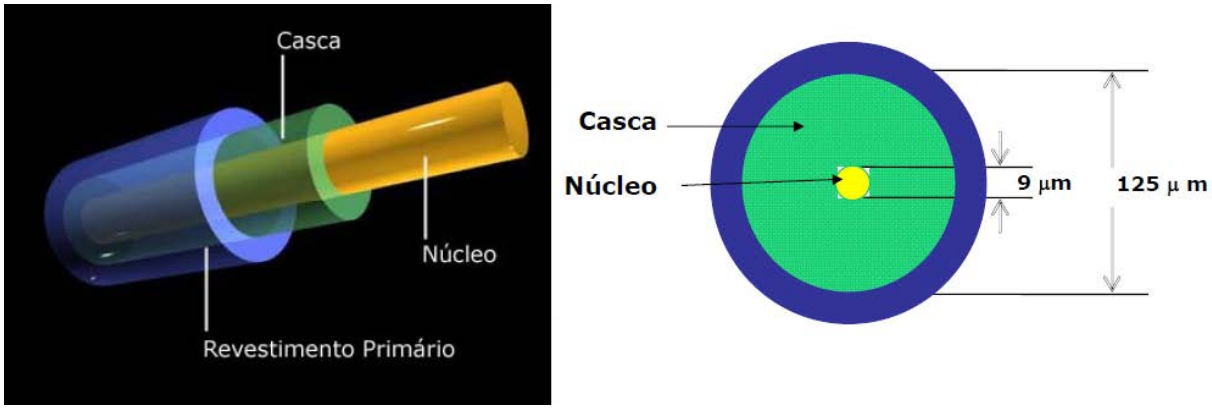
O procedimento de sobrecarga para inclusão de tensões residuais compressivas na superfície consiste em melhorar a capacidade elástica do componente através de sobrecarga no equipamento, carregando o componente além do seu limite elástico.

Um exemplo de tal emprego ocorre com uma simples barra de seção retangular sujeita ao curvamento, ao ser flexionada além do seu limite de escoamento, em condições de escoamento parcial, haverá deformação plástica na barra. Após remoção da carga, as fibras mais externas que foram deformadas em tração apresentarão tensões residuais compressivas, enquanto as fibras deformadas em compressão terão tensões residuais trativas. [14]

II.3 Redes de Bragg gravadas em fibras óticas

As Fibras ópticas são componentes cilíndricos que conduzem a potência luminosa induzida pelo emissor de luz, até o fotodetector. Em geral, são estruturas transparentes, flexíveis e compostas por dois materiais dielétricos.

Essas fibras são compostas por núcleo, casca e revestimento. O núcleo é a região central da fibra por onde a luz é conduzida, que em casos podem ter dimensões próximas a 10µm de diâmetro. Ao redor do núcleo está a casca, feita de material dielétrico, com índice de refração menor que o núcleo. Envolvendo a casca está o revestimento, feito de material polimérico, com função de proteção da fibra contra danos mecânicos e contra intempéries. A Figura II.19 mostra a composição da estrutura de uma fibra óptica. [15]



(a) (b)

Figura II.19– Estrutura de uma fibra óptica monomodo (SMF) - (a) em perspectiva e (b) seção transversal. [15]

As redes de Bragg, usualmente chamadas por FBG (fiber Bragg grating), são estruturas periódicas de modulação do índice de refração, ao longo do eixo de propagação da luz, criadas no núcleo de uma fibra óptica por exposição a um padrão óptico de interferência ultravioleta (UV). Por essa exposição geram-se perturbações periódicas longitudinais nos índices de refração ao longo do núcleo da fibra.

Estas redes são gravadas em fibras chamadas monomodo, que são usadas na construção de sensores sempre que se pretende uma sensibilidade elevada, ou quando é necessário caracterizar eficazmente a polarização, o comprimento de onda ou a fase.

II.3.1 Sensores à Rede de Bragg

O princípio básico de operação de uma FBG está baseado na alteração do comprimento de onda refletido, chamado “comprimento de onda de Bragg”, como uma função do mensurando, ou seja, temperatura e deformação. O comprimento de onda de Bragg, ou comprimento de onda refletido (λB), é relacionado ao índice de refração do material (n) e ao período da rede (Λ), pela equação:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \qquad \text{(II.1)}$$

Sistemas de sensores envolvendo tal técnica usualmente trabalham injetando luz dentro da fibra óptica a partir de uma fonte de espectro de banda larga, na qual parte do comprimento de onda é transmitido e parte é refletido pela rede, gerando assim um pico no espectro de largura de banda muito pequena. A Figura II.20 esquematiza o princípio de operação de um sensor baseado na técnica da rede de Bragg. [16]

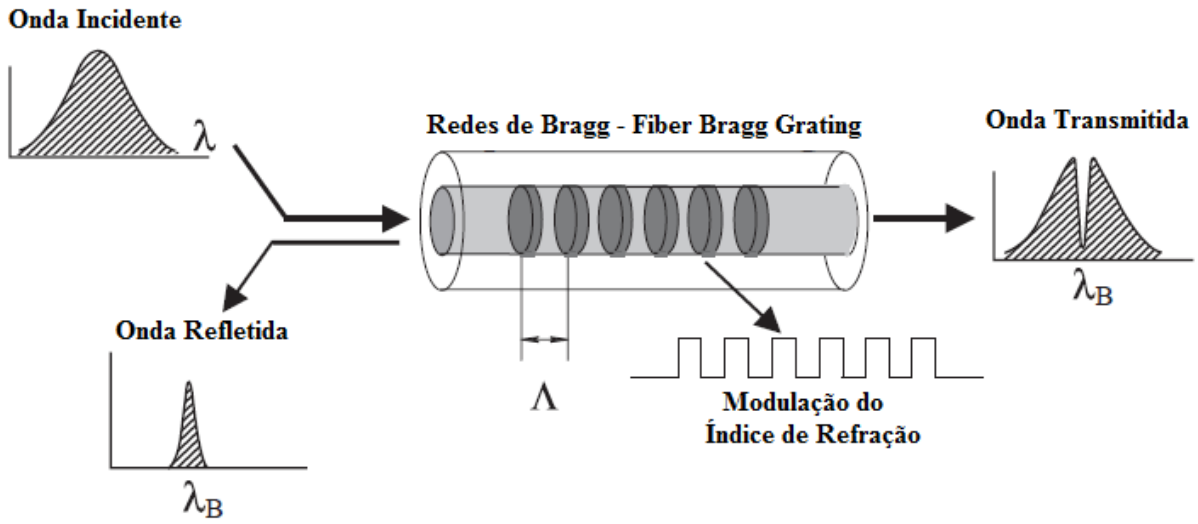


Figura II.20– Princípio de operação de um sensor baseado na técnica da Rede de Bragg. [16]

II.3.2 Monitoramento de Deformação por FBG

Um dos mais importantes potenciais de uso de sensores baseados na técnica da rede de Bragg é a capacidade de medição e monitoramento da deformação, podendo esta ser estática, semi-estática ou dinâmica. [17]

Quando se traciona uma fibra com um sensor de Bragg ocorre uma variação linear uniforme dos períodos de modulação e por consequência, uma variação do comprimento de onda refletido. Essa variação do comprimento de onda refletido tem uma relação linear com a deformação baseado na equação (II.2):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}} = k \cdot \varepsilon + \alpha \cdot \Delta T \qquad \text{(II.2)}$$

Onde:

$\Delta\lambda_B = \lambda_{B1} - \lambda_{B0} =$ variação do comprimento de onda refletido;

λ_{B0} = comprimento de onda refletido inicial, ou seja, sem estar tensionado;

k = gage factor, que geralmente tem o valor de 0.78;

ε = deformação

ΔT = variação da temperatura em K

α = variação do índice de refração

A porção $(k \cdot \varepsilon)$ da equação (II.2) descreve a influência na deformação causada pela força aplicada ε_F e $(\alpha \cdot \Delta T)$ pela temperatura ε_T.

A Figura II.21 exemplifica como ocorre a variação do comprimento de onda refletido medida que a fibra com sensor de Bragg é tracionada, sendo esta variação relacionada linearmente com a deformação.

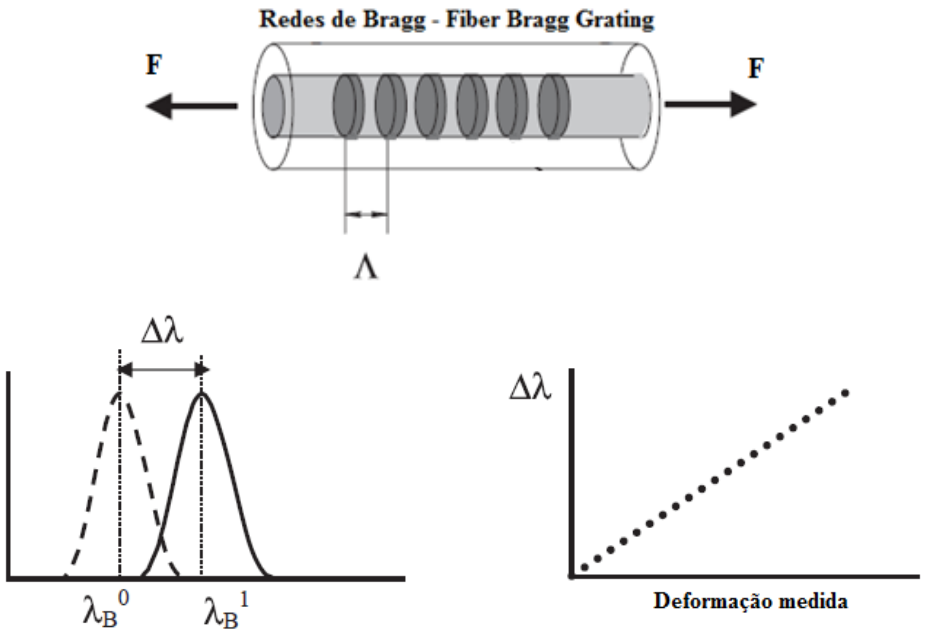


Figura II.21 – Relação entre a força aplicada, a variação do comprimento de onda refletido e deformação [16]

A utilização das fibras ópticas como sensores, apresenta algumas vantagens como a possibilidade de se multiplexar os sinais de vários sensores, inclusive de grandezas diferentes, e a realização de medidas continuamente ao longo da fibra sensora.

Nos últimos anos esta tecnica está sendo crescentemente utilizada com a finalidade de monitoramento de rupturas de arames da armadura de tração de dutos flexíveis.

Dentre as publicações relacionadas à este tipo de tema, destaca-se a contribuição de Braga *et al.* [18], que desenvolveu acelerômetros baseados no sensoriamento a rede de Bragg para a identificação de rupturas nas armaduras de tração em um ensaio de corrosão-fadiga, onde foi possível identificar o sinal referente ao evento de ruptura.

Outra contribuição com o mesmo objetivo, onde Corrignan *et al* [19] desenvolveu despositivos de material compósito com sensores embutidos baseados na tecnologia da rede de Bragg. Estes dispositivos envolvem o duto flexível e se mostraram capazes, por meio de teste, de monitorar alongamento axial e torção permanentes do duto originadas por rupturas de arames da armadura de tração. A Figura II.22 a seguir mostra os despositivos de monitoramento de alongamento (a) e de torção (b).



(a) (b)

Figura II.22 – Protótipos dos despositivos de monitormanto de alongamento axial (a) e de torção (b) [19]

Recentemente, destaca-se ainda a contribuição de Weppenaar N. et al [20], que desenvolveu e patentiou pela NOV Flexibles uma maneira alternativa de instalação de sensores de Bragg para o monitoramento de rupturas de arames. Neste desenvolvimento os sensores são instalados em ambas laterais dos arames, conforme ilustra a figura a seguir.

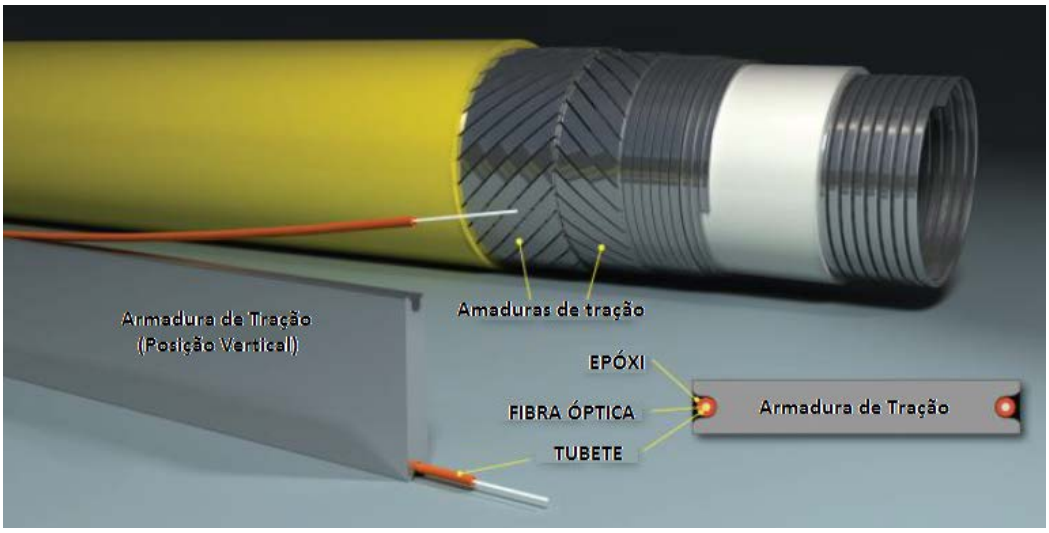


Figura II.23 – Sensores embutidos no arame da armadura de tração do duto flexível [20]

Esses sensores são instalados em 8 arames de cada camada, distribuidos igualmente pela circunferência. E em pontos pontos mais importantes relacionados à fadiga do duto flexível [20].

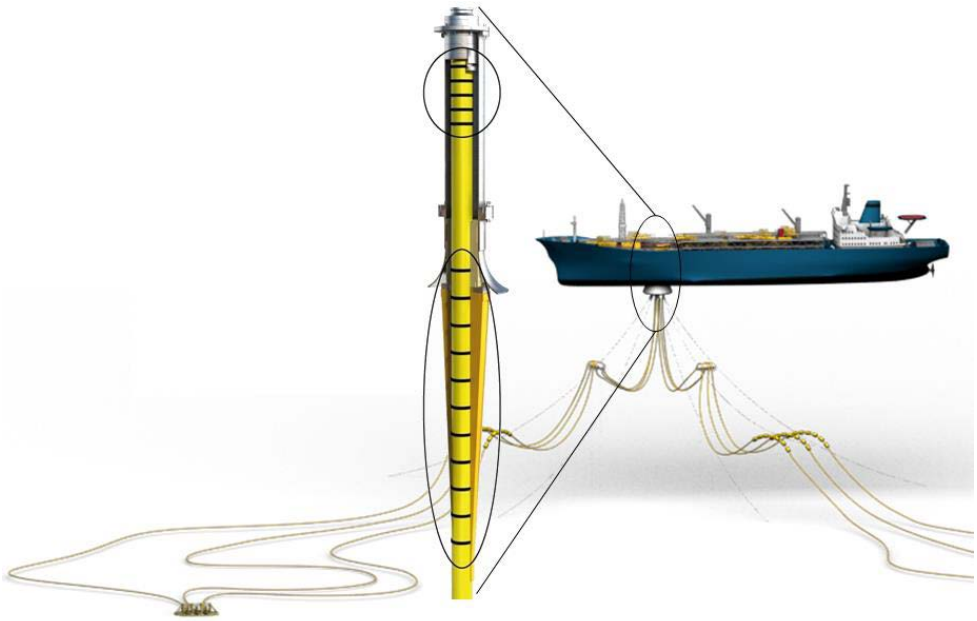


Figura II.24 – Pontos chaves de sensoriamento no riser de topo [20]

II.4 Extensometria Elétrica –“ Strain Gages”

Extensômetros elétricos de resistência, comumente denominados “strain gages”, são dispositivos constituídos por um fio muito fino (grelha) colado sobre uma folha também fina designada por suporte do extensômetro e também terminais que permitem que os cabos de ligação com o equipamento de aquisição de sinais sejam soldados. Seu funcionamento se baseia na característica fundamental dos condutores elétricos, na qual a resistência elétrica varia em função da deformação a que o condutor está sujeito. A expressão à seguir descreve essa relação.

$$\frac{\Delta R}{R}\alpha\frac{\Delta L}{L} \tag{II.3}$$

Onde, R é a resistência elétrica do fio indeformado, em Ω, L é o comprimento do fio indeformado, em m, ΔL é a variação do comprimento do fio, em m, ΔR é a variação da resistência elétrica, em Ω.

A resistência elétrica de um fio de metal é dada pela expressão II.4.

$$R = \rho\frac{L}{A} \tag{II.4}$$

Onde, ρ é o coeficiente de resistividade do material, em $\Omega.m$, A é a área da seção transversal, em m^2 e L é o comprimento do fio, em m.

Desta forma tem-se que para a faixa de interesse de pequenas deformações, a resistência elétrica varia linearmente com o alongamento, permitindo a modificação da expressão anterior para:

$$\frac{\Delta R}{R} = GF\varepsilon \tag{II.5}$$

Onde, GF é a constante característica dos extensômetros (“gage factor”) e ε é a deformação, m/m.

II.4.1 Ponte de Wheatstone

O extensômetro propriamente dito poderá ser encarado como uma simples resistência passiva, alimentada por uma fonte de alimentação adequada. As variações de resistência causadas por deformações mecânicas do extensômetro são medidas num circuito do tipo

potenciométrico ou ponte de Wheatstone, que produz um determinado sinal de saída em termos de diferença de potencial. Esse sinal é amplificado, lido e/ou registado, depois de convenientemente manipulado por forma a representar diretamente as grandezas que se pretendem ler. A ponte de Wheastone é um circuito muito utilizado para medir a variação de resistência sofrida por um extensômetro quando é submetido a determinada deformação. Então, a expressão que descreve a relacao da saida diferencial de tensao Vo e tensao de excitação Vi para o circuito da ponte de Wheatstone representada na Figura II-25 é:

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{R+\Delta R+2R_l}{2R+\Delta R+2R_l} - \frac{R}{2R} \qquad \text{(II.6)}$$

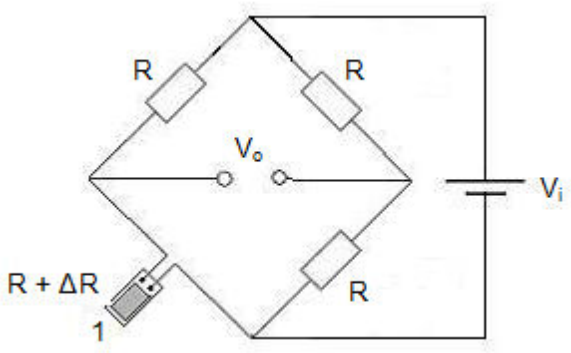


Figura II-25 – Ponte de Wheatstone [21]

II.4.1.1 Circuito ¼ de ponte com 3 fios

O circuito de ¼ de ponte com 3 fios surge para eliminar a atenuação e/ou pertubações de sinal devido à distância entre o sensor e o equipamento de aquisição de sinais. Para minimizar esses efeitos deletérios, inerentes da extensometria, é necessário aumentar o braço da ponte, ou seja, da resistência elétrica do circuito, devido ao comprimento do fio e a variação da temperatura. Com o circuito de 3 fios, os erros nas leituras das deformações devidas ao comprimento do fio e variação da temperatura ao longo do comprimento do fio podem ser minimizados, conforme exemplificado na Figura II-26:

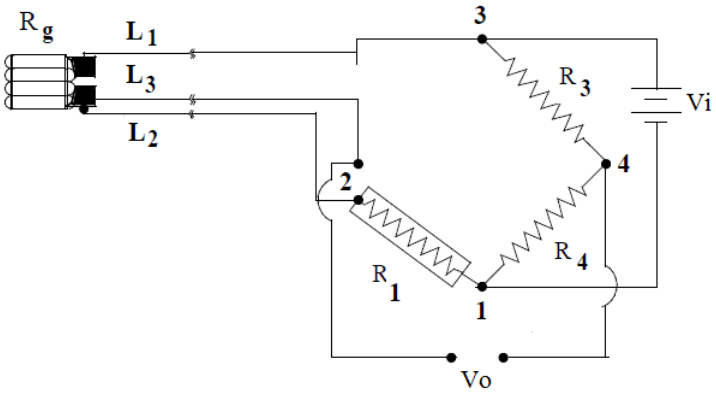


Figura II-26 – Circuito ¼ de ponte com três fios. [22]

A expressão que relaciona o sinal de saída ¼ de ponte de Wheatstone com três fios Vo com a deformação existente ε, pode ser aproximada para (II.7).

$$\varepsilon_{medido} \approx \frac{4}{GF\ V_i} V_o \qquad \text{(II.7)}$$

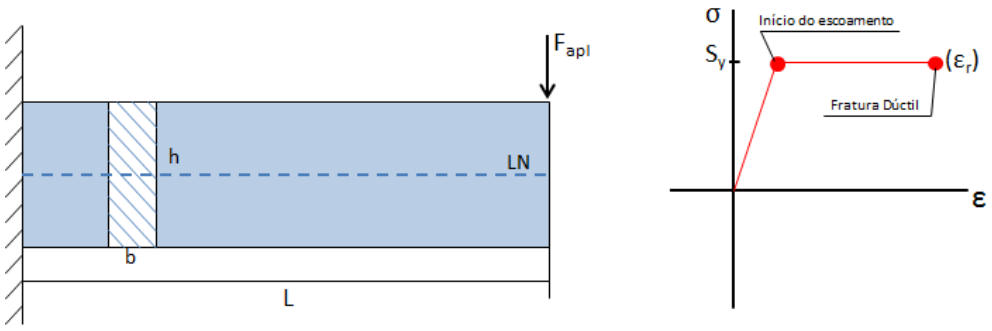
Onde, GF é o “gage factor” que tem valor nominal em torno de 2.

Capítulo III Modelo Analítico de Distribuição de Tensões residuais

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do modelo analítico utilizado neste trabalho para estimar a distribuição de tensões residuais, mostrando a introdução teórica ao modelo, apresentando detalhadamente também todas as variáveis e expressões para tratamento dos dados experimentais necessarios para a estimativa das tensões residuais.

III.1 Introdução

O modelo analítico utilizado para os ensaios deste trabalho utiliza uma viga de seção transversal retangular em balanço, como mostrada na Figura III-1a. O modelo constitutivo de material utilizado, elástico perfeitamente plástico ou elasto-plástico sem encruamento (EPSE), é mostrado na curva σxε da Figura III-1b. [24]



(a) (b)

Figura III-1 – (a) Viga mono-engastada com um carga vertical na extremidade livre e (b) Curva σxε de um material EPSE [24].

A carga Fapl atua na extremidade livre da viga mono-engastada. A carga de início do escoamento Fy, gera um momento de início de escoamento no engaste My. A tensão máxima σmax, que atua na viga na seção crítica (no engaste) para o momento My, para o modelo constitutivo utilizado elástico-perfeitamente plástico, está limitado a resistência ao escoamento Sy, portanto:

$$\sigma_{max} = -\frac{M \cdot h/2}{I} \qquad \text{(III.1)}$$

Donde:

$$M_y = \frac{bh^2}{6} S_y \qquad \text{(III.2)}$$

Onde b é a largura e h é a altura da seção transversal.

A carga que inicia o escoamento Fy, para seção tansversal retangular, pode ser estimada a partir da seguinte expressão de equilíbrio:

$$F_y . L = 2 \int_0^{h/2} \left(\frac{y}{(h/2)} S_y \right) . y . b \cdot dy \qquad \text{(III.3)}$$

Donde:

$$F_y = \frac{bh^2 S_y}{6L} \qquad \text{(III.4)}$$

Entretanto, Para chegar ao colapso plástico, a estrutura torna-se instável quando se atinge um valor crítico de carga FCP (valor da carga para ocorrência do colapso plástico). Este consiste em uma falha dúctil instável, gerada pelo escoamento global de pelo menos uma seção resistente da estrutura. As seções críticas de componentes submentidos a flexão, quando atingem o colapso plástico sob carga constante, podem falhar se deformando até romper por esgotamento da ductilidade do seu material.

A carga de colapso plástico para uma viga de seção transversal retangular é dada pela equação (III.6), obtida à partir da seguinte expressão de equilíbrio:

$$F_{CP} . L = 2 \int_0^{h/2} S_y . y . b \cdot dy \qquad \text{(III.5)}$$

Donde:

$$F_{CP} = \frac{bh^2 S_y}{4L} \text{ ou } F_{CP} = 1{,}5 F_y \qquad \text{(III.6)}$$

A distribuição de tensões elásticas que atuam na seção crítica no início do escoamento possui configuração conforme a Figura III-2a. A distribuição das tensões plásticas que atuam na seção crítica no colapso plástico se apresentam conforme a Figura III-2a. [24]

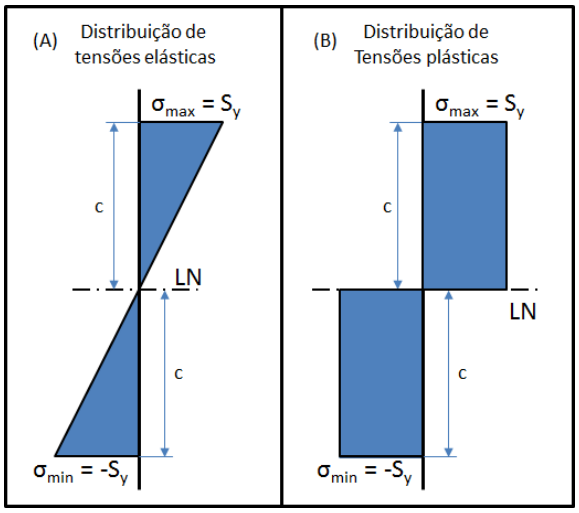


Figura III-2 – Distribuição de tensões elásticas (a) e plásticas (b) da seção crítica [24]

As tensões residuais são auto-equilibrantes, o somatório de esforços e momentos é nulo. O perfil das tensões residuais para o caso de flexão simples é simétrico em relação à

linha neutra. A distribuição de tensões residuais, na seção crítica de uma viga de seção retangular em balanço, oriundas de um ciclo de carga e descarga de Fapl = {0 → αFy→ 0}, sendo 1 < α < 1,5, é mostrado na Figura III-3. [24]

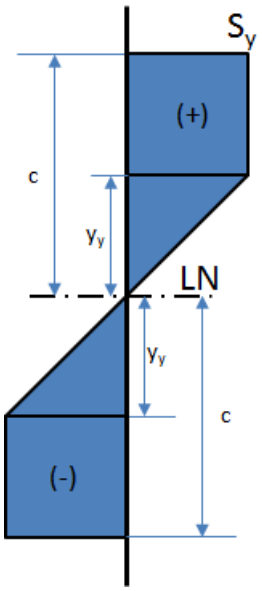


Figura III-3 – Distribuição de tensões elastoplásticas [24]

A expressão do equilíbrio é:

$$\alpha F_y L = 2\left[\int_0^{y_y} \frac{y}{y_y} S_y y\, b dy + \int_{y_y}^{c} S_y y b dy\right] \quad \text{(III.7)}$$

Donde:

$$\frac{y_y}{c} = \sqrt{(3-2\alpha)} \quad \text{(III.8)}$$

Note que $c = {}^{h}/_{2}$

III.2 Cargas elastoplásticas cíclicas

Quando um material escoa, assume diferentes caminhos nos eventos de carga e descarga no plano de tensões x deformações. Esses carregamentos geram laços de histerese elastoplástica neste plano, por este motivo é preciso descrever precisamente a sequência de variações das tensões e deformações no ponto crítico geradas pelo histórico de cargas aplicadas ao material.

No caso de aplicação de apenas um caregamento elastoplástico ($F_y<F_{apl}<F_{CP}$), como no exemplo, a viga mostrada na Figura III-1, gera deformações elastoplásticas, a descarga será elástica e o histórico de deformações será plástico (irreversível). Desta forma, o ponto crítico do material pode apresentar tensões e deformações residuais não nulas.

Para um carregamento aplicado que obedece à condição $F_y<F_{apl}<F_{CP,}$ como no exemplo da mesma viga mostrada na Figura III-1, este terá valor entre $F_y<F_{apl}<1.5F_y$ (seção transversal retangular) e seguirá o ciclo $F_{apl} = 0 \rightarrow \alpha F_y \rightarrow 0$, onde $1 < \alpha < 1.5$. Deste modo as tensões e deformações residuais, (σ_{res}) e (ε_{res}), são estimadas pelas expressões (III.9) e (III.10). [24]

$$\sigma_{res} = -S_y(\alpha - 1) \tag{III.9}$$

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_{max} - \alpha\frac{S_y}{E} = \frac{S_y}{E}\left(\frac{1}{\sqrt{3-2\alpha}} - \alpha\right) \tag{III.10}$$

Onde, $\varepsilon_{max} = \frac{S_y}{E}\frac{1}{\sqrt{(3-2\alpha)}}$

A Figura III.4 representa graficamente a aplicação de um único carregamento elastoplástico seguida de descarregamento elástico, gerando assim tensões (σ_{res}) e deformações (ε_{res}) residuais. [24]

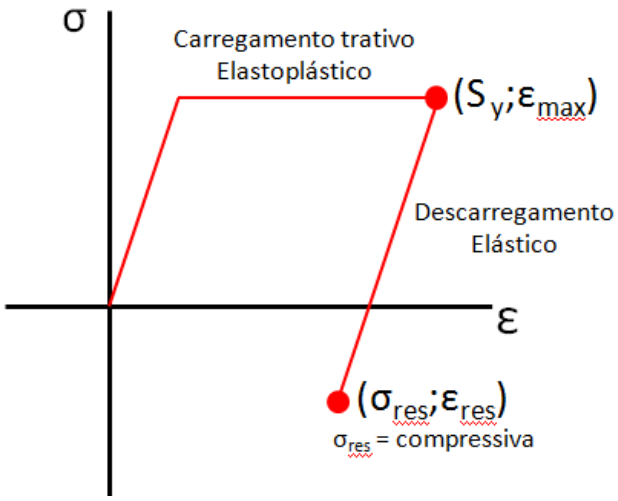


Figura III.4– Laço elastoplástico gerado pela carga Fapl = {0 →αFy →0} [24]

A Figura III.5 mostra o perfil de tensões residuais (C) gerado, pelo carregamento elastoplástico (A), somado ao descarregamento elástico (B), para uma viga EPSE. [24]

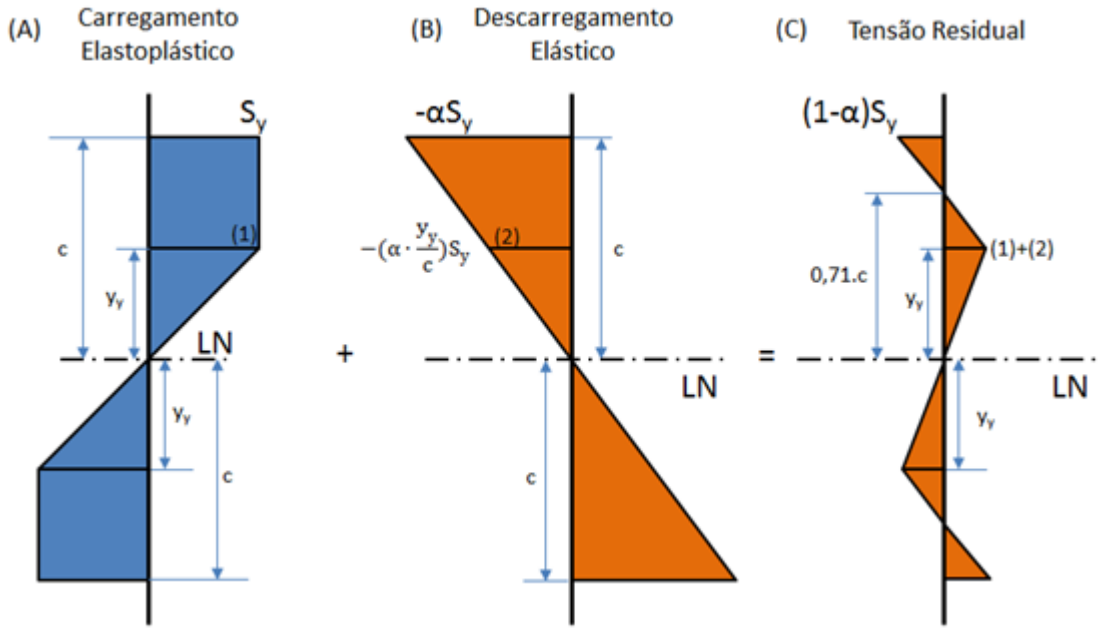


Figura III.5– Perfil de tensões residuais gerado pelo ciclo de carga Fapl = {0 →αFy →0} [24]

Todo evento de carga que escoa o material gera efeitos de memória que não podem ser desprezados quando se fala de carregamentos cíclicos. Após o escoamento inicial, o perfil de tensões deve ser seguido pelos laços de histerese elastoplásticos das variações de tensão e deformação (Δσ x Δε), geradas pelo histórico de cargas aplicadas. Esses laços de histerese possuem o mesmo módulo de elasticidade (E) de uma curva σε monotônica (utilizada apenas no escoamento inicial), porém possui uma parte elástica dobrada que vai de +Sy até –Sy pois a descarga EPSE é elástica quando $|\Delta\sigma| < 2Sy$, o que gera efeitos de memória na peça para os próximos carregamentos. [24]

Caso um novo carregamento sequencial seja aplicado, para o primeiro seguirá a curva σε primária do carregamento $\alpha F_{y.}$ Já no segundo carregamento o material seguirá a curva do laço de histerese. Então para uma sequência de carregamento 0 → αF_y→ $-\beta F_y$→0, onde β representa o coeficiente de plasticidade do segundo carregamento respeitando o critério de colápso plástico apresentado anteriormente 1< β < α < 1,5 ou 1 < α < β < 1,5. A expressão de equilíbrio é mostrada a seguir: :

$$\Delta M = (\alpha + \beta)F_y L = 2S_y \cdot b \cdot 2\left[\int_0^{y_r} \frac{y^2 dy}{y_r} + \int_{y_r}^{c} y dy\right] \quad \text{(III.11)}$$

$$\frac{y_r}{c} = \sqrt{(3 - \alpha - \beta)} \quad \text{(III.12)}$$

Onde, y_r é a dimensão da semi-espessura elástica da seção transversal, a partir da linha neutra, oriunda do segundo carregamento.

Já a deformação pode ser calculada a partir da expressão (III.13), levando em consideração a deformação originada no primeiro carregamento.

$$\Delta\varepsilon = \frac{2S_y/E}{\sqrt{3-\alpha-\beta}} \qquad \text{(III.13)}$$

Analisando as tensões da linha neutra até a superfície do material, no caso de um ciclo de carregamento onde α > β, a parcela do limite elástico sob compressão oriunda do carregamento reverso é maior. Já no caso de um ciclo de carregamento onde β > α, o escoamento causado pelo carregamento reverso compressivo plastifica o material de forma a sobrepor o carregamento inicial trativo.

A Figura III.6 a seguir apresenta um exemplo da variação da distribuição de tensões na seção tranversal em função da variação de β, para α = 1.4.

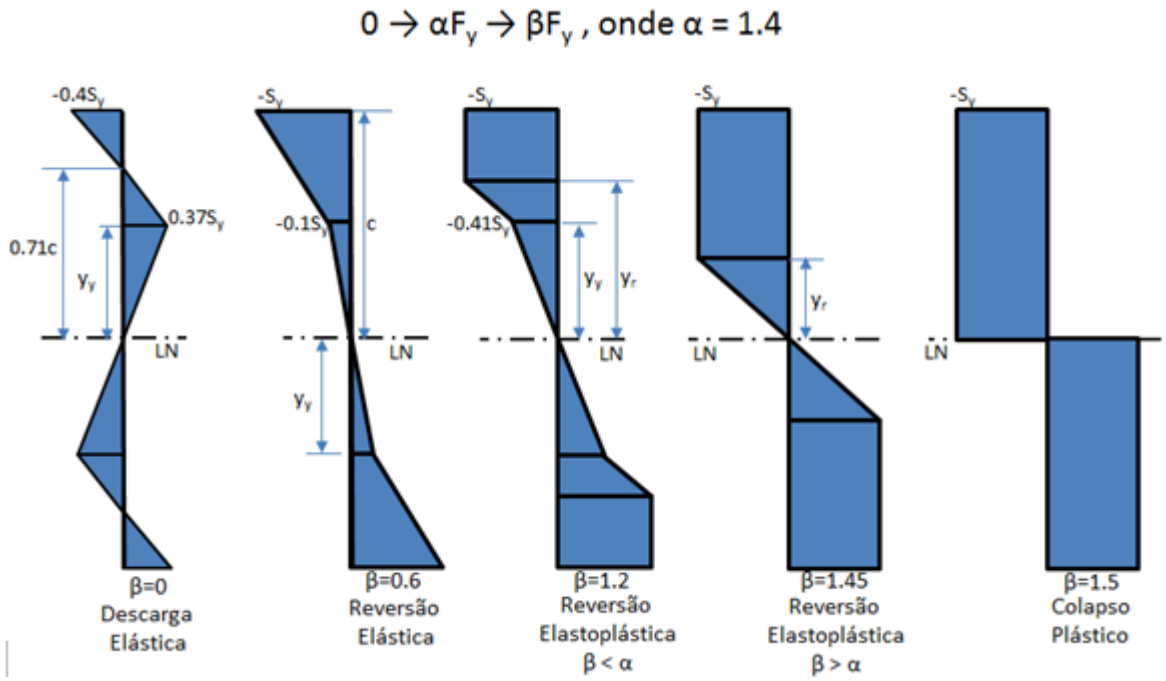


Figura III.6– Perfil de tensões residuais gerado pelo ciclo de carga Fapl = {0 →αFy →βFy } com α = 1.4, em função da variação β [24].

III.3 Desenvolvimento do modelo analítico

O desenvolvimento analítico a ser apresentado tem o objetivo de estimar tanto a distribuição de tensões residuais ao longo de toda a seção transversal da amostra, a partir dos dados de deformação obtidos experimentalmente, quanto o comportamento elastoplástico cíclico oriundo da sequência de carregamento de flexão aplicada.

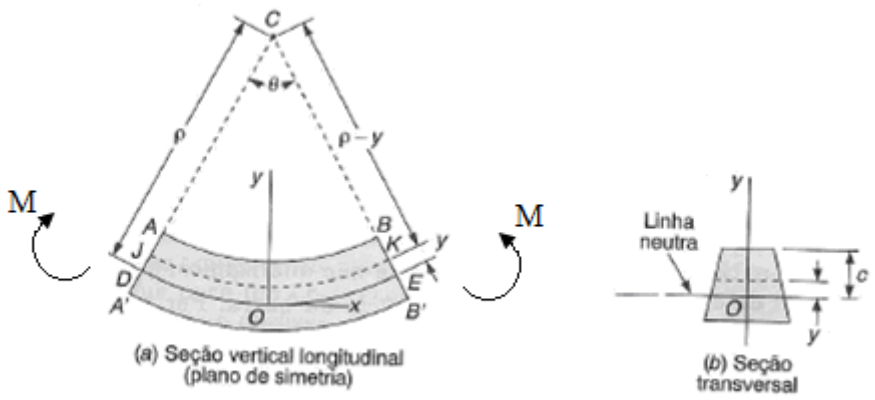


Figura III.7 – Referência dos raios de curvatura. [25]

Os raios de curvatura são definidos como:

$$\rho = \frac{y}{\varepsilon} \text{ ou ainda como } \rho_y = \frac{c}{\varepsilon_y} \tag{III.14}$$

$$\rho_\alpha = \frac{c}{\varepsilon_e} \quad e \quad \rho_\beta = \frac{-c}{\varepsilon_i} \tag{III.15}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \tag{III.16}$$

Onde, ρ é o raio de curvatura, ε é a deformação, E é o módulo de elasticidade, ε_e é a deformação aquisitada experimentalmente no ponto da superfície trativa e ε_i é a deformação aquisitada experimentalmente no ponto da superfície compressiva. A deformação de escoamento é definida como:

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} \tag{III.17}$$

Da expressão (III.16), para a condição limite onde as fibras externas da viga começam a escoar, pode ser adaptada para:

$$\rho_y = \frac{EI}{M_y} \tag{3.18}$$

Para se calcular o momento aplicado em um carregamento elastoplástico, conforme mostrado na Figura III.8, é necessário considerar-se a regiõe da seção transversal já plastificada e a região que ainda é elástica.

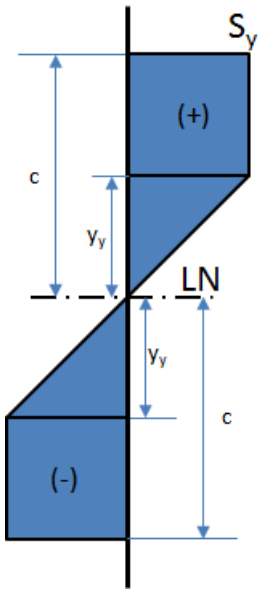


Figura III.8 – Carregamento elastoplástico

Utilizando a equação (III.7), estas regiões podem ser correlacionadas com o fator de plasticidade do momento (α ou β):

$$\alpha M_y = \left[\int_0^{y_y} y\left(\frac{y}{y_y}S_y\right)\cdot b dy + \int_{y_y}^{c} y\cdot S_y b dy\right] \tag{III.19}$$

$$\alpha = \frac{1}{2}\left[3 - \left(\frac{y_y}{c}\right)^2\right] \tag{III.20}$$

Para que α e β fique em função dos raios de curvatura gerados a partir das deformações aplicadas experimentalmente, é preciso associar às equações (III.20) com as equações (III.17) e (III.21).

$$\varepsilon_y = \frac{y_y}{\rho} \tag{III.21}$$

O fator de plasticidade em função do raio de curvatura experimental é dada por:

$$\alpha(\rho) = \frac{1}{2}\left[3 - \left(\frac{S_y \rho}{Ec}\right)^2\right] \; ou \; \beta(\rho) = \frac{1}{2}\left[3 - \left(\frac{S_y \rho}{Ec}\right)^2\right] \tag{III.22}$$

Com o carregamento elastoplástico obedecendo à condição $1{,}0 < \alpha < 1{,}5$, o material estará em um estado em que o núcleo se encontra elástico e suas superfícies plastificadas. Então, é necessário saber o valor de (y_y), que representa a porção que ainda está elástica após o carregamento, indicando desta forma a fronteira elastoplástica.

A partir do valor de α(ρ) obtido, este é relacionado com M_ye ao $y_y(\rho)$ para chegamos aos valores de tensão normal máxima no "spring-back", expressão (III.23), e também a dimensão da semi-espessura elástica da seção transversal em função do raio de curvatura imposto, equação (III.24).

$$\sigma_m(\rho) = \frac{\alpha(\rho) M_y c}{I} \tag{III.23}$$

$$y_y(\rho) = c\sqrt{3 - 2\alpha(\rho)} \tag{III.24}$$

Portanto, a distribuição de tensões $\sigma_x(y,\rho)$ na seção transversal ao impor o raio de curvatura **ρ** e a distribuição elástica e linear no "spring back" $\sigma_x^m(y,\rho)$ são expressas pelas equações (3.25) e (3.26) respectivamente:

$$\begin{cases} \sigma_x(y,\rho) = \dfrac{y}{y_y(\rho)} S_y \quad se \quad 0 \le y \le y_y(\rho) \\ \sigma_x(y,\rho) = S_y \quad se \quad y > y_y(\rho) \end{cases} \tag{III.25}$$

$$\sigma_x^m(y,\rho) = -\frac{y}{c} \cdot \sigma_m(\rho) \tag{III.26}$$

A partir da soma das equações (III.25) e (III.26) é possível se estimar a distribuição das tensões residuais em uma dada seção transversal, em cada etapa, conforme (III.27):

$$\sigma_x^{sb}(y,\rho) = \sigma_x(y,\rho) + \sigma_x^m(y,\rho) \tag{III.27}$$

No caso de ocorrência de carregamento reverso caracterizando ciclo de plasticidade, o β(ρ) é calculado a partir da expressão (III.22), no qual é relacionado com M_y e ao y_r para chegamos aos valores de tensão normal máxima no "spring-back" reverso, quando houver, equação (III.28), e também a dimensão da semi-espessura elástica da seção transversal em função do raio de curvatura imposto pelo carregamento reverso aplicado $y_r(\rho)$, equação (III.29).

$$\sigma_{mr}(\rho) = \frac{\beta(\rho) M_y c}{I} \tag{III.28}$$

$$y_r(\rho) = c\sqrt{3 - \alpha(\rho) - \beta(\rho)} \tag{III.29}$$

A distribuição de tensões $\sigma_{xr}(y,\rho)$ na seção transversal ao impor o raio de curvatura reverso ρ e a distribuição elástica e linear no "spring back" $\sigma_x^{mr}(y,\rho)$ são expressas pelas equações (III.30) e (III.31) respectivamente:

$$\begin{cases} \sigma_r(y,\rho) = -\dfrac{y}{y_r(\rho)} S_y \quad se \quad 0 \le y \le y_r(\rho) \\ \sigma_r(y,\rho) = -S_y \quad se \quad y > y_r(\rho) \end{cases} \tag{III.30}$$

$$\sigma_r^{mr}(y,\rho) = -\frac{y}{c} \cdot \sigma_{mr}(\rho) \tag{III.31}$$

Portanto, a partir da soma das equações (III.30) e (III.31) é possível se estimar a distribuição das tensões residuais resultante em uma dada seção transversal, através da eq.(III.32):

$$\sigma_{xr}^{sb}(y,\rho) = \sigma_r(y,\rho) + \sigma_r^{mr}(y,\rho) \tag{III.32}$$

III.3.1 Desenvolvimento do modelo analítico

Diversas possibilidades de perfil de tensões residuais podem ser originadas a partir da sequência de carregamentos impostos [9]. A seguir seguem as possibilidades de sequência de carregamentos que variam o resultado das deformações em relação ao ponto "a" analizado, localizado na superfície, conforme Figura III.9. As sequências estão apresentadas em duas tabelas separadas, divididas em possibilidades com curvamento único (Tabela III.1) e com curvamento inicial seguido de curvamento reverso (Tabela III.2).O sentido de cada curvamento foi definido conforme a Figura III.9, onde α representa o carregamento do ponto "a" em tração e β em compressão.

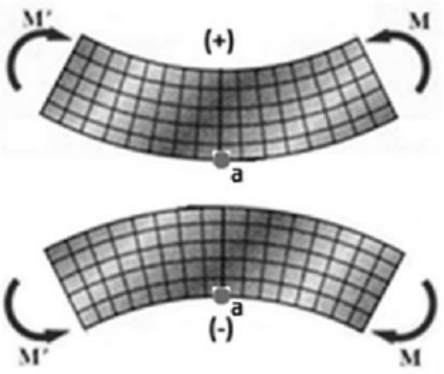


Figura III.9 – Sentido do momento

A Figura III.10 mostra, em forma de fluxograma, as expressões utilizadas para se calcular analiticamente as deformações em cada sequência de carregamento apresentada na Tabela III.1 e Tabela III.2.

Tabela III.1 – Possibilidades de curvaturas com um carregamento

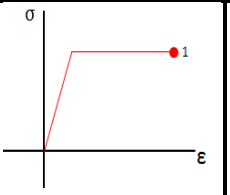
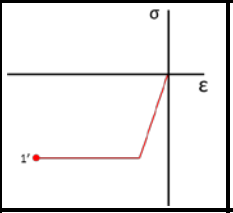
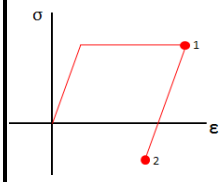
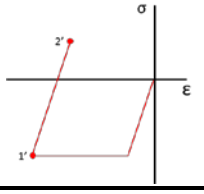
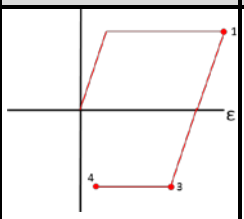
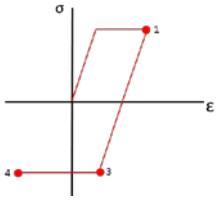
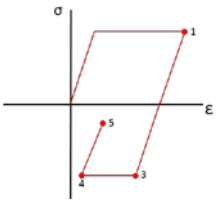
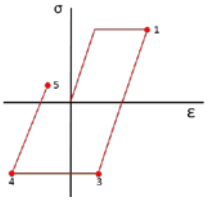
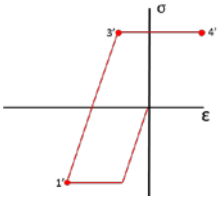
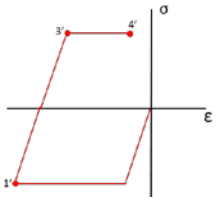
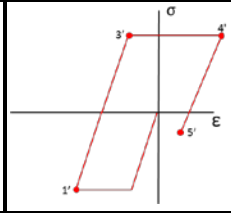
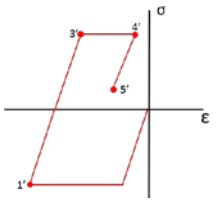
Sequência	Carregamento	Sentido Momento	Descarregamento	Spring back	σ x ε	Expressões
1	Elastoplástico	Positivo	N/A	N/A		$\sigma_1 = S_y$ $\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_y}{\sqrt{(3-2\alpha)}}$
2	Elastoplástico	Negativo	N/A	N/A		$\sigma'_1 = -S_y$ $\varepsilon'_1 = -\frac{\varepsilon_y}{\sqrt{(3-2\beta)}}$
3	Elastoplástico	Positivo	Elástico	Sim		$\sigma_2 = (1-\alpha)S_y$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - \alpha\varepsilon_y$
4	Elastoplástico	Negativo	Elástico	Sim		$\sigma'_2 = -(1-\beta)S_y$ $\varepsilon'_2 = \varepsilon'_1 + \beta\varepsilon_y$

Tabela III.2 – Possibilidades de curvaturas com carregamento inicial e reverso

Sequência	Sentido Carreg. Inicial	Sentido Carreg. Reverso	Spring back	Relação α e β	σ x ε	Expressões
3.a	Positivo	Negativo	Não	α > β		$\sigma_3 = -S_y$ $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_y$ $\sigma_4 = -S_y$ $\varepsilon_4 = \varepsilon_1 - \frac{2\varepsilon_y}{\sqrt{(3-\alpha-\beta)}}$
3.b	Positivo	Negativo	Não	α < β		$\sigma_4 = -S_y$ $\varepsilon_4 = \varepsilon_1 - \frac{2\varepsilon_y}{\sqrt{(3-2\beta)}}$
3.c	Positivo	Negativo	Sim	α > β		$\sigma_5 = (\beta - 1)S_y$ $\varepsilon_5 = \varepsilon_4 + \beta\varepsilon_y$
3.d	Positivo	Negativo	Sim	α < β		$\sigma_5 = (\beta - 1)S_y$ $\varepsilon_5 = \varepsilon_4 + \beta\varepsilon_y$
4.a	Negativo	Positivo	Não	α > β		$\sigma'_4 = S_y$ $\varepsilon'_4 = \varepsilon'_1 + \frac{2\varepsilon_y}{\sqrt{(3-2\alpha)}}$
4.b	Negativo	Positivo	Não	α < β		$\sigma'_3 = S_y$ $\varepsilon'_3 = \varepsilon'_1 + 2\varepsilon_y$ $\sigma'_4 = S_y$ $\varepsilon'_4 = \varepsilon'_1 + \frac{2\varepsilon_y}{\sqrt{(3-\beta-\alpha)}}$
4.c	Negativo	Positivo	Sim	α > β		$\sigma'_5 = (1-\alpha)S_y$ $\varepsilon'_5 = \varepsilon'_4 - \alpha\varepsilon_y$
4.d	Negativo	Positivo	Sim	α < β		$\sigma'_5 = (1-\alpha)S_y$ $\varepsilon'_5 = \varepsilon'_4 - \alpha\varepsilon_y$

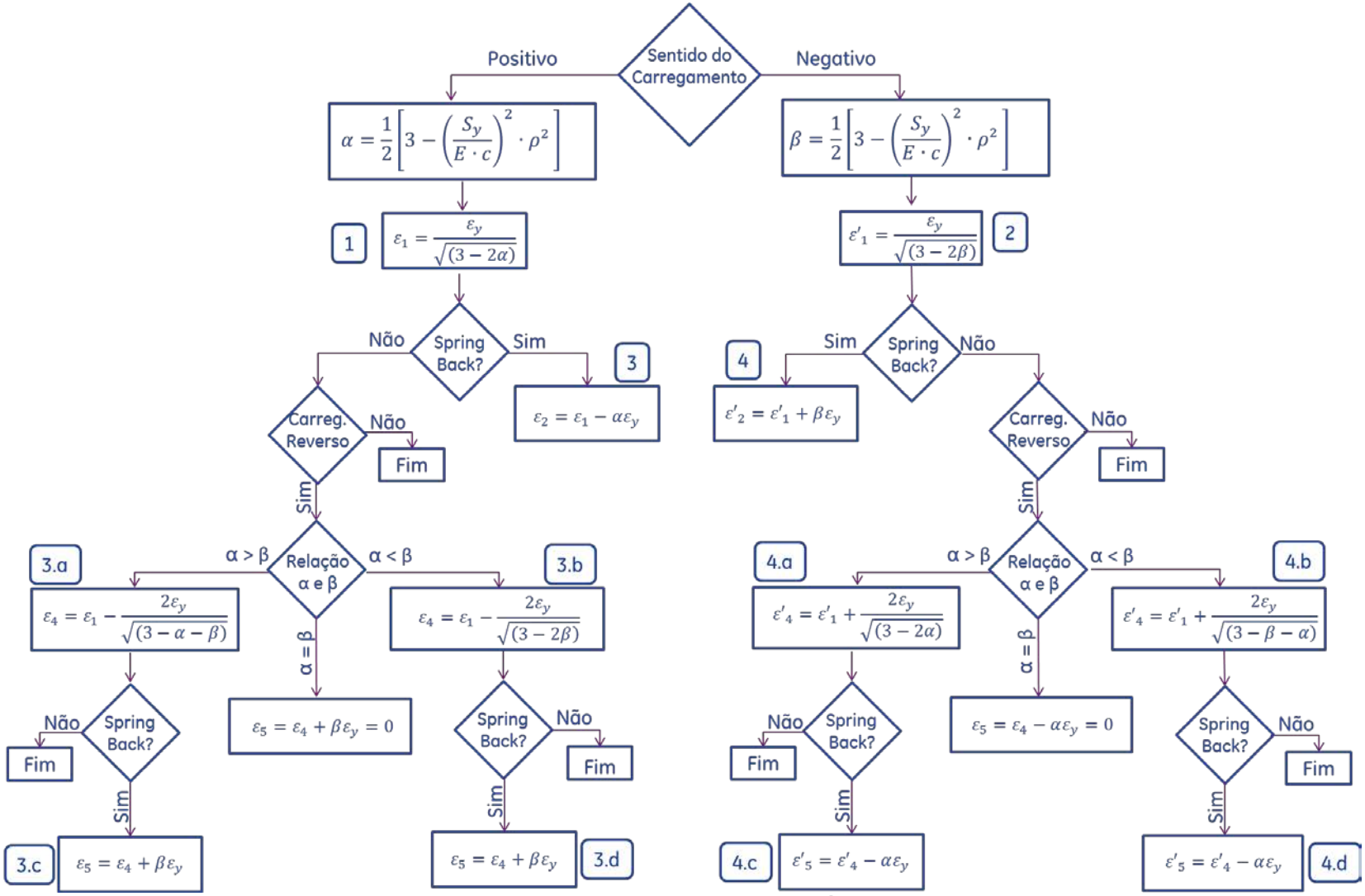


Figura III.10 – Fluxograma analítico de deformações

A Figura III.11 mostra, também em forma de fluxograma, as expressões utilizadas pelo modelo analítico para gerar a distribuição de tensões residuais na seção transversal em função do raio de curvatura (ρ) gerado pelo carregamento com fatores de plasticidade (α e β) que caracterizam o momento aplicado, tanto para a utilização de strain gages quanto para o uso de sensores de Bragg.

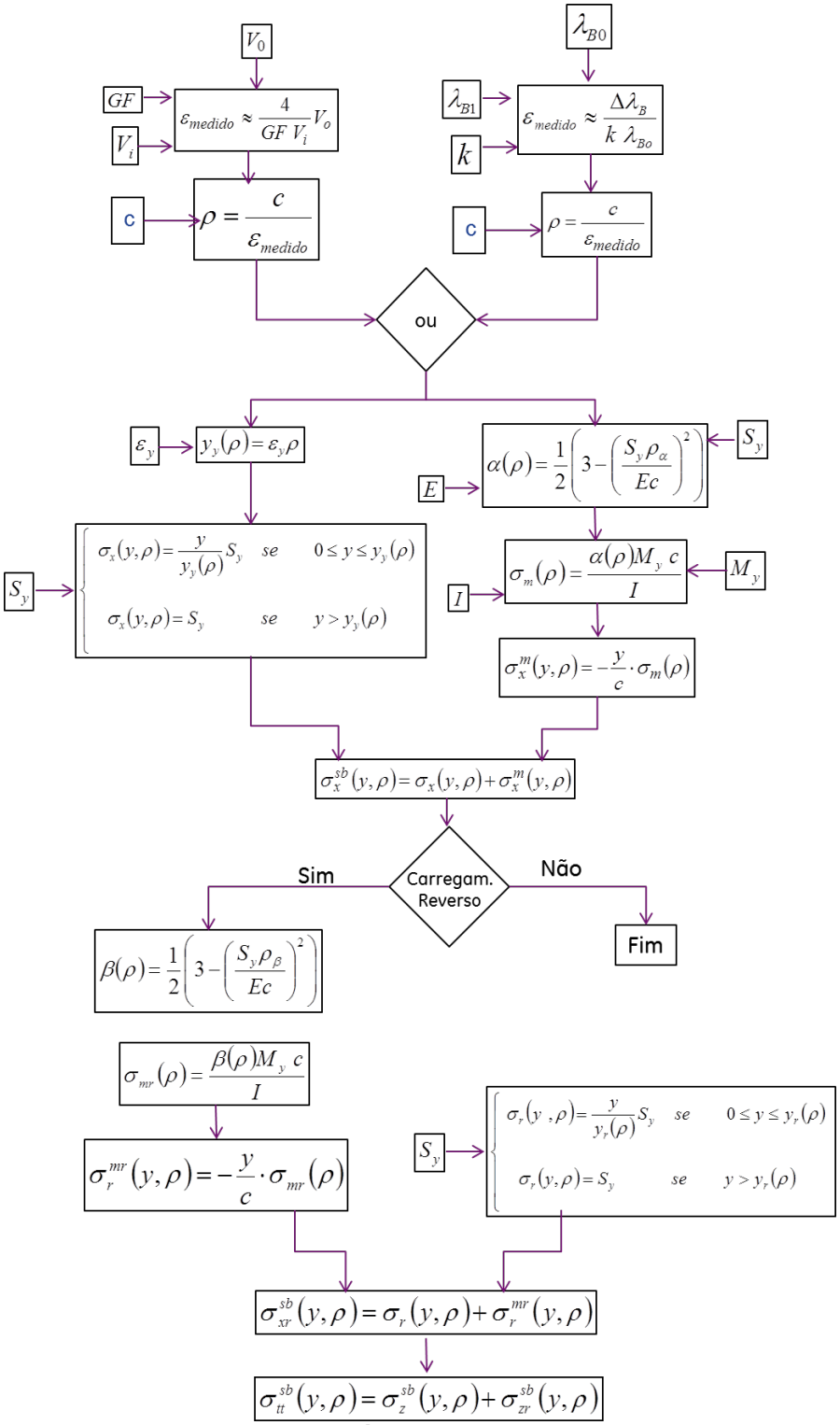


Figura III.11 – Fluxograma analítico de tensões residuais [23]Adaptado

III.3.2 Estimativa da distribuição das tensões residuais dos casos abordados

A seguir serão apresentados, da Figura III.12 até a Figura III.24, os perfis de tensões da seção trensversal do arame 12x6 mm, para cada sequência de carregamento apresentada nas Tabela III.1 e Tabela III.2.

a) Sequência de carregamento 1:

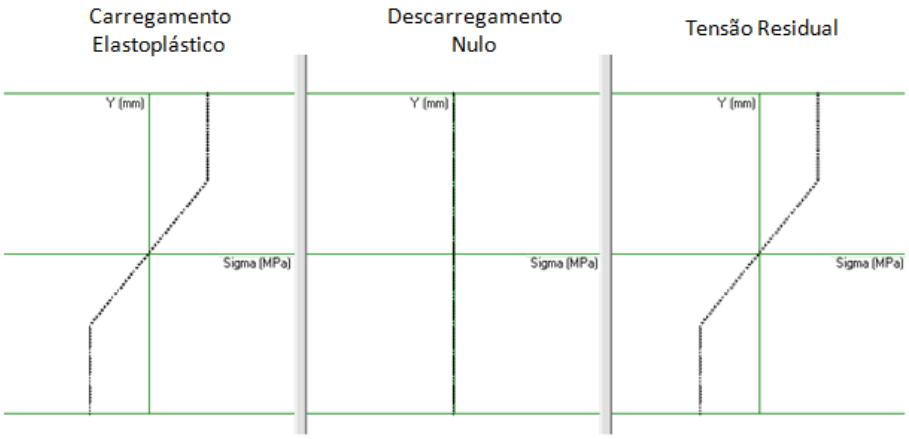


Figura III.12 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 1 (Tabela III.1)

b) Sequência de carregamento 2:

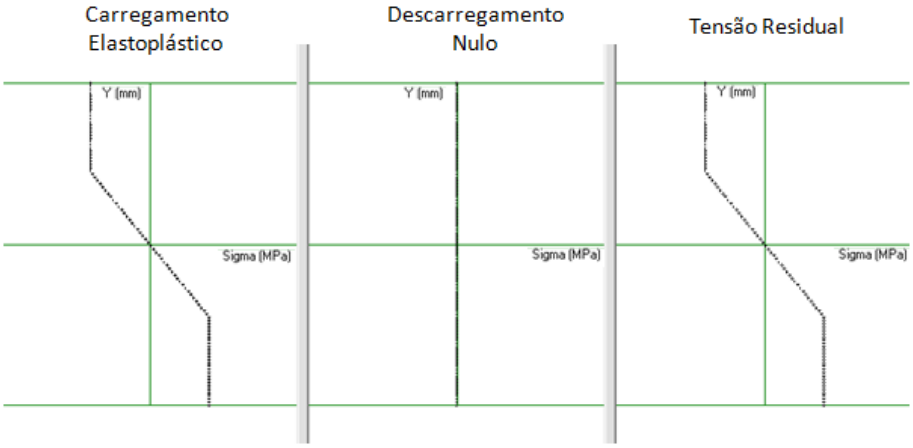


Figura III.13 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 2 (Tabela III.1)

c) Sequência de carregamento 3:

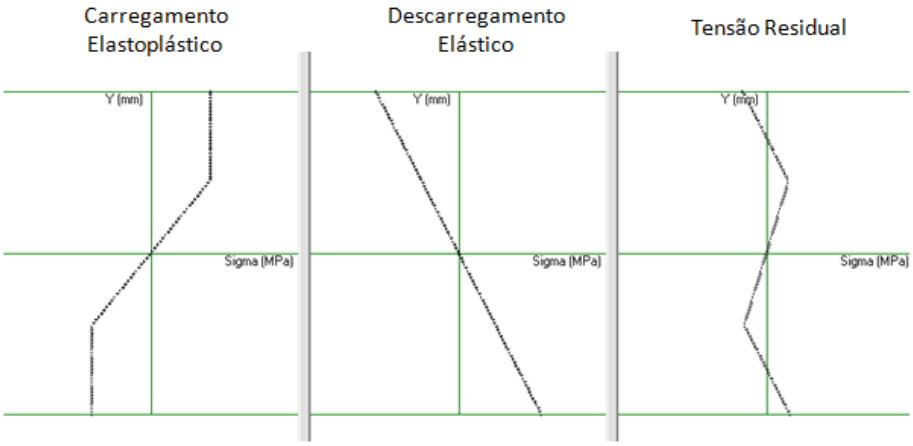


Figura III.14 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3 (Tabela III.1)

d) Sequência de carregamento 4:

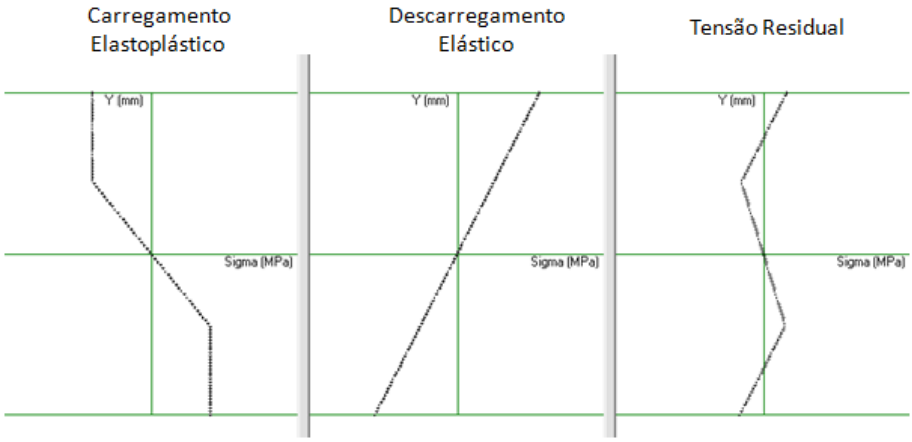


Figura III.15 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4 (Tabela III.1)

e) Sequência de carregamento 3a:

i. Com α > β

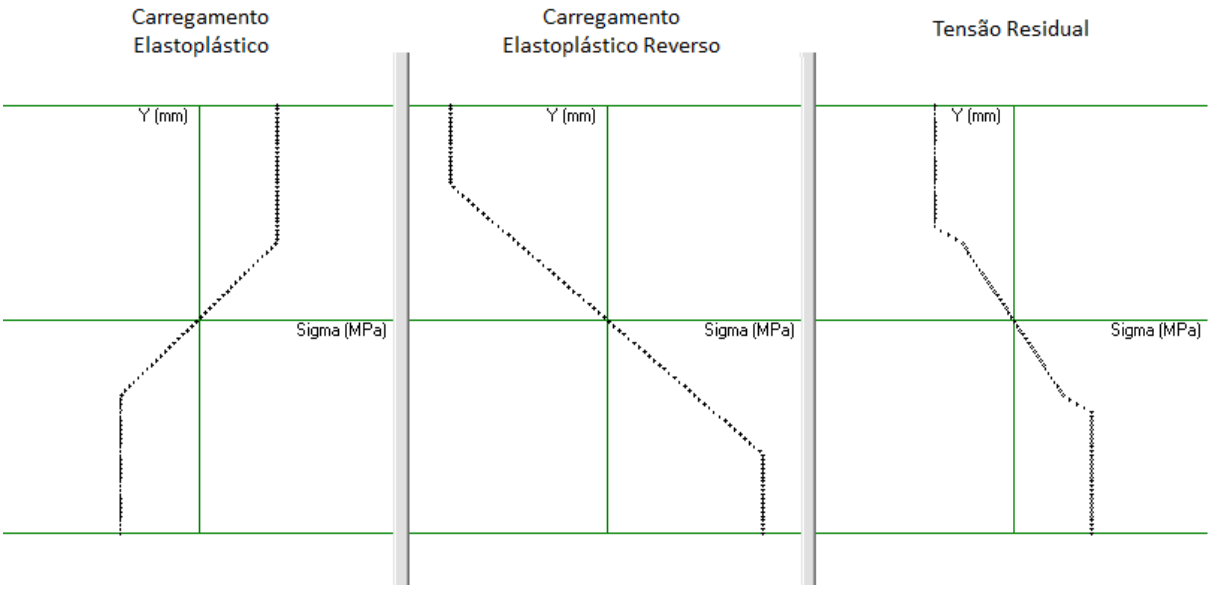


Figura III.16 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3a (α > β) (Tabela III.2)

ii. Com α >> β

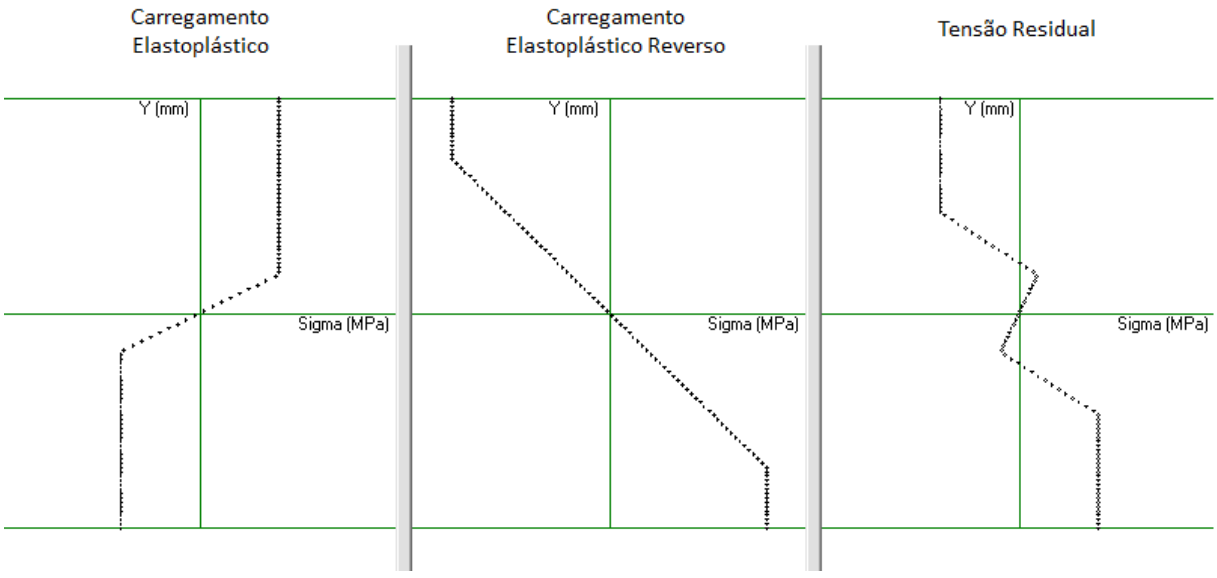


Figura III.17 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3a (α >> β) (Tabela III.2)

f) Sequência de carregamento 3b:

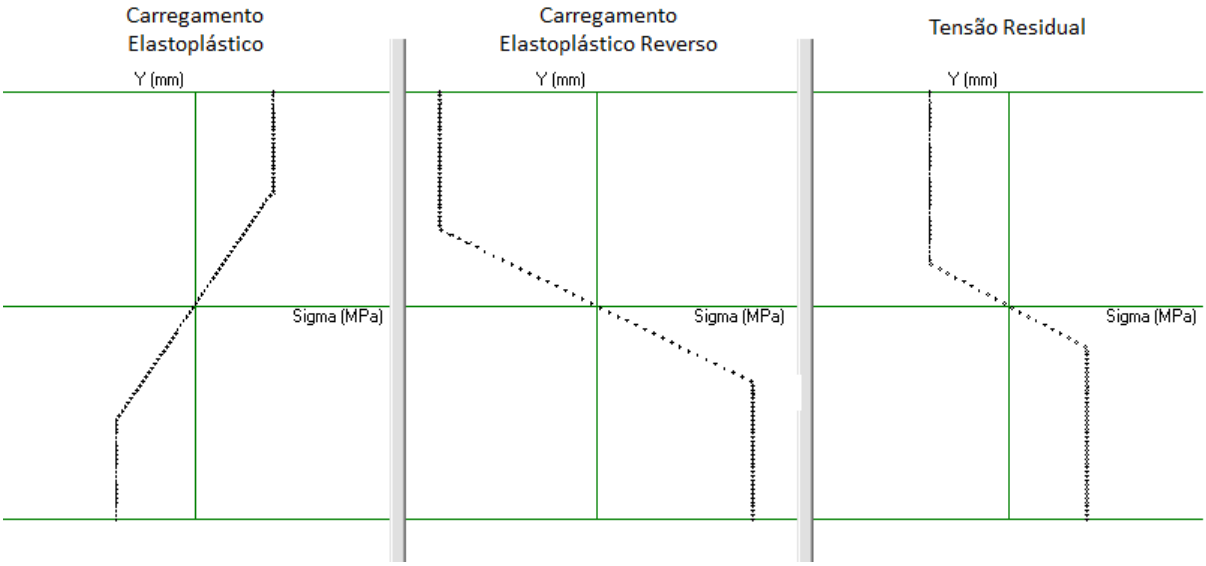


Figura III.18 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3b (α < β) (Tabela III.2)

g) Sequência de carregamento 3.c (com spring back):

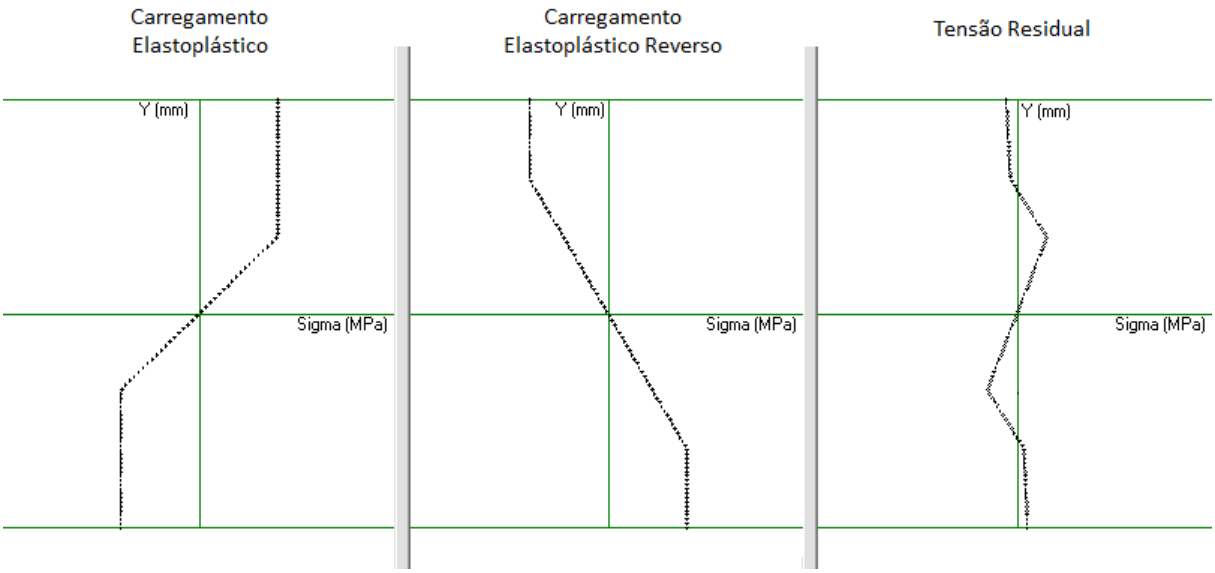


Figura III.19 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3c (α > β) (Tabela III.2)

h) Sequência de carregamento 3.d (com spring back):

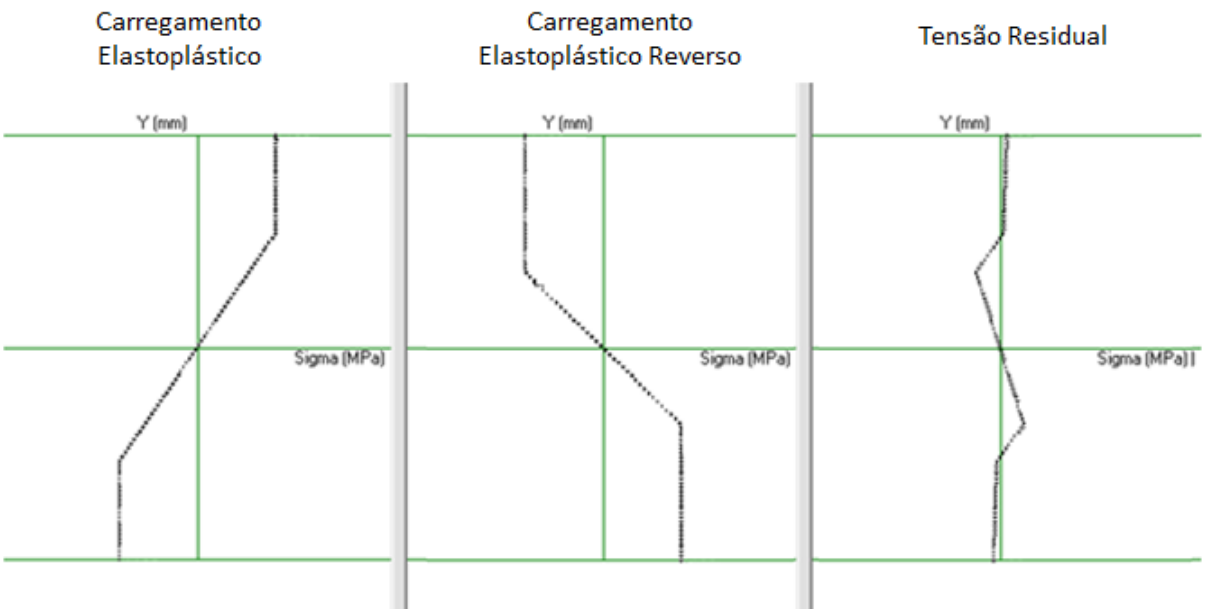


Figura III.20 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 3d (α <β) (Tabela III.2)

i) Sequência de carregamento 4.a:

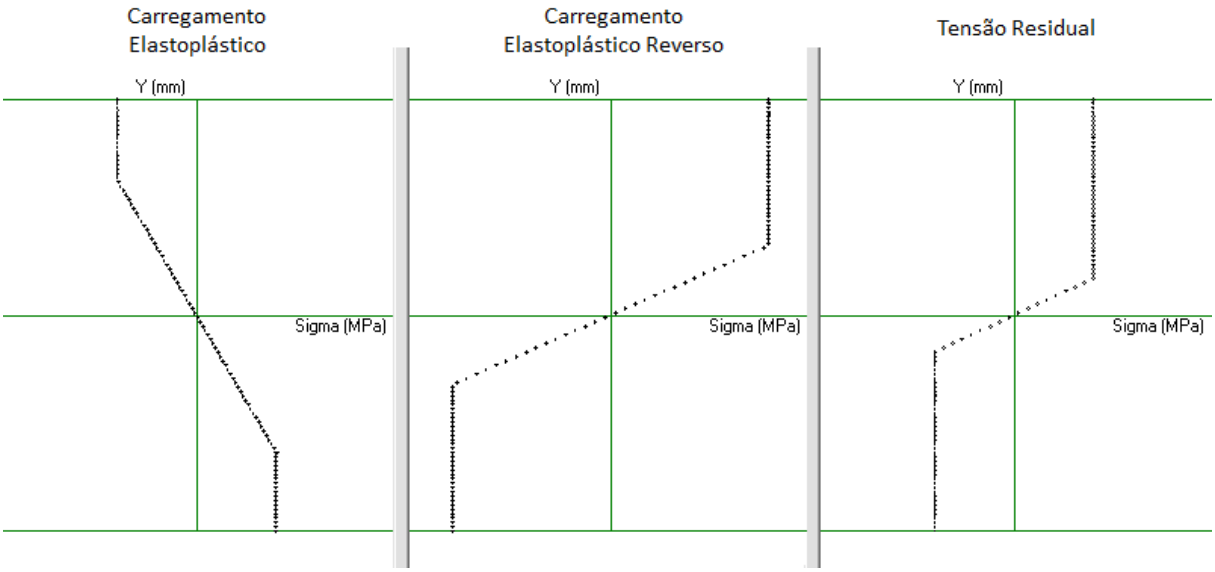


Figura III.21 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4a (α > β) (Tabela III.2)

j) Sequência de carregamento 4.b:

i. Com α < β

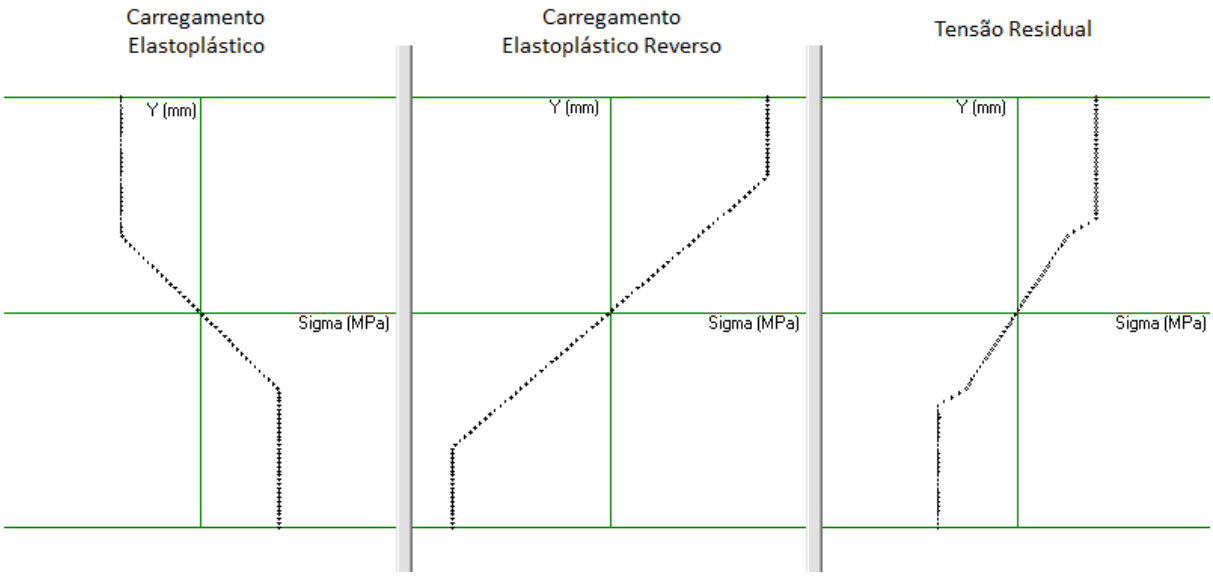


Figura III.22 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4b (α < β) (Tabela III.2)

ii. Com α << β

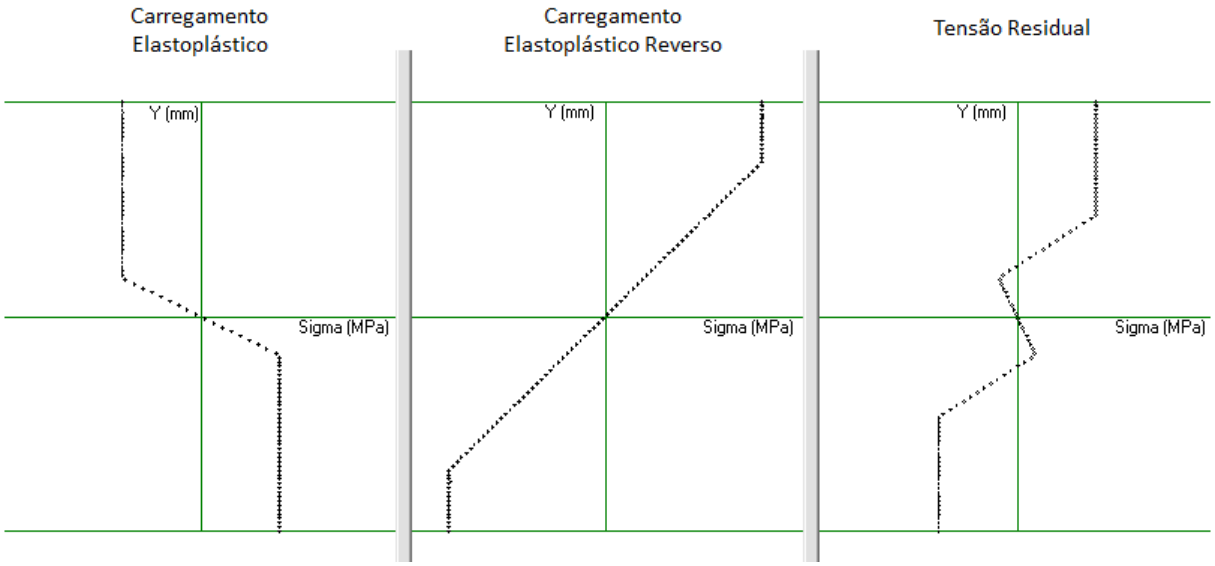


Figura III.23 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4b (α << β) (Tabela III.2)

k) Sequência de carregamento 4.c:

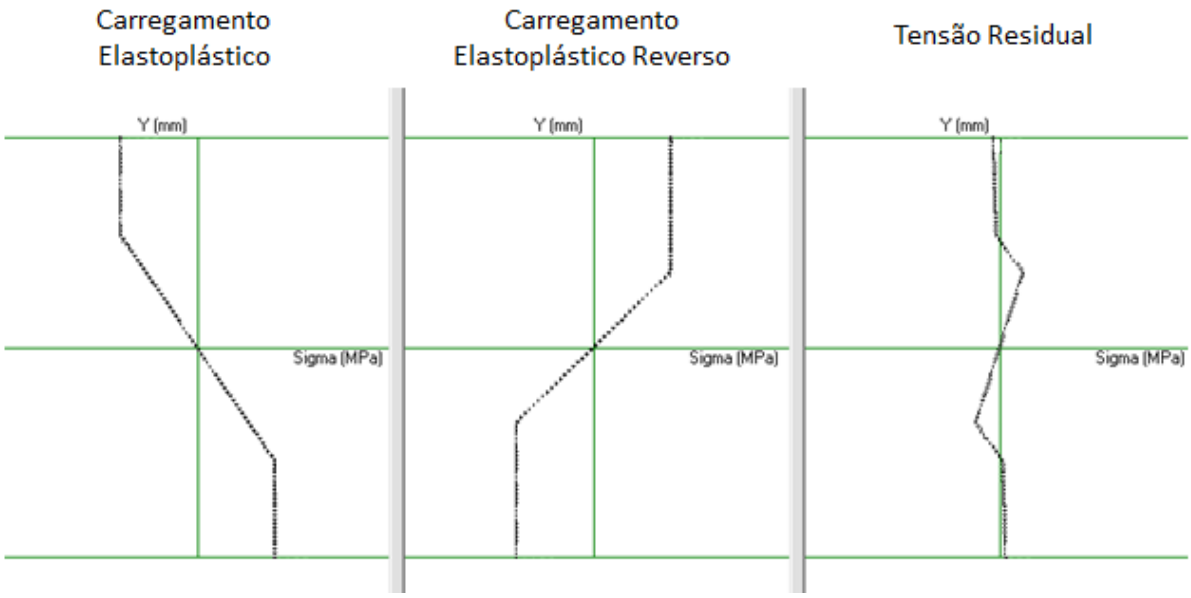


Figura III.24 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4c (α > β) (Tabela III.2)

l) Sequência de carregamento 4.d (com spring back):

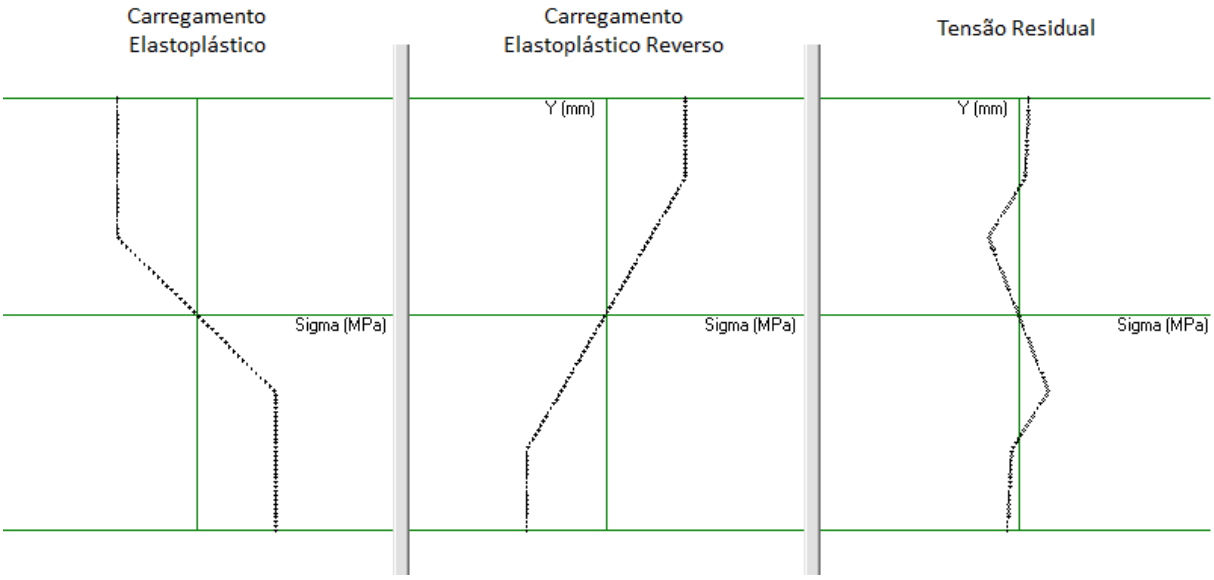


Figura III.25 – Perfil de tensões residuais da sequência de carregamento 4d (α < β) (Tabela III.2)

Sumarizando, este capítulo reuniu a teoria do modelo analítico utilizado neste trabalho, apresentado estudo de casos abrangendo qualitativamente as sequências/combinações de curvamentos possíveis e suas variações do ponto de vista de deformações, em relação à pontos na superfície, e de distribuição de tensões residuais ao longo da seção transversal.

Neste modelo analítico serão inseridas as deformações experimentais aquisitadas nos pontos de sensoriamento. No capítulo a seguir será apresentado todo o programa experimental realizado para obtenção dessas deformações, apresentando os ensaios e toda a preparação para os mesmos.

Capítulo IV Programa Experimental e Metodologia

Este capítulo se reserva à apresentação de todos os ensaios realizados com a finalidade de obter as deformações reais envolvidadas no processo de montagem das armaduras de tração de um duto flexível. Também será mostrada toda a preparação das amostras, eglobando os sistemas sensores, assim como o dispositivo de média escala desenvolvido para simular este processo de montagem.

IV.1 Preparação para os Ensaios

Os experimentos consistiram na aplicação de flexão pura em amostras de arame de 1,3 metros de comprimento e seção transversal 12 x 6 mm, através de um dispositivo. Os testes foram realizados com dois tipos de sistemas de monitoramento de deformação, cujos valores médios foram inseridos no modelo analítico apresentado no Capítulo 3.

IV.1.1 Ensaio utilizando método óptico da rede de Bragg

O teste teve como escopo a execução de curvamento de um arame instrumentado por intermédio de um dispositivo conformador. O arame foi instrumentado com 32 sensores de Bragg, em 16 posições distribuídas ao longo de seu comprimento. Em cada uma das 16 posições foram instalados dois sensores, um na superfície superior e outro na superfície inferior do arame.

IV.1.1.1 Instalação dos sensores de Bragg

Pelos níveis de deformação esperados serem muito elevados e devido ao alto risco de quebra da fibra durante o teste, optou-se pela não multiplexação dos sensores em uma mesma fibra de modo a diminuir o risco de perda de sensores e também proporcionar um melhor dimensionamento do espectro de cada fibra no equipamento de interrogação.

Entretanto, para viabilizar o monitoramento de tantas fibras simultaneamente, foi necessária a utilização de acopladores e chaves ópticas para a multiplexação dos sinais entre dois equipamentos de interrogação.

Os sensores foram nomeados conforme a sua cota a partir da referência (posição na amostra) e sua condição de carregamento no ensaio, onde a letra C indica que o sensor está instalado na superfície submetida à compressão e a letra T indica a instalação na superfície submetida à tração, durante o ensaio.

A Tabela IV.1 mostra a nomenclatura, o comprimento de onda inicial e a localização no equipamento interrogador, de cada fibra com sensor instrumentada no arame.

Tabela IV.1 – Nomenclatura e disposição dos sensores nos equipamentos

Nomenclatura do Sensor	Comprimento de onda inicial (λ_0)	Equipamento Interrogador	Canal	Chave
C30	1550	3	4	10
C150	1545	1	1	00
C175	1555	1	2	00
C210	1585	1	4	00
C250	1585	5	3	X
C259	1585	5	4	X
C290	1555	1	4	00
C335	1585	4	2	11
C404	1550	4	2	11
C472	1540	4	4	11
C537	1585	4	4	11
C581	1545	3	1	10
C665	1530	3	3	10
C750	1540	3	3	10
C817	1550	2	3	01
C893	1560	2	4	01
T30	1560	3	4	10
T150	1555	1	1	00
T175	1540	1	2	00
T210	1520	1	3	00
T250	1515	5	1	X
T259	1530	5	2	X
T290	1545	1	3	00
T335	1545	4	1	11
T404	1520	4	1	11
T472	1515	4	3	11
T537	1530	4	3	11
T581	1555	3	1	10
T665	1530	3	2	10
T750	1540	3	2	10
T817	1550	2	1	01
T893	1560	2	2	01

A Figura IV.1 apresenta um desenho esquemático que mostra a posição em que cada sensor foi instalado no arame.

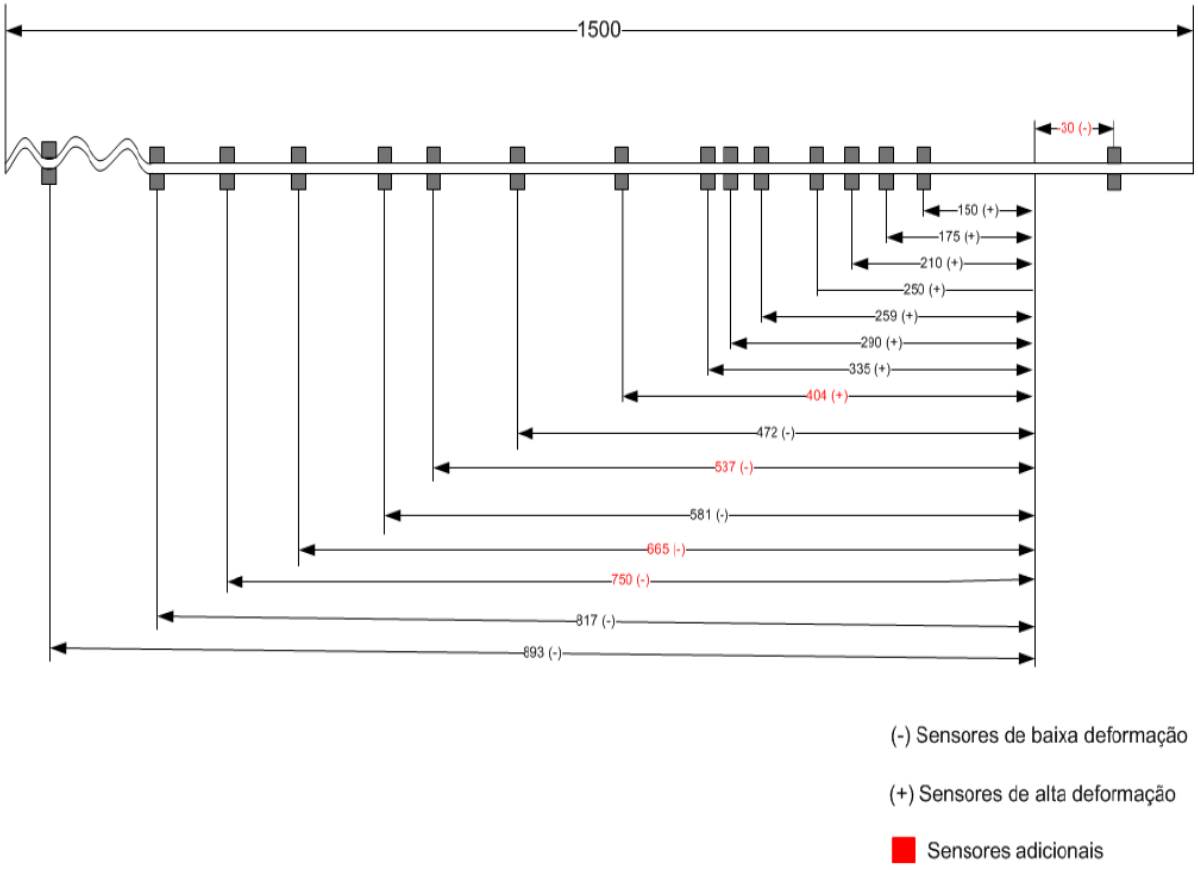


Figura IV.1 – Desenho esquemático da disposição dos sensores no arame.

Para a realização da instrumentação são utilizadas ferramentas e acessórios para trabalhos mecânicos e ópticos. A Tabela IV.2 e a Tabela IV.3 apresentam uma relação básica de itens necessários para execução da instalação.

A Tabela IV.2 apresenta os materiais necessários para a preparação superficial da amostra.

Tabela IV.2 –Materiais para preparação superficial do arame

Item	Material
1	Lixa d'água (granulação 280)
2	Acetona
3	Álcool Isopropílico
4	Estopa
5	Pinça

Antes de iniciar a instrumentação com os sensores ópticos é necessário preparar o arame para receber os sensores. A superfície do arame que entrará em contato direto com os sensores deverá estar limpa e livre de qualquer tipo de contaminante. Então é necessário executar o seguinte procedimento de preparação da área de instalação:

1- Efetuar limpeza primária de cada posição de sensor utilizando uma pinça, uma estopa com álcool isopropílico.
2- Efetuar lixamento de cada superfície que receberá um sensor com a lixa 280.

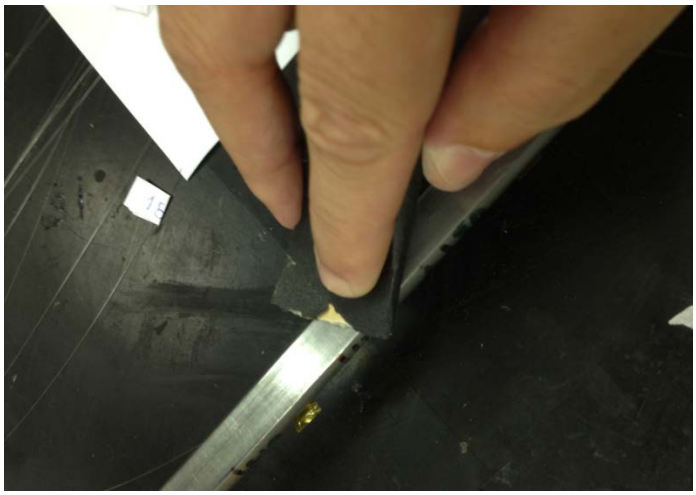


Figura IV.2 – Lixamento do arame na região de um dos sensores.

3- Efetuar limpeza final da superfície lixada utilizando pinça com estopa embebida com álcool isopropílico/acetona.

A instrumentação foi iniciada pela instalação dos sensores na superfície de topo do arame, após o processo de cura da resina adesiva dos mesmos, foi então realizada a instrumentação da outra superfície do arame.

A Figura 4.3 e a Tabela IV.3 apresentam as ferramentas e materiais necessários para instalação dos conjuntos de sensores ópticos.



Figura 4.3 – Ferramentas e materiais básicos para a instalação dos sensores ópticos.

Tabela IV.3 – Materiais para instalação do conjunto sensor na amostra

Item	Material
1	Alicate Descascador para fibra óptica
2	Fibras com elemento sensor
3	Fita adesiva opaca / Fita kapton / Dupla face
4	Fita isolante 2,5mm de espessura
5	“Tubing” de teflon (f1mm)
6	Conector óptico FC-APC
7	Clivador para fibras ópticas
8	Protetor de emenda 40mm
9	Tesoura
10	Máquina para emenda óptica por fusão
11	Adesivo a base epóxi para fixar os sensores nos arames (não apresentada na figura)

Com as superfícies superior e inferior dos arames limpas, um procedimento de instrumentação foi seguido para haver homogeneidade na instalação dos sensores de Bragg, uma vez que os mesmos form submetidos à altos níveis de deformação por cargas de flexão. À seguir é apresentado o procedimento de instrumentação utilizado no ensaio:

1. Após identificada a posição de cada sensor, foi feita a demarcação da região a ser medida. Para isso, foram cortadas 2 tiras com 2 camadas de fita isolante de espessura 0,25mm. Essas tiras de fita isolante foram posicionadas nas extremidades da superfície limpa do arame e a fibra com o sensor foi posicionada na região central do arame, conforme mostrado na Figura IV.4. Esse passo do procedimento tem a função de padronizar a espessura da camada de resina adesiva que cada sensor receberá, ou seja, 0,50mm. Para fixar a fibra no arame foi utilizada fita Kepton, pois esta tem a característica de não deixar nenhum resíduos na superfície limpa.

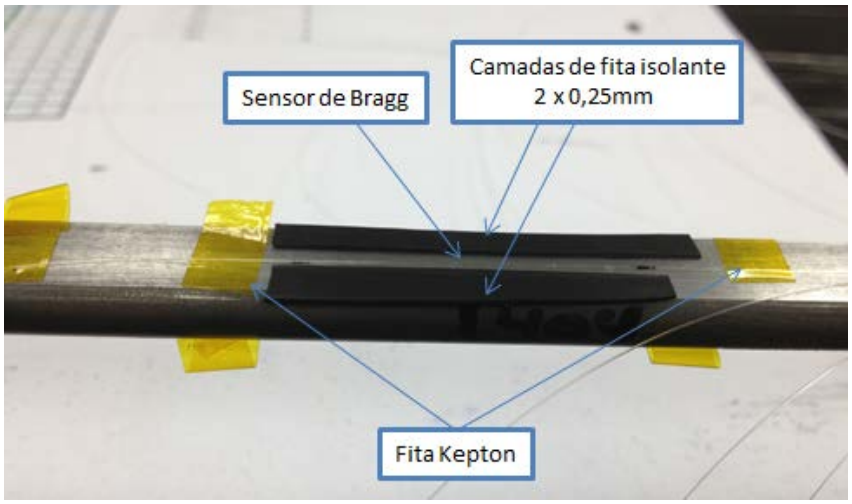


Figura IV.4 – Processo de posicionamento do sensor e delimitação da região de monitoração.

2. Após a etapa 1 do procedimento de instrumentação, a resina epóxi adesiva foi aplicada em cima da fibra na região de cada sensor de forma a preencher toda a região delimitada, respeitando a espessura de 0,50mm das tiras de fita isolante das extremidades da superfície do arame, conforme ilustrado na Figura IV.5. O processo de cura total da resina dura 48 horas à temperatura ambiente, porém pode ser acelerado utilizando uma lâmpada halógena.

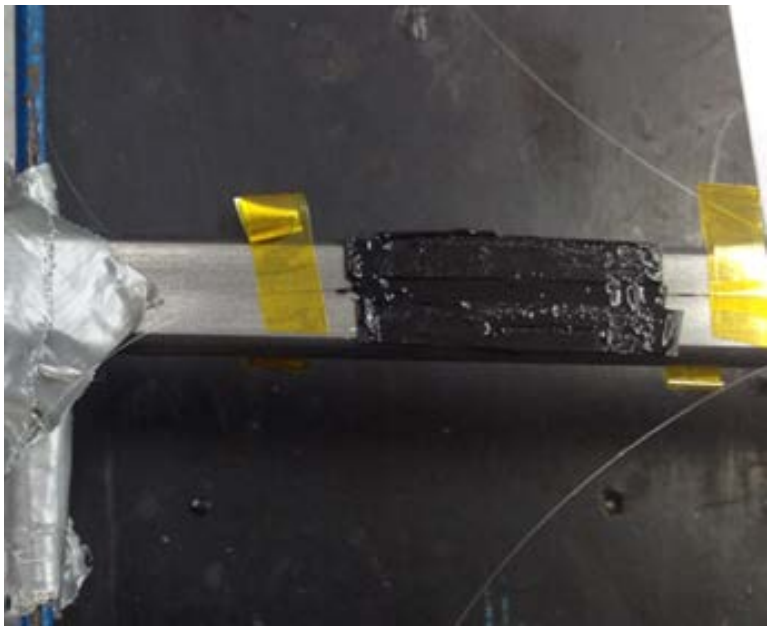


Figura IV.5 – Aplicação da resina adesiva.

3. Uma vez concluída a cura total da resina adesiva, as tiras de fita isolante foram removidas de modo a deixar apenas a resina sobre a fibra na posição do sensor. Além disso, tubings de teflon foram inseridos manualmente nas fibras. Na interface entre a fibra com o tubing e a resina adesiva foi colocado resina de silicone, visto que

este é um ponto de fragilidade do conjunto. A Figura IV.6 ilustra a configuração final da instrumentação de um sensor de Bragg.

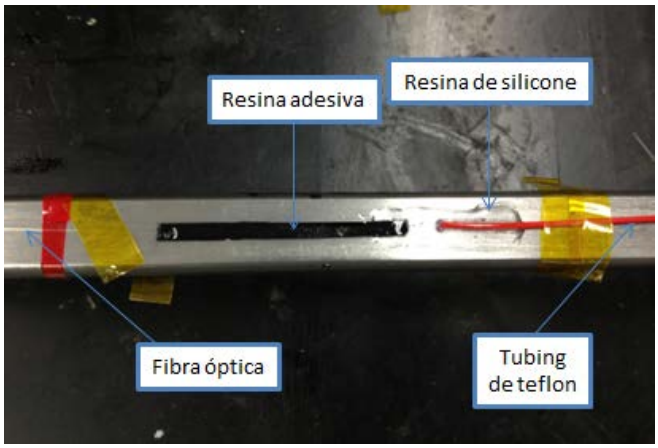


Figura IV.6 – Configuração final da instalação do sensor de Bragg.

4. Com os sensores instalados no arame, é necessário realizar as emendas das fibras ópticas com os conectores ópticos. Esta emenda permite que o sensor seja conectado com o sistema interrogador, que neste caso emite a onda luminosa e recebe o pico de comprimento de onda desejado. Antes da realização das emendas, o protetor de emendas de 40mm é passado em uma das fibras para que após a emenda concluida, o mesmo seja posicionado na região da emenda para dar mais rigidez à flexão.

5. Para a realização dessas emendas é preciso preparar primeiramente as pontas de ambas as fibras, ou seja, a ponta da fibra do sensor e a do conector óptico. Essa preparação consiste em remoção do revestimento da fibra (conforme ilustrado na Figura IV.7), limpeza com algodão embebido com álcool isopropílico e a etapa de clivagem feita com o equipamento chamado clivador (conforme Figura IV.8). A clivagem é um processo de corte feito o mais próximo do ângulo reto possível e é uma etapa muito importante para realização de uma emenda com sucesso.

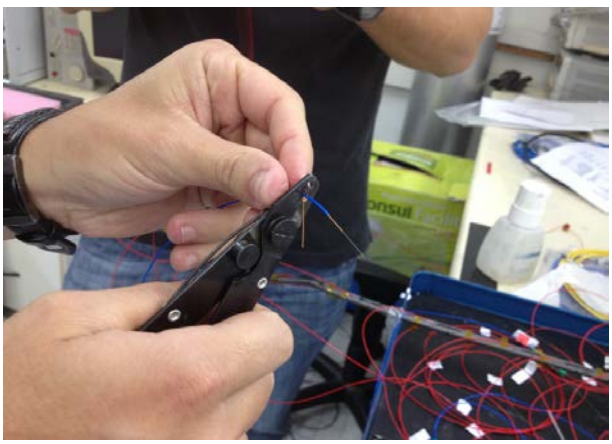


Figura IV.7 – Remoção do revestimento da fibra do conector óptico.

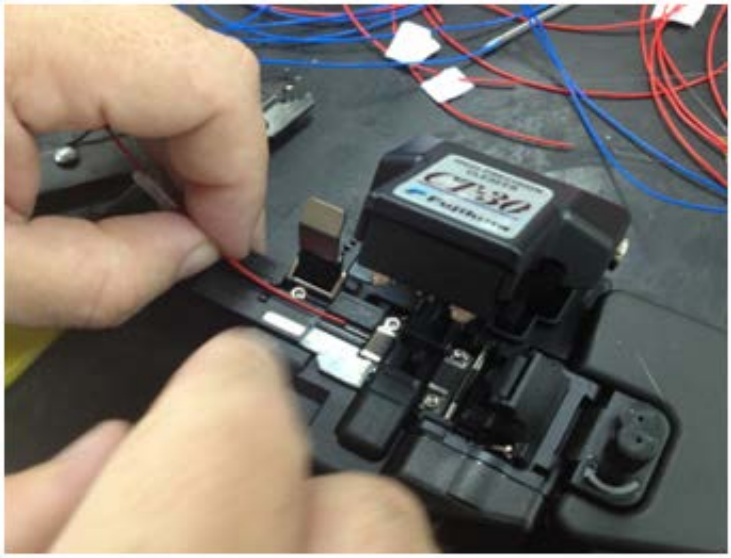


Figura IV.8 – Fibra do sensor sendo clivada.

6. Após preparação das pontas das fibras, estas são posicionadas na máquina de emendas ópticas. O processo de emenda das fibras consiste em uma fusão entre as pontas da fibra dos sensores e a fibra dos conectores ópticos. Após a fusão a máquina de emenda realiza um ensaio de tração para teste de resistência da emenda óptica. A Figura IV.9 mostra o posicionamento das fibras na máquina de emendas ópticas.

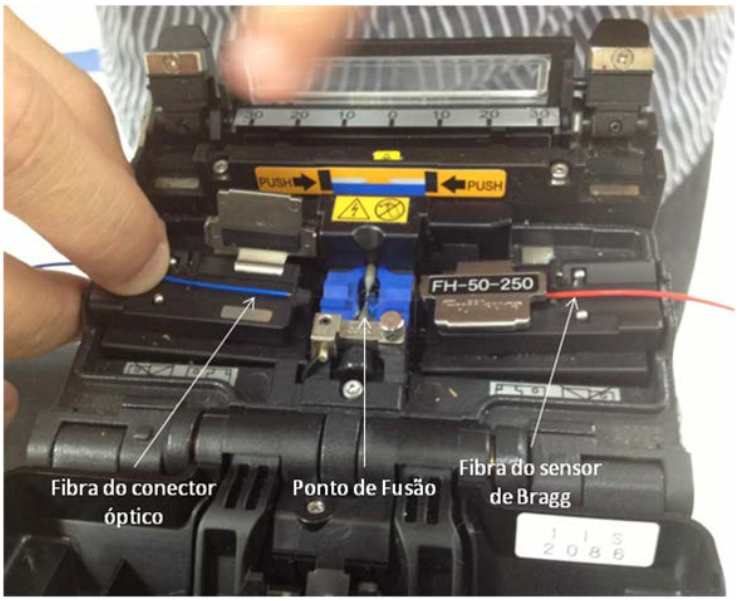


Figura IV.9 – Pontas das fibras posicionadas para a realização das emendas.

7. Com a emenda concluida, o protetor de emendas de 40 mm é posiciodado na região da emenda para que aumente a rigidez à Flexão da mesma. Para a fixação do protetor de emendas, o conjunto (fibras emendadas + protetor) é colocado no

compartimento aquecedor da máquina de emendas ópticas para fazer o polímero do protetor de emendas aderir ao tubing de cada ponta de fibra emendada, conforme ilustrado na Figura IV.10 e Figura IV.11.



Figura IV.10 – Protetor de emendas sendo aquecido para fixação.

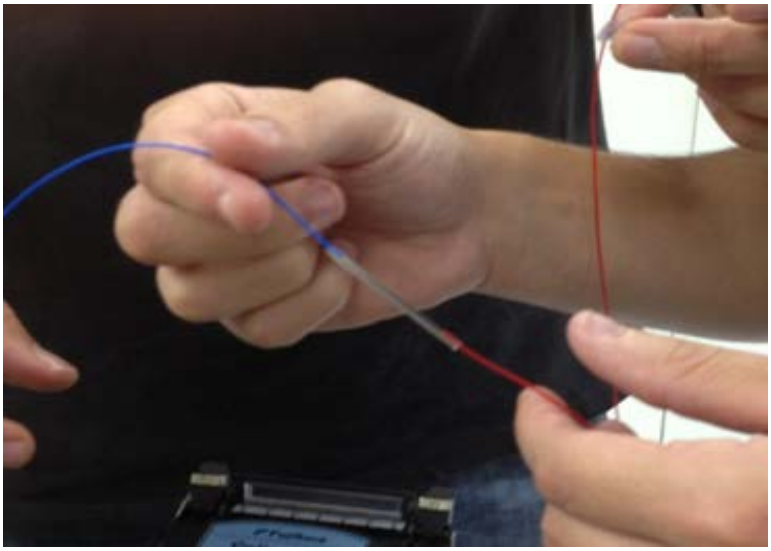


Figura IV.11 – Protetor de emendas instalado.

A Figura IV.12 apresenta a amostra com a instrumentação e todas as emendas concluídas. Os conectores ópticos de cada sensor foram identificados de forma a facilitar a preparação do ensaio e a conexão nos devidos equipamentos interrogadores.

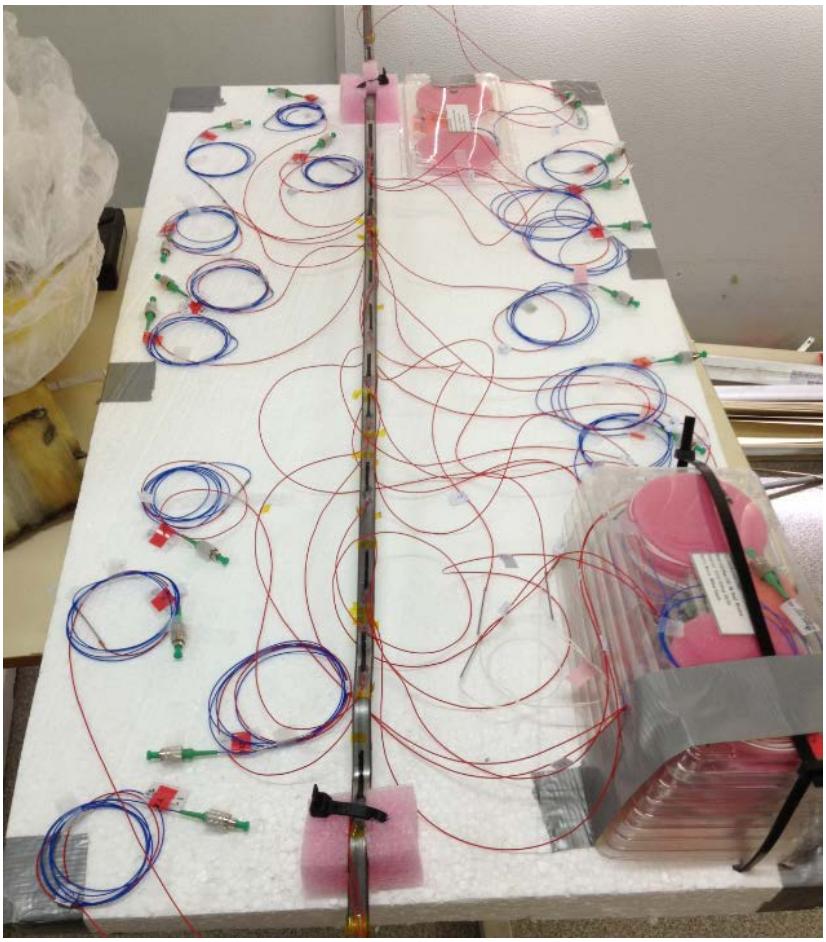


Figura IV.12 – Amostra após execução de toda instrumentação e emendas.

IV.1.1.2 Configuração do ensaio

Tendo em vista a quantidade de sensores e fibras, para o completo moitoramento do ensaio, foi necessário a adaptação com chaves e acopladores ópticos para viabilizar a conexão com os equipamentos *Bragg Meter* e *Micron Optics*, visto que estes possuem poucos canais.

Os acopladores ópticos são dispositivos considerados como multiportas (> 2) tem a função de combinar sinais luminosos, podendo estas serem dos tipos: [26]

- Acoplamento direcional
- Acoplamento distributivo (tipo estrela)
- Multiplexação WDM
- Demultiplexação WDM

A chave óptica integrada (modulador externo) é usada para realizar a multiplexação temporal (TDM). Para a seleção do intervalo de tempo na multiplexação temporal é

necessário aplicar uma tensão elétrica na chave. Dependendo da largura do pulso e do intervalo de tempo (ou atraso) selecionados, podem ser analisados todos os grupos de sensores distribuídos ao longo da fibra independentemente, desde que os níveis de tensão elétrica aplicados na chave óptica não sofram variações ao longo do tempo. A Figura IV.13 apresenta como a configuração do ensaio foi instalada desde o sensor até os sistemas interrogadores.

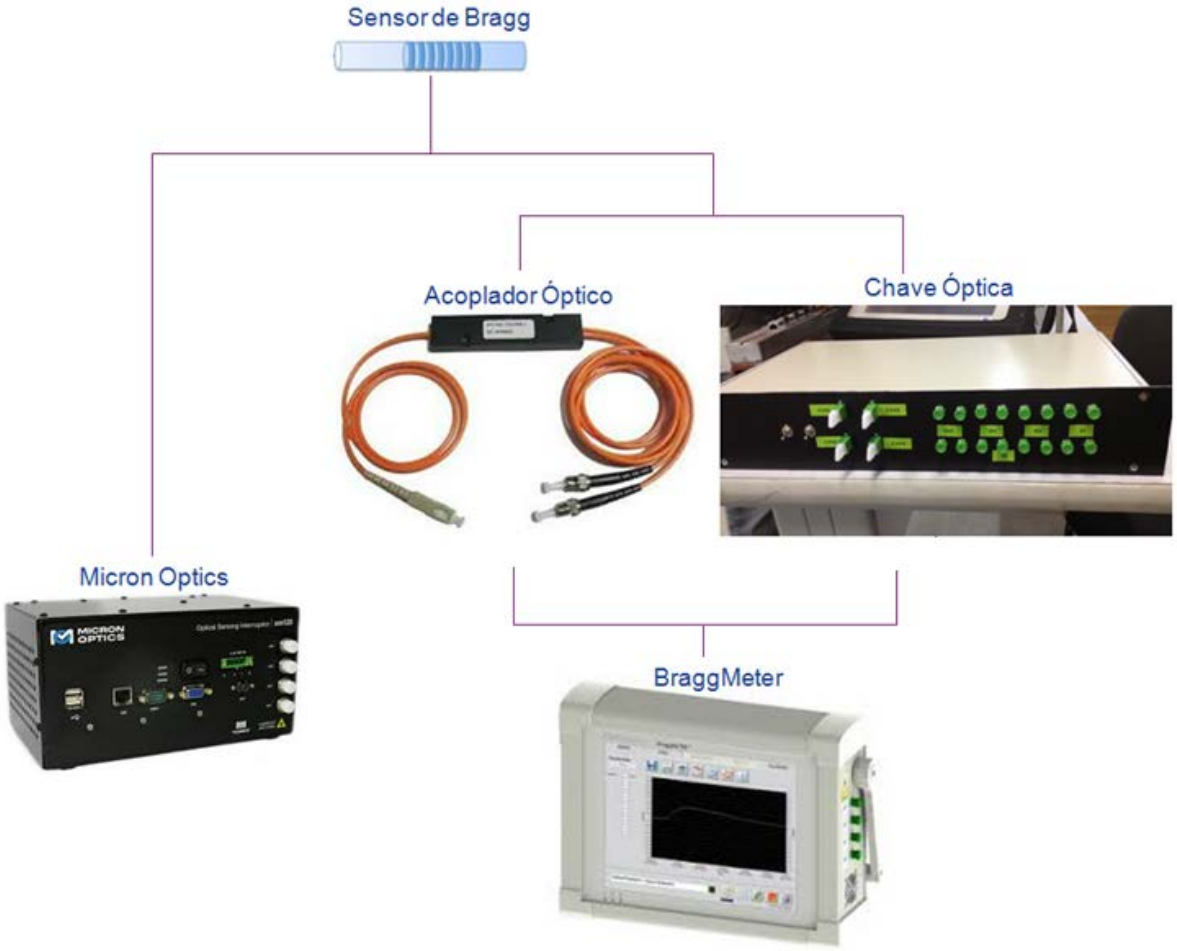


Figura IV.13 – Configuração do sistema utilizado para o monitoramento pelos sensores FBG.

IV.1.1.3 Procedimento de ensaio

O Ensaio consistiu na realização de curvatura no arame instrumentado com os sensores de Bragg utilizando um dispositivo para conformação, conforme mostrado na Figura IV.13, seguindo uma sequência definida. Devido ao número elevado de sensores instrumentados e fibras ópticas, o ensaio teve que ser realizado com extremo cuidado para não danificar nenhuma fibra. A Figura IV.14 mostra a configuração em que o ensaio foi realizado.

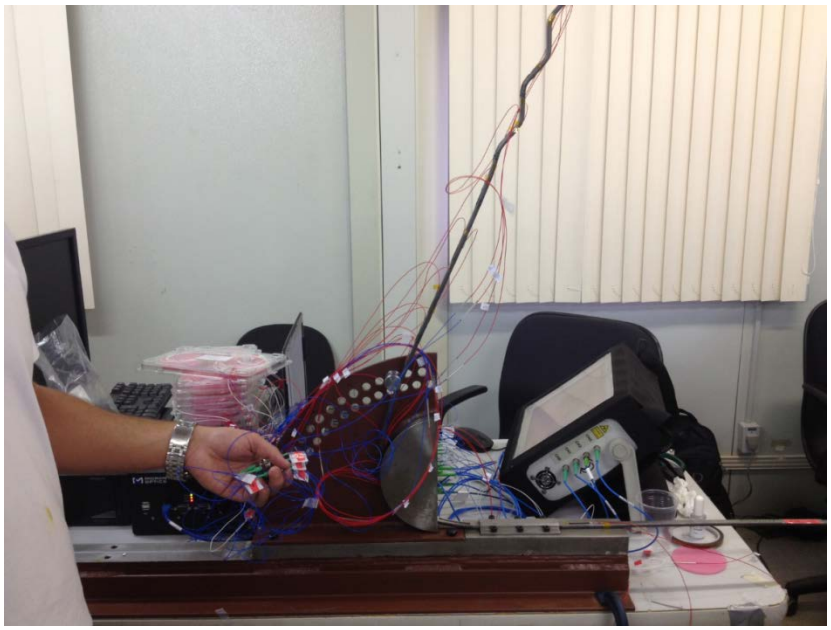


Figura IV.14 – Configuração geral do ensaio.

A seguir é apresentada a sequência de curvamentos realizada no ensaio:

1. Curvamento do arame até o 3º pino

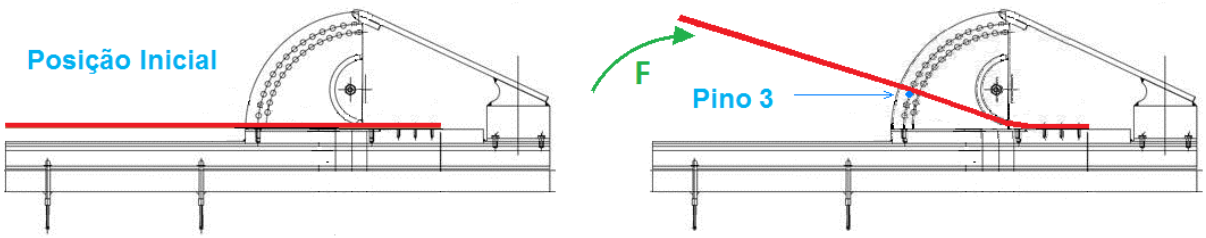


Figura 4.15 - Curvamento até 3º pino.

2. Curvamento do arameaté o 6º pino

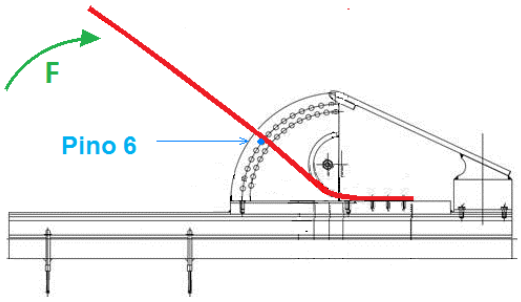


Figura IV.16 - Curvamento até 6º pino.

3. Curvamento do arameaté o 9º pino

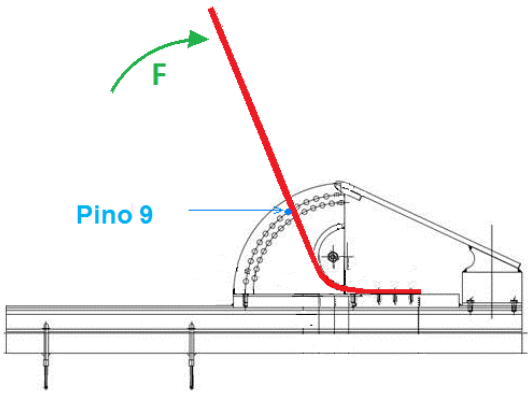


Figura IV.17 - Curvamento até 9º pino.

4. Curvamento do arame até o 12º pino

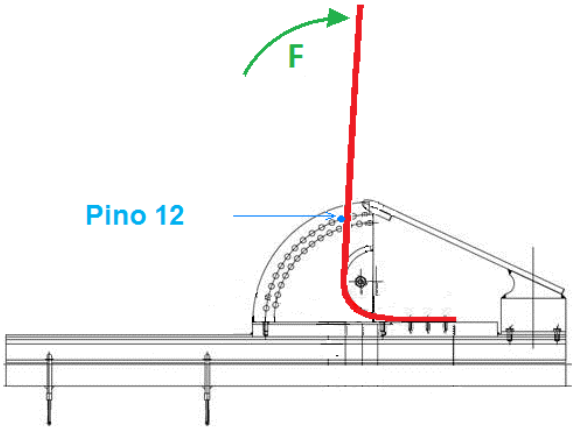


Figura IV.18 - Curvamento até 12º pino.

5. Curvamento do arame até o 14º pino

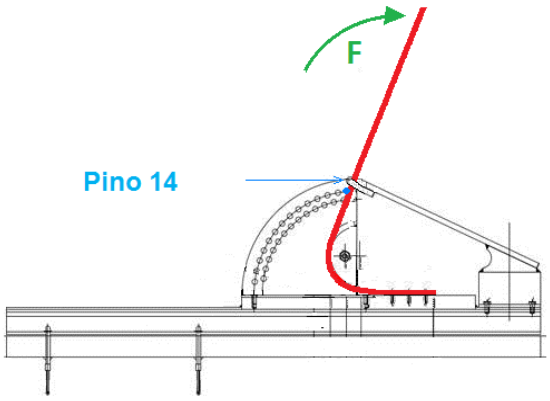


Figura 4.19 - Curvamento até 14º pino.

6. Descarregamento elástico do arame (efeito “spring back”)



Figura 4.20 - Alívio da carga de curvameto imposta no14º pino.

7. Travamento do arame na base do dispositivo

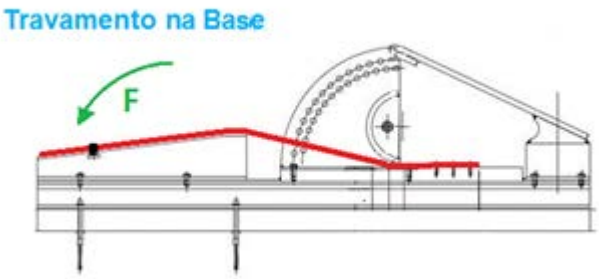


Figura 4.21 -Travamento do arame na base.

8. Alívio do arame após travamento do arame na base do dispositivo

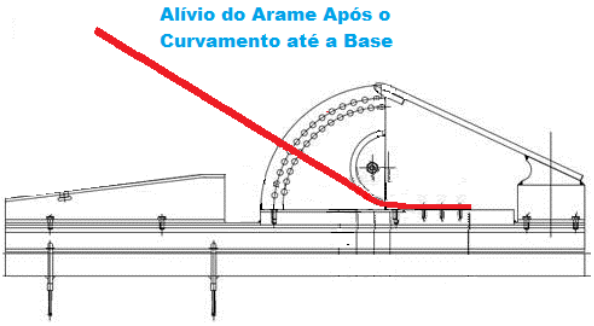


Figura 4.22 –Alívio após travamento do arame na base

IV.1.2 Ensaio utilizando método de extensometria elétrica

Em um trabalho anterior [23] foram realizados ensaios utilizando instrumentação por “strain gages” com uma freqüência de aquisição de dados ajustada em 5Hz, a temperatura ambiente e utilizando um filtro de 100Hz. Foram apresentados resultados para a sequência de ensaio, curvando os arames até o pino 14 do dispositivo e após isto curvando no sentido contrário, até a base do dispositivo, conforme apresentado à seguir.

1. Curvamento do arame até o 14º pino

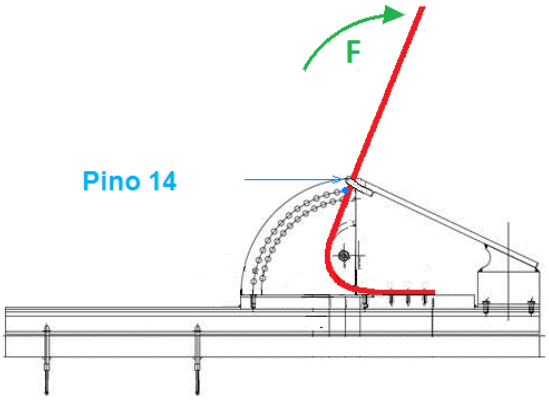


Figura 4.23 - Curvamento até 14º pino. [23]

2. Travamento do arame na base do dispositivo

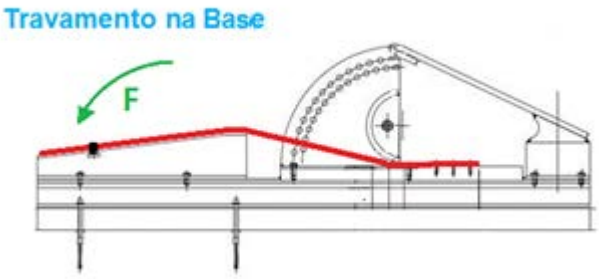


Figura IV.24 - Travamento do arame na base

Foram instalados 22 “strain gages” em cada superfície do arame (superior e inferior), nas posições longitudinais descritas na Figura IV.26. A Figura IV.25a apresenta um detalhe dos strain gages instalados e a Figura IV.25b mostra uma visão geral dos mesmos no arame.



(a) (b)

Figura IV.25 - Posicionamento dos “strain gages” no corpo de prova – (a) detalhe e (b) visão geral. [23]

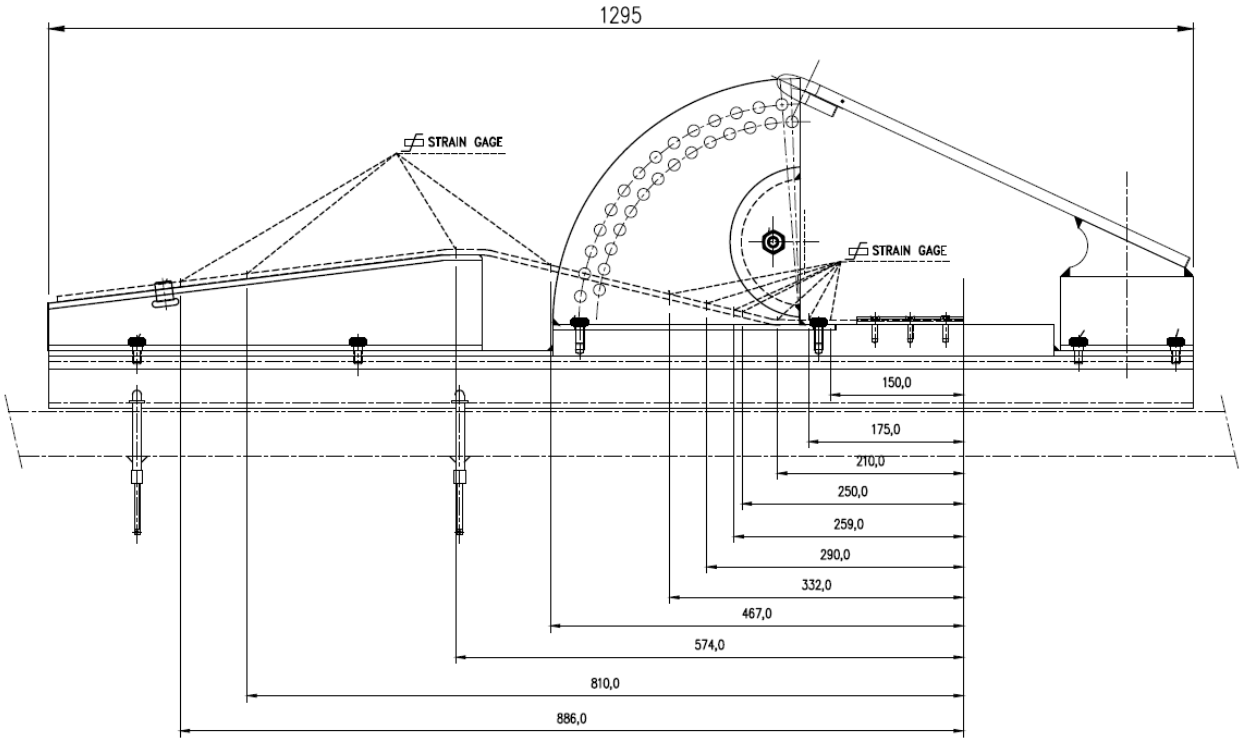


Figura IV.26 - Posicionamento esquemático dos “strain gages”. [23]

Nos ensaios foram usados “strain gages” uniaxiais fabricados pela Kyowa, modelo KFEL-2-120-C1-L30C3R de resistência 120 ohms e deformação máxima de 10%. Para a fixação dos mesmos foi utilizado adesivo a base cianoacrilato (Loctite 401). [23]

IV.1.2.1 Ensaios adicionais para levantamento de condição aceitável

Para este trabalho, foram realizados ensaios adicionais utilizando os mesmos modelos de “strains gage” e parâmetros descritos no item IV.1.2, cujo objetivo foi levantar as deformações e tensões residuais aceitáveis para este tipo de montagem avaliando-se a menor tensão residual em que seja possível instalar os acessórios do conector.

Os ensaios foram realizados seguindo a sequência apresentada à seguir.

a. Amostra 1 - Curvamento do arame até o pino 1 (aproximadamente 20° com a horizontal), seguido de descarregamento elástico do arame (efeito “spring back”)

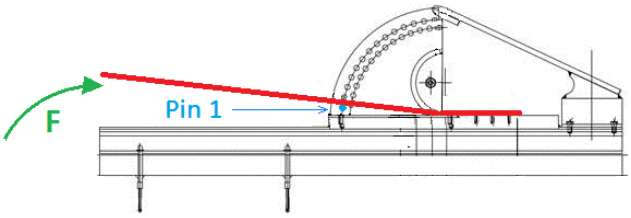


Figura IV.27 - Curvamento até 1º pino.

b. Amostra 2 - Curvamento do arame até o pino 3 (aproximadamente 30° com a horizontal), seguido de descarregamento elástico do arame (efeito “spring back”)

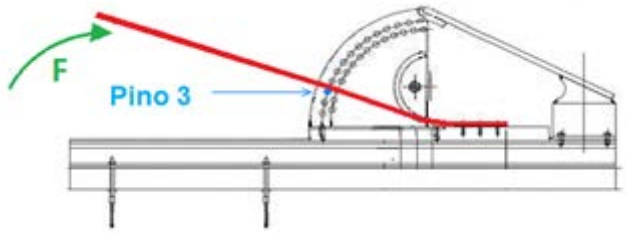


Figura IV.28 - Curvamento até 3º pino.

c. Amostra 3 - Curvamento do arame até o pino 6 (aproximadamente 45° com a horizontal), seguido de descarregamento elástico do arame (efeito “spring back”)

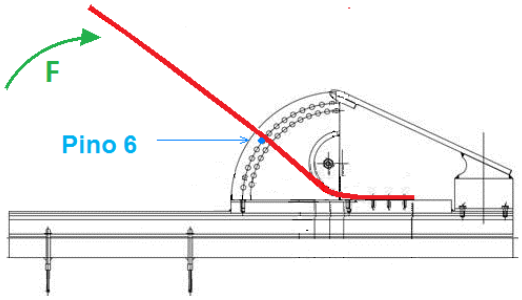


Figura IV.29 - Curvamento até 6º pino.

Após todo o programa de ensaios apresentado neste item, obteve-se os valores das deformações experimentais das amostras. Estas deformações aquisitadas, por sua vez, passaram por tratamento e foram incluídas no modelo analítico apresentado no capítulo a seguir, para que fosse gerada as estimativas das distribuições das tensões residuais oriundas dos processos de curvamento.

Capítulo V Resultados Experimentais e Metodologia

V.1 introdução

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados de deformação encontrados no programa experimental utilizando os métodos de extensometria óptico da rede de Bragg e elétrico por “strain gages”, fazendo também uma abordagem comparativa entre as metodologias. Após esta abordagem serão apresentados as estimativas da distribuição das tensões residuais na seção transversal das amostras, baseados no modelo analítico e extraídos do programa VB6, oriundos das mesmas sequências de curvamento da amostra descrita também no programa experimental.

V.2 Deformações Experimentais de Rede de Bragg

Na Tabela V.1 mostra-se os dados de material, dados geométricos das amostras utilizadas nos ensaios, assim como os valores do momento elástico My, raio de curvatura elástico ρy e o momento de inércia I utilizados para os cálculos das tensões residuais.

Tabela V.1 – Dados geométricos, de material e variáveis básicas

Dados Geométricos	
b	12 mm
c	3 mm
h	6 mm

Dados de Material	
S_y	1100 Mpa
E	205 Gpa

Variáveis Básicas	
M_y	72 N.m
ρ_y	559 mm
I	$2.16 . 10^{-10}$ m^{-4}

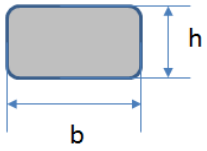


Figura V.1- Seção transversal retangular de cantos arrendondados.

Conforme descrito no item IV.1.1.3, o ensaio foi realizado em 8 etapas:

1. Curvamento da armadura até o 3º pino
2. Curvamento da armadura até o 6º pino
3. Curvamento da armadura até o 9º pino
4. Curvamento da armadura até o 12º pino
5. Curvamento da armadura até o 14º pino
6. Descarregamento elástico do arame (efeito “spring back”)
7. Travamento do arame na base do dispositivo
8. Alívio do arame após travamento do arame na base do dispositivo

Serão apresentados os resultados de deformação para cada etapa relacionada. Os valores de deformação obtidos experimentalmente serão graficamente expressos em função da deformação necessária para se iniciar o escoamento do material.

O desenvolvimento do modelo analítico tem como base os parâmetros apresentados no item anterior e nos momentos e raios de curvatura aplicados experimentalmente.

Com relação ao modelo analítico, na condição de material EPSE, o modelo obedece à condição onde o momento aplicado (αM_y) ou (βM_y) é obrigatoriamente maior que o momento elástico (M_y) e também menor que o momento de colapso plástico, ou seja, $M_y < \alpha M_y < M_{CP}\ ou\ M_y < \beta M_y < M_{CP}$. Nesta condição, "α" representa o fator de plasticicade do momento trativo em relação a um ponto e "β" o fator de plasticicade do momento compressivo em relação ao mesmo ponto, conforme ilustrado na Figura V.2.

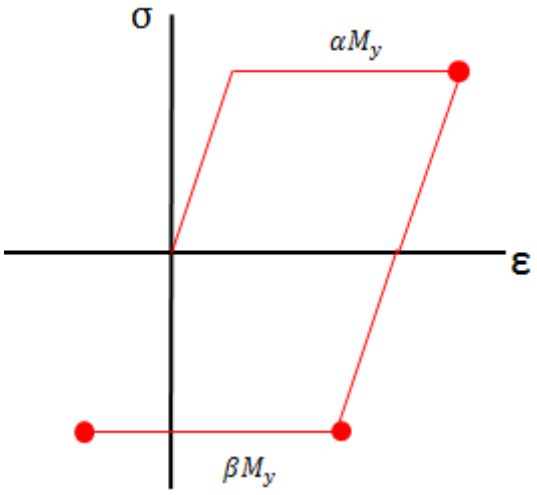


Figura V.2 – Curvamento inicial αM_y seguido de curvamento reverso βM_y, em relação à um ponto.

V.2.1 Deformações com a amostra curvada até o 3° pino

Segue apresentação do resultado da distribuição de deformação ao longo do arame após ser curvado até a posição do pino 3. Nesta posição de curvatura, é experimentalmente verificado que o ponto de maior deformação está a 150 mm da referência zero da amostra com valores em torno de 200% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material. Note que os resultados de deformação dos sensores em compressão foram apresentados em módulo, porém foram aquisitados com sinal negativo.

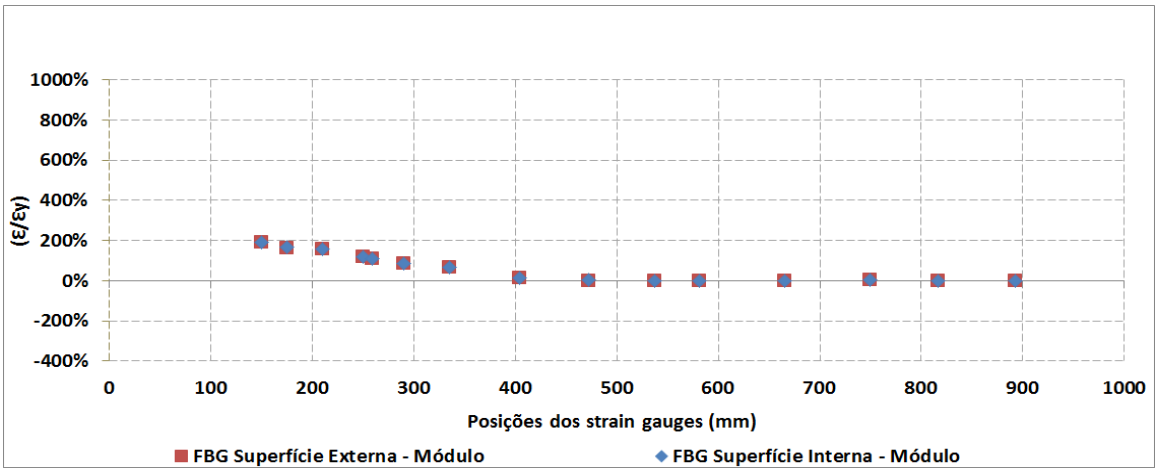


Figura V.3 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 3° pino

V.2.2 Deformações com a amostra curvada até o 6° pino

Seguindo a sequência de curvaturas executadas na amostra, segue apresentação do resultado da distribuição de deformação ao longo do arame após ser curvado até a posição do pino 6. Nesta posição de curvatura, é experimentalmente verificado que o ponto de maior deformação está a 210 mm da referência zero com valores em torno de 370% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material.

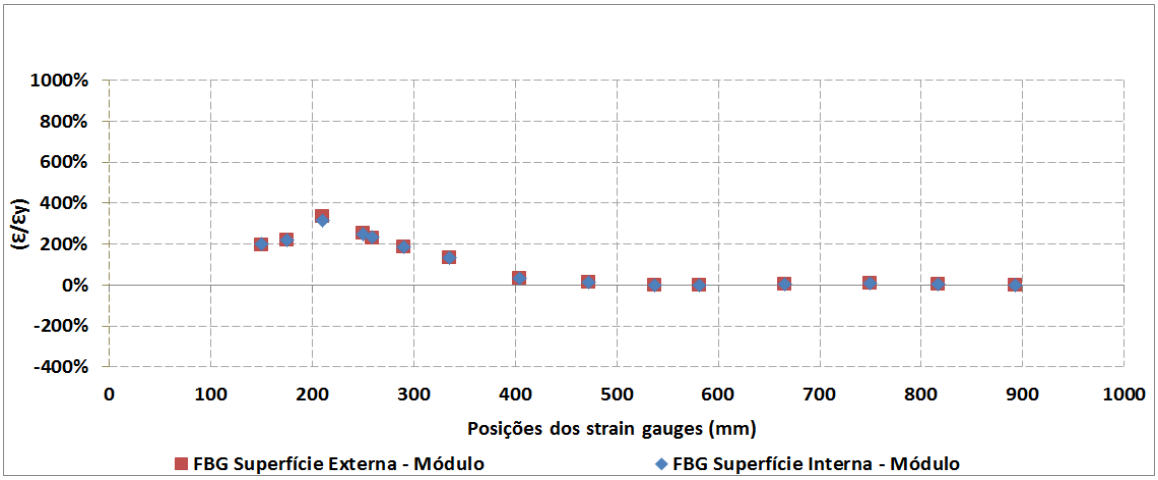


Figura V.4 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 6° pino

V.2.3 Deformações com a amostra curvada até o 9° pino

Conforme previsto na sequência de curvaturas para esse experimento, segue apresentação do resultado da distribuição de deformação ao longo do arame após ser curvado até a posição do pino 9. Nesta posição de curvatura, foi verificado que o ponto de maior deformação está a 250 mm da referência zero com valores em torno de 440% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material.

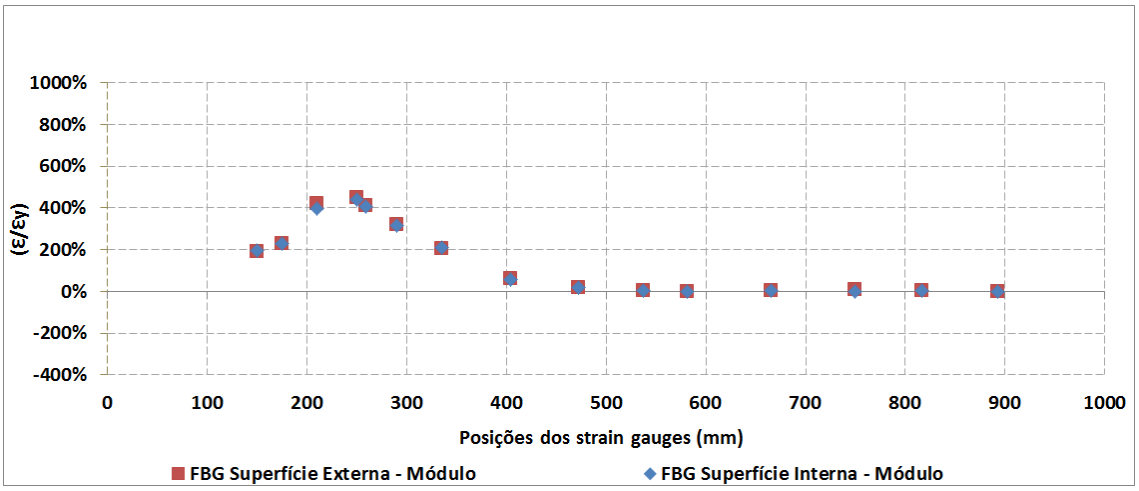


Figura V.5 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 9° pino

V.2.4 Deformações com a amostra curvada até o 12° pino

Após o curvamento até a posição do pino 12, é experimentalmente verificado que o ponto de maior deformação está a 250 mm da referência zero com valores em torno de 560% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material.

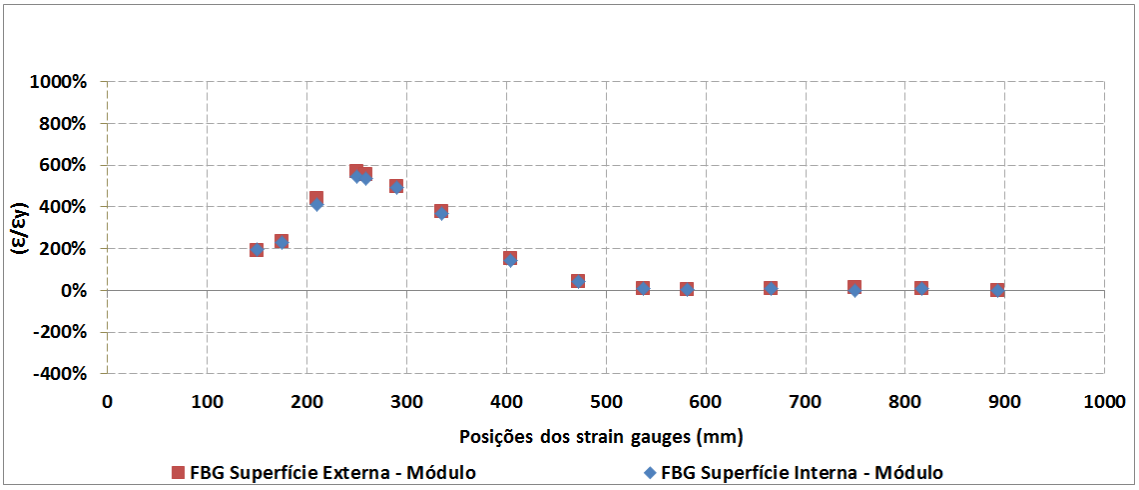


Figura V.6 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 12° pino

V.2.5 Deformações com a amostra curvada até o 14° pino

Seguindo a sequência de curvaturas executadas na amostra, segue apresentação do resultado da distribuição de deformação ao longo do arame após ser curvado até a posição de máxima curvatura to experimento, o pino 14. Nesta posição de curvatura, é verificado que o ponto de maior deformação está a 250 mm da referência zero com valores em torno de 690% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material.

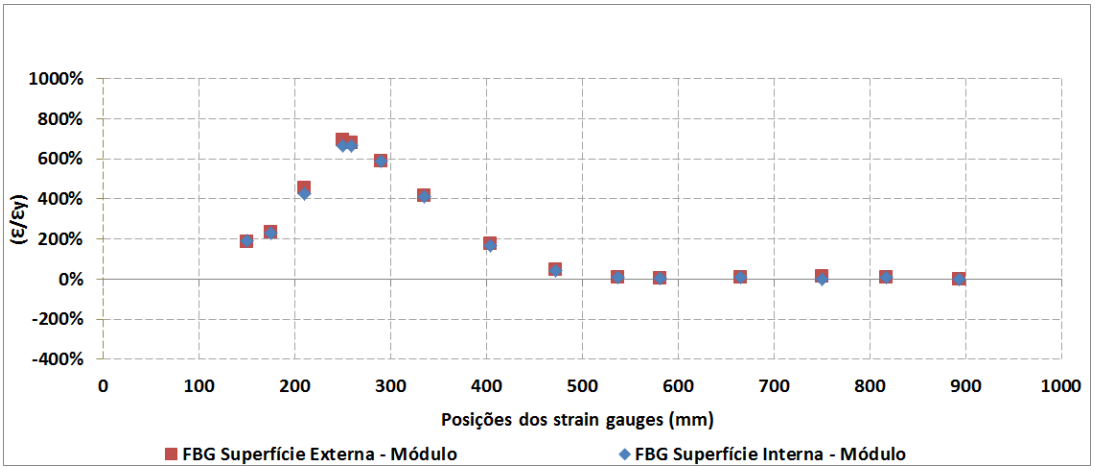


Figura V.7 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame no 14° pino

V.2.6 Deformações após descarregamento elástico da amostra (efeito “spring back”)

Com o alívio do carregamento máximo executado neste programa experimental, segue apresentação do resultado da distribuição de deformação residual ao longo do arame após ser aliviado. Nesta situação, é experimentalmente verificado que o ponto de maior deformação continua sendo o de 250 mm da referência zero, porém houve uma redução da deformação aplicada, permanecendo apenas a deformação plástica residual, com valores em torno de 510% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material.

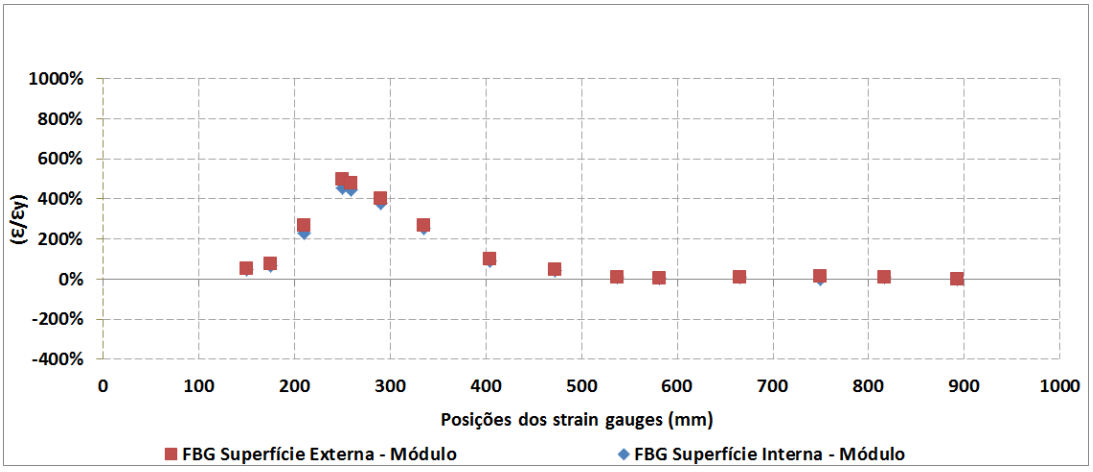


Figura V.8 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame após descarregamento elástico

V.2.7 Deformações apóstravamento do arame na base do dispositivo

Segue apresentação do resultado da distribuição de deformação residual ao longo do arame após ser carregado no sentido contrário à sequência de carregamento inicial até a base do dispositivo de teste. Nesta posição, é experimentalmente verificado que o carregamento contrário gerou uma redução significativa nos resultados de deformação. Mesmo assim o ponto de maior deformação não se altera, continuando sendo o de 250 mm a partir da referência zero com valores em torno de 200% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material.

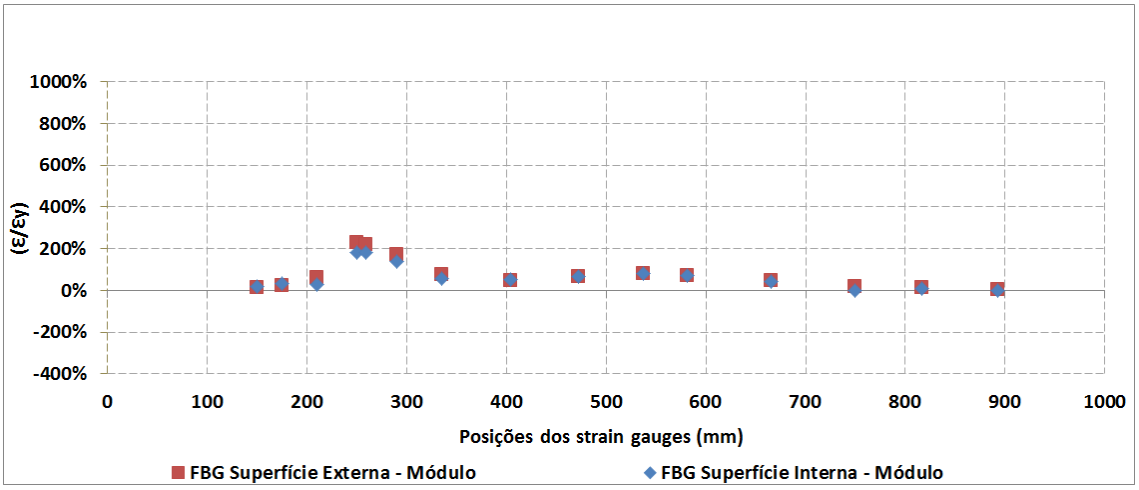


Figura V.9 – Distribuição das deformações em função do escoamento do material ao longo do arame na base do dispositivo

V.2.8 Deformações após alívio do arame a partir do travamento do mesmo na base do dispositivo

Com o alívio do carregamento aplicado até a base do dispositivo de teste, ou seja, no sentido contrário ao carregamento máximo executado neste programa experimental, segue apresentação do resultado da distribuição de deformação residual ao longo do arame após ser aliviado. Nesta situação, é experimentalmente verificado que o ponto de maior deformação se desloca para 410 mm da referência zero, com um aumento da deformação residual atuante no material apresentando assim valores em torno de 370% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material.

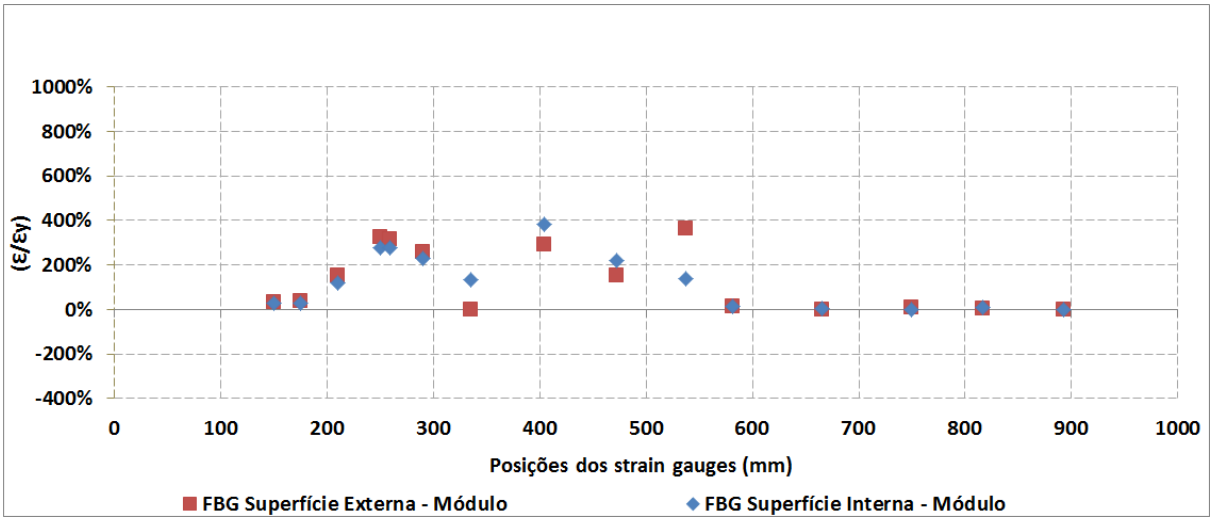


Figura V.10 – Distribuição das deformações proporcionais ao longo do arame após alívio a partir da base do dispositivo.

Analisando o ponto de 250 mm foi verificado que, após o carregamento contrário até a base do dispositivo e o alívio consequente deste carregamento, as deformações residuais sofreram uma redução de aproximadamente 100% em relação à deformação necessária para início do escoamento do material, ficando com valores proporcionais em torno de 300%. Este resultado mostra que os carregamentos plásticos contrários alteram as deformações residuais, diminuindo-as.

V.3 Análise Comparativa das Deformações Experimentais

Este subitem se reserva à apresentação de uma abordagem comparativa entre as deformações encontradas experimentalmente utilizando a metodologia da rede de Bragg e as encontradas com o uso da instrumentação elétrica convencional por “strain gages”, onde parte dos resultados gerados através do método de extensometria elétrica foram referenciados de Lopes [23].

A comparação foi realizada apenas nas três posições que apresentaram maiores deformações nos ensaios realizados com as duas metodologias, ou seja, nas posições dos pinos 9, 12 e 14. Também serão apresentados os resultados comparativos das deformações após travamento do arame na base do dipositivo e após alívio do arame depois de tê-lo deformado até a base do dispositivo.

V.3.1 Comparação das deformações com a amostra curvada até o 9° pino

A análise comparativa entre as deformações obtidas pelas duas metodologias, para a etapa de curvatura até o 9° pino, apontou uma tendência de uniformidade demonstrando uma coerência nos valores de deformação encontrados.

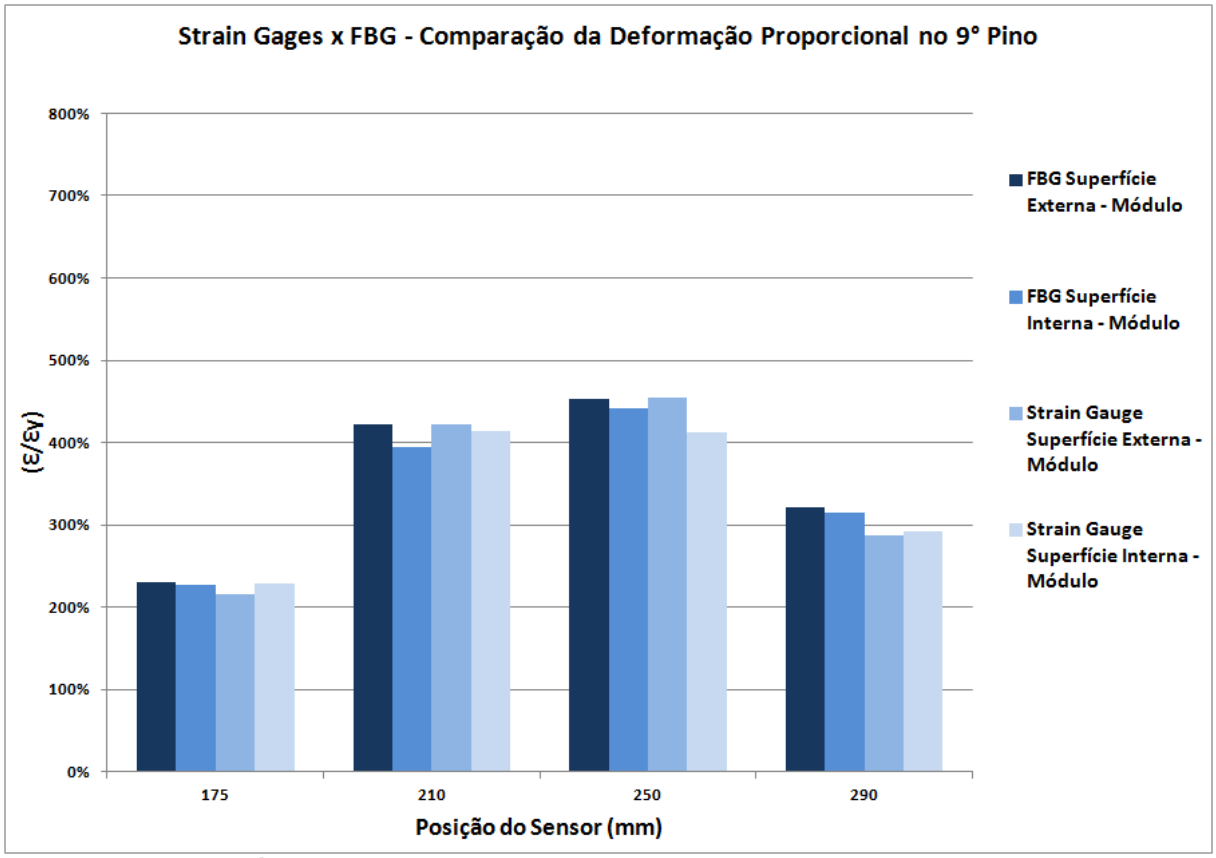


Figura V.11 – Gráfico comparativo das deformações, em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, na posição do 9° pino

V.3.2 Comparação das deformações com a amostra curvada até o 12° pino

Já a análise comparativa para a etapa de curvatura até o 12° pino também apontou uma tendência uniforme, porém na posição de maior deformação (250 mm) apresentou uma divergência maior. Esta divergência pode estar relacionada ao ensaio que foi executado com arames do mesmo material, porém amostras diferentes gerando assim essa pequena variação.

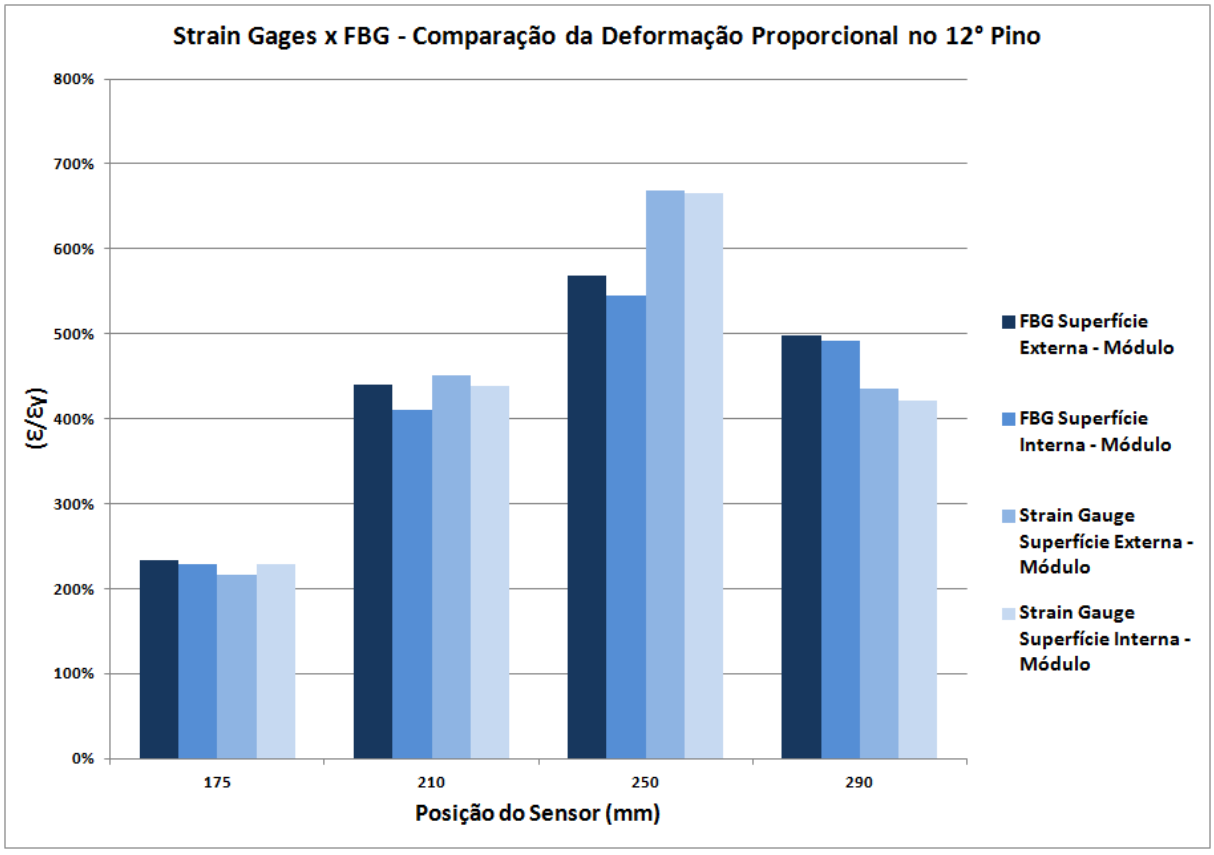


Figura V.12 – Gráfico comparativo das deformações, em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, na posição do 12° pino

V.3.3 Comparação das deformações com a amostra curvada até o 14° pino

Para a etapa de curvatura máxima destes ensaios, até o 14° pino, a análise comparativa mostrou valores de deformação muito próximos. Por serem amostras distintas de um mesmo material, estes percentuais de diferença podem ser considerados desprezíveis.

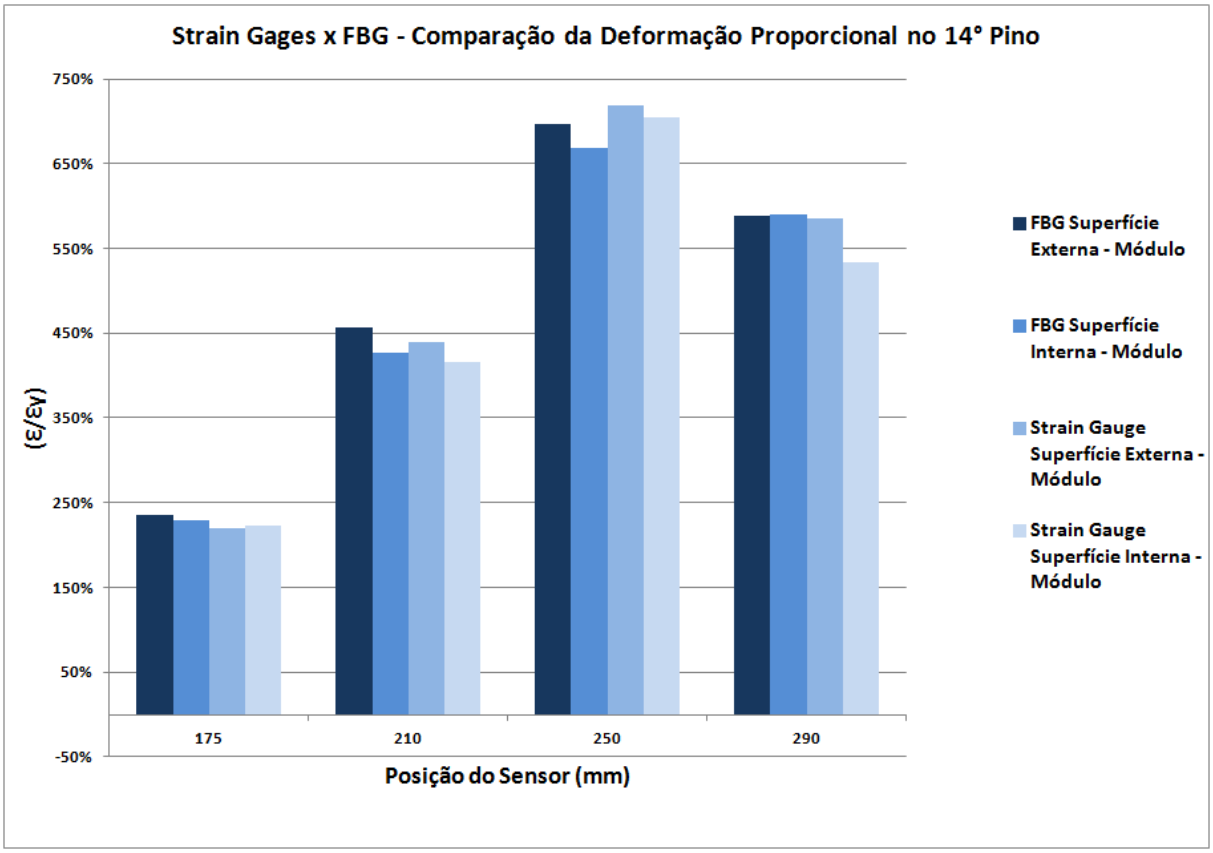


Figura V.13 – Gráfico comparativo das deformações, em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, na posição do 14° pino

V.3.4 Comparação das deformações após travamento do arame na base do dispositivo

Com a etapa de curvatura para o sentido contrário, até a base do dispositivo de ensaio, a análise comparativa também apresentou valores de deformação muito próximos e esta diferença também pode ser considerada desprezível.

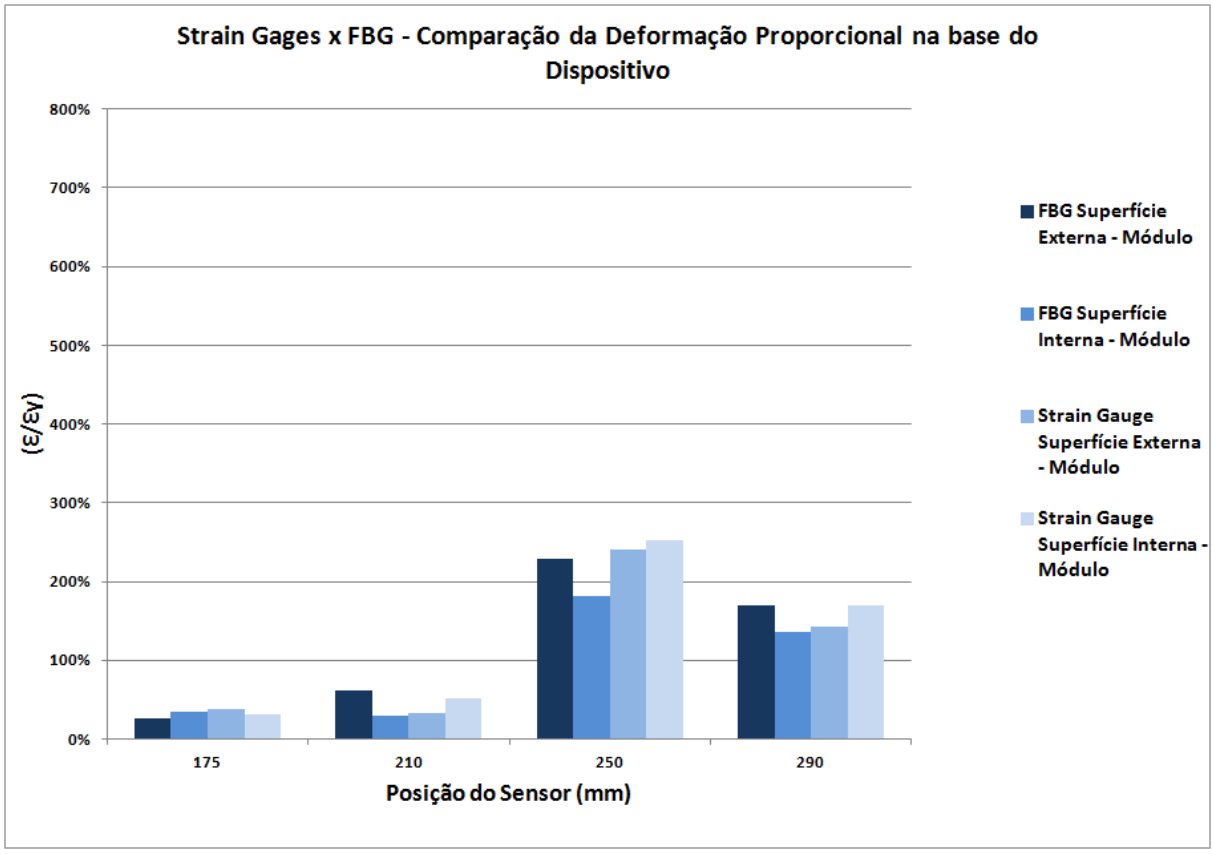


Figura V.14 – Gráfico comparativo das deformações , em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, com a amostra curvada até a base do dispositivo

V.3.5 Comparação das deformações após alívio do arame a partir do travamento do mesmo na base do dispositivo

Após o descarregamento elástico da amostra (*spring back*), as deformações entre as duas técnicas se apresentaram de forma homogênea, ratificando a confiabilidade das técnicas.

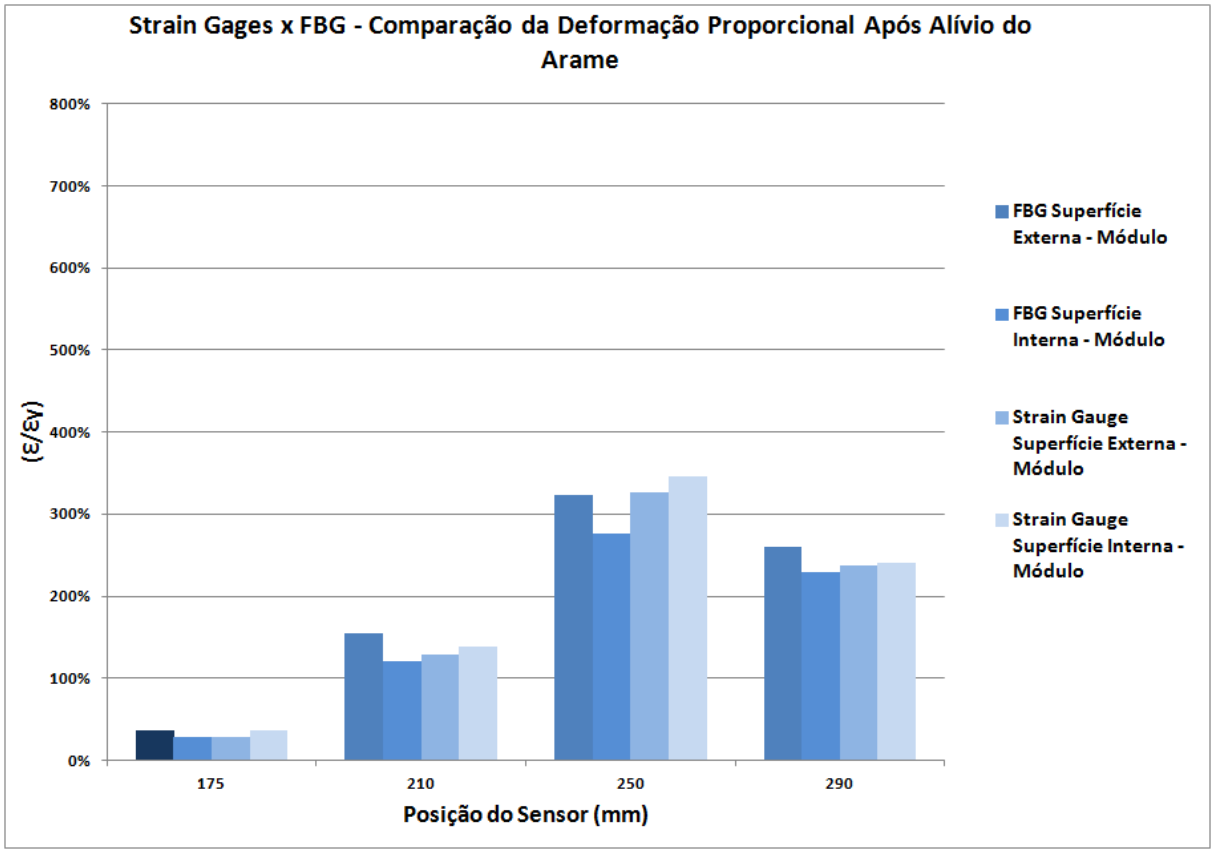


Figura V.15 – Gráfico comparativo das deformações , em função do escoamento do material, entre as duas metodologias de monitoramento, após o alívio do arame a partir do curvamento até a base do dispositivo.

V.4 Análise das Deformações Experimentais dos Ensaios para Condição Aceitável

Baseado nos experimentos apresentados no subitem IV.1.2.1, a análise das deformações foram feitas a partir das medições dos “strain gages” instalados nos pontos de maior deformação encontrados nos testes anteriores para estas curvaturas menores, ou seja, nas posições 175mm e 210mm a partir do ponto de referência da amostra. Estes dados foram plotados e apresentados juntamente para as três condições de teste 20° (1° pino), 30° (3° pino) e 45° (6° pino). Ressalta-se que esses testes foram realizados utilizando amostras diferentes para cada ângulo de curvamento.

V.4.1 Deformações com a amostra curvada

O gráfico da Figura V.16 apresenta as deformações em cada posição (175 e 210) com o arame curvado nas nos três ângulos (20°, 30° e 45°).

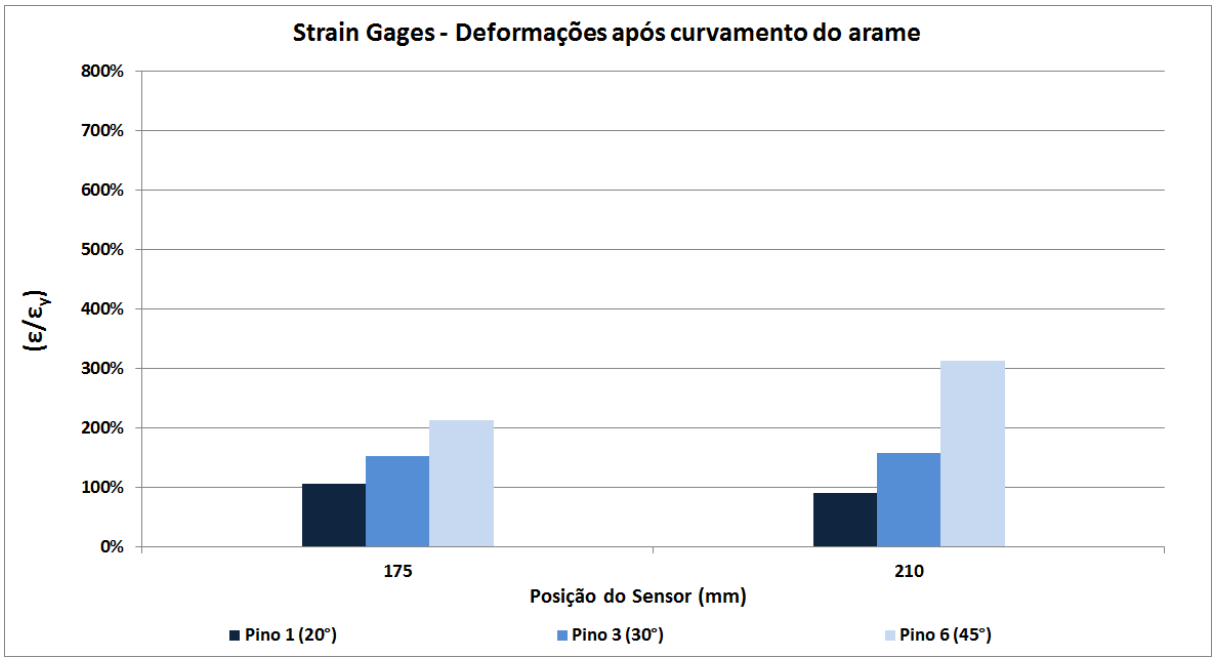


Figura V.16 – Deformações, em função do escoamento do material, nos pontos 175 e 210 do arame após o curvamento até os pinos 1, 3 e 6.

Neste caso, pode-se notar que as deformações nos pinos 3 e 6 estão na ordem de 160% e 300%, respectivamente, da necessária para se alcançar o início do escoamento do material, na posição 210mm do zero de referência na amostra. Contudo a deformação resultada da amostra curvada até o pino 1, apresentou-se em torno do valor da deformação do início de escoamento.

V.4.2 Deformações após descarregamento elástico da amostra (efeito “spring back”)

O gráfico da Figura V.17 apresenta as deformações em cada posição (175 e 210) após o descarregamento elástico de cada arame em cada ângulo de curvamento.

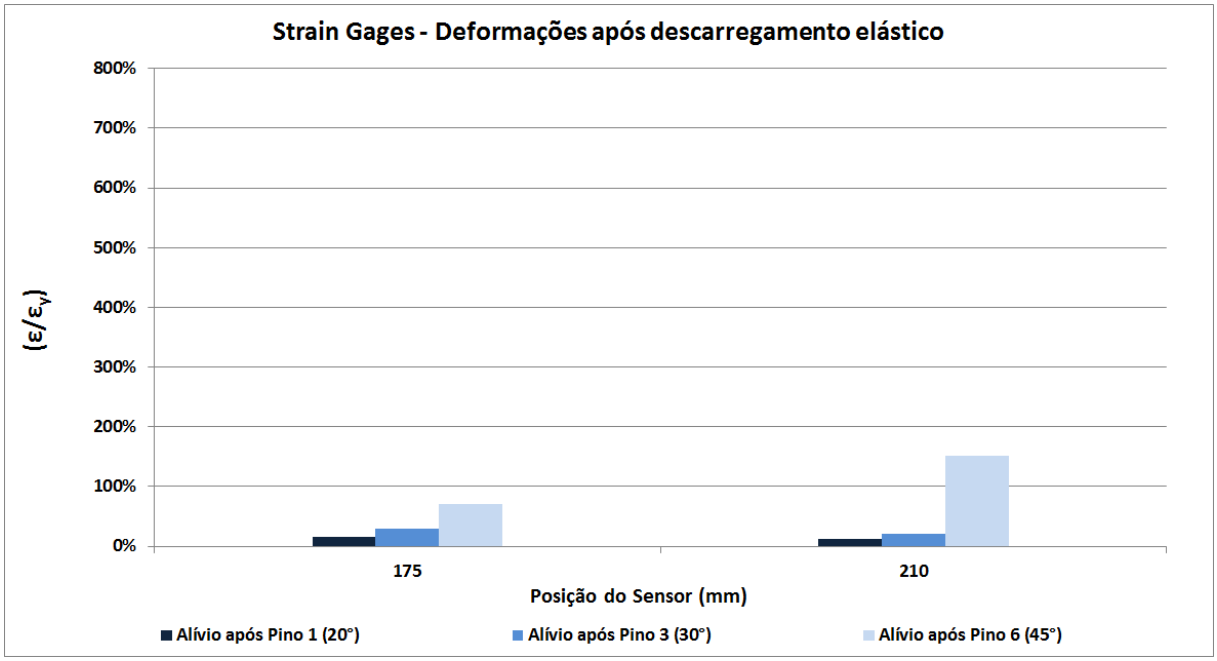


Figura V.17 – Deformações, em função do escoamento do material, nos pontos 175 e 210 do arame após o descarregamento elástico.

Com o alívio dos arames após serem curvados, a deformação residual do arame curvado até o pino 6 mostrou-se da ordem de 150% da deformação necessária para o início do escoamento do material (ε_y), na posição 210mm do zero de referência na amostra. Já as deformações residuais orinda dos curvamentos até os pinos 1 e 3 mostraram-se abaixo de ε_y.

V.4.3 Deformações após fixação do arame na base do dispositivo

O gráfico da Figura V.18 apresenta as deformações em cada posição (175 e 210) após o curvamento de cada arame na base do dispositivo.

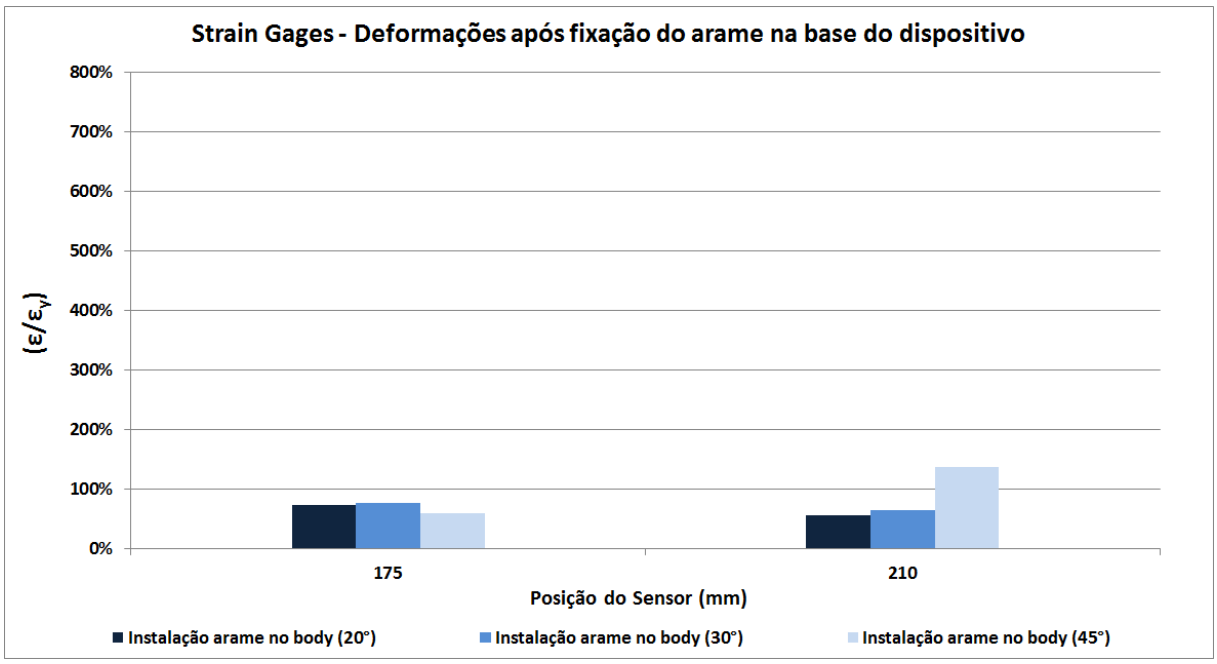


Figura V.18 – Deformações, em função do escoamento do material, nos pontos 175 e 210 do arame após o assentamento na base do dispositivo.

Na etapa final deste experimento, com o carregamento contrário até a base do dispositivo, apenas a deformação final do arame curvado até o pino 6 mostrou-se acima de (ε_y), da ordem de 30%. As demais deformações apresentaram valores menores que (ε_y).

V.5 Análise das Tensões Residuais

Para estimar a distribuição das tensões residuais na seção transversal da amostra de arame da armadura de tração do tubo flexível, durante os ensaios, foi utilizado o modelo analítico apresentado no Capítulo III. Este modelo foi escrito em linguagem VB6, para facilitar as análises das tensões residuais.

Neste item serão apresentadas as estimativas das distribuições de tensão residual ao longo da espessura da amostra nos pontos de maiores deformações plásticas geradas nas sequências de curvatura praticadas nos ensaios, conforme Tabela V.2.

Tabela V.2 – Sequência de curvamentos para análise das tensões residuais

Sequência	Carregamento	Sentido	Spring back	Descarregamento	Sentido	Spring back
1	Elastoplástico Até o Pino 14	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Não
2	Elastoplástico Até o Pino 14	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Sim
3	Elastoplástico Até o Pino 1 (20°)	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Não
4	Elastoplástico Até o Pino 1 (20°)	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Sim
5	Elastoplástico Até o Pino 3 (30°)	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Não
6	Elastoplástico Até o Pino 3 (30°)	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Sim
7	Elastoplástico Até o Pino 6 (45°)	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Não
8	Elastoplástico Até o Pino 6 (45°)	Positivo	Sim	Elastoplástico até a base do dispositivo	Negativo	Sim

V.5.1 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 1

Nesta sequência de curvamento, foi imposta à amostra um carregamento no sentido até o pino 14 onde há a deformação plástica de quase toda a seção transversal (a). Esta deformação então, foi aliviada elásticamente (b) gerando uma distribuição de tensões residuais ao longo da espessura (c). Após isso a amostra foi novamente carregada elastoplasticamente, no sentido contrário, até a base do dispositivo (d). Uma vez que o carregamento não foi aliviado neste caso não possui descarregamento elástico (e), gerando a distribuição de tensões residuais e aplicadas mostradas em (f).

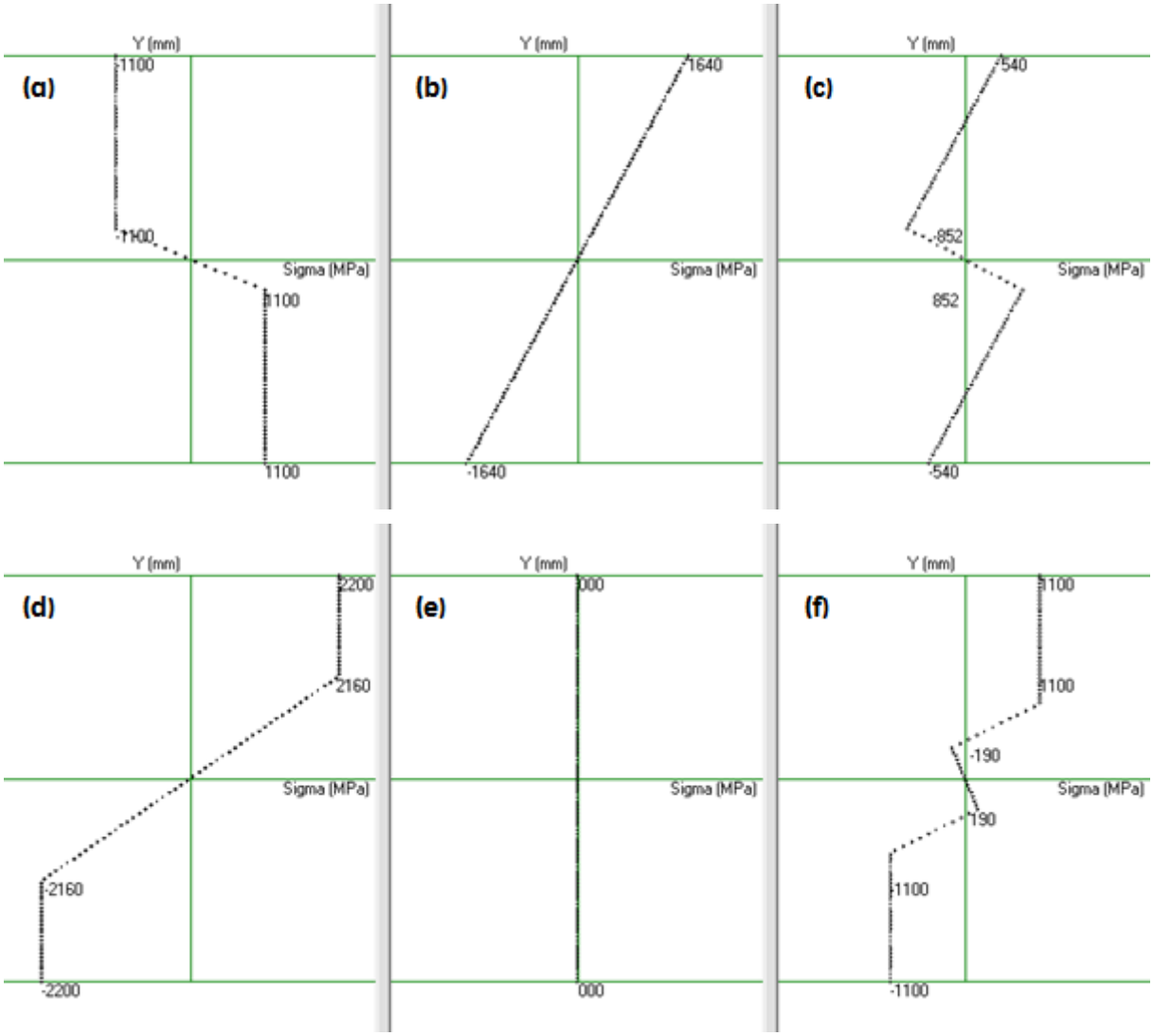


Figura V.19 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 1

V.5.2 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 2

Nesta sequência de curvamento, o carregamento inicial foi aplicado conforme descrito na primeira sequência de curvamento (a, b e c). Após isso, a amostra foi carregada elastoplasticamente, no sentido contrário, até a base do dispositivo (d), seguido de descarregamento elástico (e), gerando a distribuição de tensões residuais apresentadas em (f).

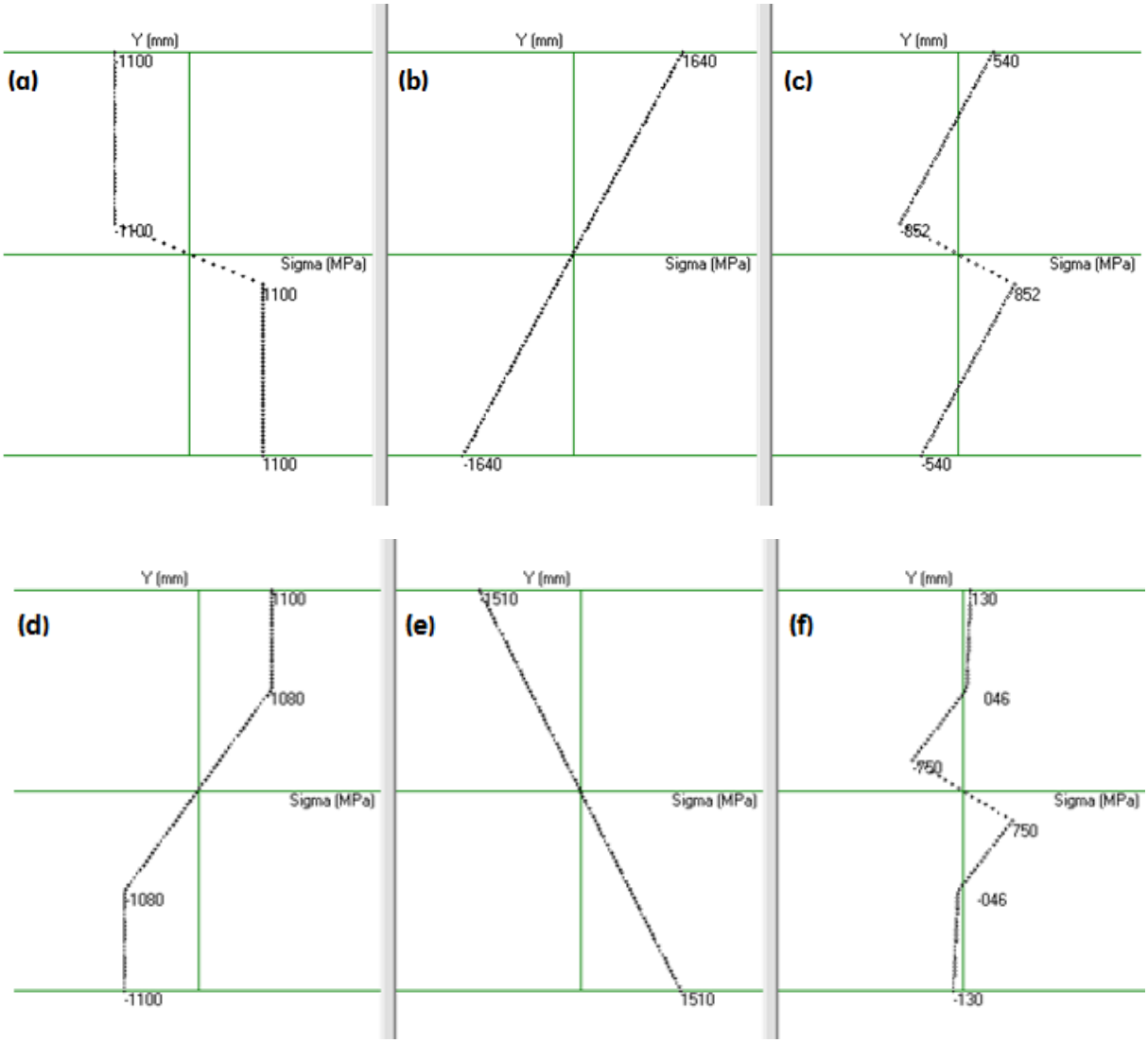


Figura V.20 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 2

Neste caso, foi visto que as tensões residuais internas são consideravelmente maiores que as tensões das superfícies. Isto ratifica a atenção que deve ser dada à distribuição das tensões residuais na seção transversal do arame, onde a medição experimental das deformações nas superfícies dos arames configura-se apenas um passo intermediário para a estimativa da distribuição das tensões residuais na seção transversal.

V.5.3 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 3

Na sequência de curvamento 3, a amostra foi carregada até o pino 1, no sentido positivo formando aproximadamente 20° com a horizontal. O Momento aplicado nesta etapa impôs uma tensão suficiente para atingir o escoamento do material conforme mostrado em (a). Após este carregamento inicial, a carga foi aliviada elasticamente como esperado (b), apesar do arame ter escoado a distribuição de tensões residuais se mostrou aproximadamente nula (c). Então a amostra foi carregada outra vez, porém no sentido contrário, até a base do dispositivo (d). Uma vez que o carregamento não foi aliviado, neste caso não possui descarregamento elástico (e), gerando a distribuição de tensões mostradas em (f).

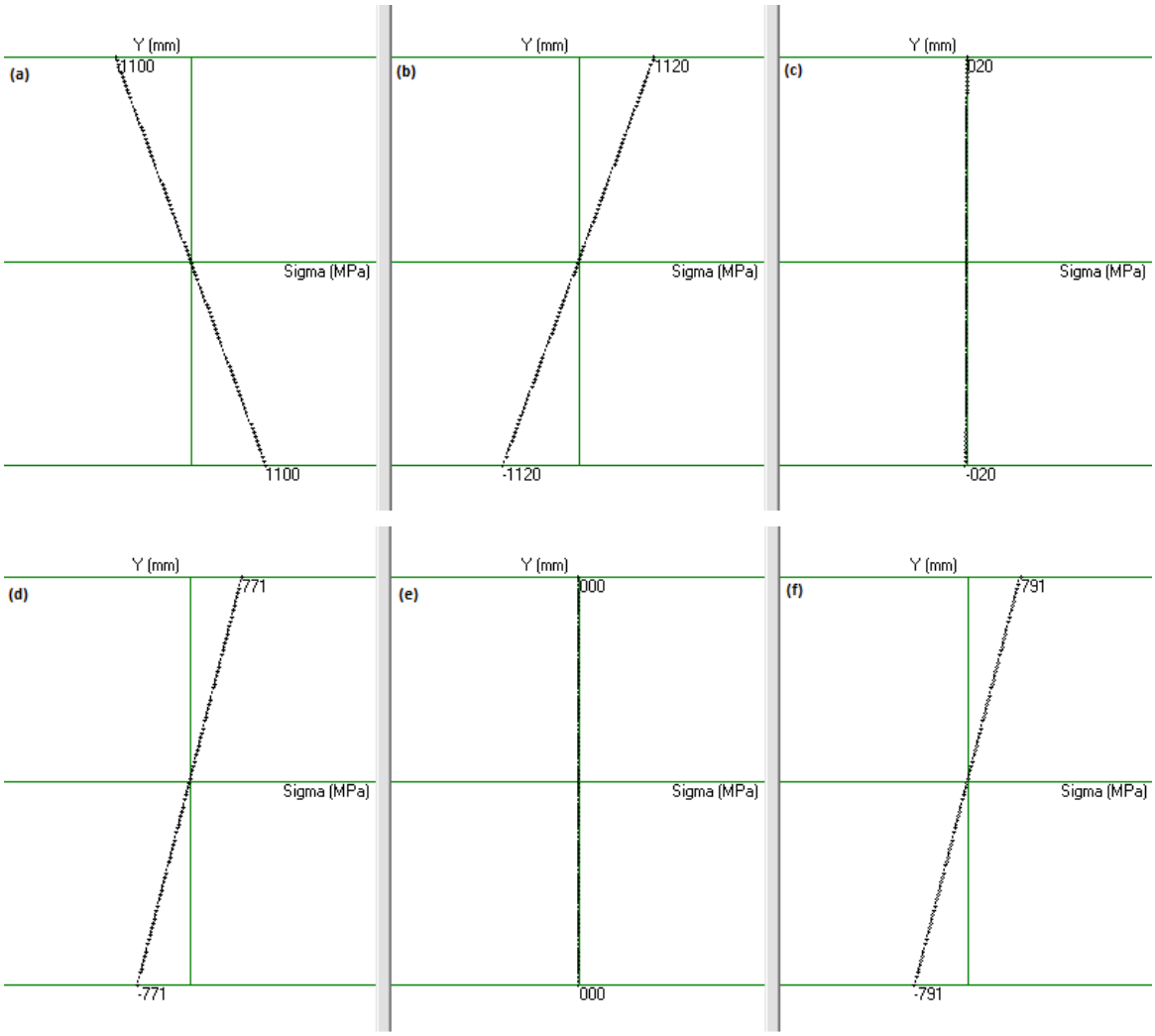


Figura V.21 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 3

Esta sequência de carregamento mostra que a tensão aplicada no carregamento reverso, até a base do dispositivo, é em quase sua totalidade elástica e o fato de não proporcionar o descarregamento posterior, a tensão se mantém aplicada e com elevado

valor nas superfícies. Neste caso, devido ao fato que no carregamento primário ter ocorrido muito pouca plasticidade, na sequência o carregamento reverso não foi elastoplástico.

V.5.4 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 4

Nesta sequência de curvamento, o carregamento inicial foi aplicado conforme descrito na sequência de curvamento 4 (gráficos a, b e c). Após isso, a amostra foi carregada novamente, no sentido contrário, até a base do dispositivo (d), seguido de descarregamento elástico (e), gerando a distribuição de tensões residuais apresentadas em (f).

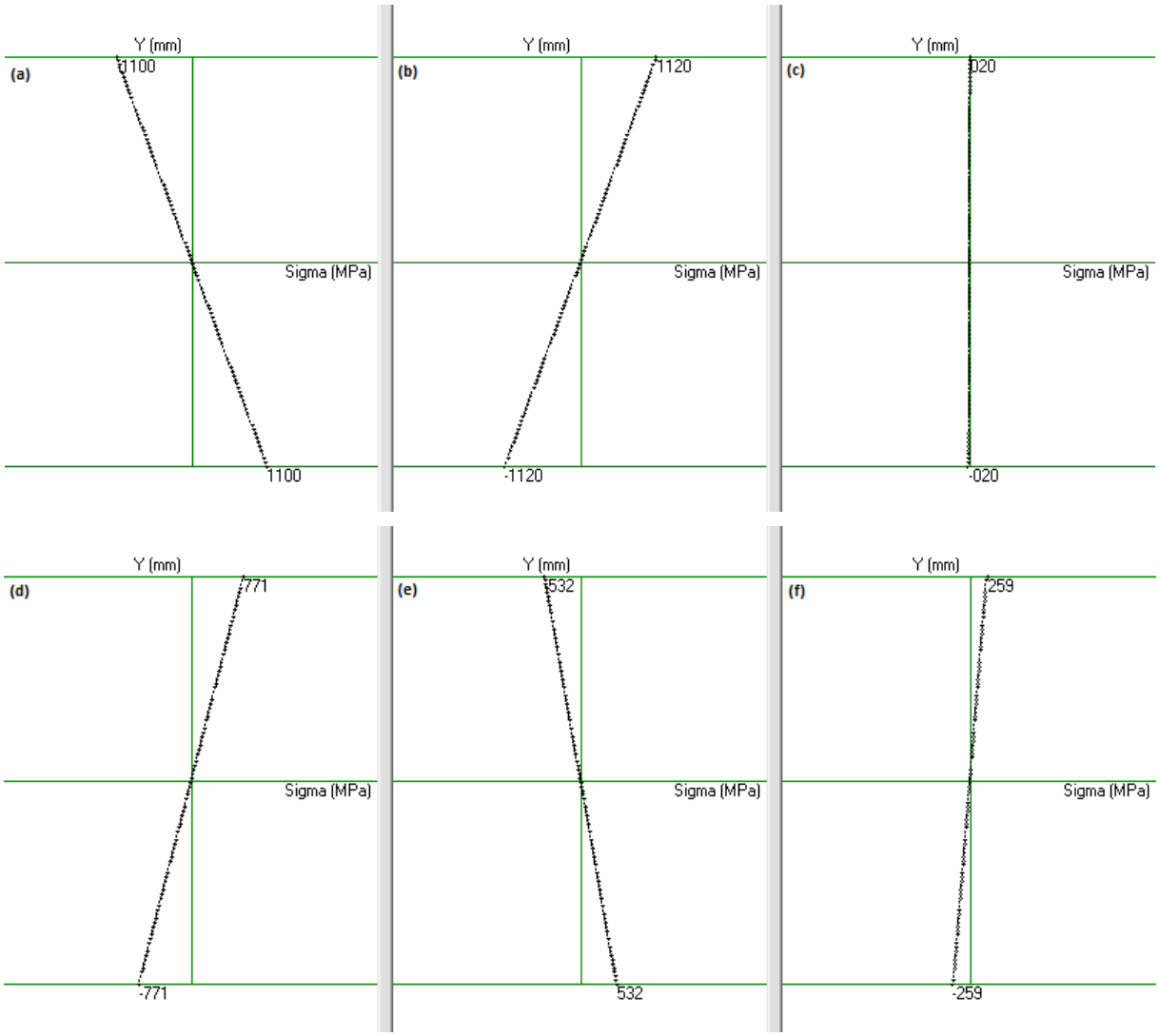


Figura V.22 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 4

Nesta sequência de carregamento, se tem a mesma condição da sequência de carregamento 3 (Figura V.21), porém com o descarregamento elástico após o carregamento reverso. Note que o efeito “spring back” do descarregamento posterior é menor que o carregamento reverso, gerando tensões residuais nas superfícies superior e inferior de aproximadamente 260MPa.

V.5.5 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 5

Na sequência de carregamento 5, foi imposto à amostra um momento puro no sentido referencial negativo até o pino 3, no qual ocorre deformação plástica de uma pequena porção superficial da espessura do arame (a) seguida de descarregamento elástico (b) gerando uma distribuição de tensões residuais ao longo da espessura (c). Após isso a amostra foi reversamente carregada, até a base do dispositivo (d). Neste caso não foi considerado o descarregamento elástico desta última carga imposta, gerando assim uma distribuição de tensões residuais e aplicadas mostradas em (f).

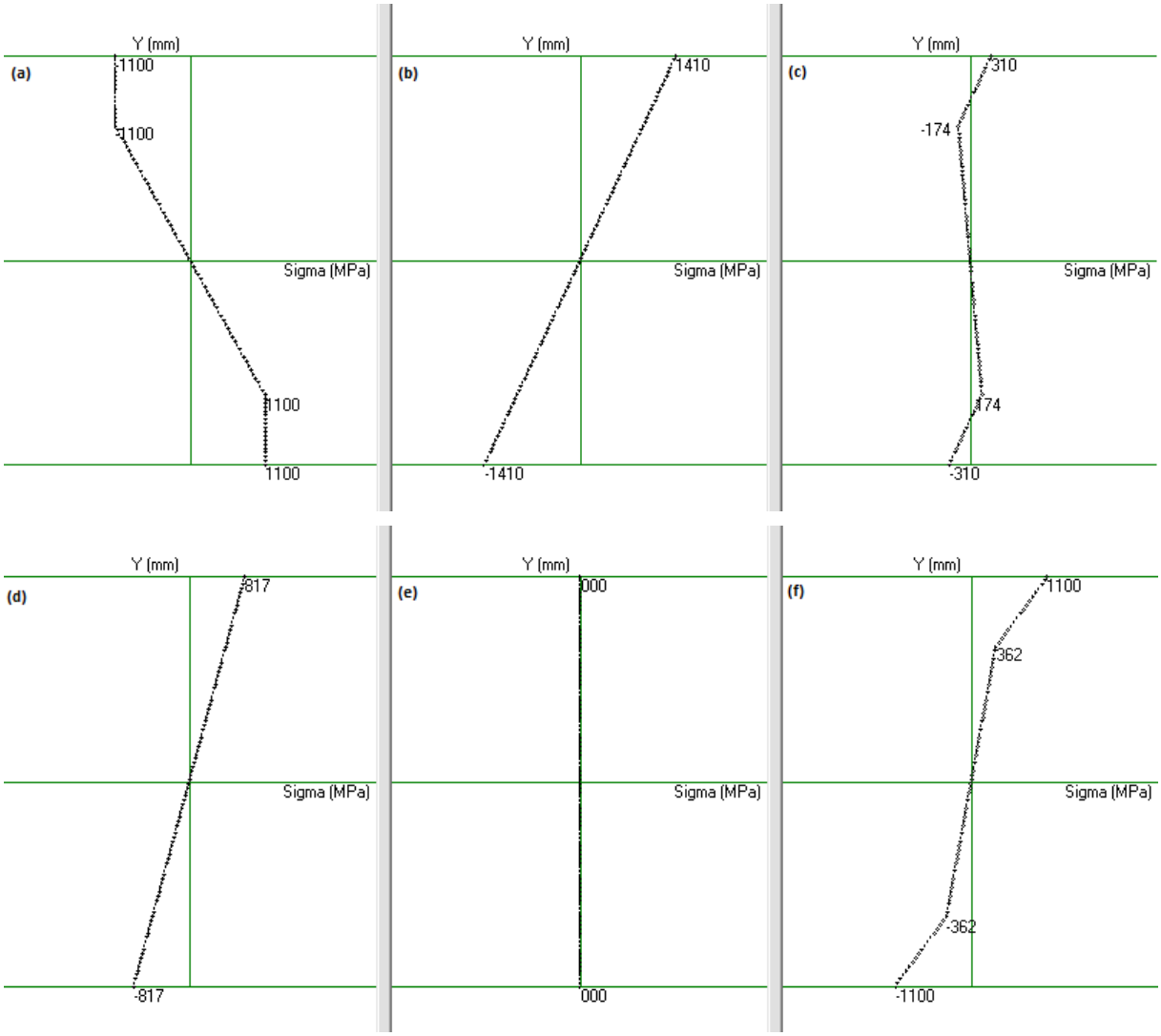


Figura V.23 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 5

V.5.6 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 6

Nesta sequência de curvamento, o carregamento inicial foi aplicado conforme descrito na sequência de curvamento 5 (gráficos a, b e c). Então, foi executado o carregamento reverso, até a base do dispositivo (d), seguido de descarregamento elástico (e), gerando a distribuição de tensões residuais apresentadas em (f).

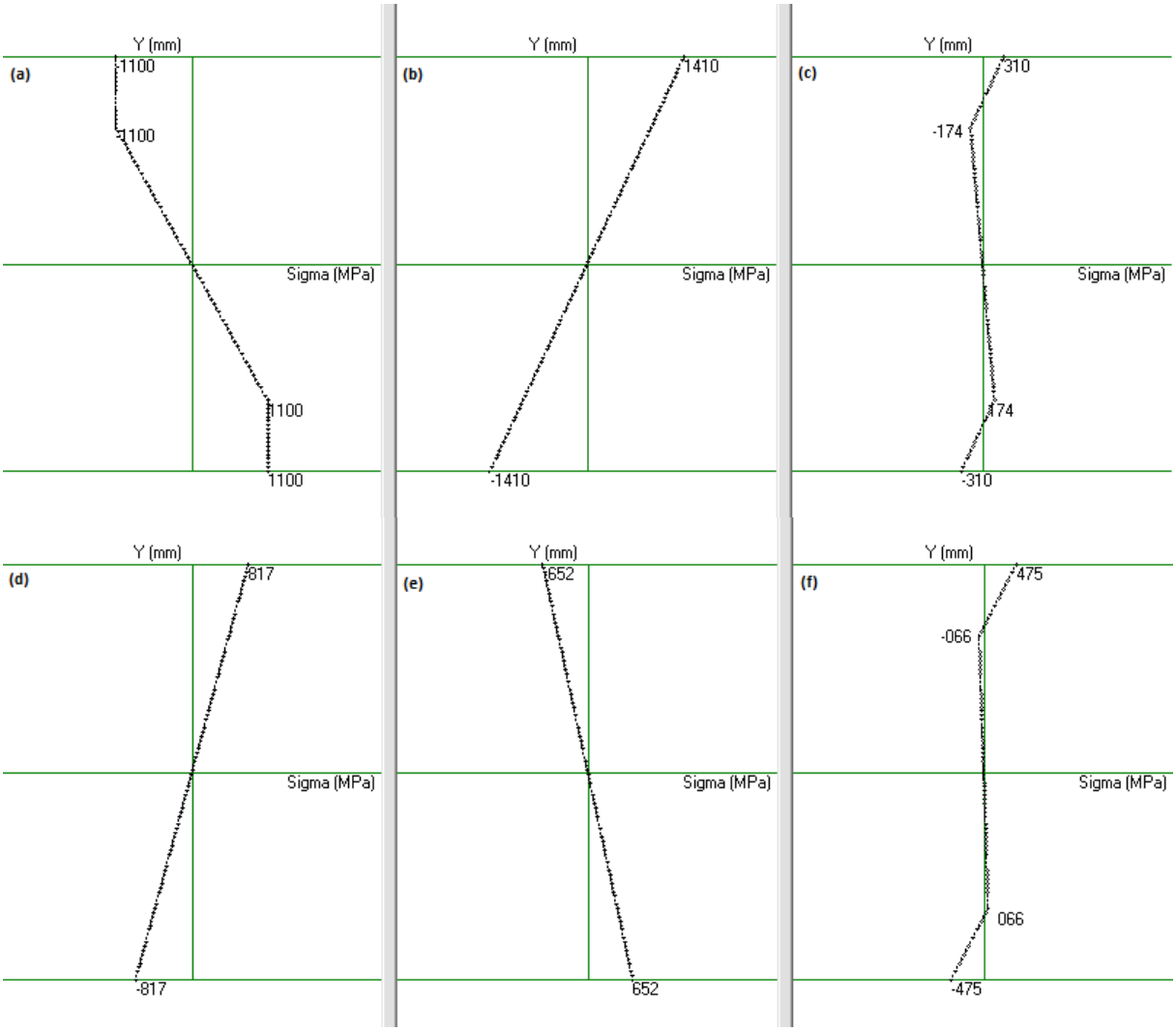


Figura V.24 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 6

V.5.7 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 7

Nesta sequência de curvamento, foi imposto à amostra um carregamento até o pino 6, formando aproximadamente 45° com a horizontal, ocorrendo a deformação plástica parcial da seção transversal (a). Na sequência, a carga foi aliviada elasticamente (b) gerando uma distribuição de tensões residuais ao longo da espessura (c). Após isso a amostra foi novamente carregada elastoplasticamente, no sentido contrário, até a base do dispositivo (d). Uma vez que o carregamento não foi aliviado, neste caso não possui descarregamento elástico (e), originando a distribuição de tensões residuais e aplicadas mostradas em (f).

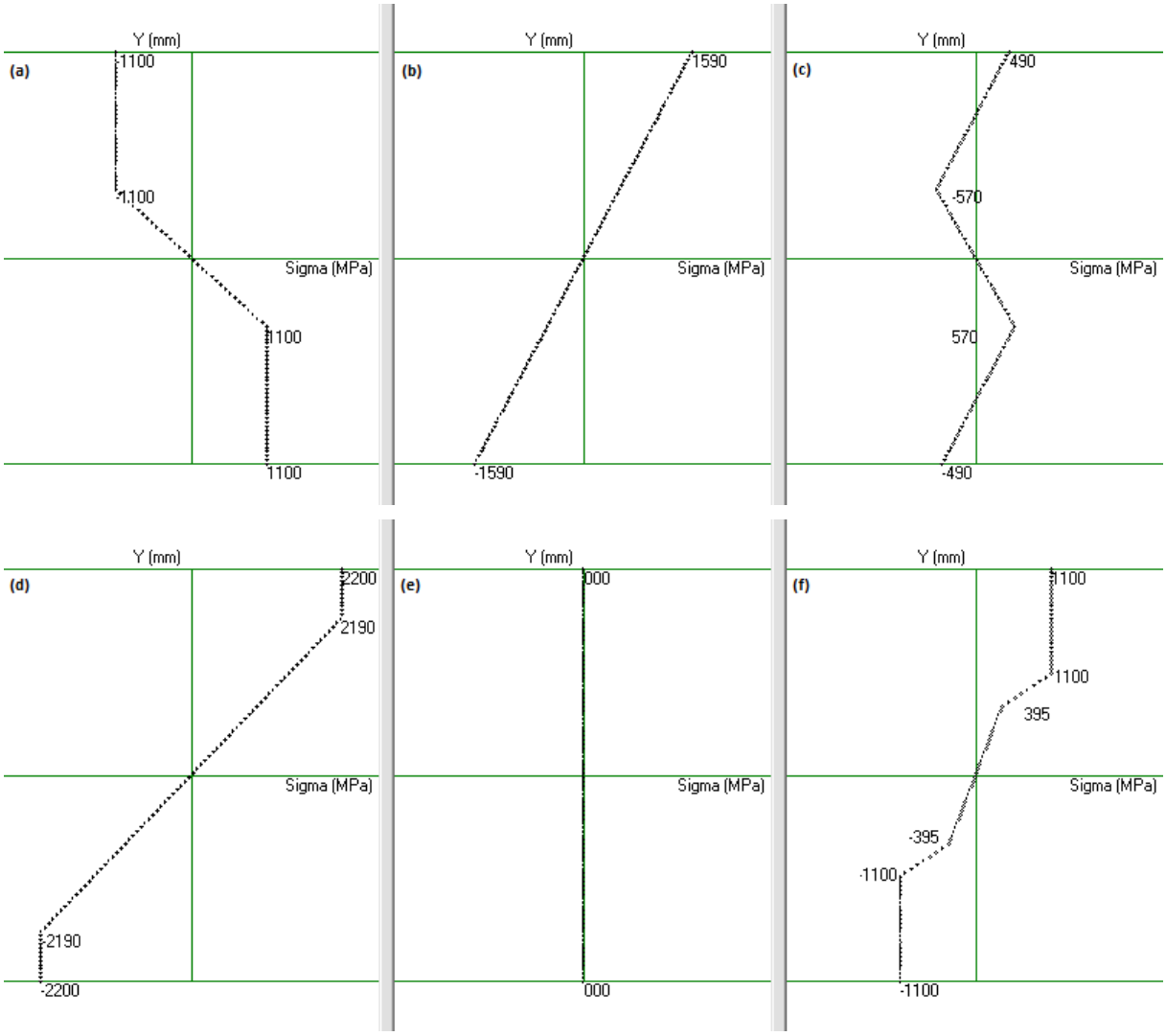


Figura V.25 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 7

V.5.8 Distribuição de tensões na sequência de curvamento 8

Nesta sequência de curvamento, o carregamento inicial foi aplicado conforme descrito na sequência de curvamento 7 (gráficos a, b e c). Após isso, a amostra foi carregada elastoplasticamente, no sentido contrário, até a base do dispositivo (d), seguido de descarregamento elástico (e). O resultado desta sequência é a distribuição de tensões residuais apresentadas em (f), que mostra que as tensões residuais internas são maiores que as da superfície.

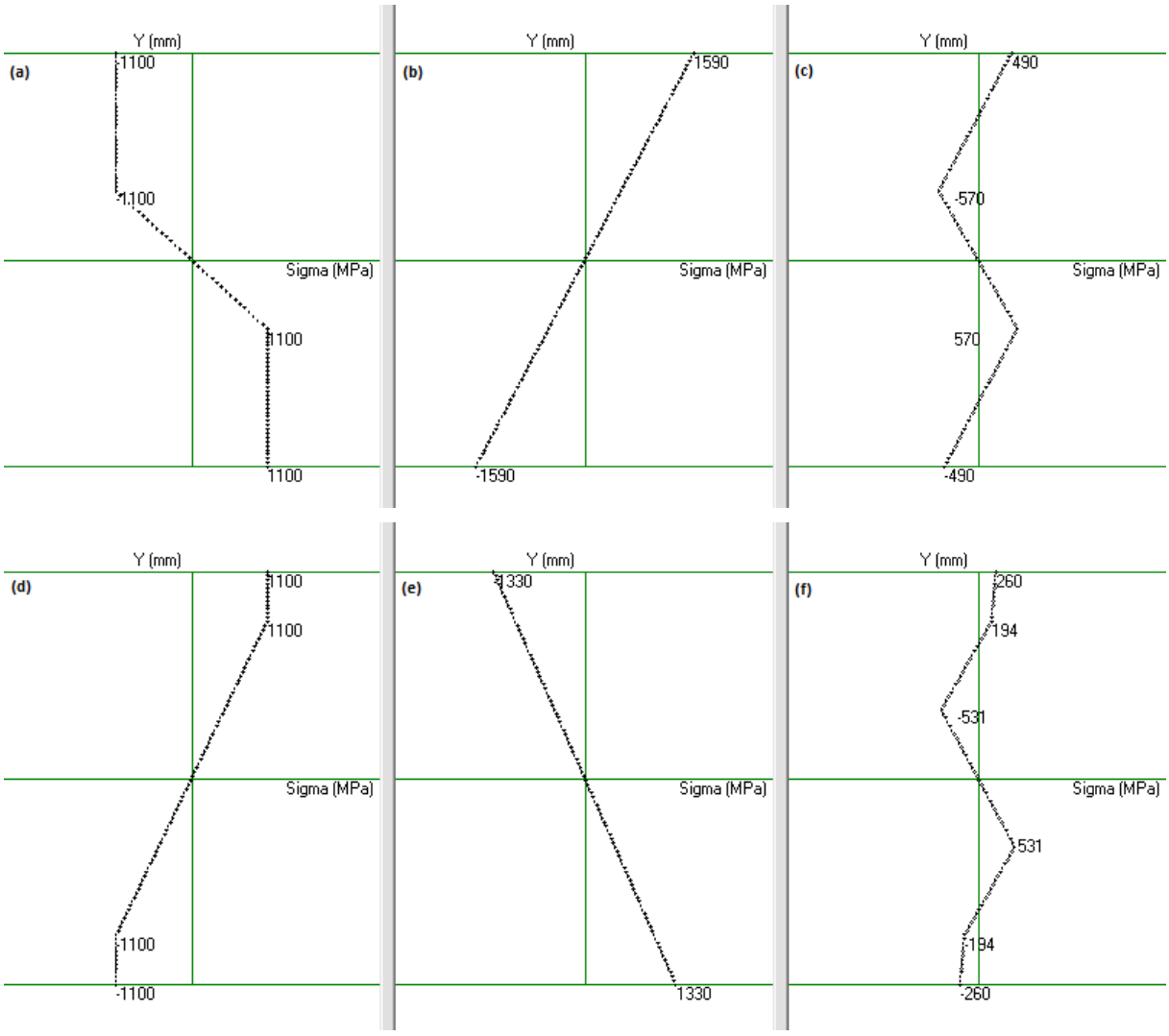


Figura V.26 – Distribuição de tensões residuais para a sequência de curvamento 8

Com intuito de comparar as estimativas do modelo analítico (distribuição de tensões na seção transversal) e os resultados experimentais de deformações (obtidos nas superfícies superior e inferior de uma dada seção transversal), apresenta-se um gráfico tensão x deformação da sequência experimental de curvamento 2, representativa da montagem real de conectores. Note que este gráfico é uma aplicação do caso 3.c da Tabela III.2 do Capítulo III. O gráfico agrupa os resultados de tensões e deformações em relação ao ponto crítico na superfície externa do arame, segundo a referência da Figura III.9, onde os sensores da posição 250 foram instalados.

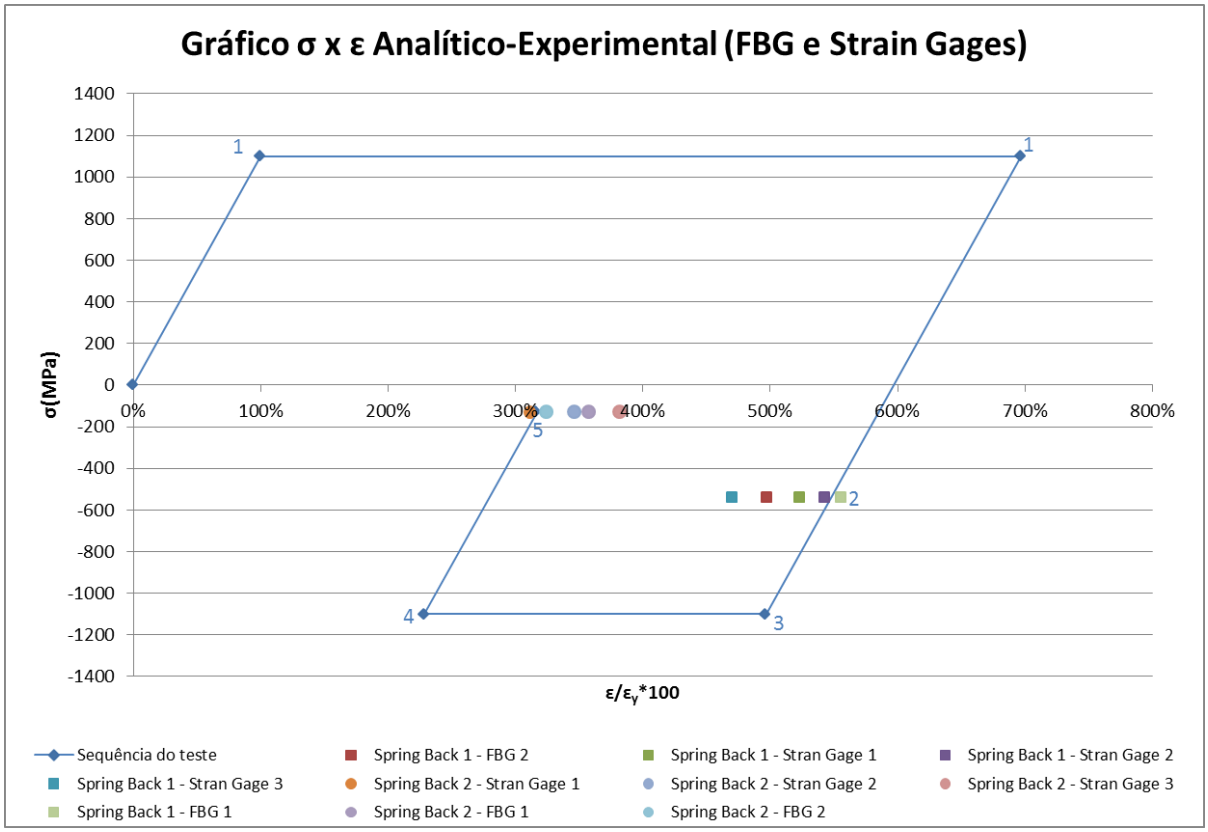


Figura V.27– Gráfico tensão x deformação analítica/experimental para a sequência de curvamento 2 para um ponto da superfície da amostra.

O ponto 1 representa o escoamento do arame, o ponto 2 representa o curvamento até o pino 14. A transição entre o ponto 2 e 4 representa o descarregamento elástico seguido do carregamento reverso até o ponto 4, que representa o início do escoamento reverso. A dispersão de pontos 3 mostra o intervalo experimental das deformações aquisitadas, do springback após o carregamento até o pino 14, com as duas técnicas extensométricas. O ponto 5 indica o curvamento elastoplástico até a base do dispositivo.

O ponto 6 representa o springback após o carregamento reverso, onde a dispersão de pontos mostra o intervalo experimental e a diferença real entre as amostras de arame. Outro fato importante é que ambos os descarregamentos elásticos, pontos 3 e 6, que

seguem a mesma inclinação de reta, passam por dentro do intervalo da dispersão de pontos experimentais.

Note que embora a Figura V.26 seja bastante esclarecedora de como as tensões e deformações evoluem na seção da posição 250, conforme visto na Figura V.20.f as tensões residuais são máximas no interior da seção transversal e não em suas superfícies superior e inferior. Portanto um novo gráfico tensão x deformação é apresentado mostrando a evolução das tensões e deformações no ponto crítico da seção crítica:

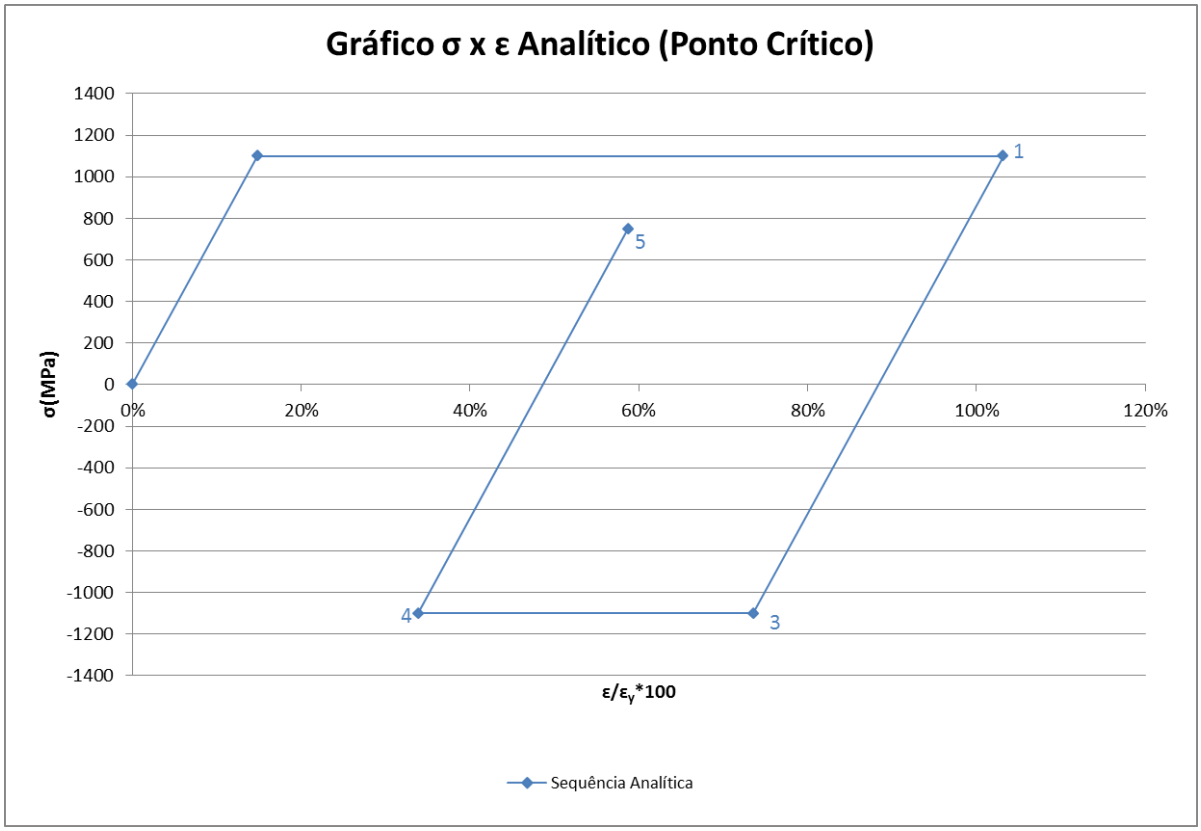


Figura V.28– Gráfico tensão x deformação analítica para a sequência de curvamento 2 para um ponto do interior da amostra.

Ao comparar a Figura V.27 com a Figura V.28, é possível notar a evolução da distribuição das tensões residuais na superfície e internamente. Como visto, para uma mesma sequência de carregamento, as tensões residuais internas podem ser maiores do que as da superfície. Mesmo com o monitoramento superficial, ratifica-se a importância que deve ser dada às tensões no interior da amostra, no ponto de vista de projeto.

Neste capítulo, todos os resultados gerados nos ensaios e tratados com o modelo analítico foram apresentados e comentados.

Os resultados de deformação foram mostrados avaliando os níveis reais envolvidos no processo de montagem da armadura de tração. Também, os mesmos foram comparados dentre as metodologias de extesometria utilizadas. Além disso, uma avaliação de deformações residuais geradas em uma condição de curvamento menos severa foi realizada.

Já os resultados de distribuição de tensões residuais foram apresentados de forma a estimar quantitativamente seus níveis utilizando as aproximações adotadas no modelo analítico, avaliando também uma condição de montagem menos severa onde a distribuição das tensões residuais ao longo da seção transversal se mostraram aceitáveis.

Capítulo VI Conclusões

É sabido que a região de interface entre o conector e o duto propriamente dito possui uma grande transição de rigidez devido ao epóxi injetado no conector. Além disso, há um desnível na entrada do mesmo, onde o arame muda a direção ao ser acomodado. Estas condições aliadas à grande deformação aplicada aos arames da armadura de tração durante a montagem torna esta região crítica e passível de falhas no ponto de vista de fadiga.

Como no projeto dos dutos flexíveis não são considerados os fatores relacionados à deformação plástica aplicada aos arames durante a montagem do conector, gerou-se um conceito de teste em média escala, que simulou a montagem de um arame da armadura de tração em seu processo de curvamento e acomodação. Esta metodologia de teste teve a finalidade de levantar as deformações reais aplicadas em um arame nas condições de montagem. Os métodos de medição de deformação utilizados neste trabalho foram o da rede de Bragg em fibras ópticas e o método de extensometria elétrica utilizando “strain gages”. Ambas as técnicas se mostraram muito eficientes e precisas nas medições.

O método da rede de Bragg apresentou um elevado custo quando comparado ao método de extensometria elétrica. Porém, apresentou um melhor desempenho por não ter havido necessidade de substituição dos sensores durante os ensaios, pois os extensômetros elétricos tiveram que ser trocados algumas vezes por perda de aderência do adesivo de cianoacrilato. Já os sensores de Bragg não tiveram nenhuma perda de aderência do adesivo à base de resina epóxi.

O teste em média escala foi capaz de simular o processo de montagem real do duto flexível, tornando possível e viável financeiramente a execução de vários ensaios para o levantamento das deformações. Foi possível quantificar as deformações provenientes deste processo, que por sua vez, apresentaram um elevado nível que poderia impactar significativamente a vida em fadiga deste produto em condições de operação.

Um modelo analítico foi proposto para estimar a distribuição das tensões residuais ao longo da espessura do arame da armadura de tração, inclusive nos pontos de medição experimental das deformações. Este mostrou-se capaz também de estimar as tensões residuais internas. Foi visto que estas podem ser consideravelmente maiores que as tensões das superfícies, e poderiam passar despercebidas em projetos e dimensionamentos.

A distribuição das tensões residuais na seção transversal de arames de armadura de tração foi estimada para diversas sequências de curvamento, obtendo resultados relevantes, importantes para o aperfeiçoamento do projeto mecânico destes componentes estruturais.

Como resultado desta dissertação melhoramentos na execução da montagem de conectores foram propostas, com vistas a aprimorar o seu desempenho à fadiga.

Sugestões para trabalhos futuros

A relação constitutiva utilizada no modelo analítico neste estudo, elástico perfeitamente plástico é uma simplificação da realidade física para o material do arame. Para tornar o modelo analítico mais próximo da realidade propõe-se alterar a relação constitutiva para elastoplástico com encruamento, ou mesmo uma relação multilinear no trecho após o escoamento.

Referências Bibliográficas

[1] PETROBRAS N-2409 "Flexible pipe specification" - Norma Técnica, CONTEC - 1994.

[2] BUENO, A.F.B., "Avaliação das Armaduras de Tração de Riser Flexível Durante Ensaios Axiais de Tração e Fadiga" - Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2010..

[3] MARTINS, C. O. D., "Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões" - Tese de Doutorado, Porto Alegre-RS, 2008..

[4] API-17B, Recomended Pratice for Flexible Pipe, 2008.

[5] LOPES, V. S., Influência da Rigidez à Flexão de Duto Flexível Na Instalação de Módulos de Conexão Vertical em Águas Profundas, Rio de Janeiro-RJ: (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica), 2005.

[6] SANTOS, F.P., “Avaliação dos efeitos da pressão parcial de CO2 no processo de corrosão-fadiga em armaduras de tração de dutos flexíveis,” *Dissertação de M.Sc: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais,* 2011.

[7] MONTENEGRO, V. A., Visão Computacional Aplicada à Análise de Deformações em Ensaios de Tubos Flexíveis, Niterói-RJ: (Mecânica dos Sólidos, Universidade Federal Fluminense), 2012.

[8] PIRES, F.; Clevelario, J.; Falcão, G.; Souza, I.; Sheldrake, T., “Flexible Flowline Thermal Exchange Coefficient Test Performed at High External Pressures”.*OTC 20101 - Offshore Technology Conference*, Houston, USA, 2009. .

[9] XAVIER, F. G., Avaliação da Vida em Fadiga de um Novo Modelo de Terminal Conector para Dutos Flexíveis, Porto Alegre-RS: Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

[10] MANSUR, T. R. et al, 2011 - Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base - Artigo Técnico ABS (Associação Brasileira de Soldagem).

[11] TOTTEN, G., M. Howes, T. Inoue, Handbook of Residual Stress, Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.

[12] SOARES, M. C. B. V., Influência das Tensões Residuais no Comportameto em Fadiga e Fratura de Ligas Metálicas, São Paulo: Tese de Doutorado, 1998.

[13] NUNES, R. M., Analise de Tensões Residuais no Processo de Trefilação Combinada do Aço AISI 1048 Visando Minimizar Distorções Pós Processamento, Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2008.

[14] BENHAM, P.P. ; Crawford, R. J., Mechanics of Engineering Materials, New York John, Wiley & Sons, Inc, 1994.

[15] ALLIL, R. C. S. B., 2010, Sensores a Fibra Óptica com Tecnologia FBG para Medida de Temperatura e Alta Tensão - Tese de Doutorado .

[16] QUINTERO, S.M.M. et al, 2005 - Thin film stress measurement by fiber optic strain gage, Thin Solid Films, 494, 141-145..

[17] GRATTAN, K.T.V., B.T. Meggitt (Eds.), Optical Fiber Sensor Technology,Champman and Hall, London, 1995..

[18] BRAGA, A.M., Morikawa, S., Camerini, C.S., Camerini, M.G., Ribeiro, A.S., Simoes, T.B., “Vibration Monitoring Technique to Detect Failure in Armour Wires of Flexible Risers,” OTC 21730 - Offshore Technology Conference, 2011..

[19] CORRIGNAN H., Ramos R. T., Smith R. J. , Kimminau S., El Hares L.,2009 - New Monitoring Technology for Detection of Flexible Armor Wire Failure - Offshore Technology Conference (OTC)..

[20] WEPPENAAR N., Andersen B., 2014 - Investigation of Tensile Armor Wire Breaks in Flexible Risers and a Method for Detection. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2014).

[21] HANNAH, R.L. and Reed, S.E., Strain Gage User's Handbook, Bethel, CT: Society for Experimental Mechanics, Inc., 1991.

[22] AMOROS, R.T; “ Avaliação de tensões residuais em chapas planas de aço carbono, destinadas a processos de corte a laser, pelo método da anisotropia planar”, dissertação de mestrado – Paraná, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LATEC, Curitiba .

[23] LOPES, D.G, 2013, “Avaliação das Tensões Residuais Provenientes do Processo de Montagem de Conectores em Armaduras de Tração de Dutos Flexíveis”, Master Degree Dissertation, Rio de Janeiro, CEFET/RJ..

[24] CASTRO, J. T. P., Meggiolaro, M. A., Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço – Volumes I e II.

[25] BEER, F. P; JOHNSTON, E. P., “Resistência dos Materiais ”, 3 edição, São Paulo, 2005..

[26] WAN J.A., 2013 - Acopladores de Fibra Óptica, Dissertação de Mestrado ILT.