

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

PPGE3M

DANIEL SARAIVA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
ANÁLISE DE TENSÕES EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE
DUTOS FLEXÍVEIS**

Porto Alegre
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

PPGE3M

DANIEL SARAIVA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA
ANÁLISE DE TENSÕES EM ARMADURAS DE TRACÇÃO DE
DUTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G.R. Clarke

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Vice Coordenador: Afonso Reguly

CIP - Catalogação na Publicação

da Silva, Daniel
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE
TENSÕES EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS /
Daniel da Silva. -- 2018.
119 f.
Orientador: Thomas Gabriel Clarke.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Estado de tensões. 2. Armadura de tração. 3.
Dutos flexíveis. 4. Integridade Estrutural. I.
Clarke, Thomas Gabriel, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo (a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke pela oportunidade e orientação na execução deste trabalho.

Ao Dr. Toni R. S. de Lima por compartilhar seu conhecimento no campo de análises de tensão, tensões residuais e extensometria.

Aos meus colegas Me. Igor L. D. e Eng. Felipe L. pelo auxílio na realização dos ensaios aplicados neste trabalho.

Ao PPGE3M.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

A Petrobras, pela disponibilidade das amostras e pela confiança e disponibilidade de todos engenheiros envolvidos.

A todos os amigos do LAMEF, que estiveram ao meu lado durante este período de crescimento pessoal e profissional, em especial aos meus colegas do GEND.

A minha família, meu pai, José, minha mãe, Neila, meu irmão, Felipe, que sempre me incentivaram e deram suporte.

A minha namorada Juliene Paz, sempre ao meu lado, em busca de novas conquistas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 DUTOS FLEXÍVEIS.....	18
2.1.1 ARMADURA DE TRAÇÃO.....	20
2.1.2 MATERIAIS, FABRICAÇÃO E MONTAGEM.....	21
2.1.3. PRINCIPAIS MECANISMOS DE FALHA.....	24
2.1.4. ANÁLISE DE TENSÕES NA ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS.....	25
2.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES.....	26
2.2.1 DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO A PARTIR DE MEDIÇÕES COM EXTENSOMETROS DO TIPO ROSETAS TRIAXIAIS.....	27
2.3 TENSÕES RESIDUAIS.	31
2.3.1 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL.	33
2.3.1.1 MÉTODO DO FURO CEGO.....	33
2.3.1.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. MATERIAIS.....	40
3.2 METODOLOGIA DO TRABALHO.....	42
3.2.1 PROPOSTA DE METODOLOGIA.....	43
3.2.2 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA.....	44
3.2.2.1 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	44
3.2.2.2 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM.....	45
3.2.2.3 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA.....	46
3.2.3 APLICAÇÃO PRÁTICA.....	47
3.2.3.1 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA.....	48

3.2.3.2 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM.....	50
3.2.3.3 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	54
3.2.3.4 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ROSETA NO MFC.....	54
3.3 MÉTODOS DE ENSAIO.....	55
3.3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA EM ESCALA REDUZIDA.....	55
3.3.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	55
3.3.1.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	55
3.3.1.3 ENSAIO DE DUREZA HV ₁₀	56
3.3.1.4 ENSAIO DE DUREZA HK _{0,2}	56
3.3.1.6 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	57
3.3.2 MONITORAMENTO COM EXTENSOMETOS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	57
3.3.3 METODO DO FURO CEGO (MFC)	57
3.3.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	60
4. RESULTADOS.....	62
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE ESCALA REDUZIDA.....	62
4.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	62
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	62
4.1.3 ENSAIO DE DUREZA HV ₁₀	64
4.1.4 ENSAIO DE DUREZA HK _{0,2}	64
4.1.5 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	65
4.2. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA.....	66
4.2.1 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	66
4.2.1.1 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS POR DRX.....	66
4.2.1.2 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUIS PELO MFC.....	67
4.2.2 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM.....	69

4.2.3 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA.....	72
4.3. APLICAÇÃO PRÁTICA.....	75
4.3.1 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ROSETA NO MFC.....	75
4.3.2 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA.....	76
4.3.3 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM.....	83
4.3.4 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	86
4.3.4.1 ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MFC.....	86
4.3.4.2 ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS POR DRX.....	92
4.3.5. COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS DE TENSÃO.....	97
5. DISCUSSÕES GERAIS.....	100
6. CONCLUSÃO.....	109
7. TRABALHOS FUTUROS.....	111
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
APÊNDICE A - PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA ANÁLISE DE TENSÃO NA ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Histórico de produção nacional de petróleo de 1980 até 2017.....	14
Figura 2 – Sistema de produção petrolífera offshore.....	15
Figura 3 – Caracterização de um sistema de produção de petróleo marítimo.	18
Figura 4 – Configuração típica de dutos flexíveis e identificação de suas diversas camadas	20
Figura 5 – Máquina armadora para montagem da armadura de tração em duto flexível.	22
Figura 6 – Deformações aplicada aos arames da armadura de tração durante o processo de fabricação de dutos flexíveis.....	23
Figura 7 – Configurações de extensômetros: (a) biaxial (90°); (b) triaxial retangular (45°); e (c) triaxial delta (60°).....	27
Figura 8 – Transformação das deformações principais para deformação em qualquer direção: (a) $\epsilon\theta$ em termos das deformações principais ϵ_P e ϵ_Q demonstradas no círculo de Mohr; (b) Roseta extensométrica triaxial retangular como instalada em uma superfície de teste, com a direção 1 do orientada em uma direção (θ) arbitrária em relação a deformação principal; (c) Eixos de uma roseta triaxial retangular sobreposto ao círculo de Mohr.	28
Figura 9 – Sobreposição de tensões residuais e tensões de serviço de um componente.	31
Figura 10 – Representação esquemática da distribuição de tensões residuais.....	32
Figura 11 – Diversos tipos de rosetas extensométricas padrão utilizadas no MFC.....	34
Figura 12 - Dispositivo para realização do MFC.....	35
Figura 13 – Segmento de arame de armadura de tração utilizado como amostra nos ensaios de escala reduzida.	40
Figura 14 – Amostra de duto flexível utilizada nos ensaios de escala real.....	41
Figura 15 – Diagrama de etapas desenvolvidas na metodologia do trabalho.....	42
Figura 16 - Representação esquemática dos tipos de tensões avaliadas e dos métodos de medição.	44
Figura 17 – Diagrama de esforços cortantes (Q) e momento fletor (M) para o caso de uma viga submetida a solicitação de flexão a quatro pontos.....	45
Figura 18 – Dispositivo para aplicação de solicitação de flexão em quatro pontos.	45
Figura 19 – Montagem do dispositivo de flexão em quatro pontos abaixo da bancada do MFC para determinar tensão efetiva.....	47
Figura 22 - Ensaio de monitoramento do alívio de tensão.....	51
Figura 23 - Seccionamento da amostra com monitoramento de deformação da armadura externa e interna.....	51
Figura 24 – Soldagem da camada Zeta.....	52
Figura 25 – Corte para remoção da capa externa.....	52
Figura 26 – Amostra após a remoção de um dos lados da capa externa.....	53
Figura 27 – Roseta extensométrica especial para medição de tensões pelo MFC.....	54
Figura 28 – Regiões de análise de MO: (a) longitudinal e (b) transversal.....	56
Figura 29 - Região do perfil de dureza.	56
Figura 30 – Ensaio do MFC para determinar tensão residual.....	58
Figura 31 - Arame solto. Distancia entre pontos de medição das tensões residuais e efetiva igual a 30mm.....	59
Figura 32 - Difrátômetro de Raios-X GE - Seifiert Charon XRD M.....	60

Figura 33 - Representação esquemática das distâncias entre os pontos de medição de tensões residuais por DRX.....	61
Figura 34 - Micrografia em MO no núcleo da amostra, seção longitudinal, mostrando microestrutura composta de ferrita e perlita deformada no sentido de laminação. Ataque: Nital 2%. Aumento: (a) 100 vezes e (b) 1000 vezes.....	63
Figura 35 - Micrografia em MO na borda da amostra, seção longitudinal, mostrando microestrutura composta de ferrita e perlita. Ataque: Nital 2%. Aumento: (a) 200 vezes e (b) 600 vezes.	63
Figura 36 - Micrografia em MO no núcleo da amostra, seção transversal, mostrando microestrutura composta de ferrita e perlita. Ataque: Nital 2%. Aumento: (a) 100 vezes e (b) 1000 vezes.	63
Figura 37 - Resultado da microdureza KNOOP no núcleo da seção longitudinal da amostra. Aumento: (a) 200 vezes e (b) 600 vezes.....	64
Figura 38 - Resultado da microdureza KNOOP na borda da seção longitudinal da amostra. Aumento: (a) 200 vezes e (b) 600 vezes.....	65
Figura 39 – Tensão residual por DRX. Resultado do estado de tensões obtidos ao longo do comprimento das amostras.....	66
Figura 40 – Tensão residual por MFC. Resultado compilado das três amostras, sendo (a) Amostra 1, (b) Amostra 2 e (c) Amostra 3.	67
Figura 41 – Ângulo de direção principal. Resultado compilado das três amostras.....	69
Figura 42 – Representação esquemática do estado de tensões para (a) tensão de montagem e (b) tensão de desmontagem.....	71
Figura 43 – Tensão de montagem teórica para carregamentos de 150 MPa e 350MPa.....	71
Figura 44 – Tensão efetiva. Resultado para carregamento de 150 MPa para: a) Amostra 1 e b) Amostra 2.	72
Figura 45 – Monitoramento da tensão mínima principal durante execução do MFC nas amostras 1 e 2 para aplicação de carregamento de 150MPa.....	73
Figura 46 – Tensão efetiva. Resultado para carregamento de 350 MPa para: a) Amostra 2 e b) Amostra 3.	74
Figura 47 – Monitoramento da tensão mínima principal durante execução do MFC nas amostras 3 para aplicação de carregamento de 350MPa.	75
Figura 48 - Perfis de tensão obtidos por DRX e pelo MFC para Amostra 3, posição 45°, utilizando: (a) roseta de 2,56 mm de diâmetro e (b) roseta de 5,12 mm de diâmetro. .	75
Figura 49 – Perfis de tensão obtidos por DRX e pelo MFC para Amostra 3, arame 315°, utilizando: (a) roseta de 2,56 mm de diâmetro e (b) roseta de 5,12 mm de diâmetro. .	76
Figura 50 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 1, sendo (a) arame 0°, (b) arame 120° e (c) arame 240°.	77
Figura 51 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 2, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (c) arame 315°.	78
Figura 52 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 2, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.	78

Figura 53 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 3, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (c) arame 315°.....	79
Figura 54 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 3, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.....	80
Figura 55 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 4, sendo (a) arame 0°e (c) arame 180°.....	80
Figura 56 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 4, sendo (a) arame 90°e (c) arame 270°.....	81
Figura 57 – Tensões Efetivas. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,12mm	81
Figura 58 – Tensões Efetivas. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,4mm.....	82
Figura 59 - Tensões de montagem. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Média dos valores obtidos ao longo da circunferência.....	85
Figura 60 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 1, sendo (a) arame 0°, (b) arame 120° e (c) arame 240°.....	87
Figura 61 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 2, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (c) arame 315°.....	87
Figura 62 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 2, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.....	88
Figura 63 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 3, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.....	89
Figura 64 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 3, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (c) arame 315°.....	89
Figura 65 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 4, sendo (a) arame 0° e (b) arame 180°.....	90
Figura 66 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 4, sendo (a) arame 90° e (b) arame 270°.....	90
Figura 67 – Tensão Residual pelo MFC. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,12mm....	91
Figura 68 – Tensão Residual pelo MFC. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,4mm.....	91
Figura 69 – Tensão Residual por DRX. Valores de médio de tensão máxima e mínima principal e de von Mises ao longo da circunferência para cada amostra.....	96

Figura 70 – Tensão de von Mises para os diferentes tipos de tensão medidos.....	98
Figura 71 – Tensão no longitudinal dos arames para os diferentes tipos de tensão medidos.	98
Figura 72 – Tensão na transversal dos arames para os diferentes tipos de tensão medidos.	99
Figura 73 – Comparativo MO na borda da amostra, seção longitudinal, e tensões residuais obtidas por DRX.	101
Figura 74 – Comparativo MO na borda da amostra, seção longitudinal, e tensões residuais obtidas pelo MFC.....	102
Figura 75 – Comparativo tensão máxima principal e tensão efetiva teórica da Amostra 2.	103
Figura 76 – Comparativo tensão residual pelo MFC com DRX por remoção de camadas, Amostra 3, arame 45°.....	105
Figura 77 – Retorna elástico dos arames da armadura de tração após retirada da capa polimérica.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amostras analisadas e posição circunferencial dos arames avaliados.....	41
Tabela 2 – Comparativo de resultado da análise química x referência.....	62
Tabela 3 - Resultado do perfil de dureza HV ₁₀	64
Tabela 4 - Resultado média do ensaio de tração do corpo de prova.....	65
Tabela 5 - Orientação das tensões residuais obtidas por DRX ao longo do comprimento do arame.....	67
Tabela 6 – Verificação entre valores de tensão na face superior e inferior da amostra.....	69
Tabela 7 – Valores de deformação para carregamento 150 MPa e 350MPa.....	70
Tabela 8 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a Amostra 1.....	83
Tabela 9 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura externa da Amostra 2.....	83
Tabela 10 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura interna da Amostra 2.....	84
Tabela 11 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura externa da Amostra 3.....	84
Tabela 12 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura interna da Amostra 3.....	84
Tabela 13 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura externa da Amostra 4.....	85
Tabela 14 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura interna da Amostra 4.....	85
Tabela 15 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 1.....	93
Tabela 16 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 2.....	93
Tabela 17 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura interna na Amostra 2.....	94
Tabela 18 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 3.....	94
Tabela 19 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura interna na Amostra 3.....	95
Tabela 20 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 4.....	95
Tabela 21 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura interna na Amostra 4.....	96

RESUMO

A integridade estrutural de dutos flexíveis para transporte de petróleo e gás é uma preocupação constante devido ao elevado grau de criticidade deste tipo de componente. Do ponto de vista de resistência mecânica, uma das partes mais importantes que compõem um duto flexível é a armadura de tração, sendo fundamental para a avaliação de seu desempenho em campo o pleno conhecimento de seu estado tensão efetiva atuante. A tensão efetiva é a tensão total que atua na estrutura e é dada pelo somatório da tensão residual e da tensão aplicada. Devido à alta complexidade do processo de fabricação e montagem da armadura de tração o valor da tensão efetiva pode variar bastante dependendo do material e dos parâmetros de produção. Esta é uma informação de extrema relevância e de grande interesse para o setor, visto que, o estado de tensão pré-existente na armadura de tração deve ser levado em consideração na concepção de novos projetos, qualificação de novas linhas ou na avaliação de linhas já existentes visando a extensão de sua vida útil. Este cenário, aliado a ausência de estudos mais completos em avaliação experimental do estado de tensões em dutos flexíveis motivou a realização deste trabalho, cujo objetivo principal foi desenvolver uma metodologia para análise experimental de tensões na armadura de tração de dutos flexíveis. O trabalho está dividido em três etapas que são: proposta de metodologia de análise de tensão; validação da metodologia através de ensaios em amostras de escala reduzida submetidas a condições controladas de carregamento; e aplicação da metodologia em amostras de escala real, segmentos de dutos flexíveis retirados de campo. Para o desenvolvimento da análise de tensões foram aplicados o método do furo cego (MFC), difração de raios-X (DRX) e o monitoramento de deformações com uso de extensômetros de resistência elétrica (ERE). Esta metodologia se mostrou eficiente e capaz de determinar de forma distinta os diferentes tipos de tensões atuantes na armadura de tração. O estudo revelou a existência de linhas de dutos flexíveis com diferentes níveis de tensão, em alguns casos com valores na ordem da tensão de escoamento do material.

Palavras-chave: Estado de tensões; Armadura de tração; Dutos flexíveis; Integridade Estrutural.

ABSTRACT

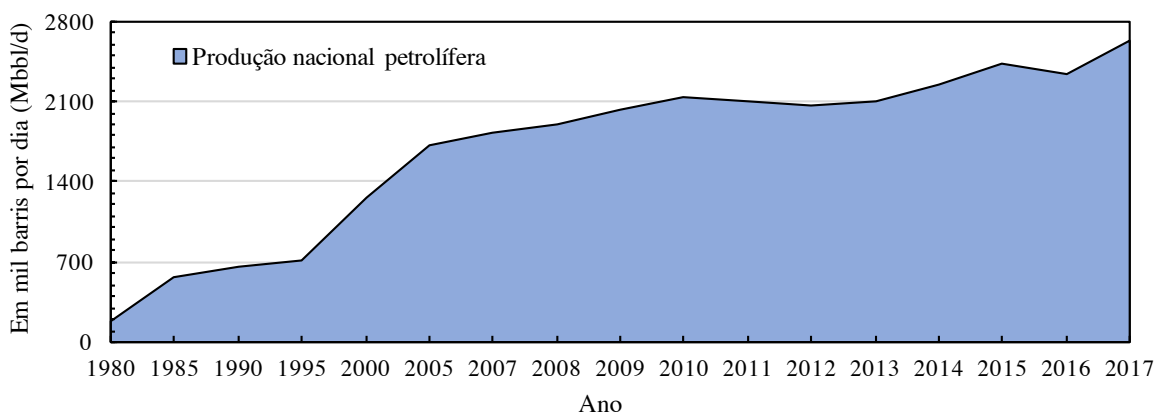
Structural integrity of flexible pipelines used in oil and gas applications takes relevance due the possibility of occurrence of catastrophic failure. From the point of view of mechanical resistance, the tensile armour is the most important component of this type of structure and the knowledge of its effective stress state is fundamental for a correct evaluation of his operational performance. Effective stress is the total stress acting on the structure or component and is given by the combination of residual and the applied stress in the structure. Due the high complexity fabrication and assembly processes involved in flexible pipe manufacturing, the value of effective stress can vary significantly depending of the material or the production parameters. This is a relevant information and of great interest to the industry, since the preexisting stress acting in the tensile armour layer should be considerate in design of new lines, acceptance of new lines or in the evaluation of lines already in operation, aiming at the extension of its life cycle. This context, coupled with the lack of more complete studies involving experimental evaluation of the stress state in flexible pipelines motivated this work, which has as its main propose to develop a methodology for experimental evaluation of the stress in the tensile armour layer of flexible pipe. This work is divided in three stages: proposal of the stress analysis methodology; validation of the methodology through tests on small scale samples submitted to controlled loading conditions; and application of the methodology in real scale samples removed from flexible pipes which have seen operation. The tests applied in the proposed methodology were the hole drilling method, X-ray diffraction and strain monitoring using electrical resistance extensometers. The developed methodology proved to be efficient and capable of determining the complete stress state acting on the tensile armour layer. The obtained results identified a significant difference between the stress values for each flexible pipe, in some cases values near the yield strength of the material.

Key-words: Stress state; Tensile armour; Flexible pipe; Structural integrity

1. INTRODUÇÃO

A autossuficiência em petróleo no Brasil só foi alcançada a partir das descobertas do Pré-sal. Da produção brasileira 95% tem origem de campos marítimos, originadas de um total de 751 poços que produzem 2.623 Mbbbl/d¹ de petróleo. Dentre estes campos de produção, somente o Pré-sal, com 80 poços, é responsável pela produção diária de 1.293 Mbbbl/d, sendo o local de maior produção o campo Lula, na bacia de Santos. A empresa brasileira Petrobras é responsável pela produção de mais de 93% de petróleo e gás natural no país. (ANP, 2017). A evolução histórica da produção nacional de petróleo de 1980 até 2017 é apresentada na Figura 1 evidenciando o aumento de produção a partir da descoberta dos campos de Pré-sal em 2006.

Figura 1 – Histórico de produção nacional de petróleo de 1980 até 2017.



Fonte: (MORAIS, 2013; ANP, 2010; ANP, 2011; ANP, 2012; ANP, 2013; ANP, 2014; ANP, 2015; ANP, 2016; ANP, 2017).

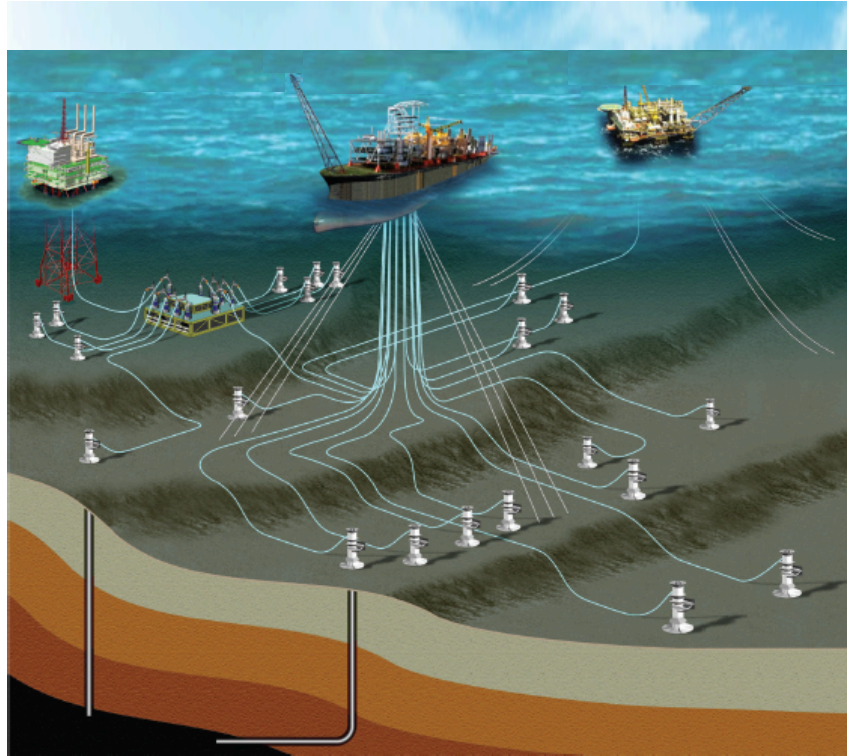
Os campos do Pré-sal estão localizados em águas ultra profundas, com lamina d'água acima de 1.500m, locais onde são encontradas condições marítimas severas e de difícil acesso. Quanto maiores as profundidades, maiores são os desafios da produção, como exemplo, águas profundas aumentam as pressões de coluna de água a serem suportadas pelos equipamentos e dutos submarinos, exigindo maiores esforços de suas estruturas. (MORAIS, 2013).

A exploração de petróleo em plataformas e navios de produção marítima é caracterizada pelo uso de equipamentos, cabos elétricos e dutos submarinos que os conectam até os poços de produção. Sabe-se, que o aumento na produção de petróleo em águas profundas está intimamente relacionado à melhoria de tecnologias associadas aos dutos flexíveis. Estas estruturas são utilizadas para o escoamento da produção de óleo ou para

¹ Mil barris por dia

condução de gases ou água aos reservatórios marítimos (MORAIS, 2013). A visão geral de um sistema de produção *offshore* é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Sistema de produção petrolífera offshore.



Fonte: MORAIS, 2013.

Dutos flexíveis são estruturas compostas por diferentes camadas de materiais metálicos e poliméricos. São componentes projetados para uma vida útil de 20 a 30 anos, que envolvem alta tecnologia em seu processo de fabricação, com poucos fornecedores mundiais e que possuem um elevado valor agregado. Dentre as camadas do duto, a armadura de tração é a mais importante no que diz respeito resistência mecânica, sendo responsável por proporcionar ao duto resistência a esforços de tração e balanceamento à torção. A armadura de tração é composta por uma ou mais camadas de arames de aço carbono, de alta resistência mecânica, enrolados de forma helicoidal ao longo do duto. (BAI E BAI, 2005).

Do ponto de vista de integridade estrutural, o conhecimento preciso do estado de tensões efetivo ao qual a armadura de tração está exposta é uma informação imprescindível para a correta avaliação de suas condições de operação. De acordo com as normas e códigos internacionais como, por exemplo API 579 (API 579, 2000) e BS 7910 (BS-7910, 2005), a tensão que deve ser considerada em cálculos de projeto é a tensão efetiva, que é representada

pela tensão total ao qual o material é submetido e é composto pelo somatório da tensão aplicada e a tensão residual do componente.

Devido a grande complexidade dos processos de fabricação e montagem o estado de tensão efetivo de linhas de dutos flexíveis pode variar bastante. Esta é uma informação de extrema relevância e de grande interesse para o setor, visto que, o estado de tensão pré-existente na armadura de tração deve ser levado em consideração na concepção de novos projetos, na qualificação de novas linhas ou na avaliação de linhas já existentes visando a extensão de sua vida útil.

De fato, muitos esforços têm sido implementados na análise de tensões de arames da armadura de tração. Dentre estes, há uma concentração de estudos publicados para análise de tensão através de modelos elementos finitos, com intuito de verificar distribuição do estado de tensão de arames da armadura de tração que são ancorados junto ao conector, terminação que liga o duto a plataforma. (MIYAZAKI, 2014). Estudos estes motivados devido a esta ser considerada uma região crítica para a fadiga. (CAMPELLO, 2014). Porém, este tipo de análise geralmente considera o material como homogêneo, sem presença de defeitos, o que não é uma realidade em condições operacionais.

Existem poucos estudos publicados que analisam de forma experimental os efeitos dos processos de fabricação e de montagem no estado de tensão efetiva da armadura de tração de dutos flexíveis. Fernando *et al.* (2017) propuseram o uso da técnica do método de contorno para análise de tensão em arames da armadura de tração. Porém, o uso do desta técnica apresenta algumas desvantagens operacionais como, por exemplo, ser uma técnica destrutiva, além disto, só pode ser aplicada para caracterização da tensão residual nos arames da armadura de tração quando estes estão soltos, ou seja, não é possível ser aplicado para determinar a tensão efetiva da armadura de tração. (ROSSINI *et al.*, 2012).

Este cenário, aliado a ausência de estudos mais completos na avaliação experimental de análise de tensão em armaduras de tração de dutos flexíveis motivou a realização deste trabalho, cujo objetivo principal é:

- O desenvolvimento de uma nova metodologia para análise experimental de tensão em armaduras de tração de dutos flexíveis, que possibilite determinar de forma distinta as diferentes tensões atuantes na armadura de tração.

Além do objetivo principal, na execução deste trabalho propõe-se como objetivos específicos:

- Estabelecer um estudo comparativo entre níveis do estado de tensão identificados nas armaduras de tração de amostras de diferentes linhas de dutos flexíveis retiradas de operação.
- Desenvolver e validar os procedimentos para determinação de tensão efetiva e tensão de montagem em uma amostra em escala reduzida com condições de carregamento controlado.
- Identificar erros de medição ao aplicar o MFC em amostras com níveis de tensões elevados quando utilizado o modelo de Kockelmann para tratamento matemático dos resultados.
- Determinar a influência do tamanho da roseta extensométrica utilizado no MFC na obtenção dos resultados de tensão residual.
- Estabelecer um comparativo entre as técnicas do MFC e DRX.

O trabalho foi dividido em três etapas distintas sendo estas: proposta de metodologia; validação da metodologia em amostras de escala reduzida; e aplicação prática da metodologia em amostras de escala real. Os métodos experimentais aplicados foram: método do furo cego (MFC), difração de raios-X (DRX) e monitoramento de deformações com extensômetros de resistência elétrica (ERE).

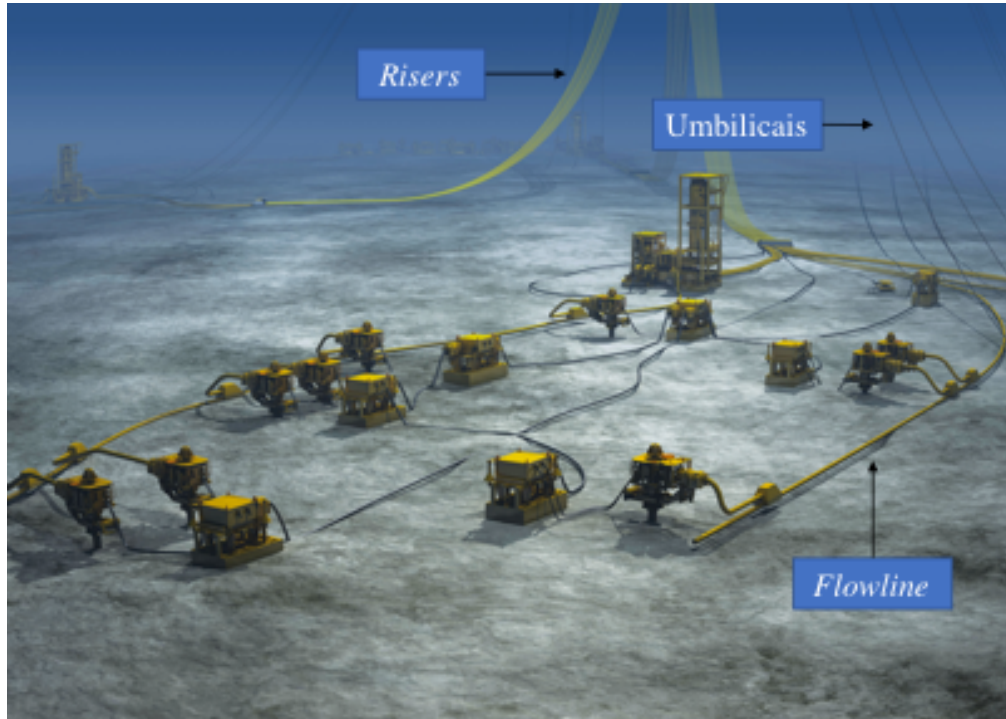
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DUTOS FLEXÍVEIS

Em 2006 com a descoberta dos campos do pré-sal o Brasil alcançou a autossuficiência em petróleo, equiparando o seu volume de produção de petróleo, 1.722 Mbbl/dia, ao volume de derivados consumidos na época. (PETROBRAS, 2014). Atualmente, a produção petrolífera no Brasil já é superior em 50% a este volume. (ANP, 2017). O aumento na produção é reflexo da prospecção de petróleo em águas profundas e ultra profundas, a qual está intimamente relacionado com os avanços tecnológicos conseguidos pela Petrobras em parceria com fornecedores, universidade e centros de pesquisas. (PETROBRAS, 2017).

Conforme ilustra a Figura 3, um sistema de produção em água profundas por natureza é um empreendimento complexo, caracterizado por diversos equipamentos e sistemas submarinos, conectados por diferentes tipos de cabos umbilicais (dutos por onde podem passar cabos elétricos e mangueiras hidráulicas) e dutos submarinos que os ligam até a plataforma ou navio de produção.

Figura 3 – Caracterização de um sistema de produção de petróleo marítimo.



Fonte: NOV (2016), adaptado pelo autor.

Estes últimos, dutos submarinos, podem ser classificados como *flowline*, *riser* ou *jumper*. *Flowlines* são os dutos que ficam apoiadas sob o leito marinho, não sofrendo com

carregamentos cíclicos, tendo seu comportamento estrutural considerado como estático. *Risers* são trechos longos de dutos responsáveis pela elevação dos produtos até a plataforma, constituindo-se de uma seção dinâmica do conjunto, constantemente expostos a solicitações cíclicas devido ao movimento das correntes marítimas e da unidade flutuante de produção (FPSO). *Jumpers* são trechos de pequeno comprimento de dutos que realizam ligação entre duas terminações, podendo ou não apresentar ganho de elevação do produto, porém geralmente pequena. (MORAIS, 2013)

Outra classificação importante de dutos submarinos é com relação ao duto em questão, podendo este ser rígido, flexível ou híbrido. Dentre estes, dutos flexíveis são aqueles que apresentam melhor adaptação a condições de operação em águas profundas. (CARTER E RONALDS, 1998). Dutos flexíveis são estruturas mecânicas empregadas em todo o sistema submarino para coleta e escoamento de fluidos produzidos por poços de produção de óleo e gás. Estes componentes possuem alta tecnologia de fabricação e baixo número de fornecedores, o que agrega um alto valor ao produto, elevando seu custo final.

Na exploração *off-shore*, os gastos com a aquisição de dutos flexíveis e umbilicais podem chegar a cerca de 20% a 30% dos custos de desenvolvimento de um campo de produção em águas profundas. (DA SILVA, 2006). A Petrobras é líder mundial na exploração em águas profundas, sendo também a maior utilizadora de dutos flexíveis no mundo. (CARMENERI, 2012)

Este tipo de componente pode ser utilizado na interligação entre unidades produtoras, para injeção de ou descarte de fluídos ou para exportação dos produtos dos poços de produção até a terra. Possuem o formato tubular e são compostos por diferentes camadas poliméricas e metálicas concêntricas que lhe conferem respectivamente estanqueidade e resistência mecânica, caracterizando-se ainda pela baixa rigidez à flexão. (MALTA, 2010).

A Figura 4 apresenta uma configuração típica de dutos flexíveis com a identificação de suas diversas camadas.

Figura 4 – Configuração típica de dutos flexíveis e identificação de suas diversas camadas



Fonte: Reto (2018), adaptado pelo autor.

Cada camada do duto flexível possui função específica durante o escoamento dos produtos originados de poços de petróleo. A carcaça intertravada está em contato direto com o produto extraído, por este motivo é confeccionada em aço inoxidável com alta resistência a abrasão e corrosão. As camadas poliméricas, barreira de pressão e capa externa, possuem a função de proteger a armadura de pressão e de tração das condições agressivas do ambiente e dos produtos transportados no duto. Do ponto de vista de resistência mecânica a armadura de tração é camada responsável por suportar os esforços axiais e de flexão no duto durante sua operação. (BUENO, 2010).

Este trabalho trata de analisar as tensões que atuam nos arames da armadura de tração de linhas de duto flexíveis, por este motivo será descrito nos próximos tópicos as principais características desta camada, processos de fabricação, montagem e principais modos de falha conhecidos.

2.1.1 ARMADURA DE TRAÇÃO

A armadura de tração é composta por arames de seção retangular com faces chatas e cantos arredondados, assentados de forma helicoidal ao longo do duto, normalmente sendo utilizadas duas camadas enroladas em sentidos opostos. Altos níveis de carregamento em dutos flexíveis que operam em águas profundas podem exigir o uso de quatro camadas de armadura de tração, em vez de apenas duas. (BAI E BAI, 2005).

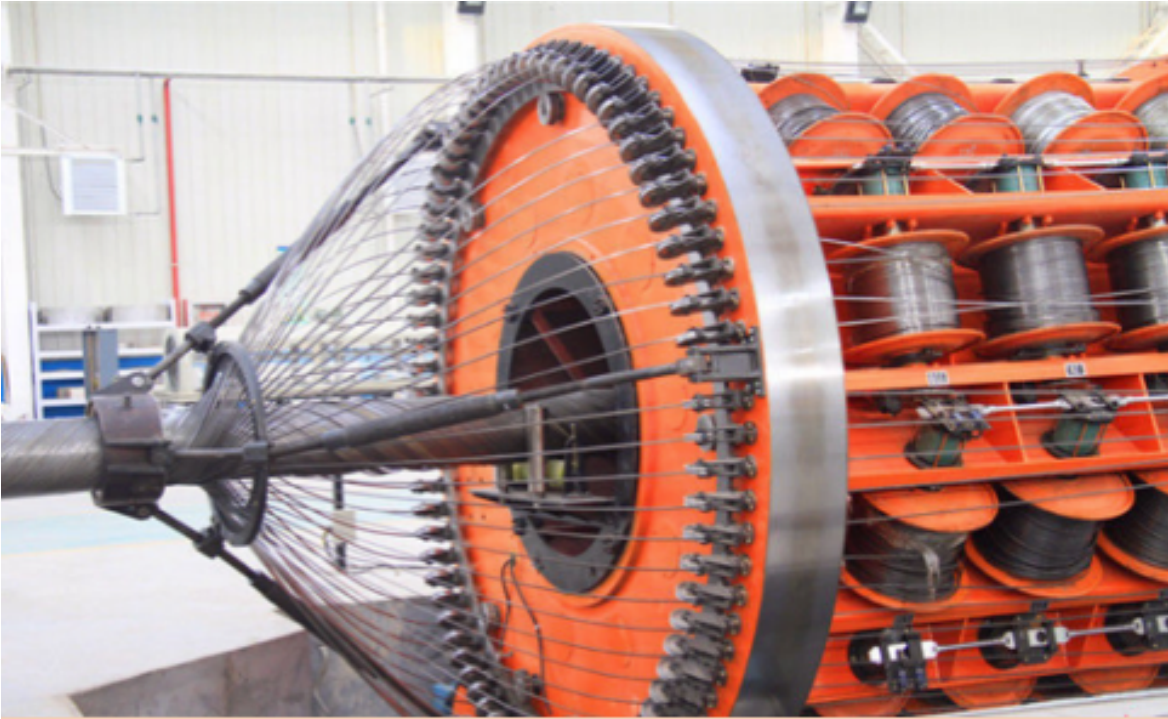
A principal função desta camada é resistir as cargas axiais e a pressão interna, sendo responsáveis também por conceber a linha rigidez à torção. O ângulo de assentamento dos arames irá determinar o balanço entre rigidez axial e radial do duto. O ângulo de assentamento é o ângulo resultante das forças axiais e radiais as quais o duto está submetido quando pressurizado. Para linhas que não estão submetidas a grandes pressões este valor é comumente próximo de 55° , este é o ângulo conhecido como ângulo neutro. Para linhas de alta pressão este ângulo pode variar entre 20° e 35° . O ângulo de assentamento pode variar ainda devido a natureza estática ou dinâmica da operação, à presença de camadas de reforço de pressão, entre outros. (XAVIER, 2009). A depender do ângulo de assentamento, o número de arames em um duto flexível pode variar entre 30 e 80 arames. (BAI E BAI, 2005).

2.1.2 MATERIAIS, FABRICAÇÃO E MONTAGEM.

O material típico utilizado na confecção dos arames da armadura de tração é aço carbono, sendo que o seu teor de carbono depende dos requisitos de projeto. São comumente aços trefilados a frio com alta resistência mecânica. (API 17B, 2002). Os processos de fabricação para obtenção de arames com alta resistência podem combinar diversos fatores como composição química, temperatura e tempo dos tratamentos térmicos e elevados níveis de deformação plástica para obtenção de melhores propriedades. (NEGREIROS, 2016).

Após a sua fabricação, os arames trefilados são bobinados em carretéis comerciais para serem transportados até as linhas de montagem do duto. O processo de montagem da armadura de tração no duto envolve algumas etapas as quais serão descritas a seguir. Ao adentrar na linha de produção, estes arames precisam ser rebobinados para as bobinas de carregamento da máquina armadora e seguem para o processo de montagem. (LOPES, 2013). Um modelo de máquina armadora é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Máquina armadora para montagem da armadura de tração em duto flexível.



Fonte: Herrman (2018).

O tambor só pode girar algumas revoluções, produzindo dezenas de metros até que seja necessário realizar a parada para substituição da bobina e soldagem dos arames. O processo de união dos arames é realizado de modo que apenas uma junta soldada esteja presente em um passo de volta do duto. (4SUBSEA, 2013).

À medida que o arame é montado sob o duto, ele corre através de ferramentas que torcem o fio para que ele fique plano contra a superfície do tubo, em um processo conhecido como pré-forma, finalizando a etapa de montagem da armadura sob o duto. (4SUBSEA, 2013). Em cada etapa em que os arames sofrem estas diversas deformações, um estado de tensões particular é criado.

Após a montagem, mas antes do início de sua operação, os dutos flexíveis devem ser aprovados em uma série de testes. Muitos destes testes, como o teste de aceitação de fábrica (FAT) são realizados ainda em solo e devem ser aplicados em cada duto individualmente. O FAT consiste na realização de testes, inspeção e emissão de documentos que comprovem que o duto está de acordo com suas especificações técnicas. (GUO, LYONS E GHALAMBOR, 2017).

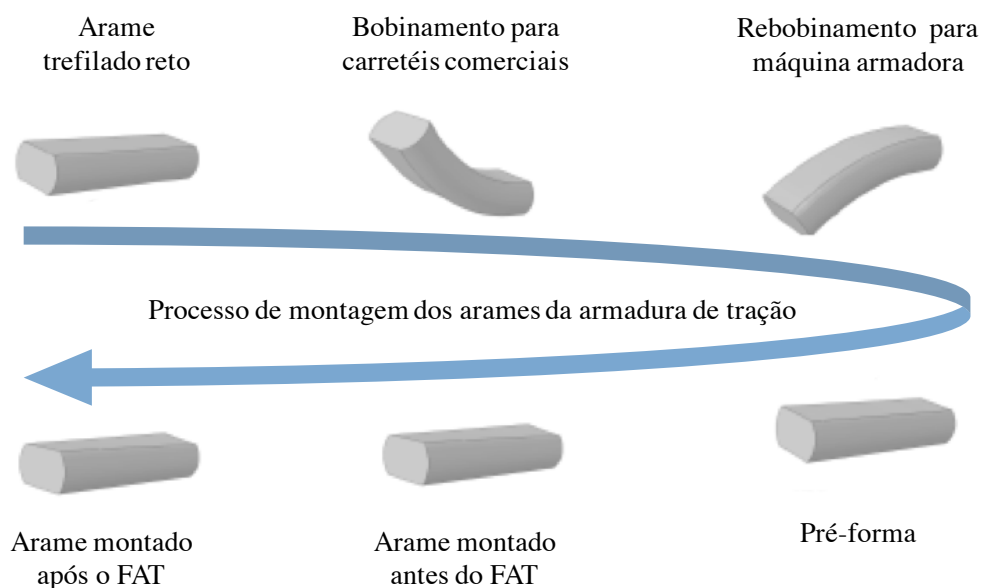
Conforme API 17J (2009), durante a execução do FAT os dutos são testados com pressões interna acima das pressões previstas em projetos, aproximadamente 1,5 vezes a

pressão de projeto para *risers* e 1,25 vezes a pressão de projeto no caso de *flownies*. Ainda conforme esta norma as tensões aplicadas durante o FAT podem chegar a 90% da tensão de escoamento dos arames.

Estudos sugerem que o FAT pode ser benéfico para vida em fadiga de dutos flexíveis, reduzindo para até 1/3 o nível das tensões residuais presentes após a montagem do duto. (FERNANDO *et al.*, 2015). Esta situação pode ser explicada pois durante a aplicação da sobrecarga ocorre a plastificação localizada das regiões com maior concentração de tensões residuais, gerando no descarregamento, tensões residuais compressivas. (BUENO, 2010)

Em cada etapa do processo desde a fabricação do arame trefilado reto, passando pelo bobinamento em carretéis comerciais, rebobinamento para máquina armadora, pré-forma do arame para montagem sob o duto, antes e após o FAT há a geração ou redistribuição de tensões permanentes e residuais nos arames da armadura de tração, fato que pode alterar a vida em fadiga de dutos flexíveis em campo. (FERNANDO *et al.*, 2017). A Figura 6 apresenta de forma esquemática como os arames são deformados ao longo de seu processo de montagem sob um duto flexível.

Figura 6 – Deformações aplicadas aos arames da armadura de tração durante o processo de fabricação de dutos flexíveis.



Fonte: Fernando *et al.* (2017), adaptado pelo autor.

Devido aos diferentes processos aplicados faz-se necessário o pleno conhecimento da evolução do estado de tensão dos arames da armadura de tração ao longo das etapas de

fabricação do duto flexível para garantia de uma maior confiabilidade operacional. Erros durante a execução destes processos podem introduzir níveis elevados de tensão permanente, prejudicando a vida útil do componente, inclusive levando a falhas catastróficas

2.1.3 PRINCIPAIS MECANISMOS DE FALHA.

Devido aos diversos tipos de materiais empregados na fabricação de dutos flexíveis, existem diversas possibilidades da ocorrência de falha. Entretanto o principal modo de falha associado a armadura de tração é a fadiga, associado aos efeitos de carregamentos cíclicos ao qual este componente está sujeito, devido a variações de correntes marítimas ou dos movimentos da FPSO. (CAVATI, 2012). Esta situação é agravada pela condição de ambiente corrosivo ao qual dutos flexíveis estão expostos durante sua operação, que transforma o fenômeno para fadiga sob corrosão. (DRUMOND *et al.*, 2017).

Ambiente corrosivos podem ser formados no espaço anular de um duto flexível quando na ocorrência de um dano a sua capa externa. Este dano possibilita que a água do mar entre no espaço anular e dê início a um processo corrosão fadiga, levando a ruptura de arames da armadura de tração. (BARNES, 2014).

As características construtivas de dutos flexíveis possibilitam também a permeação de gases corrosivos através da barreira de pressão. Quando estes gases se combinam com a água do mar, no espaço anular, cria-se um ambiente agressivo que pode acelerar o processo de corrosão nos arames da armadura de tração. (DOS SANTOS, 2011).

No Brasil, as novas áreas de produção marítima apresentam uma maior concentração de dióxido de carbono (CO_2) em comparação com a maioria dos campos existentes. Este é um grande desafio para produção nacional, visto que, quando o CO_2 e a água do mar se combinam, e com isto pode se ter início um processo de corrosão acelerado nos arames da armadura de tração e, como consequência, ocasionar uma diminuição da vida em fadiga deste componente. (SANTOS *et al.*, 2013).

A falha por fadiga em componentes mecânicos é geralmente associada a uma combinação dos efeitos da tensão efetiva da estrutura, que é a soma das tensões residuais com as tensões de carregamento aplicadas. (HAUK, 1997).

Diversos códigos e normas internacionais como API 579 (2007) determinam a utilização da tensão efetiva no uso de cálculo de projetos mecânicos. Com relação a dutos flexíveis, a API 17B (2002) determina que para aceitação do produto, devem ser consideradas

as tensões residuais presentes nos arames da armadura de tração devido aos processos de fabricação e a testes de aceitação.

Os problemas oriundos da ruptura das armaduras de tração em dutos flexíveis causam prejuízos de grande escala para a indústria petrolífera. (BUENO, 2010). Esta situação demonstra a necessidade de destinação de esforços em busca de soluções viáveis para resolver os problemas relacionados à falha catastrófica e a redução da vida útil destes componentes, permitindo, desta forma, obter maior confiabilidade operacional.

2.1.4 ANÁLISE DE TENSÕES NA ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS.

Grande parte dos estudos utilizados na concepção de projetos de dutos flexíveis envolvem análises através de modelos computacionais baseados no método de elementos finitos (FEA). Há grande precisão entre os modelos propostos com relação aos resultados experimentais. (BUENO, 2010). Porém, este tipo de análise geralmente considera o material como homogêneo, sem a presença de imperfeições que geralmente são encontradas neste tipo de estrutura.

Estudos experimentais demonstram que quando solicitada, a armadura de tração apresenta valores de deformação linear em resposta a cargas de tração, mas há uma redução significativa na sua rigidez a torção quando ocorre a ruptura nos arames da armadura de tração. Além disto, é possível afirmar os que valores de deformação nos arames da armadura de tração variam ao longo da seção do duto e também ao longo de seu comprimento, sendo que os maiores níveis de deformação ocorrem na região próxima as suas terminações, denominada conector. (DE SOUSA *et al.*, 2014).

De fato, diversos estudos têm sido apresentados para determinar o estado de tensão ao qual estão sujeitos arames da armadura de tração na região do conector. Lopes *et al.* (2013) identificou através de modelos experimentais que o sentido e o raio de curvatura da armadura de tração durante seu processo de montagem interfere de forma significativa no estado de tensões dos arames nesta região, sendo que os valores de tensão que ficam permanentes nestes arames podem ser muito significativos, da ordem da tensão de escoamento do material. Outros autores têm desenvolvidos modelos computacionais para análise do comportamento estrutural dos arames da armadura de tração no interior do conector. (MIYAZAKI, 2015; DE SOUSA *et al.*, 2014).

Poucos estudos tratam do assunto da análise experimental de tensões residuais da armadura de tração de dutos flexíveis durante seus processos de fabricação até o FAT e após entrada em operação. Os primeiros estudos experimentais aplicados com objetivo de verificar as tensões residuais antes e após o FAT foram apresentados por Fernando *et al.* (2015). Neste trabalho identificou-se uma redução dos níveis de tensão residual em 1/3 após a aplicação do FAT nos arames da armadura de pressão.

Com relação aos arames da armadura de tração, estudos experimentais para avaliar a evolução das tensões residuais no processo de fabricação de dutos flexíveis foram apresentados por Fernando *et al.* (2017). O estudo revelou uma alteração no nível de tensão residual após a montagem do arame sob o duto durante o processo de montagem da armadura de tração. A tensão residual para o arame logo após a liberação da bobina do fornecedor foi de 200 MPa, enquanto após a montagem sob o duto o nível de tensão residual ficou próximo de 360 MPa. Os maiores níveis de tensão residual foram identificados no centro da seção transversal do arame, no restante os níveis de tensão residual identificados foram na ordem de ± 50 MPa. Cabe ressaltar ainda, que na análise do autor o ponto de medição de tensão residual mais próxima da superfície considerado é de 1 mm.

2.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Os projetos e análises estruturais de componentes mecânicos utilizam métodos de cálculo que avaliam a resistência do material comparando-os aos carregamentos aplicados. As avaliações de solicitações em um componente são avaliadas com base na Lei de Hook ($\sigma = \epsilon \cdot E$) que relaciona a tensão gerada no material (σ) com a deformação resultante (ϵ), sendo E o módulo de elasticidade do material. (HIBBELER, 2004).

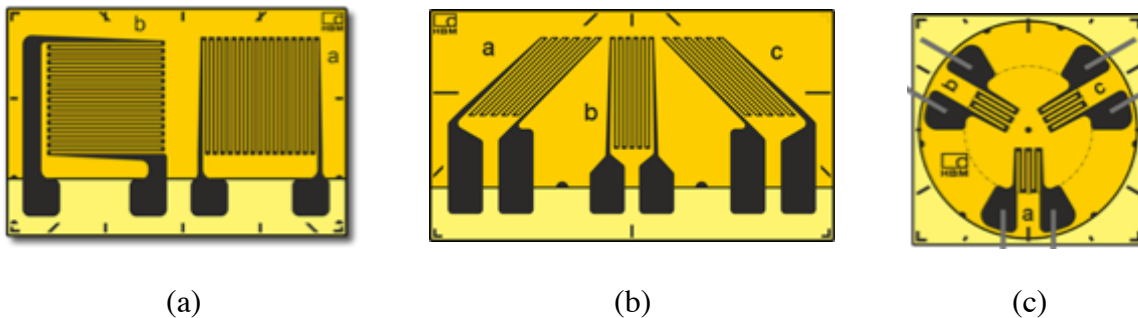
Diversos métodos e tecnologias diversificadas têm sido utilizados para monitorar deformações mecânicas. Dentre este, o método convencional mais empregado é através do uso de extensômetros de resistência elétrica (ERE). (HIBBELER, 2004).

ERE's são sensores de deformação, tipicamente formados por fios condutores finos que acusam variações no seu comportamento (alongamento ou encurtamento) através da variação de sua resistência elétrica. Quando aderidos em uma superfície, as deformações ocorridas nesta são transferidas mecanicamente ao ERE, que as transforma em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Um maior detalhamento sobre os princípios teóricos desta técnica pode ser obtido em bibliografia específica. (HOFFMAN, 1989).

Diversas configurações de ERE's podem ser encontradas comercialmente, podendo estes serem uniaxiais, biaxiais ou triaxiais. Para os casos mais comuns de engenharia, quando não se conhece a direção das tensões principais ao qual está sujeita a peça, é necessário o uso de uma roseta extensométrica triaxial. Este tipo de roseta pode ser instalada em qualquer direção, porém comumente são instaladas de forma que ao menos um dos sensores esteja alinhado com um eixo significativo da peça em estudo. (VISHAY, 2014).

Existem dois tipos de configuração das rosetas triaxiais, rosetas retangulares, com alinhamento dos sensores a 45° , Figura 7 (b), e rosetas delta, Figura 7 (c), com direção dos sensores a 60° entre eles. (VISHAY, 2014).

Figura 7 – Configurações de extensômetros: (a) biaxial (90°); (b) triaxial retangular (45°); e (c) triaxial delta (60°).



Fonte: VISHAY (2014), adaptado pelo autor.

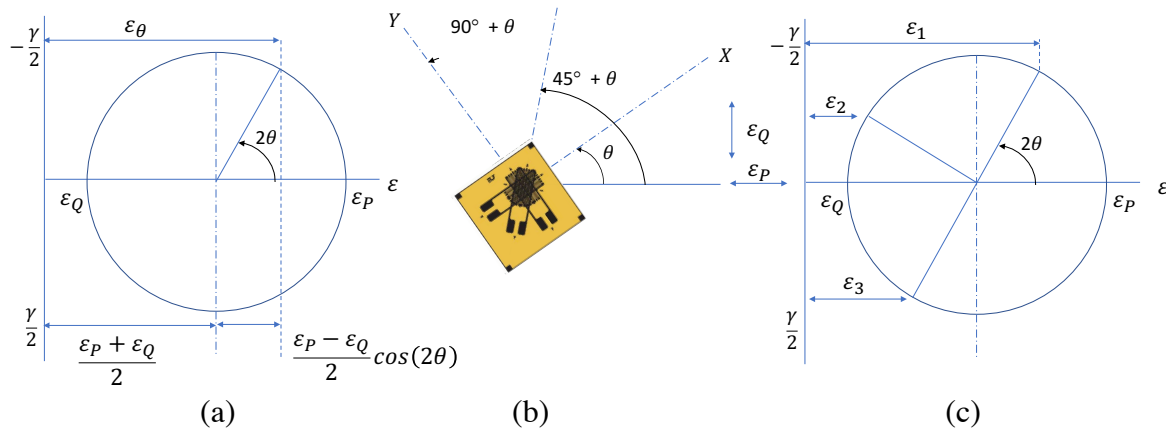
2.2.1. DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO A PARTIR DE MEDIÇÕES COM EXTENSOMETROS DO TIPO ROSETAS TRIAXIAIS

Para correta obtenção de resultados derivados de uma análise de tensões com o uso de rosetas triaxiais, os seus elementos sensores (grades) devem ser propriamente enumerados. No caso de rosetas retangulares a orientação das grades 2 e 3 em relação a grade 1 deve ser de 45° e 90° respectivamente, enquanto para rosetas delta esta relação é de 60° e 120° .

As equações utilizadas para o cálculo das deformações principais a partir das medições com uso de rosetas extensométricas triaxiais são derivadas das equações utilizadas no que é conhecido como “transformação de deformação”. De forma simplificada, estas relações expressam a deformação normal em qualquer direção de um componente em função de duas deformações principais e o ângulo de direção de uma destas deformações específicas.

Esta relação pode ser vista de forma simplificada através do círculo de Mohr para a deformação, apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Transformação das deformações principais para deformação em qualquer direção: (a) ϵ_θ em termos das deformações principais ϵ_P e ϵ_Q demonstradas no círculo de Mohr; (b) Roseta extensométrica triaxial retangular como instalada em uma superfície de teste, com a direção 1 do orientada em uma direção (θ) arbitrária em relação a deformação principal; (c) Eixos de uma roseta triaxial retangular sobreposto ao círculo de Mohr.



Fonte: Vishay, 2014.

Como pode ser observado na Figura 8 (a), a deformação normal (ϵ_θ) para qualquer ângulo (θ) do eixo principal é dada por:

$$\epsilon_\theta = \frac{\epsilon_P + \epsilon_Q}{2} + \frac{\epsilon_P - \epsilon_Q}{2} \cos 2(\theta) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo, ϵ_P a deformação máxima principal e ϵ_Q a deformação mínima principal.

O círculo de Mohr é construído com a deformação angular ($\gamma/2$) positiva traçada para baixo. Isto é feito para que a direção de rotação positiva no círculo de Mohr (anti-horário) seja a mesma da roseta, mantendo desta forma a convenção de sinal usual para tensão de cisalhamento, ou seja, uma tensão de cisalhamento positiva corresponde a uma redução do ângulo inicial na origem dos eixos XY como rotulado na Figura 8 (a). A Figura 8 (b) representa uma roseta extensométrica retangular como instalada em uma superfície, com a grade 1 orientada com ângulo de θ graus em relação a deformação máxima principal (ϵ_P). Na Figura 8 (c) é apresentado os eixos da roseta sobrepostos no círculo de Mohr.

Neste trabalho foram utilizadas as equações descritas pela norma técnica Vishay TN-515 (VISHAY, 2014) para determinar o estado de tensão de componentes mecânicas através do uso de rosetas extensométricas retangulares. Estas equações são descritas a seguir.

Substituindo na Equação 1 os ângulos das três direções, a deformação em cada elemento sensor de uma roseta retangular é expressa por:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_P + \varepsilon_Q}{2} + \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_Q}{2} \cos 2(\theta) \quad \text{Equação 2 (a)}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_P + \varepsilon_Q}{2} + \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_Q}{2} \cos 2(\theta + 45^\circ) \quad \text{Equação 2 (b)}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_P + \varepsilon_Q}{2} + \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_Q}{2} \cos 2(\theta + 90^\circ) \quad \text{Equação 2 (c)}$$

Quando propriamente instaladas em uma superfície os valores de ε_1 , ε_2 e ε_3 são conhecidos. Portanto, resolvendo a Equação 2 é possível obter os valores de deformação máxima (ε_P) e mínima (ε_Q) principal além do ângulo θ que representa a direção do eixo principal em relação a direção de referência da roseta em função dos valores de ε_1 , ε_2 e ε_3 :

$$\varepsilon_{P,Q} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad \text{Equação 3}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Em análises experimentais, é preferível visualizar o ângulo θ expresso da direção de referência da roseta para o eixo principal, esta mudança requer a alteração de sinal na Equação 5:

$$\phi_{P,Q} = -\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad \text{Equação 5}$$

A direção física do ângulo ϕ dado na Equação 4 é sempre positiva no sentido anti-horário. O ângulo ϕ pode se referir a deformações máximas ou mínimas, por este motivo deve ser adota a seguinte regra para correta interpretação:

- a) Se $\varepsilon_1 > \varepsilon_3$, então $\phi_{P,Q} = \phi_P$
- b) Se $\varepsilon_1 < \varepsilon_3$, então $\phi_{P,Q} = \phi_Q$
- c) Se $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ e $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$, então $\phi_{P,Q} = \phi_P = -45^\circ$
- d) Se $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ e $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, então $\phi_{P,Q} = \phi_P = +45^\circ$
- e) Se $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$, então $\phi_{P,Q}$ é indeterminado (deformação biaxial).

Se o material de teste for homogêneo em sua composição, isotrópico e estiver no regime linear-elástico, com deformação proporcional a tensão, é possível aplicar a Lei de Hook para determinar as tensões máxima e mínima principal. Para tal é necessário o conhecimento do modulo de elasticidade do material (E) e seu coeficiente de Poisson (v), sendo expressa como:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_P + \nu\varepsilon_Q) \quad \text{Equação 6}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_Q + \nu\varepsilon_P) \quad \text{Equação 7}$$

Substituindo em (3) os valores de tensão máxima e mínima principal podem ser expressos em função das deformações ε_1 , ε_2 e ε_3 :

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1-\nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right] \quad \text{Equação 8}$$

Quando o material possui características isotrópicas, dentro do regime linear elástico a direção do eixo das tensões principais coincide com a direção da deformação principal, apresentada na Equação 5.

A importância de conhecer a direção das tensões principais de um estado plano de tensões é que nesta direção as tensões normais (σ_1) e (σ_2) assumem seus valores máximos e mínimos, onde a tensão de cisalhamento (τ) equivale a zero. Em todas outras direções as tensões normais assumem valores que estão entre estes extremos e as tensões de cisalhamento assumem valores finitos (HOFFMAN, 1989). As tensões que atuam no plano X e Y podem ser calculadas conforme Equações 9 e 10:

$$\sigma_{X,Y} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(2\phi) \quad \text{Equação 9}$$

$$\tau_{XY}, \tau_{YX} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \text{sen}(2\phi) \quad \text{Equação 10}$$

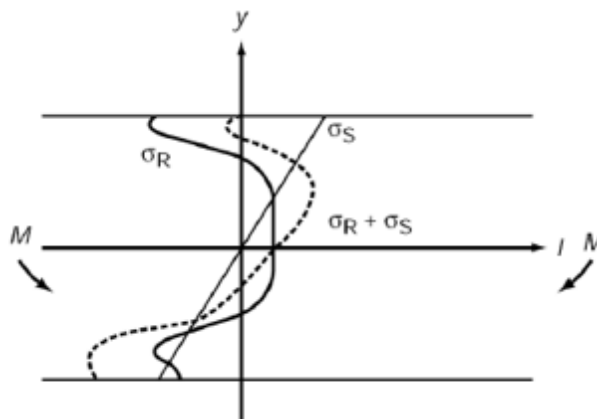
2.3 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são as tensões existentes em um corpo sólido quando este está livre de carregamentos externos ou outras fontes de tensão, tais como gradiente térmico. Tensões residuais estão em constante estado de equilíbrio, de forma que a soma das tensões trativas e compressivas será sempre zero. (LU, 1996). O valor máximo em módulo dos níveis de tensão residual em um componente pode chegar ao valor de tensão de escoamento do material. Caso isto ocorra, o material irá deformar-se plasticamente, havendo desta forma uma nova redistribuição do estado de tensões do material. (NUNES, 2008).

De fato, é de conhecimento que praticamente nenhum material é livre de tensões residuais. (HAUK, 1997). As tensões residuais são de caráter ordinário, ou seja, se combinam e somam-se em valor com as tensões externas aplicadas, podendo ser benéficas ou prejudiciais ao componente. (LEMOS *et al.*, 2017).

Tensões residuais influenciam diretamente na tensão efetiva de um componente. Conforme ilustra a Figura 9, em um componente com a presença de tensões residuais (σ_R) as tensões de serviço (σ_S) somam-se umas as outras. Desta forma, a tensão efetiva a qual o componente estará sujeito durante o serviço será equivalente a soma de $\sigma_R + \sigma_S$. (Rocha, 2010).

Figura 9 – Sobreposição de tensões residuais e tensões de serviço de um componente.



Fonte: Rocha, 2010.

Tensões compressivas diminuem a tensão efetiva de um componente, beneficiando o componente no que diz respeito a sua vida em fadiga. Por outro lado, as tensões trativas serão

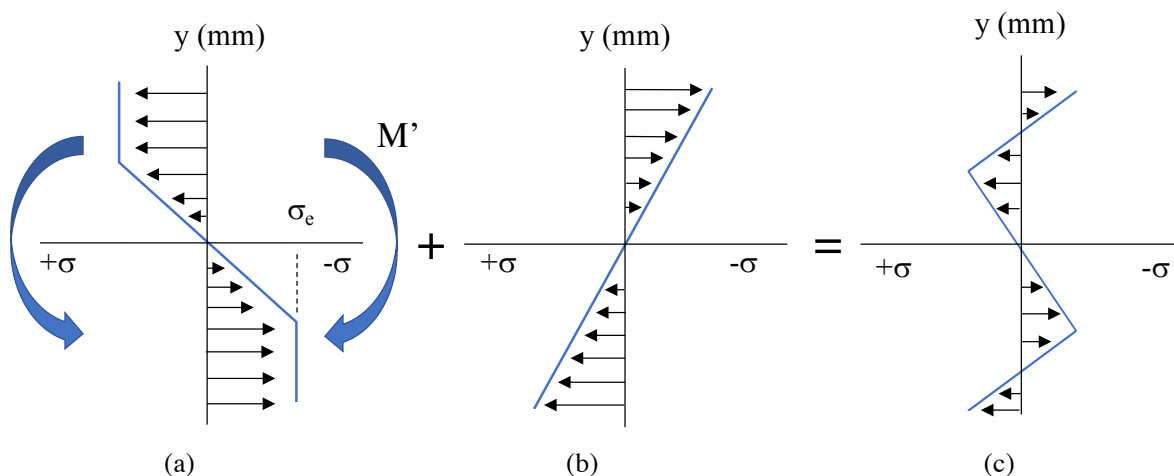
somadas as tensões de carregamento do material, o que pode levar a ocorrência de falhas. (LEMOS *et al.*, 2017).

De forma geral, podemos afirmar que as tensões residuais são geradas em processos de ordem mecânica, metalúrgica ou térmica. (MARTINS, 2004; MAHMOUDI *et al.*, 2016). Elas podem ser inseridas deliberadamente em componentes mecânicos ou de forma não controlada, dando origem a um novo estado de tensões residuais. (KALENTICS, BOILLAT *et al.*, 2017; LIANG, MURAKAWA E DENG, 2015; STORY E WEBLER, 2017).

Como exemplo, a aplicação de um momento fletor suficientemente elevado pode dar origem a regiões plastificadas em uma viga fletida. Após a retirada do momento aplicado, a parte elástica é aliviada, restando um novo estado de tensões residuais. Para um ponto inicialmente tracionado a tensão residual seria compressiva, ao tempo em que se inicialmente comprimido as tensões residuais seriam trativas. (LIU, VILLAVICENCIO E SOARES, 2017).

A Figura 10 ilustra de forma esquemática a estimativa da distribuição do estado de tensões residuais na aplicação de momento fletor em uma viga. Na fase de carregamento durante aplicação do momento (M') o material apresenta comportamento de plastificação parcial quando a tensão for superior a tensão de escoamento (σ_e), Figura 10 (a). Na etapa em que o momento é retirado ocorre o retorno elástico do material, Figura 10 (b). Adicionando-se estas duas etapas tem-se uma estimativa da distribuição das tensões residuais na viga, Figura 10 (c). Na Figura 10 a espessura do material é representada por y .

Figura 10 – Representação esquemática da distribuição de tensões residuais.



Fonte: Liu, Villavicencio e Soares (2017), adaptado pelo autor.

2.3.1 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL.

Conforme mencionado, faz-se muito importante o pleno conhecimento do estado de tensões residuais ao qual um componente está sujeito. Diversos códigos e normas internacionais como API 579 (API 579, 2000) e BS 7910 (BS-7910, 2005), ressaltam a importância do conhecimento das tensões residuais presentes nos componentes para que estas sejam somadas aos valores de carregamento na validação de projetos.

Atualmente existem diversas técnicas que são utilizadas para medição das tensões residuais. Este trabalho fez uso de duas destas técnicas, o método do furo cego (MFC) e a técnica de difração de raios-X (DRX), as quais serão descritas nos próximos tópicos.

2.3.1.1 MÉTODO DO FURO CEGO.

O princípio da técnica de medição com uso do furo foi apresentado por J. Mathar (1934). Basicamente o autor demonstrou que a medida que um furo é introduzido no componente, ocorre um alívio das tensões na região próxima a superfície do furo, para casos com tensões trativas a tendência é de que haja um alargamento do furo, enquanto para tensões compressivas ocorre uma variação negativa no diâmetro do furo usinado.

O método do furo cego (MFC) é descrito pela norma ASTM E-837. Considerada uma técnica “semi-destrutiva”, esta técnica é aplicada para determinação do perfil de tensões residuais uniforme ou não uniforme ao longo da profundidade de materiais isotrópicos dentro do regime linear elástico. (ASTM, 2002).

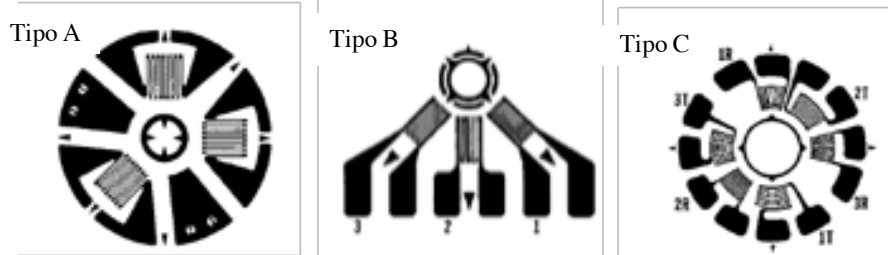
A técnica do MFC consiste na adesão de uma roseta extensométrica triaxial, em uma região de interesse do componente para posteriormente realizar a usinagem de um furo no centro desta roseta, de forma gradual, com incrementos de profundidade para que as tensões aliviadas pelo furo sejam medidas pela roseta. (CARDOSO, 2002).

A depender do tipo de roseta utilizada, diferentes diâmetros de fresas podem ser utilizados para realização do furo. Usualmente o diâmetro do furo não é maior que 3 mm (VISHAY, 2011). Durante o procedimento da usinagem do furo um novo estado de tensões é gerado, o que pode ocasionar uma deformação plástica superficial na periferia do furo, dando origem a resultados não satisfatórios. Estudos sugerem que o uso de fresas de menor diâmetro (0,8mm) podem eliminar tais problemas. (ROCHA, NUNES E HIRSCH, 2009).

Diversos tipos de rosetas extensométricas padronizadas são disponíveis comercialmente para aplicação da técnica. A Figura 11 ilustra três tipos diferentes de rosetas

convencionais. A roseta extensométrica utilizada no MFC é comumente composta de pares de extensômetros dispostos de forma circular e equidistantes do centro da roseta. Os extensômetros devem estar orientados cada um em uma direção, sendo, (1) direção de referência, (2) 45° ou 135° da direção de referência e (3) perpendicular a direção de referência.

Figura 11 – Diversos tipos de rosetas extensométricas padrão utilizadas no MFC.



Fonte: ASME, 2002.

A roseta do tipo A é o tipo de roseta mais convencional utilizada, podendo ser encontrada diferentes diâmetros. O tipo B possui todos os extensômetros alinhados ao mesmo lado da roseta, é utilizada geralmente para aplicação em geometrias com difícil acesso para conexão dos cabos e possui alta sensibilidade. O tipo C é uma roseta que apresenta pares de extensômetros dispostos em lados opostos para serem ligados em meia ponte, sendo aplicadas principalmente em situações com necessidade de estabilidade térmica e alta sensibilidade. (ROCHA, NUNES E HIRSCH, 2009).

Uma restrição quanto ao uso da técnica do MFC se refere a distância do centro da roseta para as bordas ou obstáculos do material. Para a roseta do tipo A é indicado que o centro da roseta esteja a uma distância de pelo menos 1,5 vezes o diâmetro nominal da roseta até qualquer uma das bordas do material, enquanto para roseta do tipo B esta distância equivale a 0,5 vezes. Diâmetro nominal é o diâmetro correspondente ao círculo tangenciado pelo centro da grade de cada extensômetro. (ASTM, 2002).

No caso de ser efetuado mais de um furo no componente, para mapear uma maior região da superfície do componente por exemplo, é possível que ocorram erros de medição devido a interação entre os furos já efetuados. Por este motivo, em bibliografia específica existem recomendações que sugerem que a distância entre os furos deve ser de no mínimo seis vezes o diâmetro do furo usinado. (SCHWARZ E KOCKELMANN, 1993).

A obtenção de resultados confiáveis é também relacionada diretamente com a precisão em que o furo é usinado ao centro da roseta. Conforme ilustra Figura 12 o

equipamento utilizado para aplicação da técnica é composto por um tripé que é fixado sob a peça, com seu centro alinhado com o centro da roseta. A centragem do furo é realizada com o auxílio de uma luneta microscópica. Esta lupa também é utilizada para posterior a usinagem medir o diâmetro do furo. (VISHAY, 2014)

Após a centragem do furo, é retirada a luneta e posicionada a caneta de usinagem, composta por uma turbina de alta rotação (20.000 – 400.000 rpm) que pode ser elétrica ou de ar comprimido. A ferramenta mais usual para realização do furo é uma fresa fabricada de carbeto de tungstênio. O avanço na profundidade do furo é controlado por um tambor micrométrico. (SENTHILMURUGAN E ARASU, 2016).

Figura 12 - Dispositivo para realização do MFC.



Fonte: Vishay, 2014

Pelo fato de que a tensão residual não é completamente aliviada após a realização do furo, não é possível sua determinação direta pela Lei de Hook. Por este motivo, os métodos para determinação do perfil de tensões residuais ao longo da profundidade necessitam de uma etapa de calibração experimental ou computacional. (SCHWARZ E, KOCKELMANN, 1993).

O modelo de cálculo utilizado MFC representa o perfil de tensões residuais ao longo da profundidade, onde cada etapa de profundidade corresponde aos incrementos do furo realizados durante o ensaio. Este perfil pode ser determinado matematicamente por diversos métodos dentre os quais se destacam o método da integral e de Kockelmann.

Um dos métodos mais sensíveis para determinação do perfil de tensões residuais, não uniformes, ao longo da profundidade em componentes mecânicos é de Kockelmann. (SCHWARZ E KOCKELMANN, 1993).

O método do Kockelmann apresenta resultados tão confiáveis quanto outros modelos de cálculo de tensões residuais como o método da integral, tendo como vantagem um menor erro nas medidas de deformação associado problemas com a instrumentação, pelo fato de que as condições reais do ensaio são difíceis de serem simuladas numericamente. Desta forma, a calibração experimental apresenta uma maior representatividade na determinação de perfis de tensão residual em componentes mecânicos. (ROCHA, NUNES E HIRSCH, 2009).

O método de Kockelmann utiliza de dados experimentais de calibração. Para determinar o perfil de distribuição das tensões residuais a partir das deformações utiliza-se como referência uma variável adimensional (ξ), que equivale a razão entre a profundidade (z) e o diâmetro do furo (D_0), conforme descrito na Equação 11:

$$\xi = \frac{z}{D_0} \quad \text{Equação 11}$$

A calibração deste método é realizada utilizando-se um corpo de prova sujeito a um estado de tensões conhecido, como exemplo um carregamento uniaxial, tendo suas deformações registradas em cada incremento do furo. Na medida em que o processo de furo incremental é realizado tem-se como consequência as deformações de relaxamento $\varepsilon_x(\xi)$ e $\varepsilon_y(\xi)$ que dão origem as funções de calibração $K_x(\xi)$ e $K_y(\xi)$, conforme Equações 12 e 13:

$$K_x(\xi) = \frac{E}{\sigma} \frac{d\varepsilon_x(\xi)}{d(\xi)} \quad \text{Equação 12}$$

$$K_y(\xi) = -\frac{E}{\nu\sigma} \frac{d\varepsilon_y(\xi)}{d(\xi)} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo, E o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson.

Os valores de deformação são então convertidos em valores de tensão residual utilizando as funções de calibração descritas da Equação 14 até 16:

$$\sigma_a(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2(K_y(\xi))^2} \left[K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right] \quad \text{Equação 14}$$

$$\sigma_b(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2(K_y(\xi))^2} \left[\begin{array}{c} K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \\ \nu K_y(\xi) \left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \frac{d\varepsilon_b(\xi)}{d\xi} - \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \end{array} \right] \quad \text{Equação 15}$$

$$\sigma_c(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2(K_y(\xi))^2} \left[K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right] \quad \text{Equação 16}$$

Pelas relações obtidas através do Círculo de Mohr de tensões, as tensões σ_{\max} e σ_{\min} são calculadas conforme da Equação 17:

$$\frac{\sigma_{\max}(\xi)}{\sigma_{\min}(\xi)} = \frac{\sigma_a(\xi) + \sigma_b(\xi)}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_a(\xi) - \sigma_b(\xi))^2 + (\sigma_c(\xi) - \sigma_b(\xi))^2} \quad \text{Equação 17}$$

É possível também determinar a partir da Equação 19 o ângulo de direção da σ_{\max} principal:

$$\beta(\xi) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\sigma_b(\xi) - \sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)}{\sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)} \right) \quad \text{Equação 18}$$

Esta técnica apresenta como característica de desempenho uma precisão entre ± 20 MPa e ± 30 MPa. Outra restrição do método esta relacionada com o nível de tensão ao qual o componente esta sujeito. Um aumento do erro no valor medido ocorre para a um nível de tensão superior a 70% do nível da tensão de escoamento do material. (SCHWARZ E KOCKELMANN, 1993).

2.3.1.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Uma técnica amplamente utilizada para medições de tensão residual é de difração de raios-X (DRX). Consiste basicamente em correlacionar a tensão residual com o espaçamento entre os planos cristalinos do material, partindo-se do pressuposto que em um material cristalino isento de tensões residuais a distância entre os planos cristalográficos é a mesma em todas as direções. (LOPÊS, 2014).

O princípio físico é baseado na interação entre os fótons emitidos por um feixe monocromático de raios-X e o material cristalino. A tensão medida no retículo cristalino e suas tensões residuais associadas são determinadas a partir de constantes elásticas, assumindo uma distorção linear no retículo cristalino. (ROCHA, NUNES E HIRSCH, 2009).

As medidas de tensão residual compreendem uma pequena região do material composta por alguns grãos, por este motivo, os resultados obtidos pela aplicação da técnica dependem fundamentalmente do tamanho de grão do componente e da inclinação do feixe incidente. (SPEAKMAN, 2017).

A difração de raios-X pode ser utilizada para medir com precisão os espaçamentos entre os retículos cristalinos através da Lei de Bragg, apresentada na Equação 19, onde n é um número inteiro que denota a ordem da difração, λ é o comprimento de onda do raio-X, θ é a metade do ângulo de espalhamento e d é o espaçamento interplanar médio para uma dada reflexão de um material cristalino. (LEMOS *et al.*, 2017):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Equação 19}$$

A técnica de difração de raios-X permite a medição não destrutiva de tensões residuais na superfície do material, em uma camada com profundidade de aproximadamente $5\mu\text{m}$. O método possibilita também a realização de medições de microtensões possibilitando caracterizar a microdureza do componente em pequenas camadas superficiais. (NUNES, 2008).

Um dos principais métodos para medir tensões com uso de difração de raios-X é o método de $\sin^2\varphi$. Este método é fundamentado na medida da deformação em relação ao ângulo difratado, e caracterizado pela posição angular da linha de difração. Tal método é estruturado na Lei de Bragg e na teoria da elasticidade. (TURIBUS, 2014).

Para isto, são realizadas diversas varreduras na geometria convencional Bragg-Brentano (θ - 2θ) em um pico selecionado, variando o ângulo φ (ângulo entre o plano normal

de difração e a superfície da amostra) em cada uma delas, para então realizar o comparativo entre a posição do pico na sua posição original e na ausência de tensões. A magnitude da tensão residual medida é obtida através da variação do espaço interplanar de $\sin^2\varphi$. Sendo o valor de tensão residual calculado conforme Equação 20. (LEMOS, 2012):

$$\sigma = \frac{mE}{1-\nu} \quad \text{Equação 20}$$

Onde m é o coeficiente angular da reta obtida do gráfico com a deformação da rede nas ordenadas e $\sin^2\varphi$ nas abscissas. (LEMOS, 2012).

A principal vantagem da aplicação do uso de difração de raios-X para determinação de tensões residuais é por esta ser uma técnica não destrutiva e de elevada confiabilidade. Porém, apresenta limitação por ser uma técnica de medição superficial, devido a baixa penetração do feixe. (MACHADO, 2012). Uma alternativa para contornar esta situação é realizar remoção de camadas superficiais do material através de polimento eletrolítico. Esta remoção de camadas permite a retirada de material da superfície da amostra sem que haja redistribuição das tensões residuais, o que possibilita obter um perfil de tensão residual para diferentes profundidades. (ASM INTERNATIONAL, 2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O trabalho foi dividido em etapas, sendo que, para cada etapa foram utilizadas diferentes amostras, as quais serão especificadas abaixo. O detalhamento das etapas do trabalho será descrito na metodologia do trabalho.

Na etapa de validação da metodologia, os métodos selecionados foram aplicados em amostras de escala reduzida. Esta amostra consistiu de um segmento de arame utilizado na fabricação de armaduras de tração de dutos flexíveis. Este material foi obtido de forma aleatória de uma bobina de fornecimento do fabricante do aço. O arame utilizado é apresentado na Figura 13.

O segmento de arame inicial utilizado possuía um comprimento total de 1m, deste total, foram cortadas 3 amostras de 135 mm cada. As demais dimensões do arame são de 6 mm de espessura e 14 mm de largura, com bordas arredondas.

Figura 13 – Segmento de arame de armadura de tração utilizado como amostra nos ensaios de escala reduzida.



Fonte: O autor.

Para validação da proposta foram utilizadas amostras de dutos flexíveis em escala real, disponibilizadas pela Petrobras. Cada amostra possui condições de operação distinta e foi retirada de diferentes campos de produção marítimos. As amostras 2 e 3 pertenciam a mesma linha de duto flexível e foram retiradas de cotas distantes entre si de 1 Km. Um exemplo de amostra utilizada neste trabalho é apresentado na Figura 14.

Inicialmente, não se tinha o conhecimento dos resultados esperados para cada ponto de medição analisado, por este motivo, para Amostra 1 os ensaios foram conduzidos apenas na armadura externa e foram selecionados para medição três pontos defasados entre si de 120° ao longo da circunferência. Para amostras 2 e 3, em função dos resultados preliminares, optou-se por executar os ensaios nas armaduras interna e externa em quatro pontos de medição ao longo da circunferência do duto, defasados 90°. Na Amostra 4 foram efetuadas

medições em dois pontos, defasados 180° , ao longo da circunferência. A identificação das amostras analisadas e da posição circunferencial dos arames onde foram realizadas as medições de análise de tensão são apresentadas na Tabela 1.

Por tratar-se de informação confidencial, maiores informações sobre o histórico de operação e dimensionamento dos dutos avaliados nesse trabalho não serão apresentadas.

Tabela 1 - Amostras analisadas e posição circunferencial dos arames avaliados.

AMOSTRA	ARMADURA	POSIÇÃO CIRCUNFERÊNCIAL
Amostra 1	Externa	$0^\circ - 120^\circ - 240^\circ$
Amostra 2	Externa	$45^\circ - 135^\circ - 225^\circ - 315^\circ$
	Interna	$0^\circ - 90^\circ - 180^\circ - 270^\circ$
Amostra 3	Externa	$45^\circ - 135^\circ - 225^\circ - 315^\circ$
	Interna	$0^\circ - 90^\circ - 180^\circ - 270^\circ$
Amostra 4	Externa	$0^\circ - 180^\circ$
	Interna	$90^\circ - 270^\circ$

Fonte: O autor.

Figura 14 – Amostra de duto flexível utilizada nos ensaios de escala real.

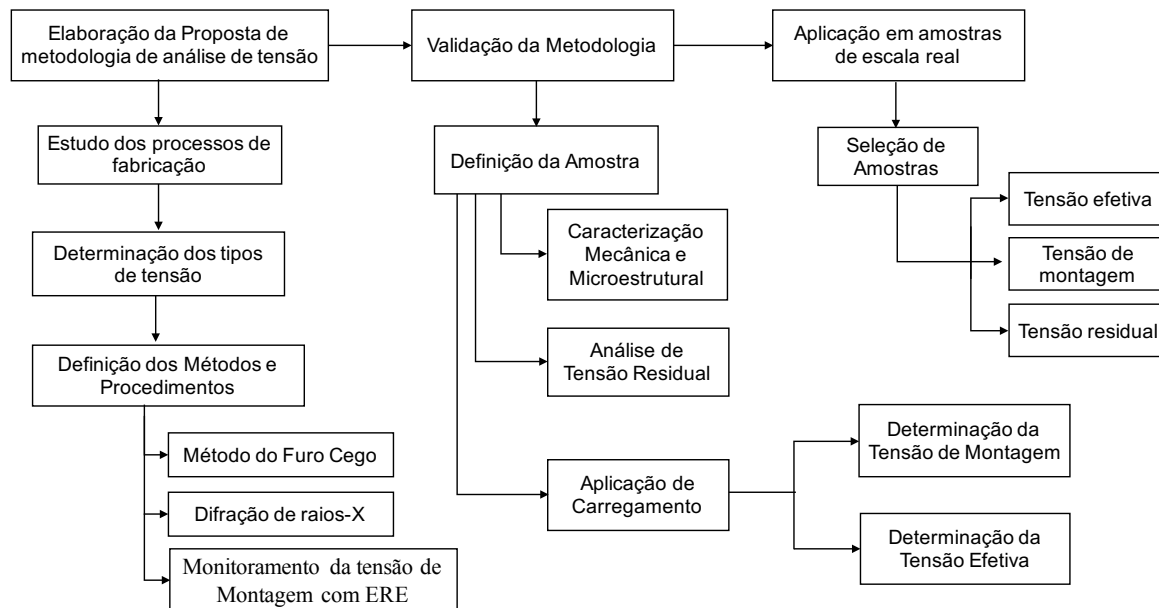


Fonte: O autor.

3.2 METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia deste trabalho foi dividida em três etapas distintas, as quais são: proposta de metodologia de análise de tensão; validação da metodologia através de ensaios em amostras de escala reduzida; e aplicação da metodologia em amostras de escala real. O desenvolvimento de cada etapa da metodologia do trabalho é apresentado na forma de diagrama na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de etapas desenvolvidas na metodologia do trabalho



Fonte: O autor.

Na primeira etapa, a proposta de metodologia de análise de tensões, foram realizados estudos sobre os processos de fabricação da armadura de tração de dutos flexíveis, objetivando obter informações quanto às suas variabilidades. Com isto, foi possível determinar os tipos de tensão atuantes nos arames da armadura de tração. Obtendo este conhecimento e com base nos métodos de ensaio disponíveis para desenvolvimento da pesquisa no LAMEF foram selecionados três métodos de análise de tensão: método do furo cego (MFC); difração de raios-X (DRX); e monitoramento de deformações com extensômetros de resistência elétrica (ERE).

Posteriormente, na segunda etapa, a metodologia proposta foi validada através da utilização de amostras em escala reduzida com condições de carregamento conhecidos. Estas amostras tiveram suas propriedades mecânicas e microestruturais caracterizadas. Então, os

métodos selecionados foram aplicados para determinar cada tipo de tensão conforme proposto na metodologia.

Na última etapa do estudo, a metodologia proposta foi aplicada em amostras de escala real de dutos flexíveis retirados de operação. Cada uma destas amostras foi estudada com os métodos escolhidos e tiveram determinados os três tipos de tensão atuantes na armadura de tração: efetiva, montagem e residual.

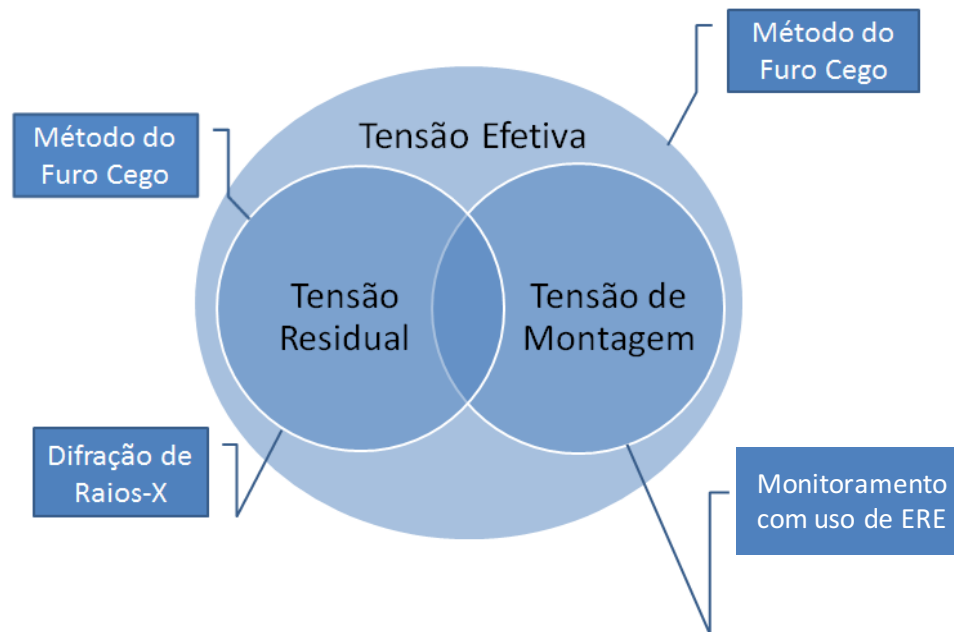
3.2.1 PROPOSTA DE METODOLOGIA

As etapas do processo de fabricação e montagem da armadura de tração de dutos flexíveis envolvem elevados níveis de deformação plástica não uniforme em seus arames. Cada etapa destes processos dá origem a um novo estado de tensão residual. Além das tensões residuais, na última etapa da montagem, quando realizado o assentamento dos arames sob o duto, as tensões aplicadas irão conservar-se de forma permanente na armadura de tração. Este tipo de tensão será denominado neste trabalho como tensão de montagem. O somatório destes dois tipos de tensão caracteriza a tensão efetiva da armadura de tração.

Cada tipo de tensão foi avaliado por diferentes de métodos. Na análise da tensão efetiva, o MFC foi aplicado *in-loco* nos arames da armadura de tração enquanto estes estavam montados sob o duto. Para determinar a tensão de montagem, durante a dissecação do duto, extensômetros de resistência elétrica foram utilizados para monitorar as deformações resultantes da desmontagem. Por fim, com os arames livres, os métodos aplicados para determinação de tensão residual foram o MFC e o DRX.

Na Figura 16 é apresentado, de maneira esquemática, os diferentes tipos de tensões avaliadas e os diferentes métodos empregados.

Figura 16 - Representação esquemática dos tipos de tensões avaliadas e dos métodos de medição.



Fonte: O autor.

3.2.2 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A validação da metodologia de análise de tensões proposta foi realizada através de ensaios em amostras de escala reduzida. Tais amostras tiveram suas propriedades mecânicas e microestruturais obtidas por diferentes ensaios, que serão descritos na etapa de métodos de ensaio.

3.2.2.1 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS

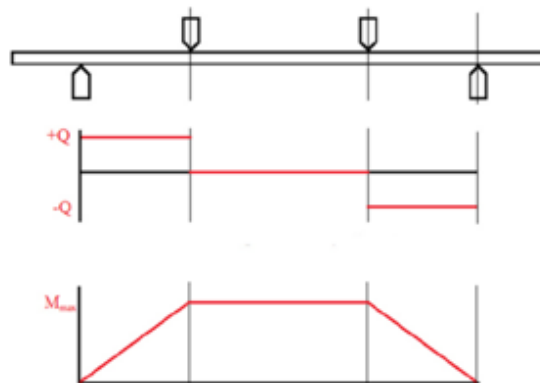
Para análise de tensão residual os métodos de medição empregados foram: MFC e DRX. O primeiro procedimento aplicado foi o DRX, isto para que não houvesse a influência do uso das lixas utilizadas na preparação da amostra para instrumentação do MFC no estado de tensões residuais da superfície da amostra.

As tensões residuais medidas com o DRX são bastante superficiais, em torno de $5\mu\text{m}$ ($0,005\text{mm}$) abaixo da superfície. Ao tempo em que, através do MFC é possível determinar os perfis de tensões residuais desde $0,12\text{ mm}$ até $0,8\text{ mm}$ de profundidade em relação a superfície da amostra.

3.2.2.2 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM

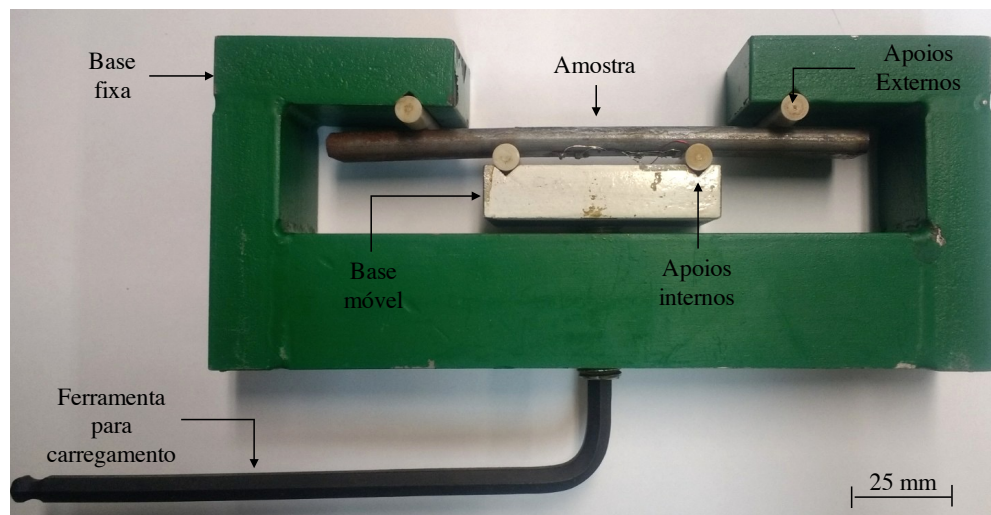
Para análise de tensão de montagem foi utilizado como auxílio um dispositivo de solicitação de flexão em quatro pontos, o que possibilitou promover condições de carregamento conhecidas na amostra. A solicitação de flexão em quatro pontos permite a geração de um estado de tensão homogêneo em toda a região central da amostra compreendida entre os dois pinos de apoio centrais, conforme diagrama de esforço cortante e de momento fletor apresentado na Figura 17. O dispositivo consiste em uma base superior fixa, onde são inseridos os apoios externos, e uma base inferior móvel, com apoios interno. A aplicação do carregamento é dada pelo aperto no parafuso da base inferior, conforme ilustra Figura 18.

Figura 17 – Diagrama de esforços cortantes (Q) e momento fletor (M) para o caso de uma viga submetida a solicitação de flexão a quatro pontos



Fonte: O autor.

Figura 18 – Dispositivo para aplicação de solicitação de flexão em quatro pontos.



Fonte: O autor.

O monitoramento das deformações derivadas dos carregamentos aplicados no dispositivo de flexão em quatro pontos foi realizado com uso de extensômetros de resistência elétrica. A tensão de montagem é obtida através do monitoramento das deformações que ocorrem no arame durante a desmontagem do dispositivo, isto por que ao analisarmos uma amostra de escala real o único acesso que se tem aos arames da armadura de tração é durante a sua dissecação, ou desmontagem.

Desta forma, após aplicação do carregamento desejado na amostra no dispositivo, foi realizado o zeramento do ERE. Posterior, enquanto era efetuado o monitoramento das deformações da amostra, foi retirado o carregamento do dispositivo. Os valores de deformação obtidos são então referentes a desmontagem. Como o objetivo é identificar a tensão de montagem, o oposto do obtido, multiplicou-se estes valores por -1.

A tensão de montagem obtida pelo monitoramento de deformações com ERE refere-se às deformações que ocorrem na superfície do material. Com base na Lei de Hook, um corpo sólido cujo o carregamento aplicado encontra-se dentro de seu regime linear elástico apresenta uma relação linear entre a tensão aplicada na superfície até a sua linha neutra. (HIBBLER, 2004). Desta forma foi possível construir a curva de tensão de montagem teórica ao longo da profundidade.

3.2.2.2 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA

Para validação da análise de tensão efetiva o MFC foi aplicado no arame enquanto este estava montado sob o dispositivo de flexão em quatro pontos, com carregamento conhecido. O posicionamento do disposto sob a bancada de realização do MFC pode ser visto na Figura 19.

Para validação dos resultados de tensão efetiva obtidos de forma experimental, foi realizado o comparativo de seu resultado com a curva de tensão efetiva teórica, construída a partir do somatório da tensão residual medida e a tensão de montagem teórica ao longo da profundidade.

Conforme citado no referencial bibliográfico, uma das limitações referentes ao uso do modelo matemático de Kockelmann utilizado neste trabalho no MFC para determinar as tensões residuais e efetiva, é com relação ao nível de tensão da amostra, sendo associado a erros de medição níveis de tensão superiores a 70% do limite da tensão de escoamento do

material. (SCHWARZ E KOCKELMANN, 1993). Por este motivo, nesta etapa da metodologia foram aplicados dois níveis distintos de tensão de montagem.

Figura 19 – Montagem do dispositivo de flexão em quatro pontos abaixo da bancada do MFC para determinar tensão efetiva.



Fonte: O autor.

3.2.3 APLICAÇÃO PRÁTICA

Após a validação da metodologia proposta, os métodos selecionados foram aplicados para determinar as tensões atuantes em amostras de escala real. Com a finalidade de permitir uma análise comparativa, os ensaios foram conduzidos em quatro amostras distintas. Os procedimentos foram divididos em três etapas, uma para cada tipo de tensão determinado, conforme descrito a seguir.

ETAPA 1 – ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA

Nesta etapa foi determinado o estado de tensão efetivo ao qual os arames da armadura de tração estavam submetidos. Para tanto, foram realizadas medições *in loco* através do MFC diretamente nos arames montados no duto flexível. Este método permitiu a determinação dos perfis de tensões ao longo da profundidade desde 0,12 mm até 0,8 mm da superfície, além

disso, foi possível a determinação do ângulo da direção da tensão máxima principal. Um maior detalhamento sobre esta metodologia de ensaio é apresentado no subitem 4.1.3.1.

ETAPA 2 – ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM

A tensão de montagem é a tensão aplicada aos arames durante o processo de montagem das armaduras sob o duto e foi obtida através do monitoramento de deformações durante o procedimento de liberação dos arames (seccionamento do duto flexível e remoção da capa externa). Maiores detalhes sobre esta metodologia de ensaio são apresentados no subitem 4.1.3.2.

ETAPA 3 – ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS

A análise das tensões residuais presentes nos arames só pode ser realizada quando estes estiverem livres dos carregamentos externos oriundos do processo de montagem da armadura de tração. Portanto, esta etapa foi conduzida após a liberação dos arames. As medições foram realizadas nos arames da armadura de tração interna e externa através do MFC e do método de DRX. Através do MFC foi possível determinar os perfis de tensões desde 0,12 mm até 0,8mm, já com o método DRX foi possível determinar as tensões residuais na superfície dos arames. Mais detalhes no subitem 4.1.3.3.

3.2.3.1 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA

A análise da tensão efetiva atuante nas armaduras de tração foi realizada utilizando o MFC. Na Figura 20 é apresentado o equipamento montado na amostra para a realização do ensaio com detalhe da janela de acesso aos arames da armadura interna. O procedimento para avaliação do estado de tensões foi realizado *in loco* em etapas conforme descrito a seguir.

Etapa 1 – Abertura de uma janela com aproximadamente 150 mm de largura na capa externa da amostra de modo a permitir acesso à armadura de tração externa.

Etapa 2 – Instrumentação dos arames com rosetas extensométricas para o MFC. A limpeza da superfície foi realizada com produtos específicos para esta finalidade a fim de eliminar resíduos sólidos e químicos. Para garantir a perfeita adesão do sensor na superfície do arame a mesma teve sua rugosidade ajustada através de lixamento da superfície. Para que a interferência do processo de lixamento nas tensões residuais fosse a menor possível, o lixamento foi realizado de forma manual e com utilização de lixas de granulometria #320 e

#400. A adesão do sensor foi realizada com cola do tipo cianocrilato com processo de cura a frio.

Figura 20 - Ensaio com o MFC para a determinação da tensão efetiva. (a) Visão geral do equipamento montado na amostra e (b) detalhe da janela aberta para acesso à armadura interna.



(a)

(b)

Fonte: O autor.

Etapa 3 – Execução dos ensaios na armadura externa. Realizada de acordo com o procedimento estabelecido na norma ASTM E-837 (Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method).

Etapa 4 – Corte de arames da armadura externa para acesso à armadura interna. As posições circunferenciais dos pontos de medição na armadura interna foram defasadas 45° em relação aos pontos de medição da armadura externa. Para cada janela de acesso a armadura interna foram removidos dois arames da armadura externa. A remoção destes arames promove uma liberação parcial das tensões nos demais arames da armadura externa influenciando nos resultados da etapa seguinte, que é a determinação da tensão de montagem. Portanto, durante o processo de corte dos arames para acesso à armadura interna foi realizado o monitoramento das deformações nos arames da armadura externa utilizando o mesmo procedimento descrito nas Etapas 1, 2 e 3 do subitem 4.2.3.

Na Figura 21 é possível observar os cortes realizados em um dos lados de dois arames para abertura de uma janela na armadura externa e a instrumentação para o monitoramento do alívio parcial das tensões de montagem causadas pelo corte destes arames.

Figura 21 - Abertura da janela para acesso à armadura interna.



Fonte: O autor.

Etapa 5 – Instrumentação dos pontos na armadura interna do mesmo modo descrito na Etapa 2.

Etapa 6 – Execução dos ensaios na armadura interna do mesmo modo como descrito na Etapa 3.

Etapa 7 – Tratamento matemático dos dados de ensaio.

3.2.3.2 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM

A análise da tensão de montagem nos arames foi efetuada a partir do monitoramento das deformações aliviadas durante o processo de desmontagem da armadura de tração para liberação dos arames. Para total liberação dos arames a amostra foi seccionada e posteriormente teve removida a capa externa.

As etapas para determinação da tensão de montagem são descritas a seguir.

Etapa 1 – Instrumentação dos arames da armadura externa e interna correspondentes às posições circunferenciais predefinidas, ver Tabela 1. A instrumentação é realizada com sensores de deformação do tipo extensômetros de resistência elétrica numa configuração de roseta triaxial retangular (0° , 45° e 90°) e são instalados conforme procedimento operacional para instrumentação de superfícies metálicas já citados.

Etapa 2 – Ligação dos sensores no sistema de aquisição de dados. Para leitura e registro dos sinais de deformação foi utilizado um sistema de aquisição de dados modelo

MGC Plus da HBM. Na Figura 22 é possível observar o sistema de aquisição de dados, bem como a amostra instrumentada e a serra fita utilizada para o seccionamento da amostra.

Figura 20 - Ensaio de monitoramento do alívio de tensão.



Fonte: O autor.

Etapa 3 – Início do monitoramento com os arames montados. Os valores de deformação são zerados antes do início do procedimento de corte para liberação dos arames.

Etapa 4 – Seccionamento dos arames. Nesta etapa são realizados cortes na seção transversal do duto em posição adjacente aos pontos de monitoramento (aproximadamente 500 mm a direita e 500 mm a esquerda), conforme mostrado na Figura 23.

Figura 21 - Seccionamento da amostra com monitoramento de deformação da armadura externa e interna.



Fonte: O autor.

Etapa 5 – Soldagem da armadura de pressão para evitar o desprendimento desta camada durante o procedimento de remoção da capa externa, Figura 24.

Figura 22 – Soldagem da camada Zeta.



Fonte: O autor.

Etapa 6 – Nesta etapa foi realizada a remoção da capa externa através do corte longitudinal da capa, conforme mostrado na Figura 25. Na Figura 26 é apresentada uma amostra após a remoção da capa externa de um dos lados da amostra.

Figura 23 – Corte para remoção da capa externa.



Fonte: O autor.

Figura 24 – Amostra após a remoção de um dos lados da capa externa.



Fonte: O autor.

Etapa 7 – Análise das tensões de montagem. A partir dos valores finais de deformação (correspondentes ao momento em que os arames estão completamente soltos) é determinado o estado de tensão para cada ponto de medição a partir da determinação dos valores das tensões principais, máxima e mínima, e da direção da tensão máxima principal.

As deformações medidas são resultantes da liberação da tensão de montagem, partindo-se de um estágio em que o componente está submetido a carregamentos externos (neste momento os valores de deformação são iguais a zero para todos os sensores) e chegando ao estágio final onde os arames estão completamente livres de qualquer carregamento externo. Portanto, as deformações medidas são as deformações aliviadas, as quais são de mesma magnitude das deformações aplicadas durante a montagem, porém, de sinal contrário, conforme verificado na validação da metodologia nos ensaios de escala reduzida. Como o objetivo é determinar as tensões que foram aplicadas na montagem, os valores de deformação medidos são multiplicados por -1 antes do procedimento de cálculo das tensões e do ângulo.

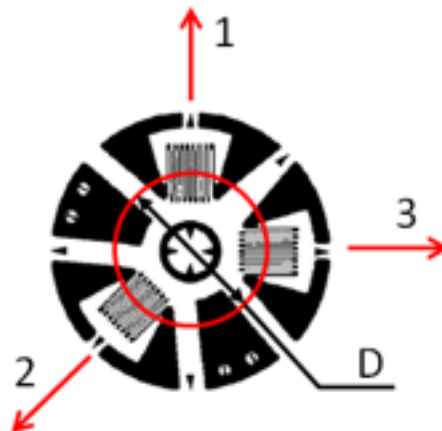
3.2.3.3 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS

Para medição das tensões residuais os arames devem estar completamente livres de qualquer solicitação externa, portanto, as medições foram realizadas após a retirada dos arames do duto flexível. Dois métodos de medição foram empregados, o MFC e DRX. Os ensaios de análise de tensão residual foram conduzidos nos mesmos arames aos quais foram aplicados os ensaios de tensão efetiva.

3.2.3.4. INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ROSETA NO MFC

Uma roseta extensométrica utilizada para aplicação do MFC consiste em um arranjo de três extensômetros de resistência elétrica posicionados em três direções bem definidas e com o centro da grade dos extensômetros equidistantes do centro da roseta, como pode ser visto na Figura 27.

Figura 25 – Roseta extensométrica especial para medição de tensões pelo MFC.



Fonte: O autor.

Uma característica bastante importante deste tipo de roseta é o diâmetro correspondente ao círculo tangenciado pelo centro da grade de cada extensômetro (D). A partir do valor de “D” é definido o diâmetro do furo a ser usinado e, conseqüentemente, a profundidade máxima para a qual é possível determinar os valores de tensão e ainda as dimensões mínimas da amostra a ser medida.

Os tamanhos de roseta disponíveis comercialmente e que podem ser utilizados atendendo as limitações dimensionais dos arames da armadura de tração possuem valor de D igual a 2,56 mm e 5,12 mm. O uso da roseta de tamanho menor limita a obtenção de resultado

de perfil de tensão residual até 0,4mm. No caso da roseta maior (5,12mm) o perfil é obtido até a profundidade de 0,8mm.

Um dos requisitos dimensionais é de que o centro do furo esteja no mínimo a uma distância de 1,5D de qualquer borda da amostra, de acordo com a norma ASTM E837-13 (2013). Para a roseta maior esta distância mínima é de 7,68 mm, ligeiramente maior do que a distância do centro do arame, onde é realizado o furo, até a sua borda, que é próxima da 6 mm. Por este motivo, toda as primeiras amostras foram ensaiadas utilizando-se as rosetas de diâmetro menor. No decorrer das análises, quando foram obtidos os primeiros resultados de tensões residuais superficiais por DRX verificou-se uma diferença relativamente grande entre os valores medidos com o MFC. Esta situação motivou um estudo específico sobre a influência do tamanho da roseta nos resultados obtidos.

3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Nesta etapa do trabalho serão descritos todos os métodos e procedimentos de ensaio aplicados nas amostras de escala reduzida e escala real.

3.3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA EM ESCALA REDUZIDA

3.3.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

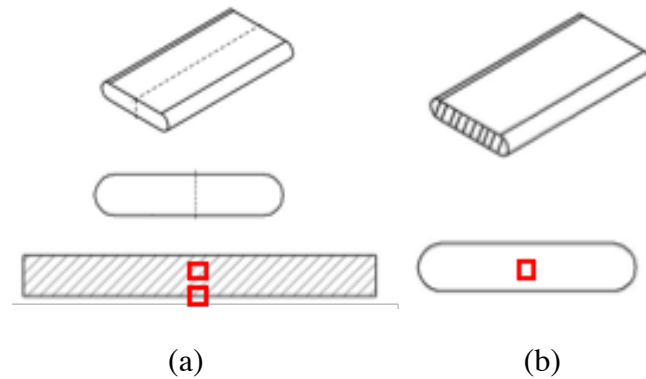
Para análise de composição química um segmento da amostra foi preparado mediante lixamento para planificação e remoção de possíveis contaminantes e em seguida foram analisadas através de espectrometria de emissão ótica, utilizando-se de um espectrômetro marca Spectro, modelo Spectrolab.

3.3.1.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A análise microestrutural do componente foi realizada nas seções longitudinal em duas regiões, na borda e no núcleo, e transversal, como mostrado na Figura 28. A amostra foi preparada para observação mediante embutimento em resina termofixa, lixamento e polimento seguindo-se o prescrito nas normas ASTM E3-95 e ASTM E 340-95. Para revelar a microestrutura foi realizado o ataque com reagente de Nital 2% por 15 segundos e então analisada através de microscopia ótica (MO), utilizando-se um microscópio marca Olympus,

modelo BX 51 M com as micrografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio.

Figura 26 – Regiões de análise de MO: (a) longitudinal e (b) transversal

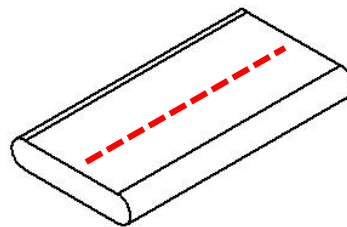


Fonte: O autor.

3.3.1.3 ENSAIO DE DUREZA HV_{10}

Foi realizado um perfil de dureza na superfície do arame conforme mostrado na Figura 29. Para realização deste ensaio foi utilizado um microdurômetro automático Instron modelo Tuckon, na escala Vickers (HV) com carga de 10 Kgf e espaçamento de 10 mm entre as indentações.

Figura 27 - Região do perfil de dureza.



Fonte: O autor.

3.3.1.4 ENSAIO DE DUREZA $HK_{0,2}$

Foram realizados ensaios de microdureza Knoop no núcleo e na superfície da seção longitudinal do arame. Para realização deste ensaio foi utilizado um microdurômetro automático Instron modelo Tuckon, na escala Knoop (HK) com carga de 200 grf.

3.3.1.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina eletromecânica marca Instron modelo 5585H. A taxa de deslocamento da máquina foi de 0,375 mm/min e a base de medida (Lo) para determinação do alongamento foi de 25 mm.

3.3.2 MONITORAMENTO COM EXTENSOMETOS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Neste trabalho foram utilizadas diferentes configurações de extensômetros de resistência elétrica. O procedimento de instrumentação dos sensores é o mesmo para todos os casos, consiste na limpeza da superfície da amostra com produtos específicos para esta finalidade a fim de eliminar resíduos sólidos e químicos e o ajuste da rugosidade da superfície através do uso de diversas lixas para perfeita adesão do sensor. A adesão do sensor é realizada com cola do tipo cianocrilato com processo de cura a frio.

Através do monitoramento das deformações com ERE foi possível obter as tensões de montagem tanto nos ensaios escala real quanto em escala reduzida. Em ambos os casos, o ERE utilizado foi uma roseta retangular sobreposta, modelo KFGS-5-120-D17-11, da fabricante Kiowa, com resistência de 120Ω e comprimento ativo do sensor de 5mm

O cabeamento dos sensores foi realizado conectando cada ERE em um circuito do tipo ponte de Wheatstone em ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte com quatro fios. Para aquisição dos dados foi utilizado o equipamento MGC Plus da empresa HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik. O software utilizado para aquisição de dados foi o Catman 4.0 fornecido pelo fabricante do equipamento.

3.3.3 METODO DO FURO CEGO (MFC)

O procedimento de ensaio do MFC é realizado de acordo com o prescrito pela norma ASTM E-837 (Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method). Para aplicação do método inicialmente foram utilizados dois tipos de rosetas com diferentes diâmetros interno, de 2,56 mm e 5,12 mm. Os modelos utilizados são da fabricante Vishay-Micro-Measuraments, código EA-06-031RE-120 e EA-06-062RE-120/SE, respectivamente.

O ensaio do MFC é efetuado com o uso do equipamento modelo RS-200 da empresa

Vishay Micro-Measurements, o qual é composto essencialmente, por uma caneta de usinagem, um tambor micrométrico, uma luneta graduada e um tripé, entre outros componentes.

O equipamento de aquisição de dados Spider 8 da empresa Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). A ferramenta utilizada para usinagem do furo é uma broca de carboneto de tungstênio, modelo cônica invertida N° 38. Na Figura 30 é possível visualizar a realização do ensaio em uma amostra de escala reduzida para determinação de tensão residual.

Figura 30 – Ensaio do MFC para determinar tensão residual.



Fonte: O autor.

Após realizar o procedimento de instrumentação do sensor é efetuado o posicionamento do tripé sob a amostra e efetuada a centragem da caneta de usinagem com auxílio da luneta. O ensaio consiste na usinagem do furo pela caneta em diferentes incrementos de profundidade, cujo o avanço é controlado pelo relógio micrométrico.

Os resultados obtidos durante o ensaio são perfis de deformação ao longo da profundidade de 0,12 mm até 0,8 mm para as três direções da roseta extensométrica (0° , 45° e 90°). A partir destes dados, mais o valor do diâmetro do furo usinado e das propriedades elásticas do material, é determinado o estado de tensões ao longo da profundidade.

O tratamento matemático é realizado através do método de Kockelmannn (1993), o

qual é indicado tanto para casos de distribuição de tensões residuais homogêneas como não homogêneas ao longo da profundidade.

No desenvolvimento deste trabalho o MFC foi aplicado em diferentes situações, para análise de tensão efetiva e tensões residuais nos ensaios de escala reduzida e escala real.

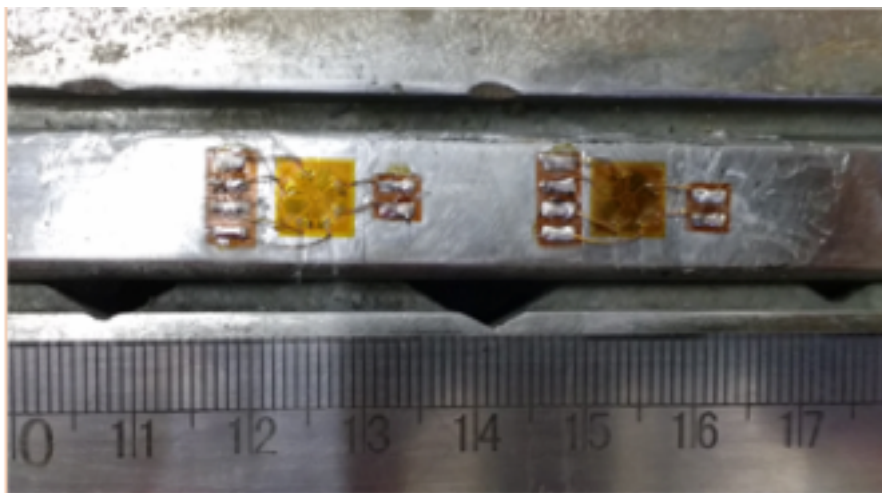
TENSÃO RESIDUAL – ESCALA REDUZIDA

Na análise de tensão residual em escala reduzida, o MFC foi aplicado nas três amostras distintas com os arames soltos, livres de solicitações externas. Em cada amostra foi analisado um ponto de medição da tensão residual no centro da amostra.

TENSÃO RESIDUAL – ESCALA REAL

Os ensaios tensão residual de escala real foram conduzidos com os arames soltos, livres de solicitações externas. Neste caso, os ensaios foram realizados nos mesmos arames que já haviam sido analisados pela tensão efetiva ao longo da circunferência dos dutos. O ponto de medição foi efetuado uma distância de 30 mm dos furos pré-existentes do ensaio anterior para tensão efetiva, conforme ilustra Figura 31. Estas distâncias foram selecionadas para garantir que não haveria interação entre os furos já usinados.

Figura 28 - Arame solto. Distância entre pontos de medição das tensões residuais e efetiva igual a 30mm.



Fonte: O autor.

TENSÃO EFETIVA – ESCALA REDUZIDA

Na validação da análise da tensão efetiva em escala reduzida o MFC foi realizado na amostra montada sob o dispositivo de flexão em quatro pontos. Os ensaios foram conduzidos em três amostras. Nesta etapa, foram aplicados dois diferentes carregamentos. Para Amostra 1 e Amostra 3 os carregamentos aplicados foram de 150 MPa e 350MPa, respectivamente. Na Amostra 2 os dois valores de carregamentos, 150 MPa e 350MPa, foram aplicados. Para evitar a interação entre os furos cada ponto de medição esteve distante 12 mm entre si.

TENSÃO EFETIVA – ESCALA REAL

Para análise de tensão efetiva em escala real, o ensaio do MFC foi conduzido em cada arame selecionado conforme sua posição circunferencial no duto, sendo realizado no centro da janela aberta para acesso aos arames, ilustrado na Figura 18.

3.3.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

O método de DRX foi aplicado para medição de tensões residuais de forma equivalente nas amostras de escala reduzida e escala real. As tensões residuais medidas com este método são bastante superficiais, em torno de $5\mu\text{m}$ ($0,005\text{mm}$) abaixo da superfície. As medições foram conduzidas em um difratômetro de raios-X da empresa GE, modelo Seifert Charon XRD M – *Research Edition*, apresentado na Figura 32.

Figura 29 - Difratômetro de Raios-X GE - Seifert Charon XRD M.



Fonte: O autor.

O modo de medição empregado é o ômega com cálculo das tensões a partir do método $\text{sen}^2 \psi$. O elemento do tubo de raios-X utilizados é o cromo com colimador de 2mm. O tempo de ensaio para cada direção, 0° , 45° e 90° , foi de 15 minutos. As constantes elásticas utilizadas são módulo de Young 220 GPa e coeficiente de poisson 0,28.

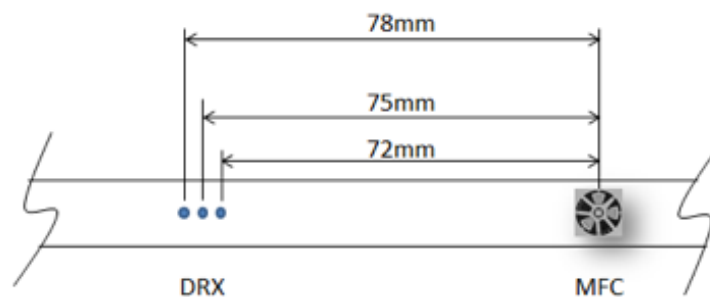
TENSÃO RESIDUAL – ESCALA REDUZIDA

Este foi o primeiro ensaio conduzido nas amostras de escala reduzida. As medições foram conduzidas em três pontos no centro das amostras distantes entre si de 12mm. As tensões em cada ponto foram medidas em 3 direções bem definidas (0° , 45° e 90°), possibilitando desta forma determinar o estado de tensões residuais da amostra. Para efeitos comparativos as medições com o DRX foram conduzidas nos mesmos pontos onde posteriormente foram conduzidos os ensaios do MFC.

TENSÃO RESIDUAL – ESCALA REAL

Na análise de tensão das amostras em escala real as medições foram conduzidas em todos os arames onde antes foi determinada a tensão efetiva. Para cada amostra foram realizadas medições em três pontos distantes 3 mm entre si e distantes de 75 mm do ponto onde foram conduzidas as medições com o MFC, conforme mostra a Figura 33.

Figura 30 - Representação esquemática das distâncias entre os pontos de medição de tensões residuais por DRX.



Fonte: O autor.

Nos arames 45° e 315° da Amostra 3 também foram realizadas medições de tensão residual com DRX por remoção de camadas através de polimento eletrolítico utilizando uma solução de H_2SO_4 , H_3PO_4 e H_2O . A amostra foi previamente protegida por material polimérico exceto pela área de interesse na remoção de material. Uma fonte elétrica é utilizada para aplicar uma tensão constante de 5 V. A amostra, imersa na solução é o ânodo

e uma placa de chumbo é utilizada como cátodo. O controle de material removido foi feito por meio de medição de espessura com um relógio comparador.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados foram divididos em três tópicos principais, sendo eles: caracterização da amostra em escala reduzida; validação da metodologia em amostras de escala reduzida; e aplicação prática da metodologia de análise de tensões.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE ESCALA REDUZIDA

4.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 2, sendo os valores apresentados a média de três análises efetuadas. Identificou-se o aço com composição química similar ao aço carbono SAE 1070. (ASTM A830/A830M, 2018).

Tabela 2 – Comparativo de resultado da análise química x referência.

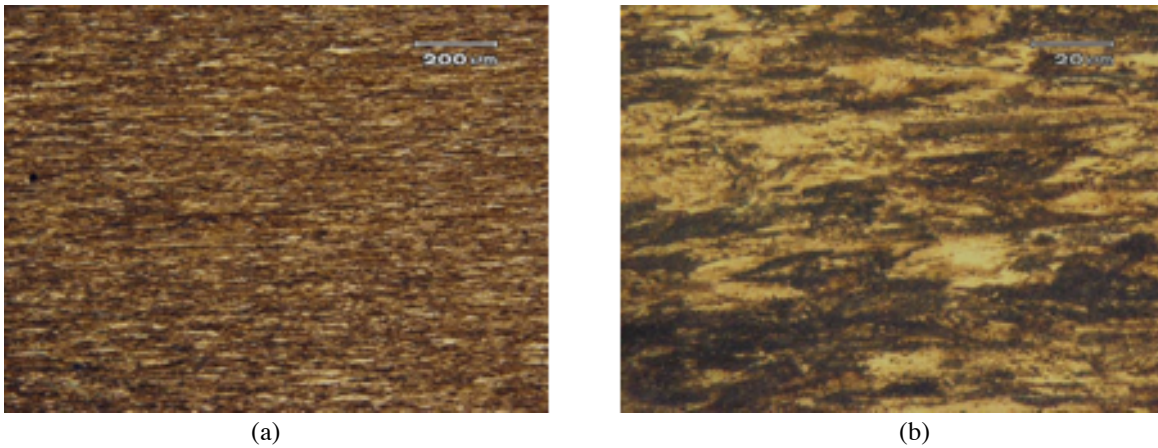
	Elemento [% em massa]			
	C	Mn	P	S
Resultado análise química	0,658	0,73	0,022	0,001
SAE 1070 (A830/A830M)	0,65 - 0,75	0,60 - 0,90	0,03 máx	0,03 máx

Fonte: O autor.

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

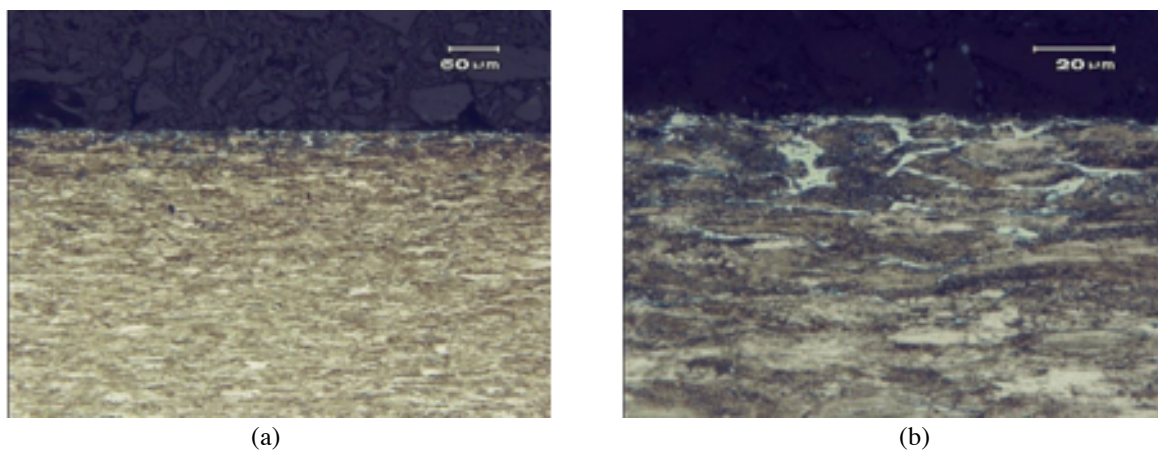
O núcleo e borda da amostra na seção longitudinal apresentaram microestrutura composta por ferrita e perlita alongada no sentido de laminação, como pode ser visto nas Figuras 34 e 35. O núcleo da amostra na seção transversal apresentou microestrutura composta por ferrita e perlita, Figura 36.

Figura 31 - Micrografia em MO no núcleo da amostra, seção longitudinal, mostrando microestrutura composta de ferrita e perlita deformada no sentido de laminação. Ataque: Nital 2%. Aumento: (a) 100 vezes e (b) 1000 vezes.



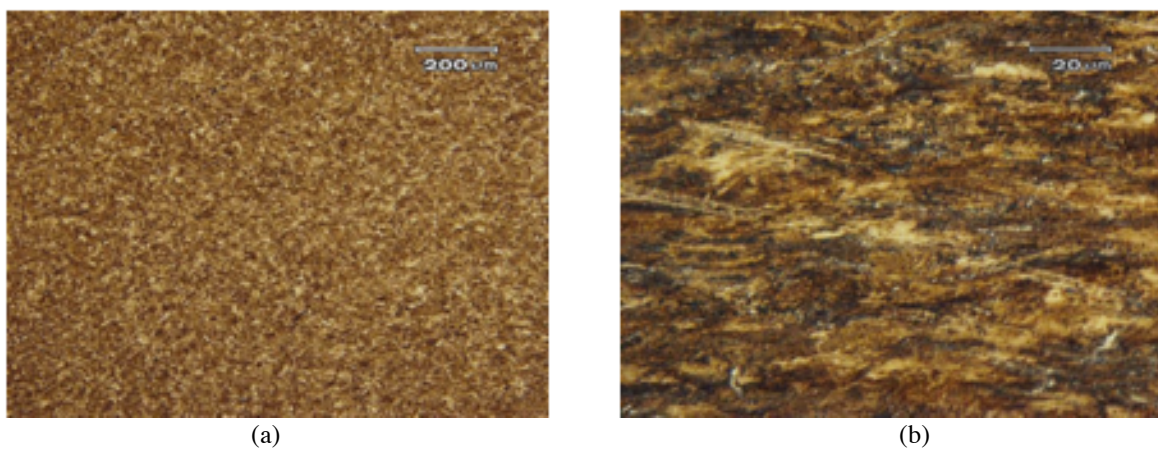
Fonte: O autor.

Figura 32 - Micrografia em MO na borda da amostra, seção longitudinal, mostrando microestrutura composta de ferrita e perlita. Ataque: Nital 2%. Aumento: (a) 200 vezes e (b) 600 vezes.



Fonte: O autor.

Figura 33 - Micrografia em MO no núcleo da amostra, seção transversal, mostrando microestrutura composta de ferrita e perlita. Ataque: Nital 2%. Aumento: (a) 100 vezes e (b) 1000 vezes.



Fonte: O autor.

Na Figura 35 é possível identificar uma região mais clara próxima a superfície, com menor concentração de carbono. Esta menor concentração de carbono na superfície ocorre possivelmente devido mecanismo de descarbonetação, comum de ser identificado em aços com alto teor de carbono submetidos a processos de tratamento térmico. (STORY E WEBLER, 2017).

4.1.3 ENSAIO DE DUREZA HV₁₀

O resultado do ensaio de dureza HV₁₀ é apresentado na Tabela 3. Não foi identificada grande variação da dureza na superfície da amostra, sendo a dureza média encontrada 374 HV₁₀.

Tabela 3 - Resultado do perfil de dureza HV₁₀

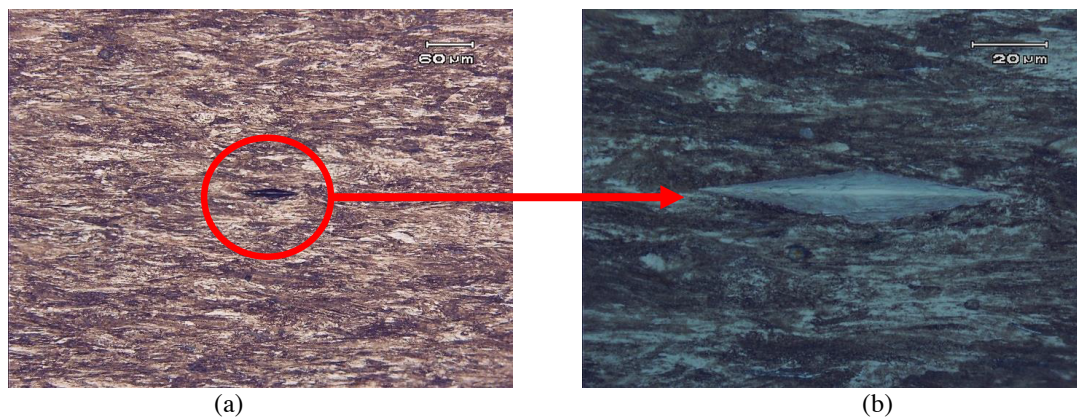
Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Dureza HV ₁₀	382	377	373	379	383	374	371	360	372	371	374

Fonte: O autor.

4.1.4 ENSAIO DE DUREZA HK_{0,2}

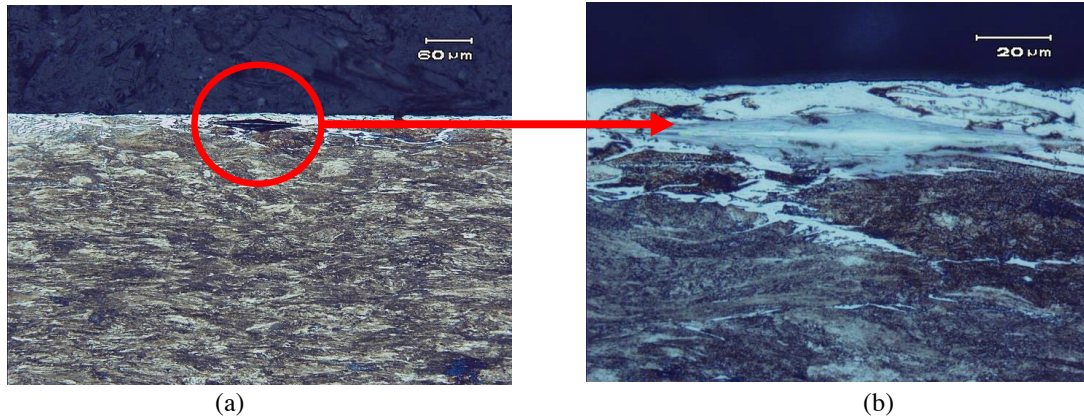
Foram efetuadas duas medidas de microdureza, no núcleo da secção longitudinal, Figura 37, e na borda próxima a superfície, Figura 38. O núcleo apresentou dureza média de 474 HK_{0,2} e a superfície, na fase mais clara, indicada na Figura 38 (b), apresentou dureza média de 220 HK_{0,2}.

Figura 34 - Resultado da microdureza KNOOP no núcleo da seção longitudinal da amostra. Aumento: (a) 200 vezes e (b) 600 vezes.



Fonte: O autor.

Figura 35 - Resultado da microdureza KNOOP na borda da seção longitudinal da amostra. Aumento: (a) 200 vezes e (b) 600 vezes.



Fonte: O autor.

Pela menor dureza e pelo aspecto microestrutural, pode se afirmar que a região próxima de 20 μ m na borda do arame na seção longitudinal é composta de ferrita.

4.1.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados obtidos no ensaio de tração são apresentados na Tabela 4. Foram realizados ensaios em dois segmentos da amostra, sendo apresentados na tabela o valor médio.

Tabela 4 - Resultado média do ensaio de tração do corpo de prova

Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]
1278	1462	3,3

Fonte: O autor.

4.2. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Neste tópico são apresentados os resultados referentes aos ensaios aplicados nas amostras de escala reduzida.

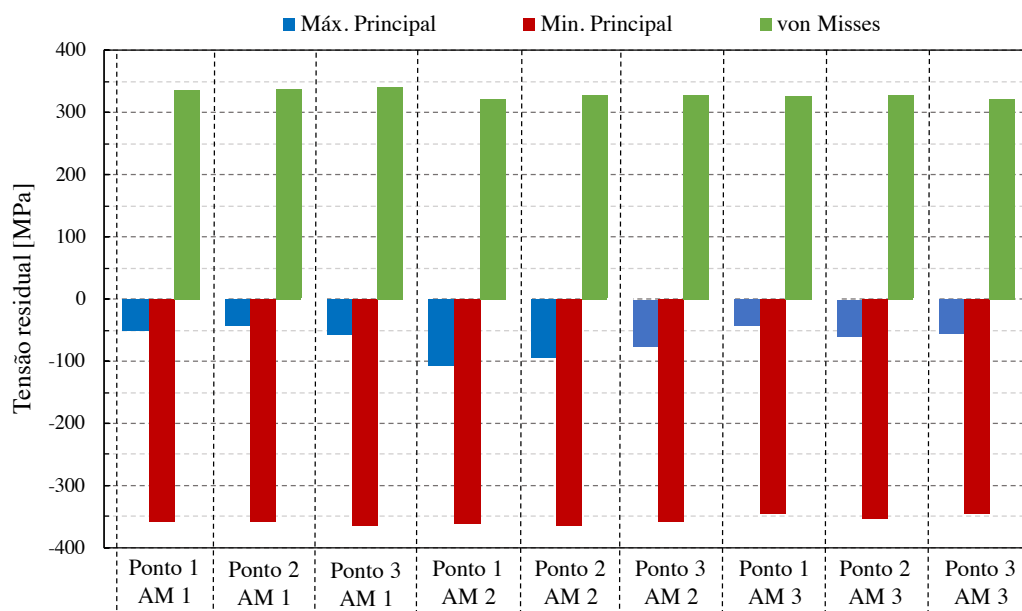
4.2.1 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS

Para aplicação destes métodos os ensaios foram realizados com os arames livres de solicitações externas.

4.2.1.1 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS POR DRX

O primeiro ensaio realizado nas amostras foi a análise de tensão residual pelo DRX. Foram efetuadas medições nas três direções (0° , 45° , 90°) em três pontos situados no centro de cada uma das três amostras, distantes 12 mm entre si. Os resultados do estado de tensões obtidos em cada ponto de medição são apresentados na Figura 39. Os valores referentes a orientação das tensões residuais são apresentados na Tabela 5.

Figura 36 – Tensão residual por DRX. Resultado do estado de tensões obtidos ao longo do comprimento das amostras.



Fonte: O autor.

Tabela 5 - Orientação das tensões residuais obtidas por DRX ao longo do comprimento do arame.

Amostra	Angulo de direção principal [Graus]		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
1	0,57	0,12	0,76
2	2,50	0,29	-2,70
3	0,64	1,32	1,26

Fonte: O autor.

Neste caso, as tensões longitudinais são maiores que as tensões na transversal, com isto ângulo de direção principal é orientado em relação a longitudinal da amostra. Foi identificado pouca variação no ângulo de direção principal, com desvio padrão médio 1,40°.

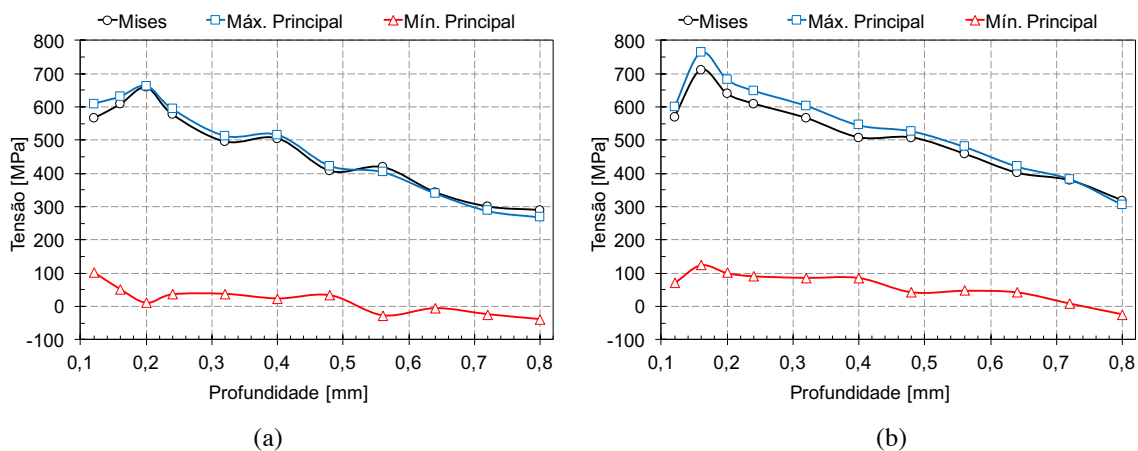
A magnitude das tensões mínimas principais é maior em módulo que as tensões máximas principais, na média geral as tensões máximas principais foram de -66 MPa e as mínimas principais foram -356 MPa.

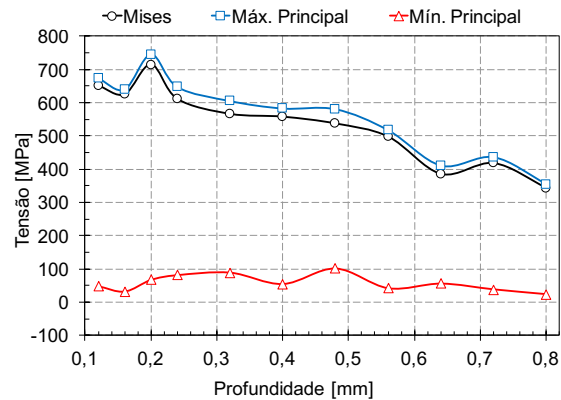
Para os valores de mínima principal os resultados são homogêneos, sendo o desvio encontrado não superior a 7 MPa. Para as tensões máximas principais houve maior variação, sendo desvio padrão de 22 MPa.

4.2.1.2 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUIS PELO MFC

Os resultados obtidos em todas amostras são apresentados nos gráficos da Figura 40.

Figura 37 – Tensão residual por MFC. Resultado compilado das três amostras, sendo (a) Amostra 1, (b) Amostra 2 e (c) Amostra 3.





(c)

Fonte: O autor.

Próximas a superfície (0,12 até 0,2mm) os valores de tensão máxima principal são superiores a 50% da tensão de escoamento do material, na média o valor obtido foi de 653 MPa.

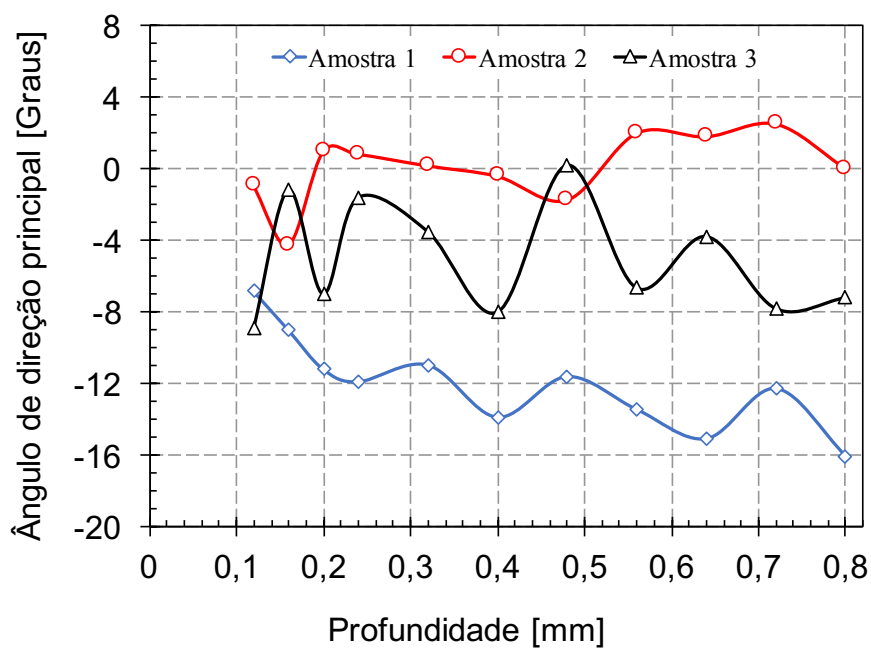
O estado de tensão residual se mostrou linear, porém não homogêneo ao longo da profundidade, com as tensões máximas principais próximas a superfície, na distância de 0,12 mm, muito maiores que as tensões a 0,8 mm de profundidade, com diferença entre si média de 318 MPa.

De um modo geral, a nível de tensões residuais presente nas três amostras é de mesma magnitude, porém, há uma pequena variação entre os perfis encontrados. Quando comparados os valores médios de tensão equivalente de von Misses de cada amostra, foi encontrado um desvio de 25MPa, o que representa 5% do valor médio, dentro do erro da técnica que é de 20 a 30 MPa (SCHWARZ E KOCKELMANN, 1983)

O ângulo de direção principal ao longo da profundidade para as três amostras é apresentado na Figura 44. O ângulo de direção principal neste caso é apresentado com relação da direção 1 da roseta, longitudinal da amostra, para a tensão máxima principal.

A orientação das tensões máximas principais mostraram-se próximas de 0°, longitudinal da amostra, e com pouca variação ao longo da profundidade, no pior dos casos, Amostra 3, o desvio padrão encontrado foi de 3°.

Figura 38 – Ângulo de direção principal. Resultado compilado das três amostras.



Fonte: O autor.

4.2.2 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM

A primeira etapa foi realizar com intuito de diferença entre os valores de tensão aplicados na face superior e inferior da amostra para diferentes condições de carregamento aplicados no dispositivo de flexão em quatro pontos. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Verificação entre valores de tensão na face superior e inferior da amostra.

Carregamento aplicado	Posição da roseta	Tensão [MPa]			Ângulo Principal [Graus]
		Máxima principal	Mínima principal	von Misses	
100 MPa	Superior	101	-1	102	0,29
	Inferior	1	-101	101	88,81
200 MPa	Superior	199	-2	200	-0,37
	Inferior	2	-199	200	88,23
300MPa	Superior	299	-3	301	-0,50
	Inferior	3	-298	299	88,18
400MPa	Superior	398	-5	400	-0,83
	Inferior	5	-398	401	87,87

Fonte: O autor.

Não foi identificado variação entre os valores de tensão equivalente de von Mises nas duas faces do arame. Com relação as tensões máximas e mínimas principais, o resultado encontrado nada duas faces são equivalentes, porém opostos, ou seja, tensões trativas na face superior e compressivas na face inferior.

Dois diferentes níveis de carregamentos foram selecionados 150 MPa e 350 MPa para apresentação dos resultados de tensão de montagem. Os valores de deformação, as tensões máximas e mínimas principais, assim como a tensão equivalente de von Mises e o ângulo da direção principal para as três etapas da determinação da tensão de montagem são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de deformação para carregamento 150 MPa e 350MPa

Carga [MPa]	Etapa	Deformações [$\mu\text{m/m}$]			Tensões [MPa]			Ângulo principal [Graus]
		0°	45°	90°	Máxima principal	Mínima principal	von Mises	
150	Montagem	-762	-300	212	1	-152	153	91,46
	Zeramento	0	0	0	0	0	0	
	Desmontagem	757	302	-204	152	-0	152	1,51
350	Montagem	-1755	-585	465	-2	-352	351	88,46
	Zeramento	0	0	0	0	0	0	
	Desmontagem	1749	592	-449	351	5	349	-1,51

Fonte: O autor.

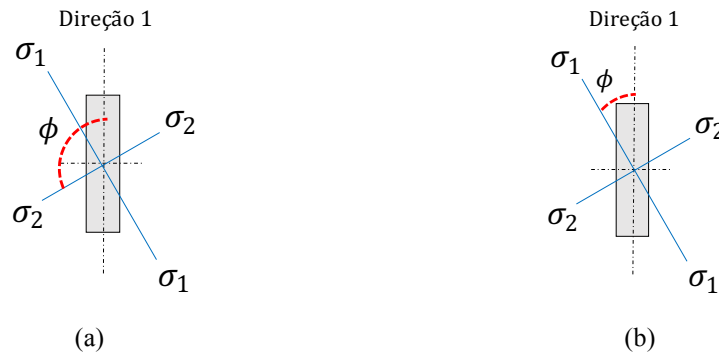
Os resultados da tensão de montagem foram obtidos pelo monitoramento da face inferior da amostra, com a roseta extensométrica posicionada com a direção 1 na longitudinal do arame. Na flexão em quatro pontos a face inferior do arame é solicitada de forma compressiva durante a montagem e trativa na desmontagem.

Os resultados demonstram exatidão no monitoramento das deformações durante as etapas de montagem e desmontagem. Desta forma, ao multiplicarmos o resultado da deformação obtida na desmontagem por -1 é possível determinar o valor da tensão de montagem.

Quando aplicada a montagem da amostra, a deformação ε_1 , 0°, é menor que a deformação ε_3 , 90°, portanto, conforme a TN-515 (2014) o ângulo principal (ϕ), positivo no sentido anti-horário, é calculado com referência da direção 1 da roseta em relação a mínima principal. Na desmontagem, a deformação ε_1 é maior que a deformação ε_3 , então ϕ é

calculado com referência da direção 1 da roseta em relação a máxima principal. A interpretação das direções de tensão máxima principal nesta amostra é apresentada esquematicamente na Figura 42 para (a) tensão de montagem e (b) tensão de desmontagem.

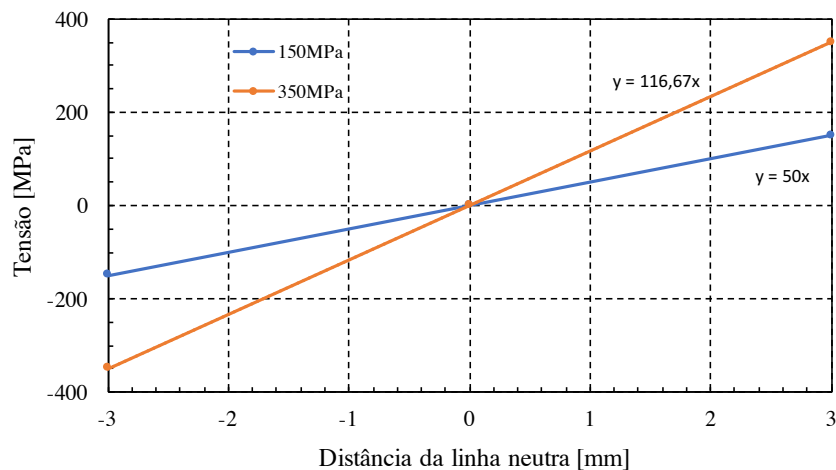
Figura 39 – Representação esquemática do estado de tensões para (a) tensão de montagem e (b) tensão de desmontagem.



Fonte: O autor.

A tensão determinada com uso dos extensômetros de resistência elétrica é calculada a partir das deformações medidas na superfície do material. (HOFFMAN, 1989). Com base na Lei de Hook, um corpo sólido cujo carregamento aplicado encontra-se dentro de seu regime linear elástico apresenta uma relação linear entre a tensão aplicada na superfície até a sua linha neutra. (HIBBLER, 2004). Desta forma, considerando a espessura da amostra de 6mm, é possível determinar a tensão de montagem teórica ao longo da profundidade da amostra. Este resultado é apresentado na Figura 43.

Figura 40 – Tensão de montagem teórica para carregamentos de 150 MPa e 350MPa



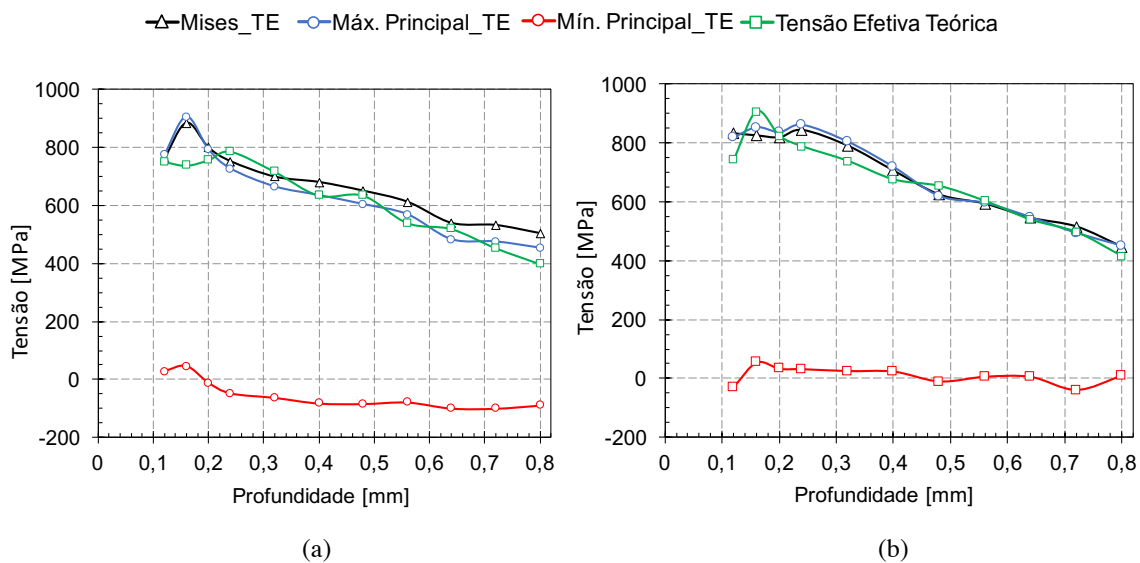
Fonte: O autor.

4.2.3 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA

Para efeitos comparativos nesta etapa do trabalho foi construída a curva de tensão efetiva teórica da amostra. Este valor foi obtido através da soma das tensões máximas principais, referentes as tensões residuais presentes nas amostras, com a tensão de montagem teórica, demonstrada anteriormente. Isto é possível, pois conforme visto no resultado anterior, o ângulo de direção da tensão máxima principal durante montagem da amostra no dispositivo de flexão em 4 pontos é próximo de 0° . Esta orientação é muito próxima da orientação das tensões residuais presente nas amostras (ver Figura 41). Desta forma é possível somar as tensões máximas principais das tensões residuais e tensão de montagem teórica para determinar a tensão efetiva teórica.

Nas Figuras 44 são apresentados os resultados obtidos de tensão efetiva pelo MFC com carregamento aplicado de 150 MPa nas Amostras 1 e 2, respectivamente. Para efeitos comparativos na mesma imagem é apresentada a tensão efetiva teórica referente a cada uma das amostras.

Figura 41 – Tensão efetiva. Resultado para carregamento de 150 MPa para: a) Amostra 1 e b) Amostra 2.

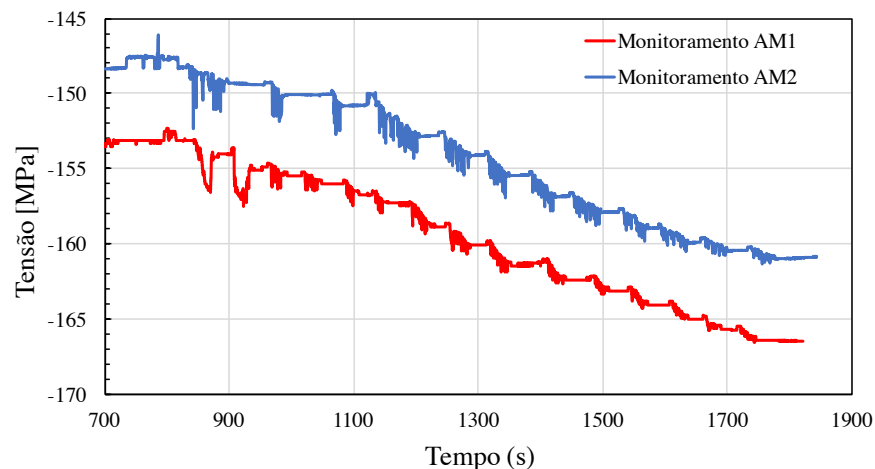


Fonte: O autor.

Levando em consideração a média ao longo da profundidade de 0,12 mm até 0,8 mm para tensão efetiva obtida com o MFC com relação a tensão efetiva teórica a diferença encontrada foi de 4%, demonstrando coerência nos resultados de ambas amostras.

Durante a realização do MFC, para análise da tensão efetiva, a face inferior do arame foi monitorada por uma roseta extensométrica com intuito de verificar variação nos valores de tensão ocasionados pela usinagem de furo. O resultado do monitoramento da tensão mínima principal aplicada durante a execução do furo é apresentado na Figura 45.

Figura 42 – Monitoramento da tensão mínima principal durante execução do MFC nas amostras 1 e 2 para aplicação de carregamento de 150MPa.

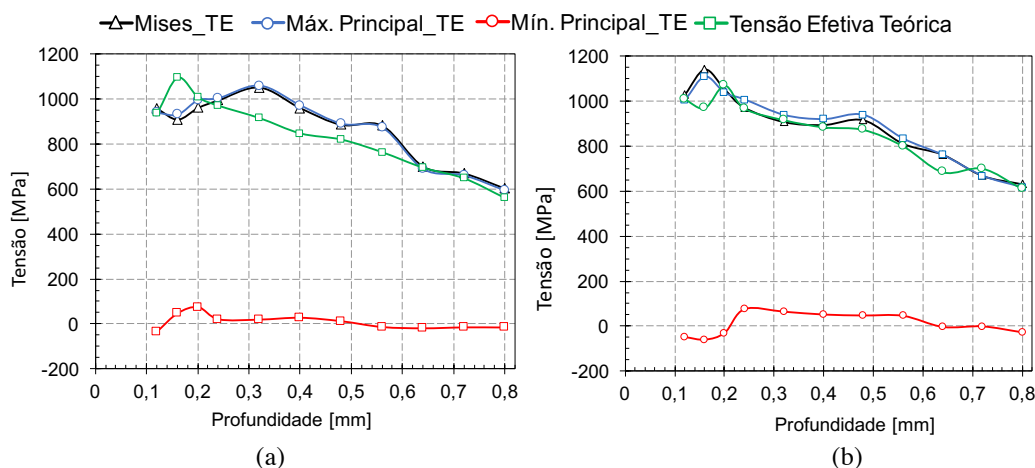


Fonte: O autor.

Os resultados demonstram que há um aumento da tensão no arame na ordem de 10 MPa durante a usinagem do furo. Este aumento na tensão pode estar relacionado com a complexidade da geometria dos arames da armadura de tração, pequena espessura e largura.

A segunda condição de carregamento aplicado, para análise da tensão efetiva, foi de 350MPa. Este valor foi selecionado para que próximo a superfície o valor da tensão efetiva fosse superior a 80% do limite de tensão de escoamento do material. Os ensaios foram conduzidos nas Amostras 2 e 3 e são apresentados na Figuras 46. Para efeitos comparativos também é apresentada a tensão efetiva teórica calculada para cada amostra.

Figura 43 – Tensão efetiva. Resultado para carregamento de 350 MPa para: a) Amostra 2 e b) Amostra 3.



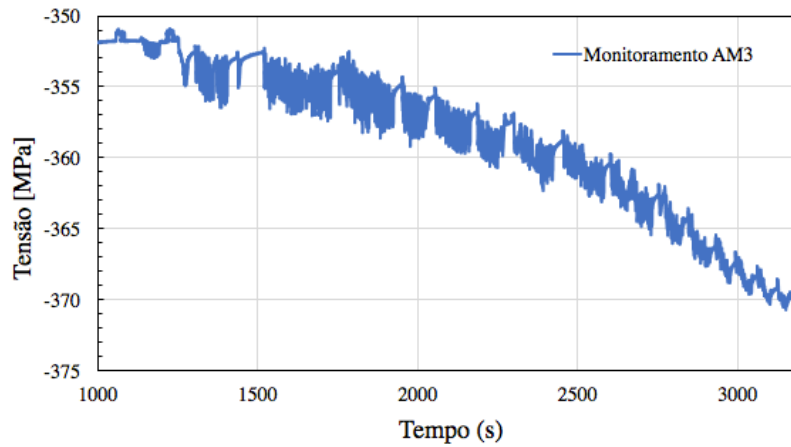
Fonte: O autor.

Na Amostra 3, quando comparado a tensão efetiva teórica e a tensão máxima principal obtida pelo MFC, o desvio médio encontrado foi de 34MPa, o que representa 4% da média da tensão efetiva total. Na Amostra 2 foi encontrada uma maior diferença entre a média dos valores teórico e o experimental, próximo a 54MPa, representando 6% da média total.

Embora tenha sido encontrado um maior desvio nos resultados obtidos de tensão efetiva teórica e experimental para o carregamento de 350MPa, estes se mostraram satisfatórios, uma vez que devemos levar em consideração que o ponto de medição da tensão efetiva não é o mesmo onde foi obtido a tensão residual. Além disto, os resultados anteriores demonstraram haver uma pequena variação do perfil das tensões residuais ao longo do comprimento do arame.

O resultado do monitoramento da face inferior do arame durante a usinagem do furo na Amostra 3 é apresentado na Figura 47. Ocorreu aumento da tensão durante a realização do ensaio, ligeiramente superior ao encontrado para condição de carregamento anterior.

Figura 44 – Monitoramento da tensão mínima principal durante execução do MFC nas amostras 3 para aplicação de carregamento de 350MPa.



Fonte: O autor.

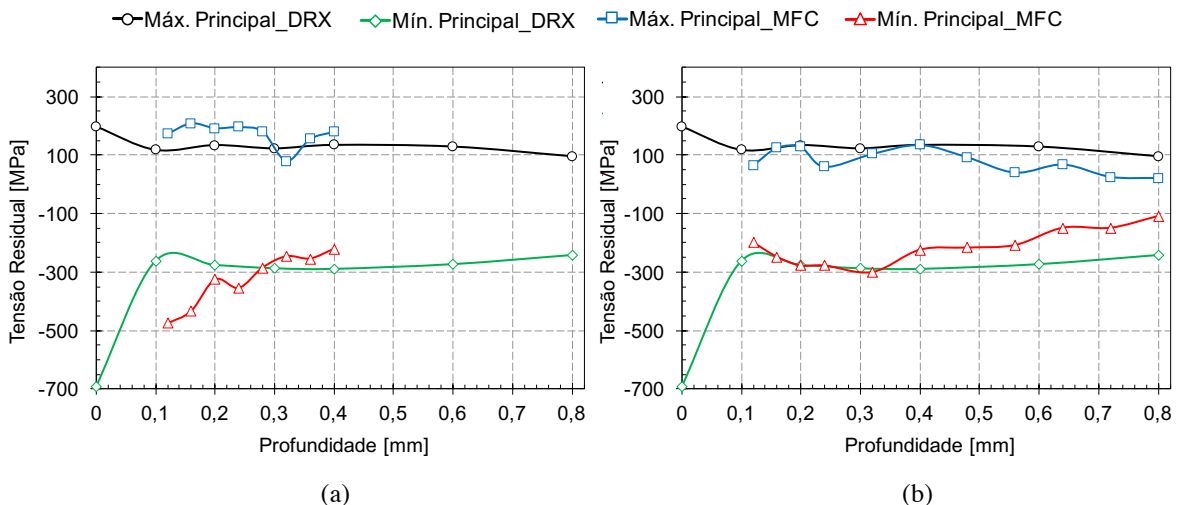
4.3. APLICAÇÃO PRÁTICA

Nesta etapa serão apresentados os resultados referentes a aplicação prática da metodologia proposta de análises de tensão em amostras de escala real distintas.

4.3.1 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA ROSETA NO MFC

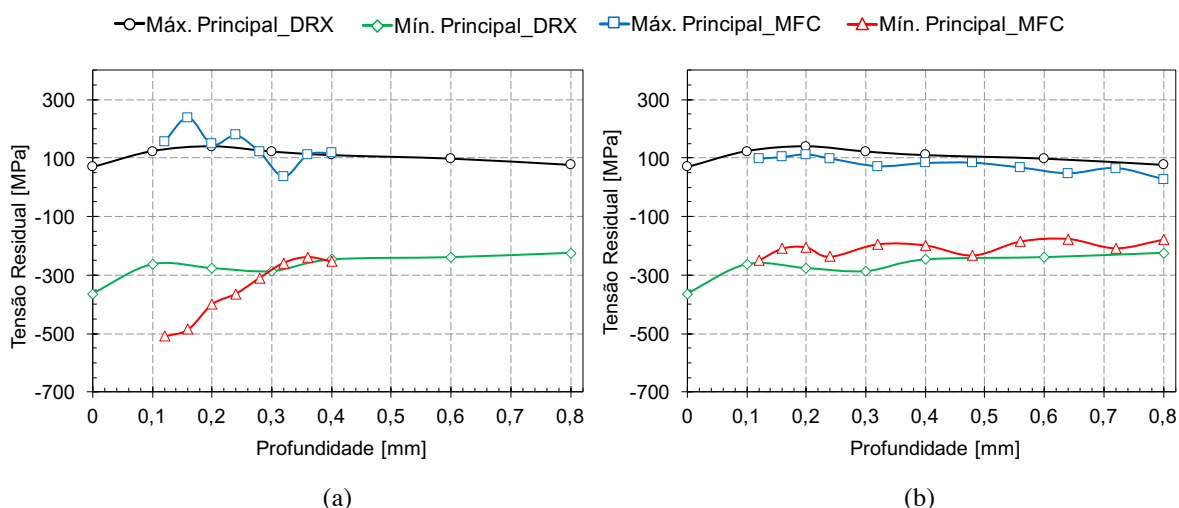
Os ensaios foram conduzidos em dois arames da armadura de tração externa correspondentes a posição 45° e 315° da Amostra 3. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 48 e Figura 49.

Figura 45 - Perfis de tensão obtidos por DRX e pelo MFC para Amostra 3, posição 45° , utilizando: (a) roseta de 2,56 mm de diâmetro e (b) roseta de 5,12 mm de diâmetro.



Fonte: O autor.

Figura 46 – Perfis de tensão obtidos por DRX e pelo MFC para Amostra 3, arame 315°, utilizando: (a) roseta de 2,56 mm de diâmetro e (b) roseta de 5,12 mm de diâmetro.



Fonte: O autor.

Para as rosetas de diâmetro menor as tensões mais próximas a superfície, na profundidade de 0,12 mm, apresentaram maior diferença quando comparados com os resultados obtidos por DRX, superior a 200 MPa para tensão mínima principal no arame 315°, enquanto para roseta maior neste mesmo arame a diferença encontrada nesta profundidade foi 13 MPa.

Para profundidade de 0,4 mm, comparando com o DRX, a roseta menor apresentou diferença para tensão mínima principal, 60 MPa, enquanto para a roseta maior esta diferença foi 50 MPa.

Os perfis de tensão obtidos com a roseta maior apresentam comportamento mais lineares ao longo da profundidade, bastante semelhante aos obtidos com DRX. Ao longo da profundidade, na média, o resultado obtido pelo MFC, com a roseta maior, no arame 315° foi de 255 MPa, enquanto com o DRX o resultado médio obtido foi 326 MPa.

4.3.2 ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA

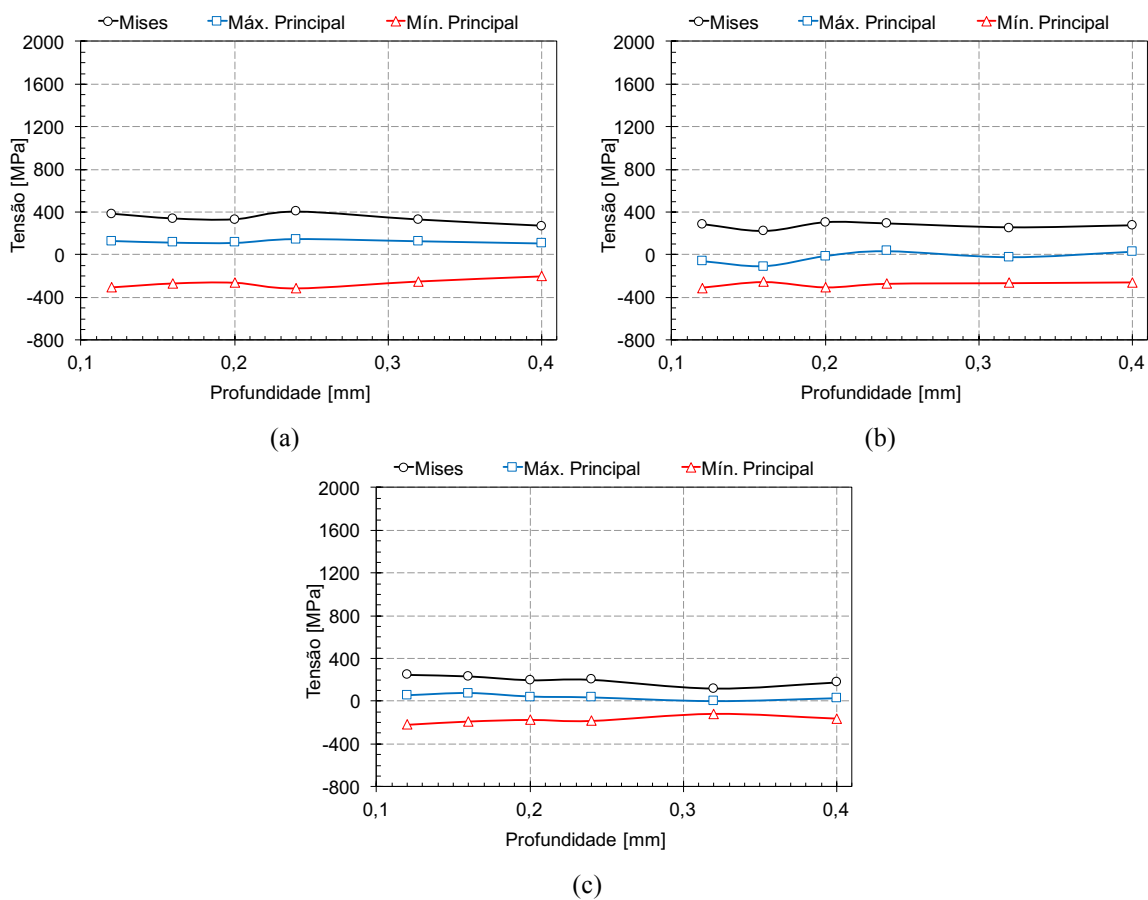
A medição de tensão pelo MFC nos arames montados permitiu a determinação da tensão efetiva atuantes nas armaduras de tração.

Os perfis de tensão máxima e mínima principal e da tensão equivalente de von Mises são apresentados nos gráficos da Figura 50 a Figura 56 para cada amostra analisada. Cada imagem apresenta diferentes gráficos que correspondem aos resultados obtido para cada posição circunferencial analisada.

Nas amostras 1 e 3 o ensaio foi conduzido com as rosetas menores, por este motivo perfil de tensão é apresentado até da profundidade de 0,12 mm até 0,4mm. Para as amostras 2 e 4 os ensaios conduzidos com a roseta de tamanho maior possibilitou determinar o perfil de tensão residual de 0,12 mm até 0,8mm.

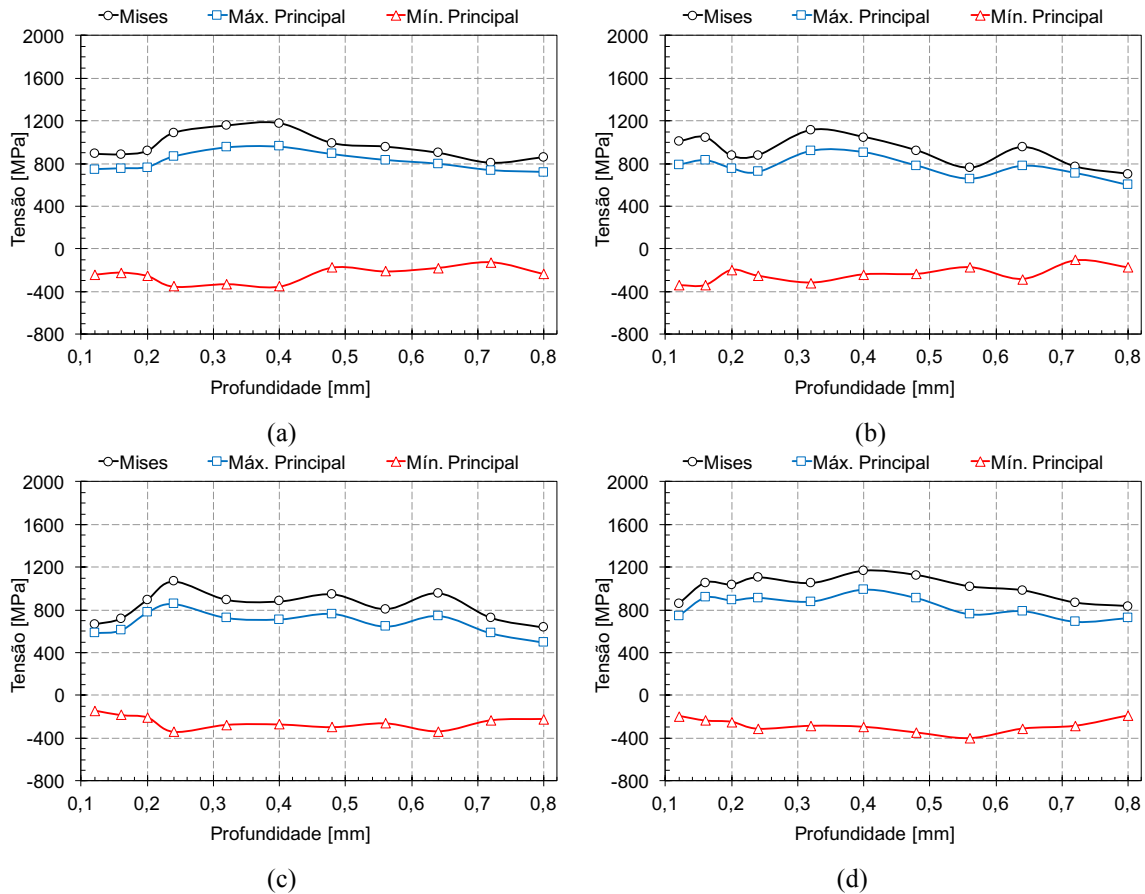
Ao final, a fim de facilitar a análise comparativa entre as diferentes amostras, os resultados são apresentados separadamente para profundidades específicas predeterminadas. Foram selecionadas duas profundidades, 0,12 mm e 0,4mm. Os comparativos entre as diferentes amostras são apresentados nas Figura 57 e Figura 58.

Figura 47 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 1, sendo (a) arame 0°, (b) arame 120° e (c) arame 240°.



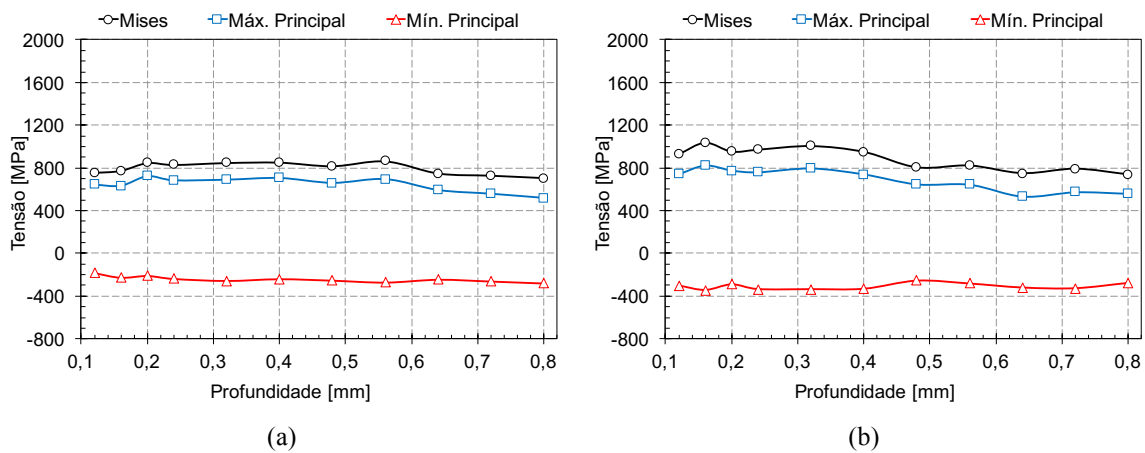
Fonte: O autor.

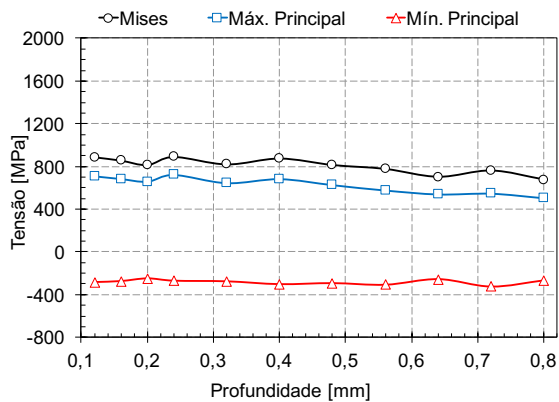
Figura 48 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 2, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (c) arame 315°.



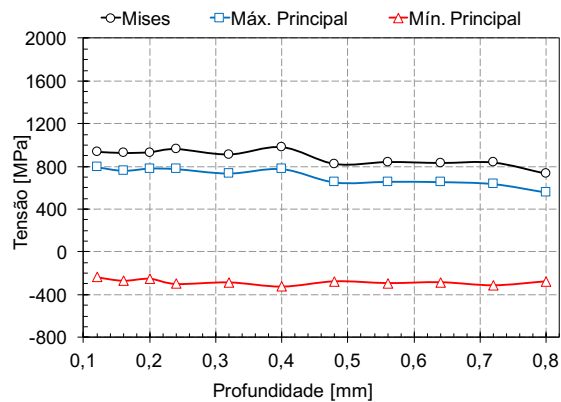
Fonte: O autor.

Figura 49 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 2, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.





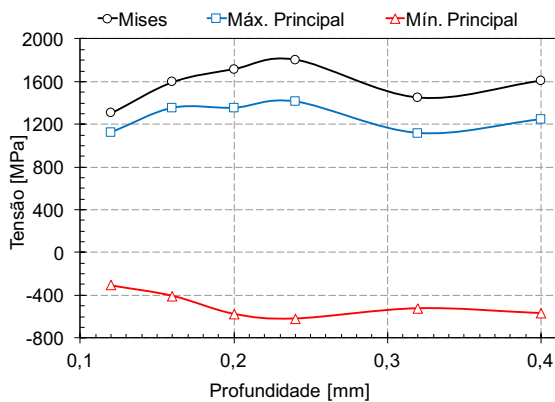
(c)



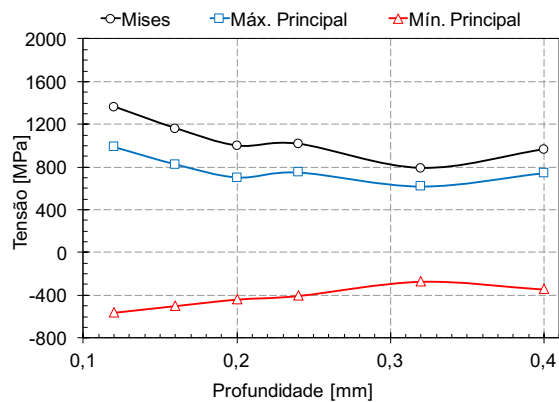
(d)

Fonte: O autor.

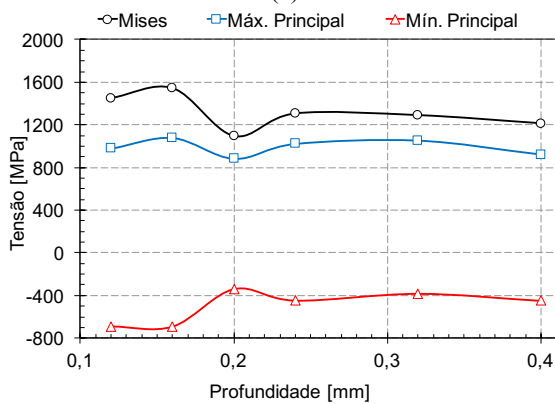
Figura 50 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 3, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (d) arame 315°.



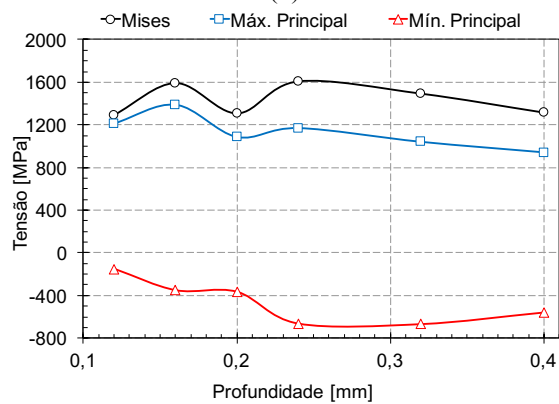
(a)



(b)



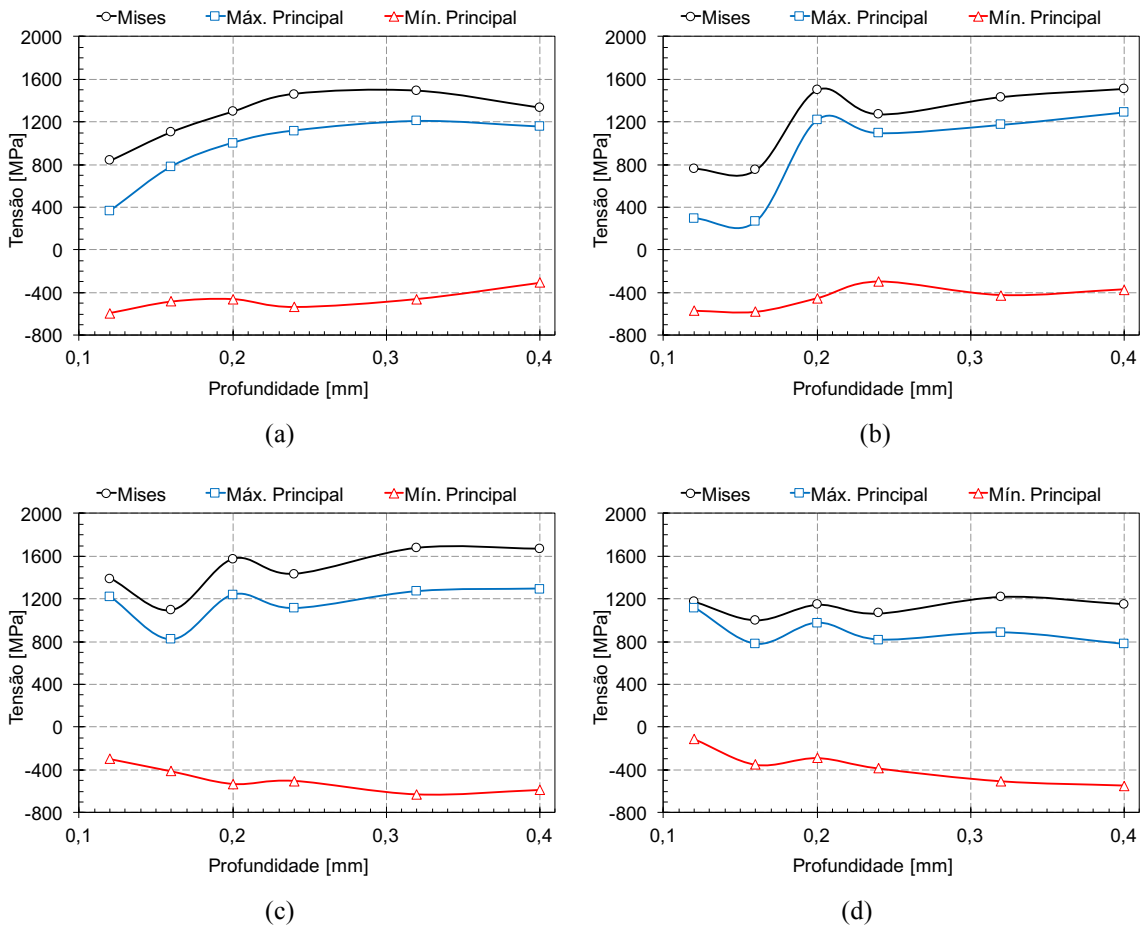
(c)



(d)

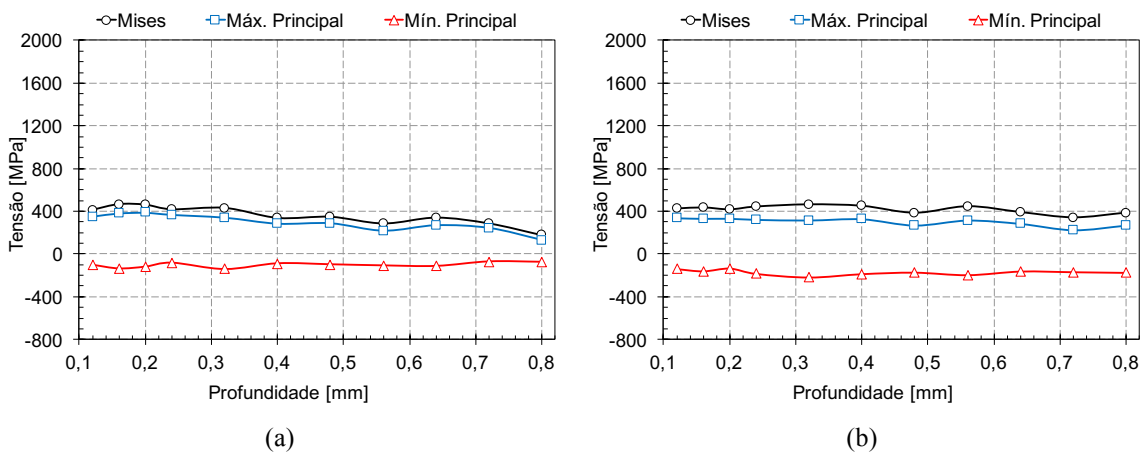
Fonte: O autor.

Figura 51 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 3, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.



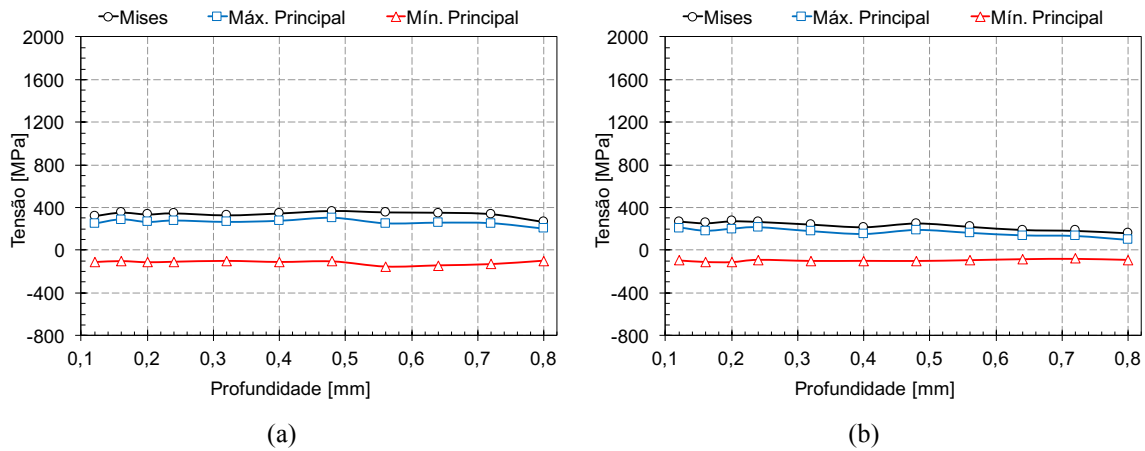
Fonte: O autor.

Figura 52 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 4, sendo (a) arame 0° e (c) arame 180°.



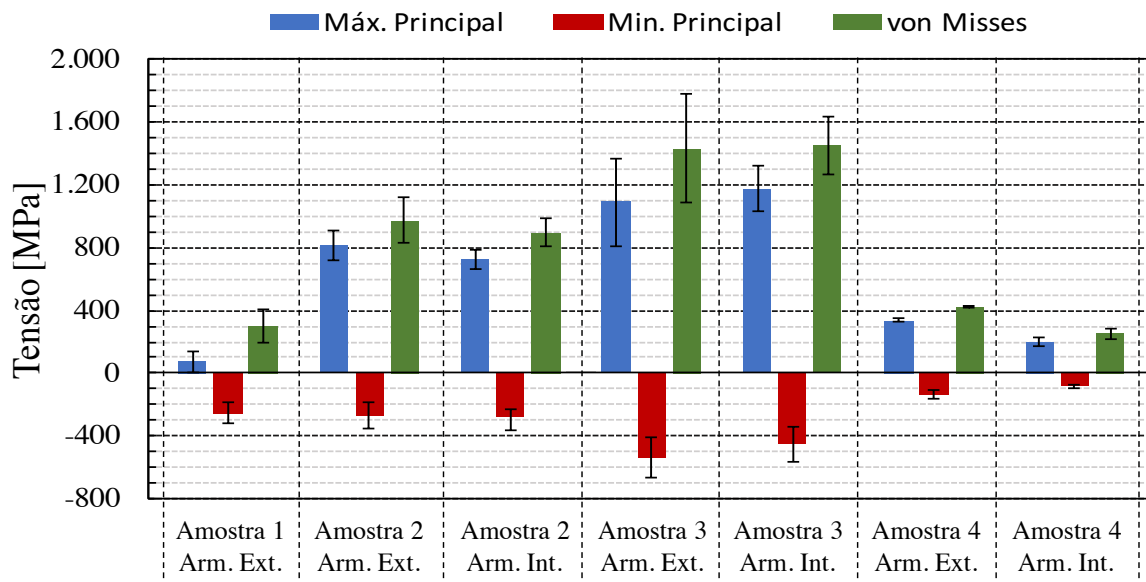
Fonte: O autor.

Figura 53 – Tensão Efetiva. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 4, sendo (a) arame 90°e (c) arame 270°.



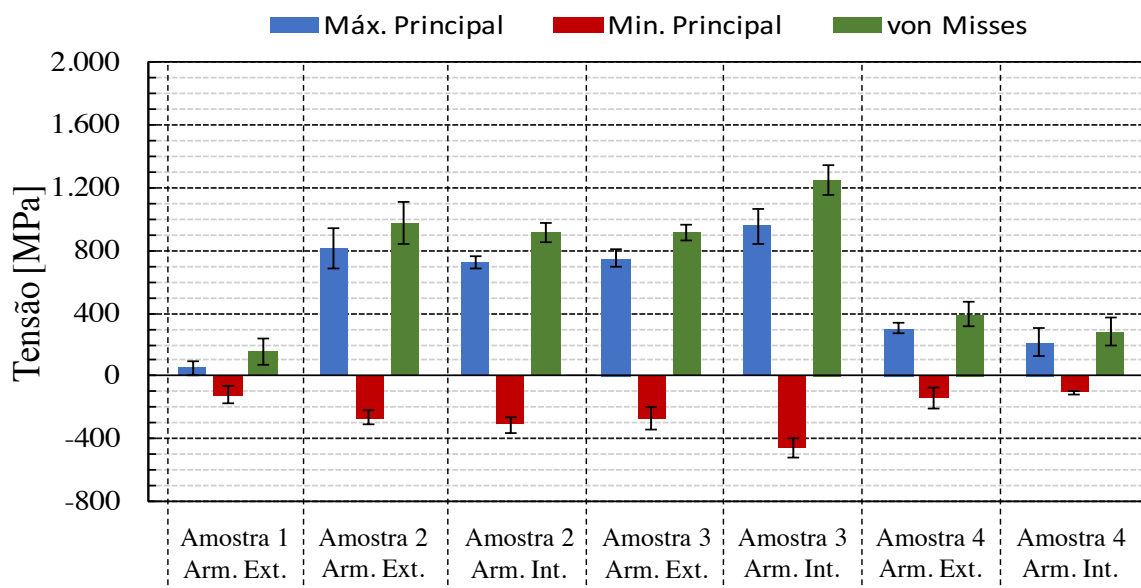
Fonte: O autor.

Figura 54 – Tensões Efetivas. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,12mm



Fonte: O autor.

Figura 55 – Tensões Efetivas. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,4mm.



Fonte: O autor.

Foram identificados diferentes níveis de tensão efetiva em cada uma das quatro amostras distintas. Comparando os resultados na profundidade de 0,4 mm, os maiores níveis de tensão foram identificados nas amostras 2 e 3, para armadura externa e interna, sendo a magnitude das tensões máximas principais superiores a 700 MPa. Para Amostra 4, a magnitude das tensões máximas principais foi menor, 200 MPa para armadura interna e 305 MPa para armadura externa. Na Amostra 1 o resultado da média ao longo da circunferência das tensões máximas principais foi de 50 MPa.

Na Amostra 3, próximo a superfície em 0,12mm, os resultados obtidos para as tensões máximas principais são muito próximos a tensão de escoamento do material, 1088 MPa na armadura externa e 1036 MPa na armadura interna. Para esta amostra, na mesma profundidade citada, identificou-se uma grande variação da tensão máxima principal ao longo da circunferência do duto, com desvio padrão de 277 MPa na armadura externa e 146 MPa na armadura interna. Para a profundidade de 0,4 mm o valor obtido das tensões máximas principais foi menor, 749 MPa na armadura externa e 956 MPa na armadura interna, o desvio padrão foi 55 MPa e 112 MPa, respectivamente.

4.3.3 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM

Através do ensaio de monitoramento de deformação durante o procedimento de desmontagem das armaduras para liberação dos arames foi possível determinar o estado de tensões ao qual os arames estavam submetidos. Os resultados para cada amostra e armadura para as quais foram realizadas as medições são apresentados da Tabela 8 a Tabela 14. Nestas tabelas são apresentados os valores das tensões principais máxima e mínima, além da tensão equivalente de von Mises e do ângulo da tensão máxima principal.

O ângulo da tensão máxima principal é medido a partir da direção longitudinal do arame, sendo positivo no sentido anti-horário e negativo no sentido horário. Os valores médios das tensões ao longo da circunferência são apresentados na Figura 59.

Tabela 8 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a Amostra 1.

Posição radial (Graus)	Máxima Principal (MPa)	Mínima Principal (MPa)	Ângulo Principal (Graus)	von Mises (MPa)
0	144	-22	28	156
120	110	-23	30	123
240	69	-30	37	88
Média	108	-25	32	122
Desvio Padrão	38	4	5	34

Fonte: O autor.

Tabela 9 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura externa da Amostra 2.

Amostra 2 - Arm. Ext.				
Posição radial (Graus)	Máxima Principal (MPa)	Mínima Principal (MPa)	Ângulo Principal (Graus)	von Mises (MPa)
45	1116	-381	-30	1348
135	1061	-434	-32	1332
225	1106	-379	-28	1336
315	1078	-343	-23	1284
Média	1090	-384	-28	1325
Desvio Padrão	25	37	4	28

Fonte: O autor.

Tabela 10 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura interna da Amostra 2.

Amostra 2 - Arm. Int.				
Posição radial (Graus)	Máxima Principal (MPa)	Mínima Principal (MPa)	Ângulo Principal (Graus)	von Mises (MPa)
0	1001	-365	28	1225
90	985	-393	28	1230
180	1000	-435	31	1274
270	1017	-416	31	1277
Média	1001	-402	30	1251
Desvio Padrão	13	30	2	28

Fonte: O autor

Tabela 11 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura externa da Amostra 3.

Amostra 3 - Arm. Ext.				
Posição radial (Graus)	Máxima Principal (MPa)	Mínima Principal (MPa)	Ângulo Principal (Graus)	von Mises (MPa)
45	1073	-349	29	1285
135	1081	-351	27	1291
225	1085	-342	27	1290
315	1059	-378	31	1290
Média	1075	-355	29	1289
Desvio Padrão	11	16	2	3

Fonte: O autor.

Tabela 12 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura interna da Amostra 3.

Amostra 3 - Arm. Int.				
Posição radial (Graus)	Máxima Principal (MPa)	Mínima Principal (MPa)	Ângulo Principal (Graus)	von Mises (MPa)
0	1046	-475	28	1348
90	1048	-458	33	1337
180	1084	-376	22	1313
270	*	*	*	*
Média	1059	-436	28	1333
Desvio Padrão	21	53	6	18

* Para a posição 270° houve perda do sinal dos sensores durante o ensaio.

Fonte: O autor.

Tabela 13 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura externa da Amostra 4.

Amostra 4 - Arm. Ext.				
Posição radial (Graus)	Máxima Principal (MPa)	Mínima Principal (MPa)	Ângulo Principal (Graus)	von Mises (MPa)
0	425	-41	17	447
180	476	-145	28	563
Média	451	-93	23	505
Desvio Padrão	36	74	8	82

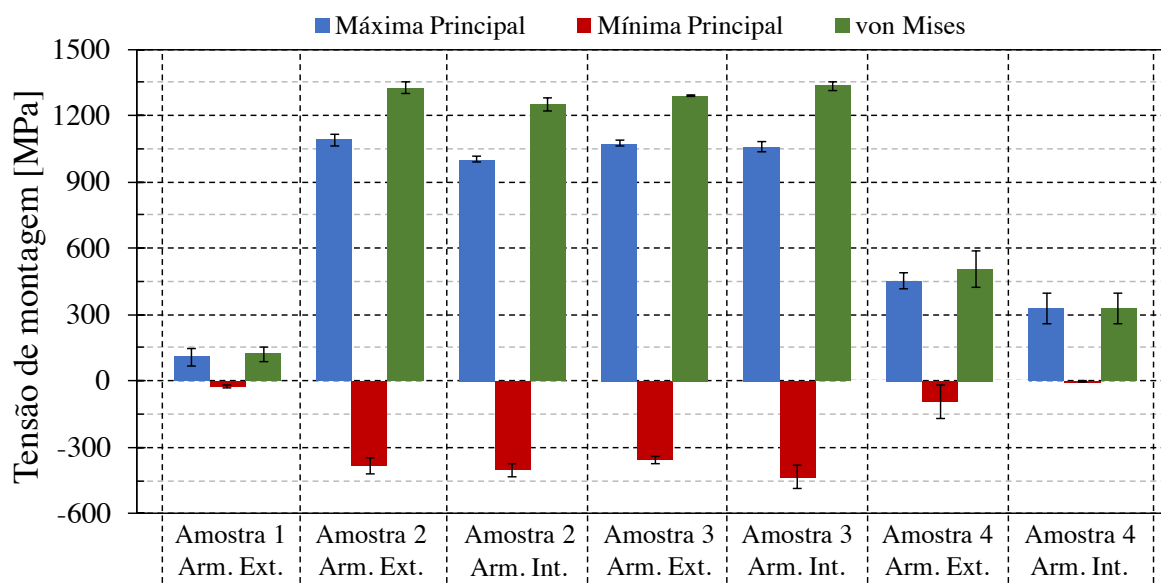
Fonte: O autor.

Tabela 14 – Valores de tensão e direção da tensão máxima principal para a armadura interna da Amostra 4.

Amostra 4 - Arm. Int.				
Posição radial (Graus)	Máxima Principal (MPa)	Mínima Principal (MPa)	Ângulo Principal (Graus)	von Mises (MPa)
90	276	1	-2	276
270	375	-3	-4	376
Média	326	-1	-3	326
Desvio Padrão	70	3	1	71

Fonte: O autor.

Figura 56 - Tensões de montagem. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Média dos valores obtidos ao longo da circunferência.



Fonte: O autor.

O estado de tensão de montagem para as Amostras 2 e 3 extraídas do mesmo segmento de duto flexível são bastante semelhantes, com valor da tensão equivalente de von Mises próximo a 1300 MPa, na ordem da tensão de escoamento do material, indicando que houve deformação plástica nos arames da armadura de tração durante a desmontagem. Enquanto para a Amostra 1 o nível de tensão de montagem é bem inferior, com tensão de von Mises em torno de 120 MPa.

De um modo geral, não foi identificada variação significativa da tensão de montagem ao longo da circunferência da armadura de tração, o maior desvio identificado foi de 71 MPa para tensão equivalente de von Mises armadura interna da Amostra 4,

4.3.4. ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS

4.3.4.1. ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MFC

As tensões residuais nos arames, medidas pela técnica do MFC, foram determinadas através da medição dos arames soltos. Os perfis de tensão residual máxima e mínima principal e da tensão equivalente de von Mises são apresentados nos gráficos da Figura 60 a Figura 66 para cada amostra. Cada imagem apresenta diferentes gráficos que correspondem aos resultados obtido para cada posição circunferencial analisada, a identificação desta posição na circunferência do duto é realizada no seu canto inferior direito do gráfico.

Na Amostra 1 e 3 o ensaio foi conduzido com as rosetas menores, por este motivo perfil de tensão é apresentado até da profundidade de 0,12 mm até 0,4mm. Para Amostra 2 e 4 os ensaios conduzidos com a roseta de tamanho maior possibilitou determinar o perfil de tensão residual de 0,12 mm até 0,8mm. A fim de facilitar a análise comparativa entre as diferentes amostras, os resultados são apresentados separadamente para profundidades específicas predeterminadas. Foram selecionadas duas profundidades, de 0,12 mm e de aproximadamente 0,4m mm da superfície do arame.

O valor utilizado para a comparação é a média dos valores obtidos ao longo da circunferência. Desta forma tem-se um valor de tensão para cada conjunto de amostra de duto e armadura, que foram analisados. O comparativo entre as diversas amostras é apresentado Figura 67 e 68 para profundidades de 0,12 mm e 0,4 mm.

Figura 57 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 1, sendo (a) arame 0°, (b) arame 120° e (c) arame 240°.

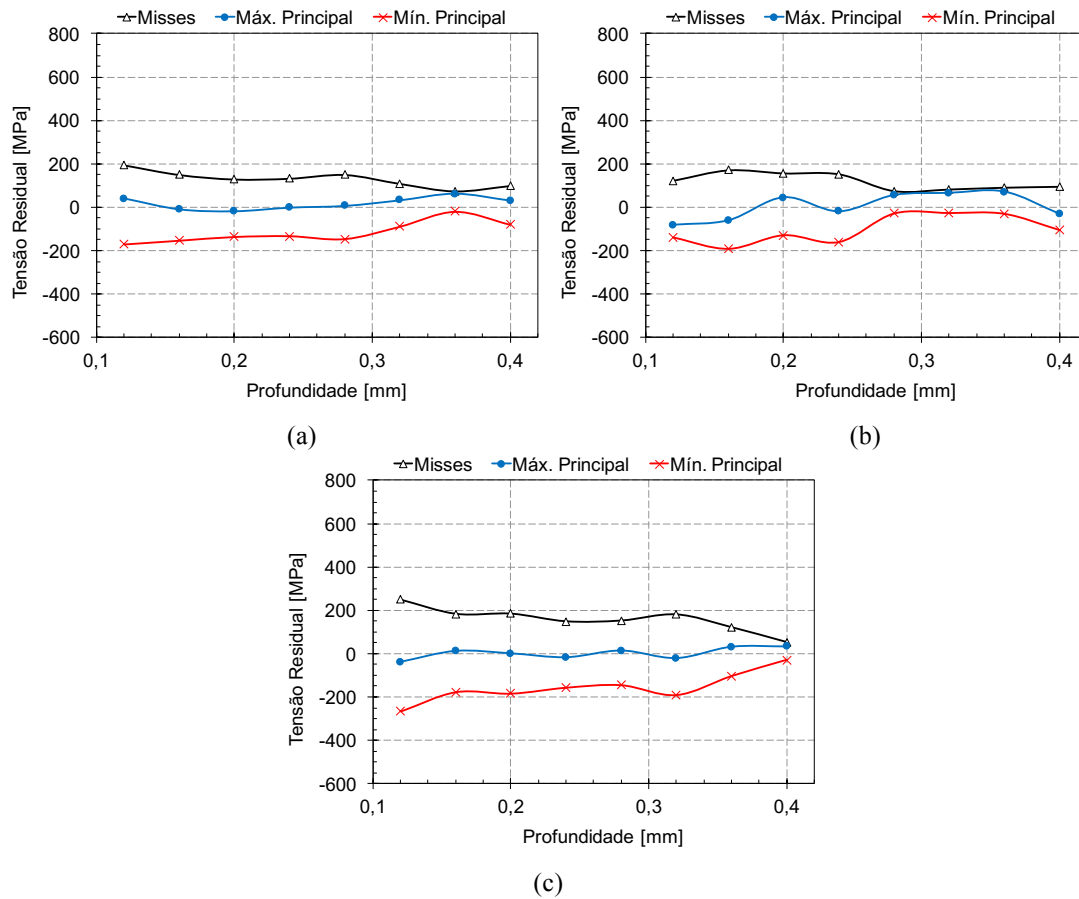
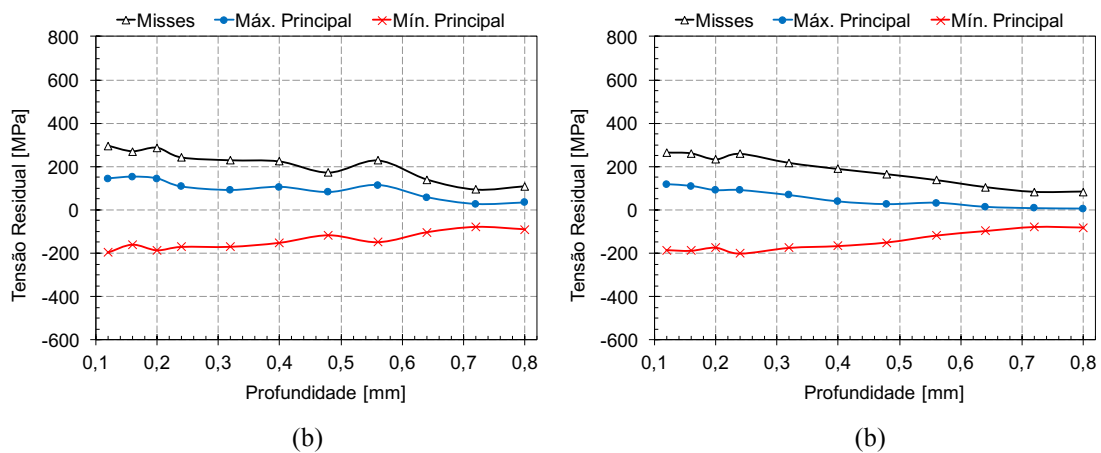
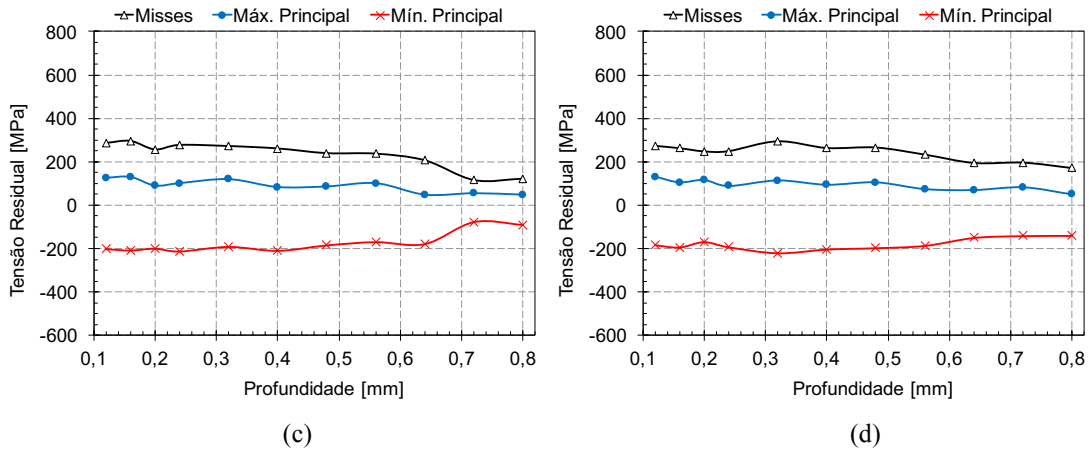


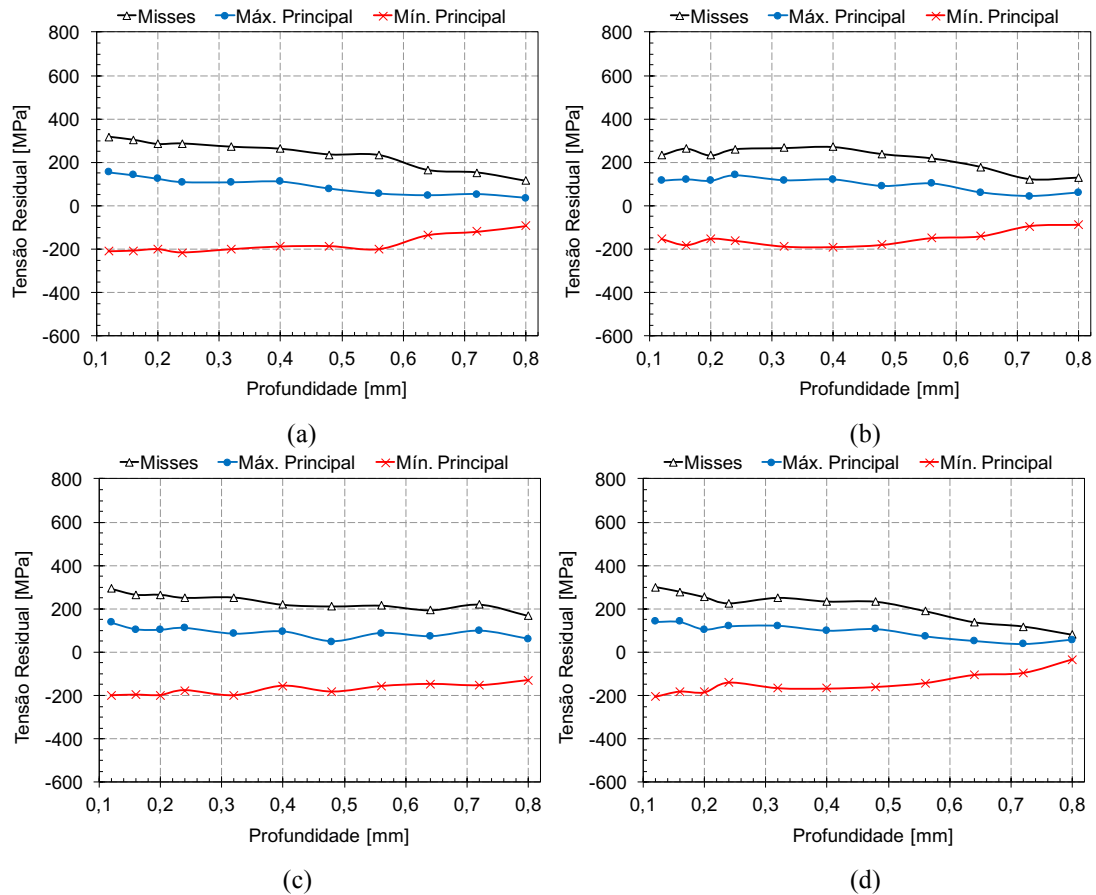
Figura 58 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 2, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (c) arame 315°.





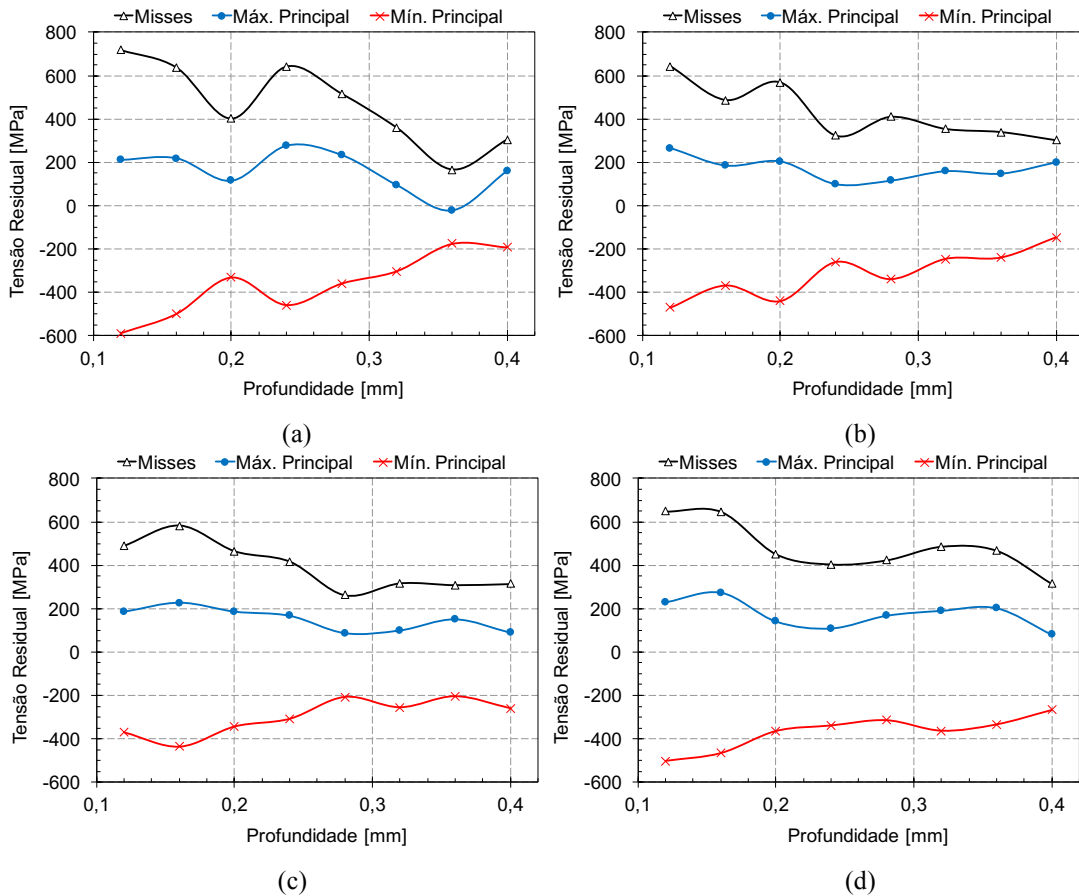
Fonte: O autor.

Figura 59 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 2, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.



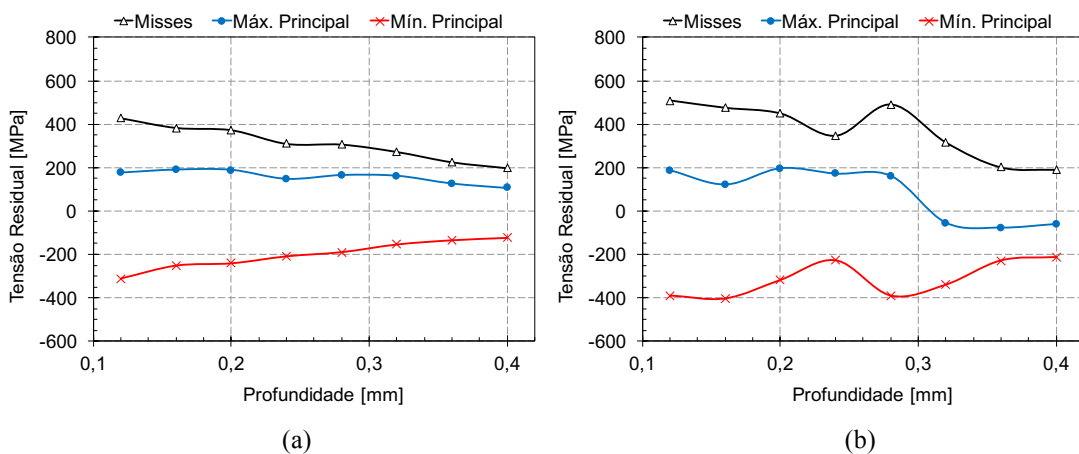
Fonte: O autor.

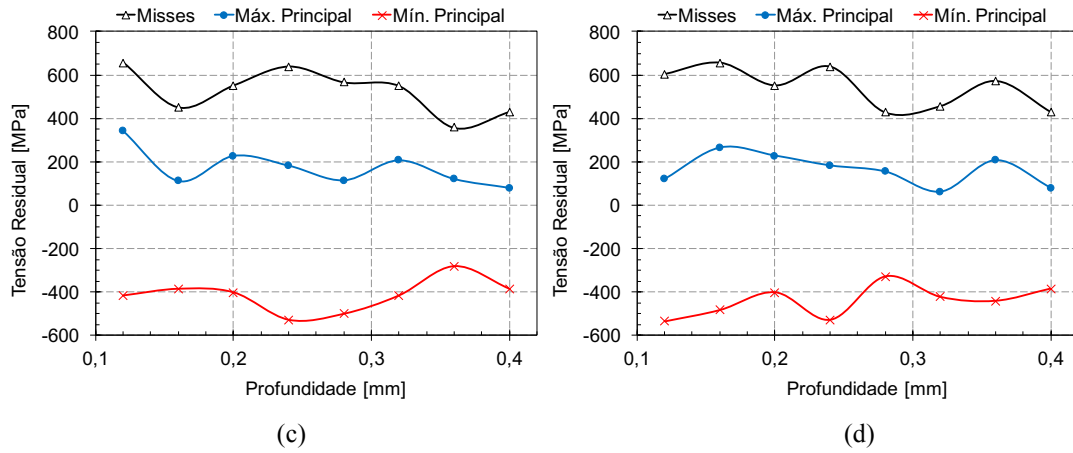
Figura 60 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 3, sendo (a) arame 0°, (b) arame 90°, (c) arame 180° e (c) arame 270°.



Fonte: O autor.

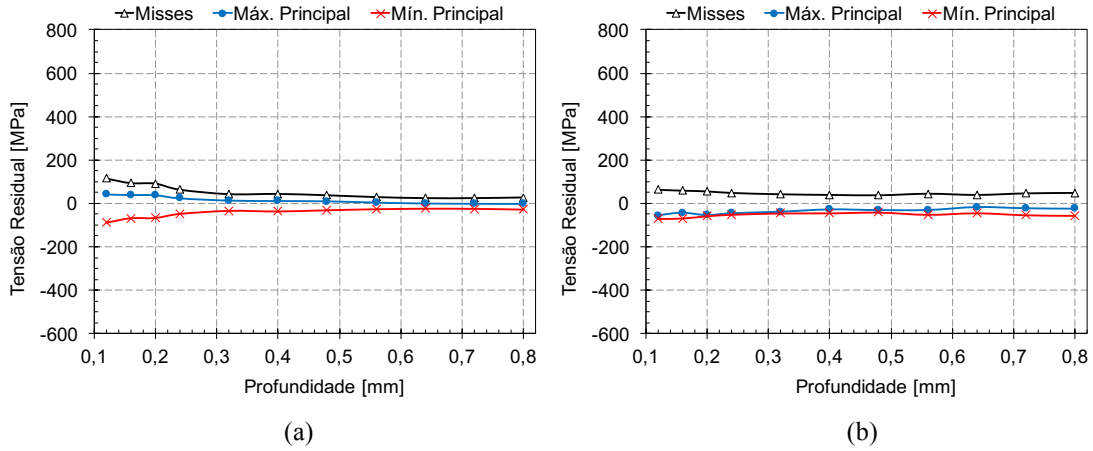
Figura 61 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 3, sendo (a) arame 45°, (b) arame 135°, (c) arame 225° e (c) arame 315°.





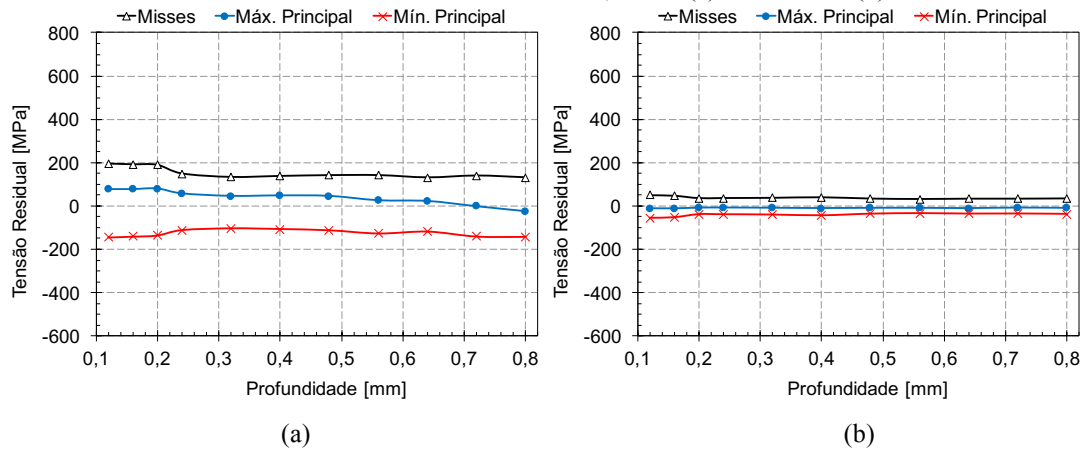
Fonte: O autor.

Figura 62 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura externa da Amostra 4, sendo (a) arame 0° e (b) arame 180°.



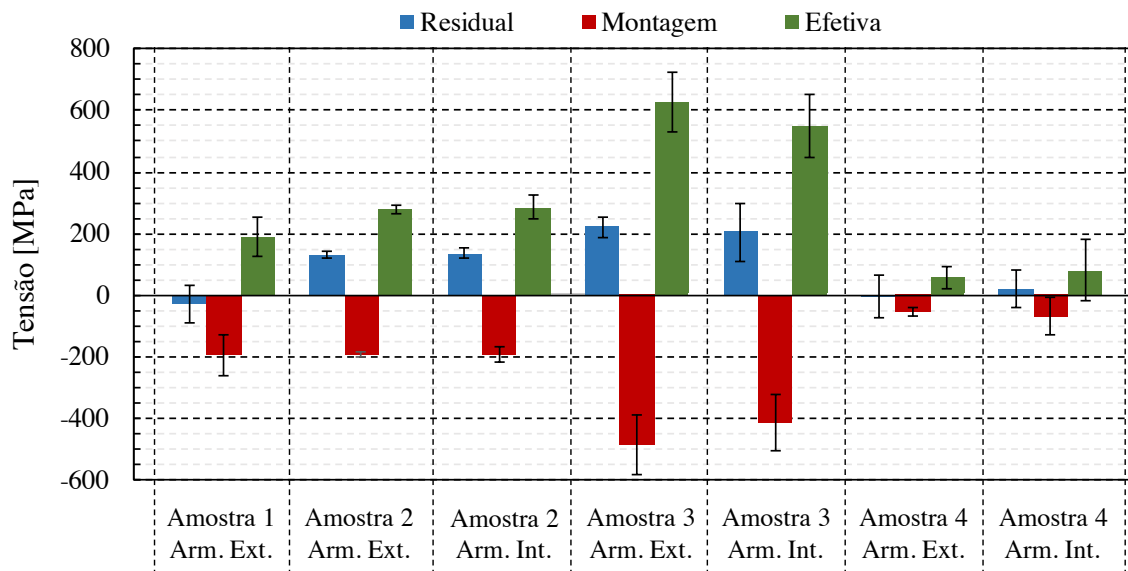
Fonte: O autor.

Figura 63 – Tensão Residual pelo MFC. Perfis de tensão ao longo da profundidade para as diferentes posições circunferenciais na armadura interna da Amostra 4, sendo (a) arame 90° e (b) arame 270°.



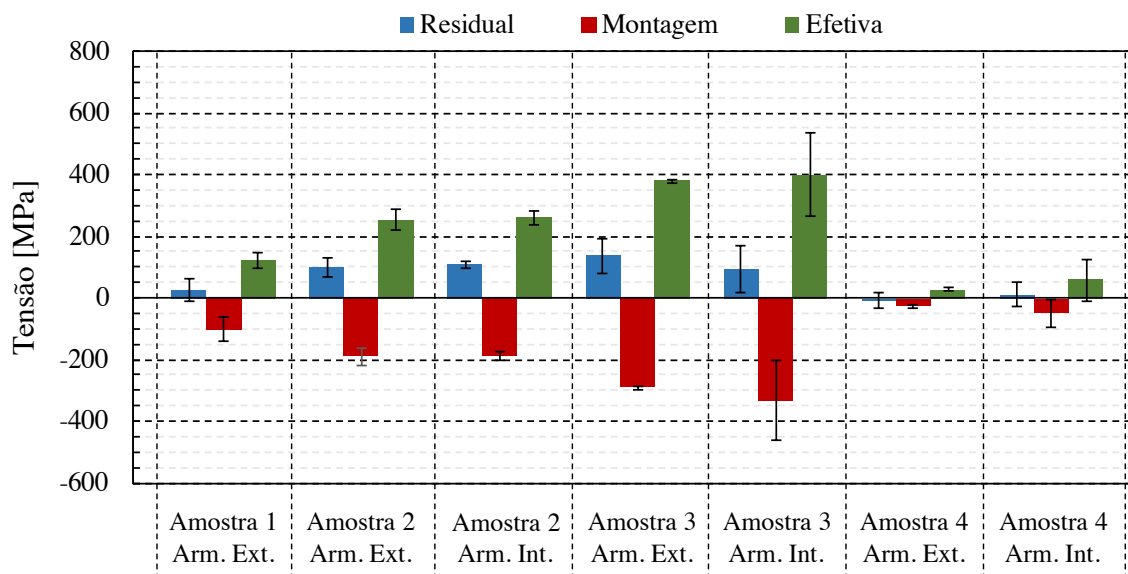
Fonte: O autor.

Figura 64 – Tensão Residual pelo MFC. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,12mm.



Fonte: O autor.

Figura 65 – Tensão Residual pelo MFC. Valores de tensão máxima e mínima principal e de von Mises para cada condição de ensaio. Valores para a profundidade de 0,4mm.



Fonte: O autor.

Foram identificados diferentes níveis de tensão residual em cada amostra analisada. Em suma, a magnitude das tensões mínimas principais encontradas ao longo da profundidade, em módulo, são maiores que as máximas principais.

Os maiores níveis de tensão residual foram identificados na Amostra 3. Próximo a superfície, o resultado obtido para tensão equivalente de von Mises representa

aproximadamente 50% da tensão de escoamento do material. Em todas amostras há um decaimento do valor da tensão residual a partindo da superfície dos arames para maiores profundidades.

Há maior variação da tensão residual ao longo da circunferência do duto na profundidade de 0,12 mm. Para Amostra 3 o desvio padrão para tensão equivalente de von Misses encontrado foi de 96 MPa e 100 MPa nas armaduras externa e interna, respectivamente. Para profundidade de 0,4 mm foi identificado menor variação do nível de tensão ao longo da circunferência, para Amostra 2 o desvio padrão foi de 35 MPa e 24 MPa, respectivamente, para tensão equivalente de von Misses nas armaduras externa e interna. Uma exceção foi para armadura interna da Amostra 3, onde o desvio padrão para tensão equivalente de von Misses foi de 136 MPa.

4.3.4.2. ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS POR DRX

As tensões residuais nos arames, medidas pela técnica de DRX, foram determinadas através da medição dos arames soltos, sendo realizadas três medidas em cada ponto selecionado, nas três direções (0° , 45° , 90°), em todos os arames ao longo da circunferência, desta forma tem-se um valor de tensão residual para cada conjunto de amostra de duto e armadura que foram analisados. Os resultados são apresentados entre as Tabelas 15 e 21. O resultado compilado referente a média ao longo da circunferência é apresentado na Figura 69.

Tabela 15 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 1.

Amostra	Posição Circunferencial [Graus]	Ponto de medição	Máxima Principal [MPa]	Mínima Principal [MPa]	Ângulo Principal [Graus]	von Mises [MPa]
Amostra 1 Arm. Ext.	0	1	14	-51	-12	60
		2	13	-55	-5	63
		3	22	-53	-7	67
	120	1	28	-101	0	117
		2	31	-93	-3	111
		3	35	-76	-3	98
	240	1	40	-30	-9	60
		2	38	-39	-9	67
		3	41	-24	-14	57
Média			29	-54	-7	73
Desvio Padrão			11	27	5	24

Fonte: O autor.

Tabela 16 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 2.

Amostra	Posição Circunferencial [Graus]	Ponto de medição	Máxima Principal [MPa]	Mínima Principal [MPa]	Ângulo Principal [Graus]	von Mises [MPa]
Amostra 2 Arm. Ext.	45	1	116	-309	41	380
		2	111	-312	41	380
		3	115	-307	41	378
	135	1	26	-410	37	424
		2	78	-306	38	352
		3	70	-327	37	367
	225	1	104	-332	37	395
		2	89	-335	36	387
		3	71	-317	37	358
	315	1	77	-402	38	446
		2	78	-417	38	461
		3	66	-398	39	435
Média			83	-347	38	396
Desvio Padrão			26	45	2	36

Fonte: O autor.

Tabela 17 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura interna na Amostra 2.

Amostra	Posição Circunferencial [Graus]	Ponto de medição	Máxima Principal [MPa]	Mínima Principal [MPa]	Ângulo Principal [Graus]	von Mises [MPa]
Amostra 2 Arm. Int.	0	1	-45	-335	-40	315
		2	44	-308	-37	333
		3	88	-330	-37	381
	90	1	98	-394	-36	451
		2	108	-405	-36	468
		3	101	-432	-37	491
	180	1	123	-406	-36	480
		2	111	-385	-35	451
		3	119	-391	-36	462
	270	1	-259	-364	21	324
		2	-264	-357	21	321
		3	-267	-360	27	324
Média			-10	-366	-38	361
Desvio Padrão			163	36	27	73

Fonte: O autor.

Tabela 18 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 3.

Amostra	Posição Circunferencial [Graus]	Ponto de medição	Máxima Principal [MPa]	Mínima Principal [MPa]	Ângulo Principal [Graus]	von Mises [MPa]
Amostra 3 Arm. Ext.	45	1	84	-347	38	395
		2	73	-356	37	397
		3	63	-354	36	390
	135	1	85	-352	39	402
		2	83	-329	40	377
		3	79	-339	39	385
	225	1	78	-343	39	388
		2	80	-325	40	371
		3	74	-338	39	381
	315	1	81	-338	39	385
		2	58	-393	38	425
		3	61	-391	39	425
Média			75	-350	38	393
Desvio Padrão			9	22	1	17

Fonte: O autor.

Tabela 19 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura interna na Amostra 3.

Amostra	Posição Circunferencial [Graus]	Ponto de medição	Máxima Principal [MPa]	Mínima Principal [MPa]	Ângulo Principal [Graus]	von Mises [MPa]
Amostra 3 Arm. Int	45	1	-243	-337	42	301
		2	-266	-331	37	304
		3	-212	-290	42	260
	135	1	118	-332	-36	404
		2	121	-342	-36	416
		3	124	-357	-36	432
	225	1	115	-336	-37	406
		2	111	-340	-36	407
		3	106	-354	-36	417
	315	1	55	-334	-38	365
		2	74	-354	-38	396
		3	92	-356	-38	410
Média			16	-339	-18	376
Desvio Padrão			156	18	35	56

Fonte: O autor.

Tabela 20 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura externa na Amostra 4.

Amostra	Posição Circunferencial [Graus]	Ponto de medição	Máxima Principal [MPa]	Mínima Principal [MPa]	Ângulo Principal [Graus]	von Mises [MPa]
Amostra 4 Arm. Ext.	0	1	29	-180	-25	196
		2	26	-188	-27	202
		3	37	-174	-28	195
	180	1	1	-266	-15	266
		2	-1	-323	-20	323
		3	-5	-263	-15	260
Média			12	-230	-21	236
Desvio Padrão			18	61	6	52

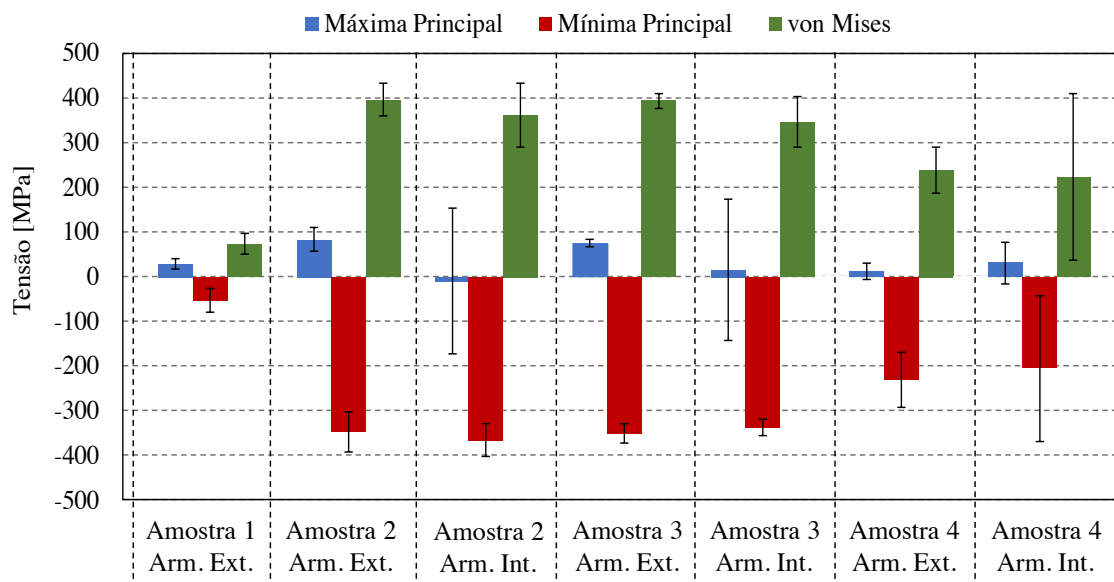
Fonte: O autor.

Tabela 21 – Tensão Residual por DRX. Tensão média de três pontos ao longo do comprimento do arame para armadura interna na Amostra 4.

Amostra	Posição Circunferencial [Graus]	Ponto de medição	Máxima Principal [MPa]	Mínima Principal [MPa]	Ângulo Principal [Graus]	von Mises [MPa]
Amostra 4 Arm. Int.	90	1	68	-336	-30	375
		2	69	-346	-29	386
		3	85	-373	-29	422
	270	1	-13	-88	-33	82
		2	-13	-80	-45	74
		3	-5	-14	-20	13
Média			31	-205	-30	223
Desvio Padrão			47	162	8	187

Fonte: O autor.

Figura 66 – Tensão Residual por DRX. Valores de médio de tensão máxima e mínima principal e de von Mises ao longo da circunferência para cada amostra.



Fonte: O autor.

Em todas amostras as tensões mínimas principais apresentaram valores de maior magnitude em módulo do que as tensões máximas principais.

Comparando a tensão equivalente de von Mises a amostra que se mostrou com menor nível de tensão residual na superfície foi a Amostra 1, em média 73 MPa. As Amostras 2 e 3 apresentaram os valores mais elevados, 396 MPa e 393 MPa, respectivamente, ambos obtidos na armadura externa.

A maior variação do nível de tensão ao longo da circunferência foi encontrada na armadura interna da Amostra 4, onde o desvio padrão encontrado foi de 187 MPa para tensão equivalente de von Misses.

Quando analisados os valores de tensão residual entre os três pontos na longitudinal do mesmo arame identifica-se que há pouca entre os valores. Os maiores desvios ocorreram na armadura interna da Amostra 4, 37 MPa e 24 MPa para tensão equivalente de von Misses nos arames 270° e 90°, respectivamente.

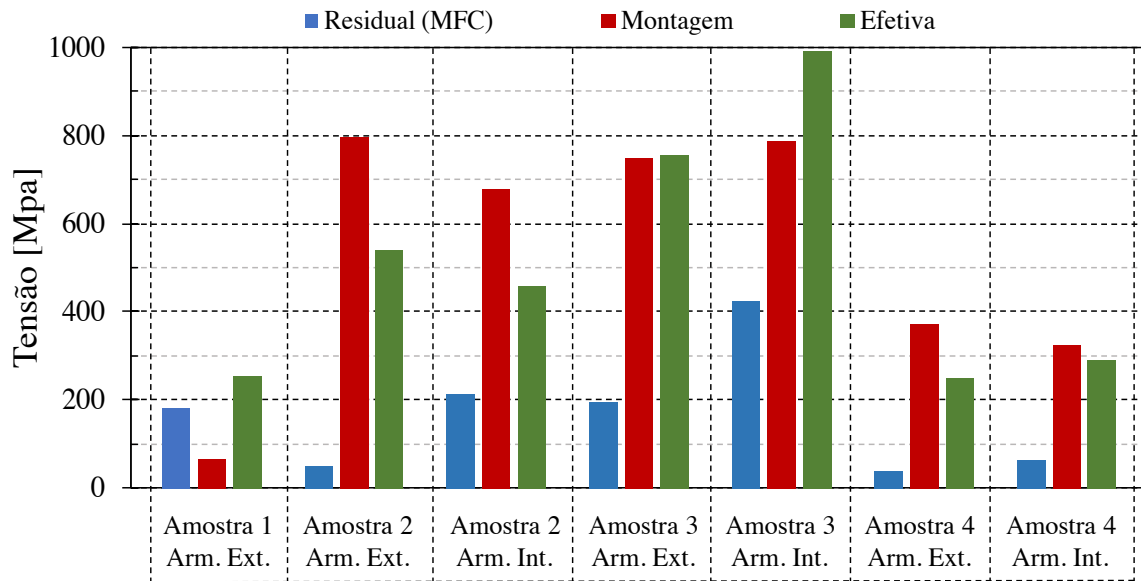
4.3.5. COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS DE TENSÃO

Os valores para a tensão de montagem são medidos na superfície dos arames, já para a tensão efetiva e residual tem-se um perfil de tensão para uma determinada profundidade. Para efetuar a comparação de resultados entre os três tipos de tensão medidos, os valores da tensão de montagem são comparados com os valores de tensão residual e efetiva correspondentes ao ponto de medição mais próximo da superfície do arame, 0,12mm.

Cada tipo de tensão avaliada possui orientação diferente das tensões principais. Por este motivo para efetuar o comparativo entre os diferentes tipos de tensão foi necessário realizar a transformação das tensões para os planos longitudinal e transversal do arame. Esta transformação foi aplicada utilizando a Equação 10 descrita no referencial bibliográfico.

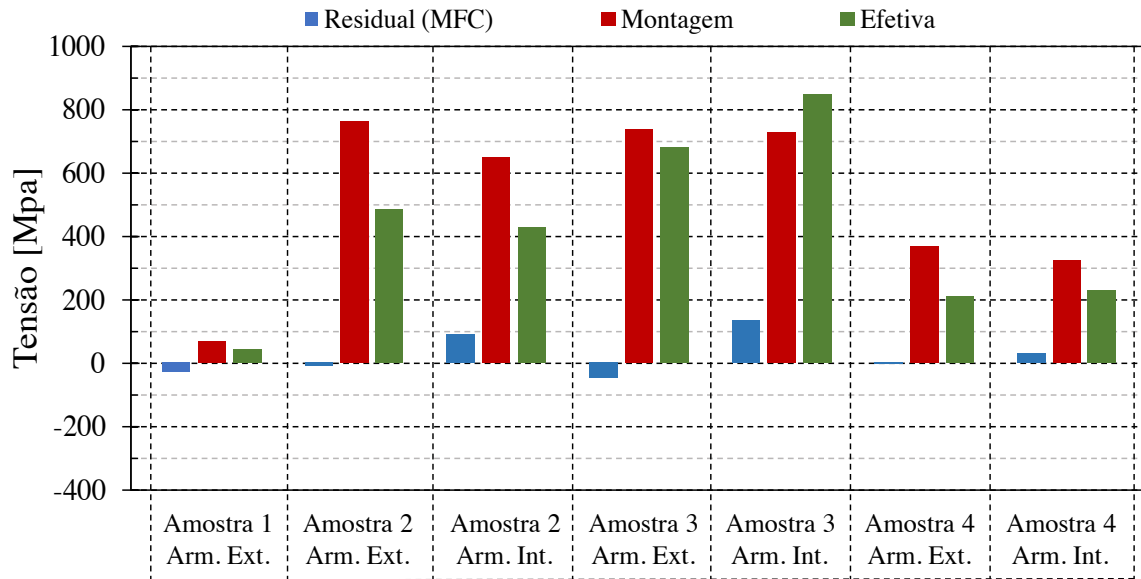
O comparativo dos resultados de tensão equivalente de von Mises, tensão na longitudinal e na transversal para cada tipo tensão são apresentados respectivamente nos gráficos da Figura 70 a Figura 72.

Figura 67 – Tensão de von Mises para os diferentes tipos de tensão medidos.



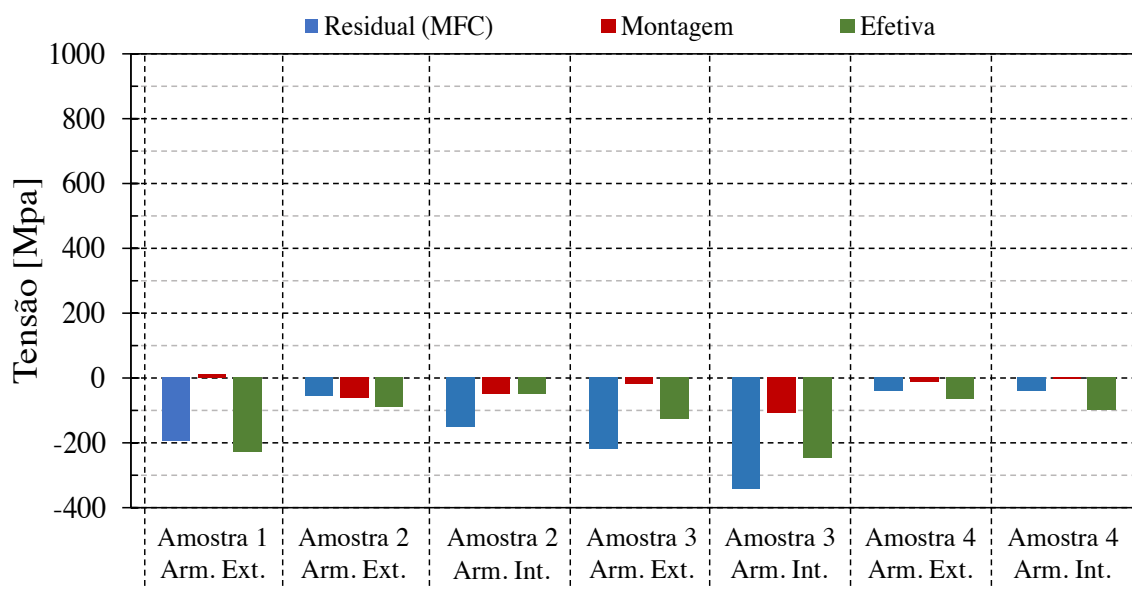
Fonte: O autor.

Figura 68 – Tensão no longitudinal dos arames para os diferentes tipos de tensão medidos.



Fonte: O autor.

Figura 69 – Tensão na transversal dos arames para os diferentes tipos de tensão medidos.



Fonte: O autor.

Comparando os resultados para tensão equivalente de von Mises, exceto para Amostra 1, a magnitude das tensões de montagem é maior do que as tensões residuais. Para Amostra 2 a diferença entre os tipos de tensão, residual e montagem, é de 747 MPa e 464 MPa, respectivamente para armadura externa e interna.

As tensões de montagem são mais atuantes na armadura de tração na longitudinal dos arames. Os maiores resultados foram obtidos nas amostras 2 e 3, superiores a 650 MPa nas armaduras interna e externa. Na transversal, exceto para Amostra 1, as tensões de montagem são negativas, sendo a maior magnitude, -106 MPa, identificada na armadura interna da Amostra 3.

As tensões residuais são de maior magnitude no sentido transversal dos arames da armadura de tração. Comparando a tensão equivalente de von Mises os maiores resultados foram obtidos nas amostras 1 e 3. A Amostra 1 apresentou níveis de tensão residual, 179 MPa, próximo a magnitude das tensões residuais da armadura externa da Amostra 3, 206 MPa.

5. DISCUSSÕES GERAIS

Pouco se sabe sobre a evolução do estado de tensões da armadura de tração desde sua fabricação até a sua montagem sob o duto. Esta é uma informação de extrema relevância e de grande interesse para o setor de óleo e gás, visto que, o estado de tensão pré-existente na armadura de tração deve ser levado em consideração na concepção de novos projetos ou na avaliação de linhas já existentes visando a extensão de sua vida útil.

Muitos esforços vêm sendo implementados para análises de tensão em armaduras de tração, entretanto grande parte destes estudos são dedicados a análise de tensão por meio de modelos de elementos finitos. (MIYAZAKI, 2014). Uma grande desvantagem do uso deste tipo de análise é que geralmente considera-se o material como homogêneo, sem presença de defeitos, o que não é uma realidade em condições operacionais.

Existem diversos métodos que possibilitam efetuar análises de tensões de forma experimental. Dentre estes, os autores Fernando *et al.* (2017) propuseram o uso de método de contorno para análise de tensão em armaduras de tração. Porém, esta técnica possibilita determinar apenas a tensão residual dos arames, ou seja, é aplicada com os arames soltos, após a desmontagem do duto, não sendo possível determinar com esta técnica a tensão que os arames estavam expostos enquanto montado sob o duto.

Esta problemática motivou o objetivo principal deste trabalho que foi desenvolver uma metodologia para análise experimental de tensão na armadura de tração de dutos flexíveis, que possibilitasse determinar de forma distinta os diferentes tipos de tensões atuantes na armadura de tração. O trabalho foi inicialmente dividido em três etapas que foram: proposta da metodologia de análise de tensão; validação da metodologia em amostras de escala reduzida; e aplicação prática em amostras de escala real.

Na primeira etapa do trabalho, proposta de metodologia, foram realizados estudos sobre os processos de fabricação e montagem da armadura de tração, que possibilitaram determinar os tipos de tensão atuantes na armadura: tensão residual, de montagem e efetiva. Dentre os métodos de análise de tensão disponíveis para realização da pesquisa, os métodos selecionados foram: método do furo cego (MFC), difração de raios-X (DRX) e monitoramento com uso de extensômetros de resistência elétrica (ERE). Os ensaios foram conduzidos no LAMEF/UFRGS.

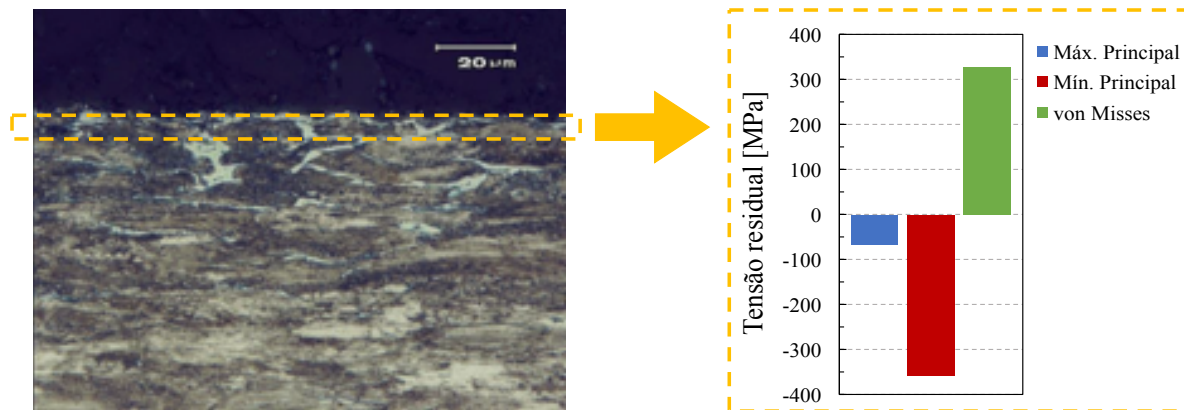
Para validação da proposta de metodologia, a segunda etapa do trabalho consistiu na realização de ensaios de escala reduzida em um segmento de arame de armadura de tração,

retirado de forma aleatória da bobina de fornecimento do fabricante do aço. O material passou por diversos ensaios para caracterização mecânica e microestrutural.

A caracterização microestrutural possibilitou identificar o material com composição química equivalente ao aço carbono SAE 1070. (ASTM A830/A830M, 2018). A tensão de escoamento obtida foi de 1278MPa. Não foi identificada variação da dureza no sentido longitudinal da amostra, porém, quando analisada a microdureza na superfície e no núcleo do arame identificou-se uma diferença de $254\text{HK}_{0,3}$, com o núcleo apresentando maior dureza do que a superfície. A menor dureza na superfície pode ser explicada pela análise metalográfica realizada na seção longitudinal do arame, onde foi identificada uma região na borda do arame, com profundidade próxima de $20\ \mu\text{m}$, mais clara, composta por ferrita. Este resultado demonstra de que o material sofreu com processos de descarbonetação na superfície, comum de ocorrer em aços com alto teor de carbono tratados termicamente. (STORY E WEBLER, 2017).

Na análise das tensões residuais por DRX os resultados apresentaram tensões residuais na compressivas. A média as tensões mínimas principais obtidas foi $-356\ \text{MPa}$ e as máximas principais $-66\ \text{MPa}$. As tensões residuais medidas com o método de DRX são bastantes superficiais, compreendendo uma área de aproximadamente $5\ \mu\text{m}$ de profundidade por $2\ \text{mm}$ de diâmetro. Logo, a região medida pelo método é passível de ser diretamente influencia pela camada superficial descarbonetada, devido a variação de sua microestrutura. Esta situação é evidenciada na Figura 73 onde é apresentado em destaque a região descarbonetada e a média das tensões residuais obtidas com DRX.

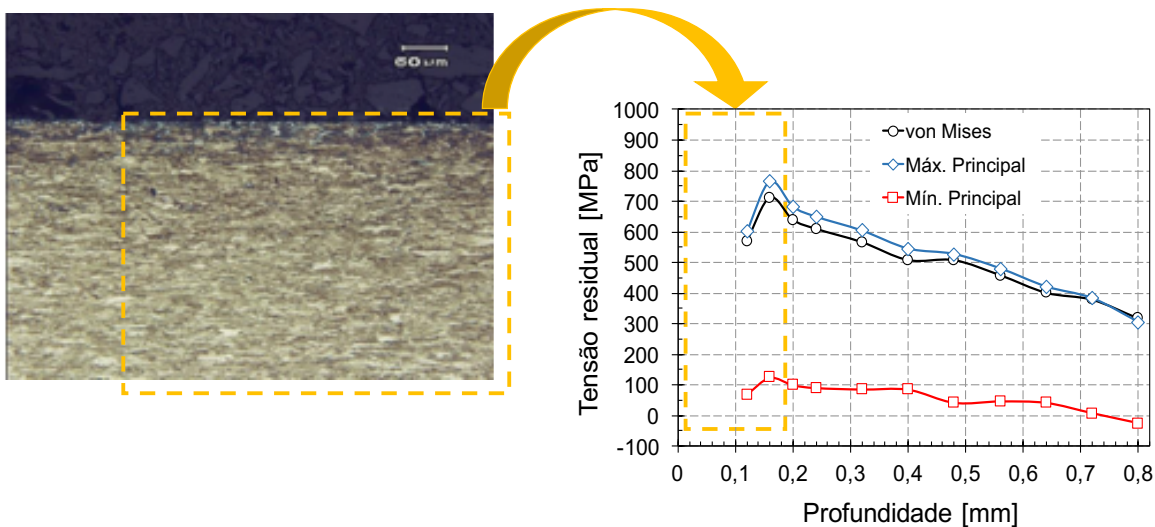
Figura 70 – Comparativo MO na borda da amostra, seção longitudinal, e tensões residuais obtidas por DRX.



Fonte: O autor.

As tensões residuais nas amostras de escala reduzida também foram analisadas pelo MFC. Os resultados revelaram perfis de tensão residual trativos. De um modo geral, a nível de tensões residuais presente nas três amostras é de mesma magnitude, com desvio padrão médio de 25 MPa. A orientação das tensões máximas principais mostraram-se próximas de 0°, longitudinal da amostra. O estado de tensão residual se mostrou linear, porém não homogêneo ao longo da profundidade, com as tensões máximas principais próximas na superfície, a distância de 0,12 mm, muito maiores que as tensões a 0,8 mm de profundidade, com diferença entre si média de 318 MPa. Próximo a superfície, para profundidades de 0,12 mm e 0,2 mm as tensões máximas principais são superiores a 50% da tensão de escoamento do material, na média o valor obtido foi de 653 MPa e as mínimas principais são próximas de 70 MPa. O destaque na microscopia óptica apresentada na Figura 74 representa próximo de 0,04 mm da borda da secção longitudinal da amostra. Embora não seja possível de identificar na imagem a região entre 0,12 mm e 0,2 mm, observa-se no resultado do MFC uma inversão dos valores de tensão residual nesta região, em destaque no gráfico da Figura 74. Isto indica que a camada descarbonetada, identificada anteriormente, pode influenciar nas tensões residuais para maiores profundidades.

Figura 71 – Comparativo MO na borda da amostra, seção longitudinal, e tensões residuais obtidas pelo MFC.



Fonte: O autor.

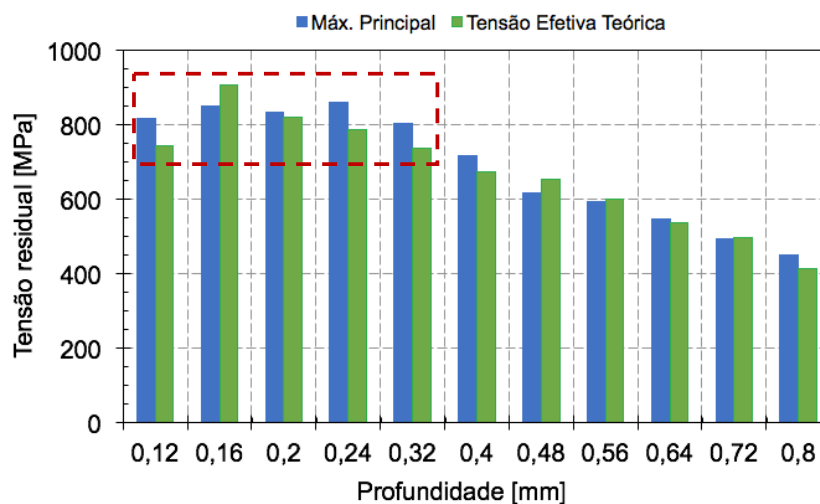
Para determinar a tensão de montagem foram aplicados para dois carregamentos, 150 MPa e 350MPa, na amostra montada em um dispositivo de flexão em quatro pontos. Os valores de deformação obtidos na desmontagem apresentaram-se semelhantes aos valores obtidos na montagem, porém com sinal oposto. Isto permitiu então a validação do modelo

proposto para determinar a tensão de montagem, uma vez que ao multiplicarmos o valor de deformação obtido na desmontagem por -1, obteve-se com sucesso os valores de tensão aplicados na montagem. Outro resultado importante descrito nesta etapa foi a determinação da tensão de montagem teórica ao longo da profundidade, construída com base na teoria da elasticidade. (HOFFMAN, 1989).

Na análise da tensão efetiva o MFC foi aplicado enquanto a amostra esteve montada no dispositivo de flexão em 4 pontos. Os carregamentos selecionados, 150 MPa e 350MPa, representaram, na superfície, aproximadamente 65% e 80% do valor da tensão de escoamento do material. O comparativo realizado entre tensão efetiva teórica e tensão efetiva experimental apresentou resultados bastantes coerentes. A maior diferença identificada ocorreu para o maior carregamento, 6%.

Inicialmente tinha-se como objetivo a aplicação de carregamentos de maior magnitude para verificar a influência do nível de tensão nos resultados obtidos pelo modelo de Kockelmann, porém durante os ensaios preliminares a amostra apresentou um nível de tensão residual muito elevado na superfície, em média 653 MPa, desta forma caso fossem aplicadas maiores cargas ocorreria o risco de plastificação do material na superfície. Entretanto, no comparativo entre as tensões máximas principais para tensão efetiva experimental e tensões máximas principais para tensão efetiva teórica identifica-se maior disparidade nos valores de tensão maior elevados, próximos a 70% da tensão de escoamento do material, conforme destaques na Figura 75.

Figura 72 – Comparativo tensão máxima principal e tensão efetiva teórica da Amostra 2.



Fonte: O autor.

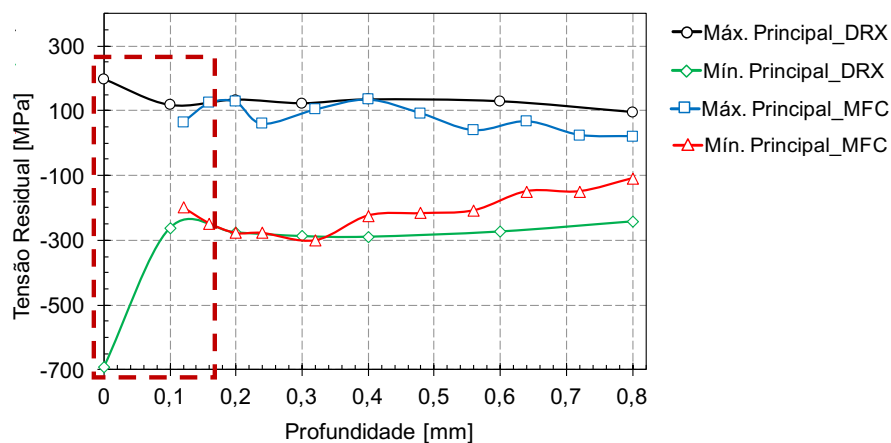
Os resultados obtidos na validação da metodologia proposta mostraram-se satisfatórios, principalmente levando em consideração que foi possível determinar os diferentes tipos de tensão na amostra em diferentes etapas e de forma distinta.

Na terceira e última etapa deste trabalho, a metodologia proposta foi aplicada em amostras de escala real de dutos flexíveis. Para efeitos comparativos os ensaios foram conduzidos em quatro amostras distintas. Todas as amostras foram retiradas de campos de operação marítimos, disponibilizadas pela Petrobras. Cada amostra possuía condições de operação distinta, sendo que as amostras 2 e 3 pertenciam a mesma linha de duto flexível, separadas 1 Km entre si.

Resultados preliminares apresentaram grande flutuação dos valores de tensão quando utilizada com a roseta de tamanho menor na aplicação do MFC. Sabe-se que o MFC apresenta restrições quanto a dimensão da roseta utilizada e a geometria da amostra em análise. Isto motivou um estudo específico sobre a influência do diâmetro de roseta utilizada nos resultados obtidos pelo MFC. Para tal, foram conduzidos ensaios comparando os resultados de tensão residual da roseta com diâmetro menor e a de tamanho maior com os resultados de DRX com remoção de camadas.

Para as rosetas de diâmetro menor as tensões mais próximas a superfície, na profundidade de 0,12mm, apresentaram maior diferença, até 200 MPa, quando comparados com os resultados obtidos por DRX. Entretanto, para maiores profundidades, 0,4mm, os resultados obtidos com os dois tamanhos de rosetas são muito próximos ao obtido por DRX, com diferença não superior a 60 MPa. Pode se verificar nos perfis de tensão obtido com a roseta maior um comportamento mais linear ao longo da profundidade, bastante semelhante aos obtidos com DRX, sendo os resultados obtidos pelo MFC inferiores aos obtidos por DRX, na média 71 MPa. Ao aplicar a DRX com remoção de camadas pode ser comprovado a inversão dos valores de tensão residual, com um grande aumento das tensões mínimas principais próximos a superfície, em detalhe na Figura 76. Nestas amostras não foram realizadas análises de microscopia óptica para verificar possível camada de descarbonetação.

Figura 73 – Comparativo tensão residual pelo MFC com DRX por remoção de camadas, Amostra 3, arame 45°.



Fonte: O autor.

Os primeiros resultados obtidos para os ensaios em escala real foram referentes a tensão efetiva. Foi verificado a existência uma grande variação da magnitude do estado de tensão efetiva entre as amostras. Comparando as tensões máximas principais, a Amostra 1 foi a que apresentou menor magnitude, 50 MPa, enquanto as amostras 2 e 3 apresentaram resultados superiores a 700 MPa, representando mais de 50% da tensão de escoamento do material das armaduras, e a Amostra 4 apresentou valor intermediário, 200 MPa para armadura interna e 305 MPa na externa.

Durante a dissecação do duto, foi aplicado o procedimento desenvolvido para análise da tensão de montagem. Os valores encontrados para tensão equivalente de von Mises nas amostras 2 e 3 foram próximos a 1300 MPa, acima de tensão de escoamento do material, indicando que houve deformação plástica nos arames da armadura de tração durante a desmontagem. Estas amostras, 2 e 3, pertenciam a mesma linha flexível, ou seja, foram fabricadas pelo mesmo fabricante com condições e parâmetros de produção semelhantes. Isto demonstra que os processos de fabricação e montagem influenciam diretamente na tensão de montagem das armaduras. Na Figura 77 é possível comparar o retorno elástico da armadura de tração das amostras 3 e 4, demonstrando que as armaduras da Amostra 3 possuíam grande energia armazenada e que há diferença no retorno elástico da armadura de tração a depender dos processos de fabricação e montagem.

Figura 74 – Retorno elástico dos arames da armadura de tração após retirada da capa polimérica, (a) Amostra 3 e (b) Amostra 4.



Fonte: O autor.

Após a dissecação do duto, com os arames da armadura de tração livre de esforços externos, foi realizada análise das tensões residuais por DRX e pelo MFC.

Na análise de tensão residual por DRX, em todas amostras os resultados encontrados apresentaram a magnitude das tensões mínimas principais muito maiores em módulo do que as tensões máximas. O nível de tensão residual em cada amostra é distinto, exceto para amostras 2 e 3, que é muito semelhante, em torno de 390 MPa para tensão equivalente de von Mises. Novamente, destaca-se o fato de que estas amostras passaram por processos de fabricação semelhantes. De certo modo, os resultados da análise de DRX se mostraram similares aos resultados que tinham sido encontrados nos arames utilizados como amostra de escala reduzida no início do trabalho. Esta seria uma indicação de que o mesmo fenômeno de descarbonetação na superfície do arame pode ter ocorrido nas amostras que foram retiradas de operação, o que destaca novamente a importância de um estudo específico para determinar a influência da camada de descarbonetação no estado de tensões residuais da superfície.

Os resultados obtidos pelo MFC revelaram diferentes níveis de tensão residual em cada amostra analisada. Os maiores níveis de tensão residual foram identificados na Amostra 3, sendo que próximo a superfície, para tensão equivalente de von Mises, a magnitude das tensões residuais é na ordem de 50% da tensão de escoamento do material. Diferente da análise com DRX, identificou-se diferença próxima de 100 MPa entre as tensões residuais ao longo da profundidade para as amostras 2 e 3. Embora pertençam a mesma linha, estão

separadas 1 Km entre si o que possibilita a exposição a diferentes condições de ambiente que podem vir a influenciar nas tensões residuais.

Por fim, foi realizado um comparativo entre os tipos de tensão analisado para cada amostra. Diferente do caso dos ensaios em escala reduzida, nos ensaios de escala real estabelecer um comparativo entre as diferentes técnicas é uma tarefa complicada de ser efetuada. Isto ocorre devido as tensões estarem orientadas em diferentes direções. Desta forma, foi necessário realizar a transformação das tensões analisados para longitudinal e transversal do arame. Conforme visto anteriormente devemos levar em consideração ainda a diferença de profundidade medida entre os métodos aplicados, sendo a tensões de montagem correspondentes aos valores logo na superfície do material enquanto as tensões efetivas e residuais se referem a distância de aproximadamente de 0,12 mm da superfície.

Comparando os resultados para tensão equivalente de von Mises, exceto para Amostra 1, a magnitude das tensões de montagem é mais representativa do que as tensões residuais. As tensões de montagem são mais atuantes na armadura de tração na longitudinal dos arames e os maiores resultados foram obtidos nas amostras 2 e 3, superiores a 650 MPa para as armaduras interna e externa. As tensões residuais são de maior magnitude no sentido transversal dos arames da armadura de tração. Comparando a tensão equivalente de von Mises os maiores resultados foram obtidos nas amostras 1 e 3. A Amostra 1 apresentou níveis de tensão residual, 179 MPa, próximo a magnitude das tensões residuais da armadura externa da Amostra 3, 206 MPa.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia capaz de efetuar uma análise dos diferentes tipos de tensão atuantes em armaduras de tração de dutos flexíveis de forma experimental. Este tipo de análise é de extrema relevância, uma vez que os resultados obtidos podem ser utilizados em diversas etapas como, por exemplo, a qualificação de novas linhas de dutos flexíveis, concepção de novos projetos ou avaliação de linhas existentes em operação.

Dos resultados obtidos neste trabalho, as conclusões mais relevantes são:

- O estudo revelou a existência de linhas de dutos flexíveis com diferentes níveis de tensão em suas armaduras de tração, em alguns casos com valores na ordem da tensão de escoamento do material. Demonstrando a importância do conhecimento preciso do estado de tensão ao qual este tipo de componente está solicitado para prevenção de danos à estrutura.
- Os parâmetros de fabricação e montagem da armadura de tração influenciam diretamente no seu estado de tensão efetivo, residual e de montagem.
- Os procedimentos desenvolvidos para análise de tensão efetiva e de montagem apresentaram resultados satisfatórios. Para tensão efetiva, a maior diferença entre o valor teórico calculado e o resultado obtido de forma experimental foi de 6%.
- Não possível determinar o erro de medição no MFC devido ao aumento do nível de tensão no método de Kockelmann pela falta de amostragem. Entretanto, na amostragem utilizada, pode ser identificado uma maior diferença entre os resultados teórico e experimental na medida que se obteve maiores valores de tensão, indicando que é possível a existência de erro devido a este aumento.
- No estudo aplicado sobre a influência do diâmetro da roseta no MFC, para a geometria de arame analisada nos ensaios realizados com o MFC a roseta com diâmetro de 5,12 mm apresentou resultados mais homogêneos.
- O comparativo entre as técnicas do MFC e DRX identificou coerência entre os resultados, com os valores encontrados pelo MFC pouco inferiores ao encontrado pelo DRX, na média ao longo da profundidade cerca de 20%.

- A caracterização microestrutural dos arames de escala reduzida revelou a presença de duas microestruturas distintas no material, sendo o núcleo formado por ferrita e perlita e uma região na superfície, próxima de 20 μ m, composta por ferrita. Esta diferença microestrutural é possivelmente relacionada ao mecanismo de descarbonetação na superfície do arame.
- Quanto mais próximo da superfície, maior a variação, para tensão equivalente de von Misses, da tensão efetiva e residual ao longo da circunferência do duto.
- Não há grande variação da tensão de montagem ao longo da circunferência de duto flexível. Sua maior magnitude ocorre no sentido longitudinal do arame, positiva. Em algumas amostras o nível da tensão de montagem encontrado foi de 1300 MPa, na ordem da tensão de escoamento do material.
- Há grande variação da magnitude das tensões residuais para cada amostra de dutos flexível retirada de operação. Em alguns casos as tensões residuais apresentaram valores que representaram 50% da tensão de escoamento do material na superfície.
- Os resultados para tensões residuais na superfície, próximos de 5 μ m, apresentaram as tensões mínimas principais de maior magnitude em módulo que as tensões máximas principais. Estas tensões residuais são possivelmente influenciadas pelo processo de descarbonetação da superfície do arame.
- Identificou-se uma região próxima entre 0,12 mm e 0,2 mm com inversão dos valores de tensão residual, indicando que a descarbonetação pode influenciar na tensão residual para maiores profundidades.

Por fim, o objetivo principal deste trabalho foi atingido pelo fato de que a metodologia de análise de tensão desenvolvida apresentou resultados significativos que permitiram determinar de forma distinta e com confiabilidade os diferentes tipos de tensão atuantes na armadura de tração de dutos flexíveis.

7. TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos por este estudo para análise de tensões em armaduras de tração, têm-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicar a metodologia proposta em diferentes etapas do processo de fabricação dos dutos flexíveis (bobinamento, rebobinamento, montagem sob o duto, pré-forma, antes e após o FAT) visando identificar a evolução do estado de tensão dos arames da armadura de tração.
- Avaliação da influência da descarbonetação no estado de tensões residuais de arames da armadura de tração.
- Estabelecer o comparativo das técnicas do MFC e DRX com outras técnicas de medição de tensão residual tais como, por exemplo, a difração por nêutrons e o método do contorno.
- Identificar o erro associado ao aumento do nível de tensão no MFC quando aplicado o método de Kockelmann para determinação de tensão residual através do desenvolvimento de uma amostra padrão com tensões residuais homogêneas ao longo da profundidade.
- Aplicar a técnica outras técnicas que possibilitem determinar a tensão efetiva *in-loco*, tal qual difração de raios-X com equipamento portátil.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

4SUBSEA. **Un-bonded flexible risers – recent field experience and actions for increased robustness**. Noruega. Novembro de 2013.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2010.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2011.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2012.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2013.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2014.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2015.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2016.

ANP. **Boletim da produção de petróleo e gás natural**. Rio de Janeiro, dezembro de 2017.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 17B**. Recommended practice for flexible pipe. 2002.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 17J**. Specification for unbonded flexible pipe. 2009.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 579**. Fitness for service. Washington, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-837**. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, Annual book of ASTM standards, Vol 03.01. ASTM Internacional, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A830/A830M**. Standard specification for plates, carbon steel, structural quality, furnished to chemical composition requirements. ASTM Internacional, 2018.

ASM INTERNATIONAL. **Chemical and Electrolytic Polishing, Metallography and Microstructures**. Vol 9, ASM Handbook, p. 281–293, 2004.

BAI, Y., BAI, Q. **Subsea pipelines and risers**. Edição 1. Elsevier. 2005.

BARNES, P. E. **An investigation into the corrosion fatigue behaviour of high strength carbon steel tensile armour wires**. 2014. 221 pg. Tese (PhD em Engenharia) – University of Manchester. Manchester, 2014.

BRITISH STANDARDS. **BS-7910**. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. 2005.

BUENO, A. **Avaliação das armaduras de tração de riser flexível durante ensaios axiais de tração e fadiga**. 2010. 155 pg. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2010.

CAMPELLO, G. C. **Metodologia de projeto para o sistema de ancoragem de conectores de dutos flexíveis e proposição de novas tecnologias**. 2014. 230 pg. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

CAMERINI, M. **Monitoramento de risers flexíveis através de técnica baseada em vibrações**. 2012. 94 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

CARDOSO, F. **Medição de tensões residuais a partir de um ensaio de flexão em quatro pontos**. 2012. 103 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2012.

CARTER, B., RONALDS, B. Deepwater Riser Technology. **Society of Petroleum Engineers**. SPE Asia pacific oil and gas conference and exhibition, Australia, Outubro de 1998.

CAVATI, R. **Gerenciamento inteligente da integridade de risers flexíveis utilizados na produção de petróleo e gás natural**. 2012. 102 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

DA SILVA, A. **Análise da influência da temperatura na rigidez à flexão de linhas flexíveis**. 2006. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

DE SOUSA, J., CAMPELLO, G., KWIETNIEWSKI, C., ELLWANGER, G., STROHAECKER, T. Structural response of a flexible pipe with damaged tensile armor wires under pure tension. **Marine Structures**. vol 39, pg 1-38, Julho de 2014.

DRUMOND, G., PASQUALINO, I, PINHEIRO, B., ESTEFEN, S. Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review. **Ocean Engineering**. vol 148, pg. 412 – 425, Novembro de 2017.

FERNANDO, U., DAVIDSON, M., YAN, K., ROY, M., PIRLING, T., WITHERS, P., FRANCIS, J. Evolution of residual stress in tensile armour wires of flexible pipes during pipe manufacture. **ASME 2017 36th International conference on ocean, offshore and arctic engineering**. Noruega, Junho de 2017.

FERNANDO, U., DAVIDSON, M., SIMPSON, C., PIRLING, T., YAN, K., CALLAGHAN, M., ROY, M., FRANCIS, J., WITHERS, P. Measurement of residual stress shakedown in pressure/tensile armour wires of flexible pipes by neutron diffraction. **ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. Canada, Junho de 2015.

GUO, B., LYONS, W., GHALAMBOR, A. **Petroleum Production Engineering**. 2 ed. Gulf Professional Publishing, 2017.

HAUK, V. **Structural and residual stresses analysis by nondestructive methods**. Elsevier, Amsterdam, 1997.

HERRMAN. Acessado em <http://www.wire-cablemachine.com/sale-10437499-reinforced-flat-wire-rigid-armouring-machine-of-submarine-flexible-pipe-production-line.html> em 11/04/2018.

HIBBELER, R. **Resistência dos materiais**. Edição 5, Pearson Education do Brasil, 2004.

HOFFMANN, K. **An introduction to measurements using strain gages**. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany. 1989.

KALENTICS, N., BOILLAT, E., PEYRE, P., ĆIRIĆ-KOSTIĆ, C., BOGOJEVIĆ, N., LOGÉA, R. Tailoring residual stress profile of Selective Laser Melted parts by Laser Shock Peening, **Additive Manufacturing**, vol. 16, pg. 90–97, Maio de 2017.

LEMOS, G. **Análise de tensões residuais em eixos automotivos do aço din 38b3 temperados por indução**. 2012. 70 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2012.

LEMOS, G., NUNES, R., DOLL, P., BERGMANN, L., STROHAECKER, T., SANTOS, J. Avaliação das Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Inconel 625 Obtidas Através da Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica, **Soldagem & Inspeção**. vol. 22, pg. 35-45, Abril de 2017.

LIANG, W., MURAKAWA, H., DENG, D., Investigation of welding residual stress distribution in a thick-plate joint with an emphasis on the features near weld end-start, **Materials and Design**, vol. 67, pg. 303–312. Fevereiro de 2015.

LIU, B., VILLAVICENCIO, R., SOARES, C. Experimental and numerical analysis of residual stresses and strains induced during cold bending of thick steel plates. **Marine Structures**. vol. 57, pg. 121–132. Outubro de 2017.

LOPÊS, J. **Estudo das tensões residuais decorrentes do processo de soldagem em chapas API 5L X80**. 2014. 23 pg. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2014.

LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses**. Fairmont Press, 1996.

MACHADO, C., **Perfis de tensão residual do aço duplex uns s32304 submetido a diferentes processos de soldagem tig e condições de tratamento térmico**. 2015. 117 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2012.

MAHMOUDI, A., GHASEMI, A. FARRAHI, G., SHERAFATNIA, K. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening. **Materials and Design**. vol. 90, pg 478–487, Janeiro de 2016.

MARTINS, C. **Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis para rolamentos**. 2004. 131 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2004.

MATHAR, J. **Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes**. ASME 56, vol. 4, pg. 249-254, 1934.

MORAIS, J. **Petróleo em águas profundas: Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. Instituto de pesquisa econômica aplicada. Brasília, 2013.

MIYAZAKI, M. **Stress analysis of a flexible pipe tensile armor wire during and after the end-fitting mounting**. 2015. 121 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, outubro de 2015.

NEGREIROS, L. **Avaliação da resistência à fadiga e corrosão-fadiga da armadura de tração de um riser flexível retirado de operação.** 2016. 197 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

NUNES, R. **Análise e tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar as distorções pós processamento.** 2008. 124 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

PELIZZARI, E. **Estudo da incerteza de medição na análise das tensões residuais através do método do furo cego.** 2013. 103 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

PETROBRAS, <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/investimentos-respostas-a-deutsche-welle.html>, 2014. Acesso em: 05 de abr. 2018.

PETROBRAS, <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia/plano-de-negocios-e-gestao/>, 2017. Acesso em: 05 de abr. 2018.

RETO, M. Acessado em <https://www.plastico.com.br/plastico-offshore-riquezas-pre-sal-abrem-campos-plasticos-alto-desempenho/4/> em 28/03/18.

ROCHA, A.; NUNES, R.; HIRSCH, T. Comparação entre difração de raios X e método do furo cego para medição de tensões residuais em barras cilíndricas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol.14 no.3, Rio de Janeiro. Setembro de 2009

ROSSINI, N., DASSISTI, M., KHALED, B., ABDUL-GHANI, O. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials & Design**. vol. 35, pg. 572-588, Novembro de 2012.

SANTOS, F. PIRES, F., CLEMENTS, R., CLEVELARIO, J. SHELDRAKE, T., DE SOUZA, L. KENEDI, P. Corrosion fatigue behavior of flexible pipe tensile armor wires in a co2 environment. **Materials Science Forum**. vol. 758, pg. 77-82, Junho de 2013.

SCHWARZ, T., KOCKELMANN, H.. Die Bohrlochmethode–ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen. **MTB**, Stuttgart, pg. 33–38. 1993.

SETHILMURUGAN, A., ARASU, K. Residual stress measurement using hole-drilling method. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**. vol. 03, pg 448-450, Abril de 2016.

SPEAKMAN, S. Basics of X-Ray Powder Diffraction, Training to Become an Independent User of the X-Ray SEF at the Center for Materials Science and Engineering at MIT. Massachusetts Institute of Technology, 2017.

STORY, M., WEBLER, B. Effect of surface microstructure on oxidation of a CMnSi advanced high strength steel. **ISIJ International**. vol 57, pg. 1468-1475. Abril de 2017.

TENAX. Acessado em <http://www.tenax.com.br/tenax/produtos/chapas-e-placas-de-aco/sae-1070/> dia 18/10/17

TURIBUS, S. Análise por difração de raios-X do estado das tensões residuais em chapas de aço inoxidável duplex após soldagem. 2014. 109 pg. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

VISHAY, Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method. Tech Note TN-503, Vishay, 2017.

VISHAY, Strain gage rosettes: selection, application and data reduction. Tech Note TN-515, Vishay, 2014.

VISHAY, RS-200 Micro-Measurements, Milling Guide for Residual Stress Measurements. Vishay Precision Group, Inc., 2014.

VISHAY, Surface Preparation for Strain Gage Bonding. Application Note B-129-8, 2009.

APÊNDICE A - PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA ANÁLISE DE TENSÃO NA ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS

Com o intuito de facilitar a aplicação desta metodologia, neste apêndice é descrito o procedimento operacional de cada uma das etapas a serem desenvolvidas para análise de tensão em armaduras de tração de dutos flexíveis.

1. SELEÇÃO DA AMOSTRA

- 1.1 Posicionar da amostra nivelada sob cavaletes.
- 1.2 Selecionar do local de abertura da janela para análise de tensão.
- 1.3 Realizar abertura de uma janela com aproximadamente 150mm de largura na capa externa da amostra de modo a permitir acesso à armadura de tração externa.
- 1.4 Selecionar os arames utilizados como pontos de medição ao longo da circunferência do duto.

2. ANÁLISE DA TENSÃO EFETIVA

- 2.1 Efetuar a instrumentação dos arames selecionados com ERE's especiais para aplicação do MFC.
- 2.2 Executar o ensaio do MFC na armadura externa de acordo com o procedimento estabelecido na norma ASTM E-837. (ASTM, 2002).
- 2.3 Realizar instrumentação dos arames onde anteriormente foi determinada a tensão efetiva com sensores ERE triaxiais.
- 2.4 Iniciar o monitoramento das deformações com ERE nos arames da armadura externa.
- 2.5 Efetuar a abertura da janela interna, em posição circunferência defasada em 45° dos arames selecionados da armadura externa.
- 2.6 Finalizar monitoramento de deformações com os ERE.
- 2.7 Instrumentar os arames da armadura interna selecionados ao longo da circunferência do duto com ERE's especiais para aplicação do MFC.
- 2.8 Realizar ensaio do MFC para análise de tensão efetiva na armadura interna, conforme procedimento estabelecido na norma ASTM E-837. (ASTM, 2002).
- 2.9 Tratar os dados do ensaio do MFC matematicamente utilizando o modelo de Kockelmann.

3 ANÁLISE DA TENSÃO DE MONTAGEM

- 3.1 Realizar instrumentação dos arames da armadura interna, os mesmos onde foram efetuadas medições para tensão efetiva, com sensores ERE triaxiais.
- 3.2 Iniciar o monitoramento das deformações com os ERE's das armaduras interna e externa.
- 3.3 Realizar o seccionamento transversal da amostra, aproximadamente 500mm distante de cada lado da janela aberta anteriormente.
- 3.4 Efetuar a soldagem da camada Zeta para evitar o desprendimento desta camada durante o procedimento de remoção da capa externa.
- 3.5 Efetuar corte na secção longitudinal da capa polimérica do duto, liberando os arames de esforços externos.
- 3.6 Finalizar o monitoramento das deformações quando os arames estiverem livres.
- 3.7 Efetuar análise da tensão de montagem através de tratamento matemático dos dados, utilizando as equações descritas pela norma técnica TN-515. (VISHAY, 2014). Atentar nesta etapa para somar aos valores de tensão de montagem da armadura externa, os valores obtidos no monitoramento das deformações durante a abertura da janela interna, ocorrido na etapa 2.4 de análise da tensão efetiva.

4 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL

- 4.1 Selecionar os arames onde foi efetuada análise da tensão efetiva e de montagem para análise de tensão residual.
- 4.2 Seccionar os arames selecionadas em amostras com comprimento de 150mm, sendo o centro desta amostra o ponto de medição onde foi anteriormente determinada a tensão efetiva.
- 4.3 Efetuar análise de tensão residual por DRX em um ponto distante em aproximadamente 75mm do ponto de medição de tensão efetiva.
- 4.4 Realizar tratamento matemático dos resultados obtido pelo DRX.
- 4.5 Efetuar a instrumentação das amostras com ERE para aplicação do MFC, em um ponto afastado 30mm do ponto medido pela tensão efetiva.
- 4.6 Executar o ensaio do MFC de acordo com o procedimento estabelecido na norma ASTM E-837. (ASTM, 2002)
- 4.7 Realizar tratamento matemático dos dados de ensaio do MFC utilizando o modelo de Kockelmann.