



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Instituto Politécnico

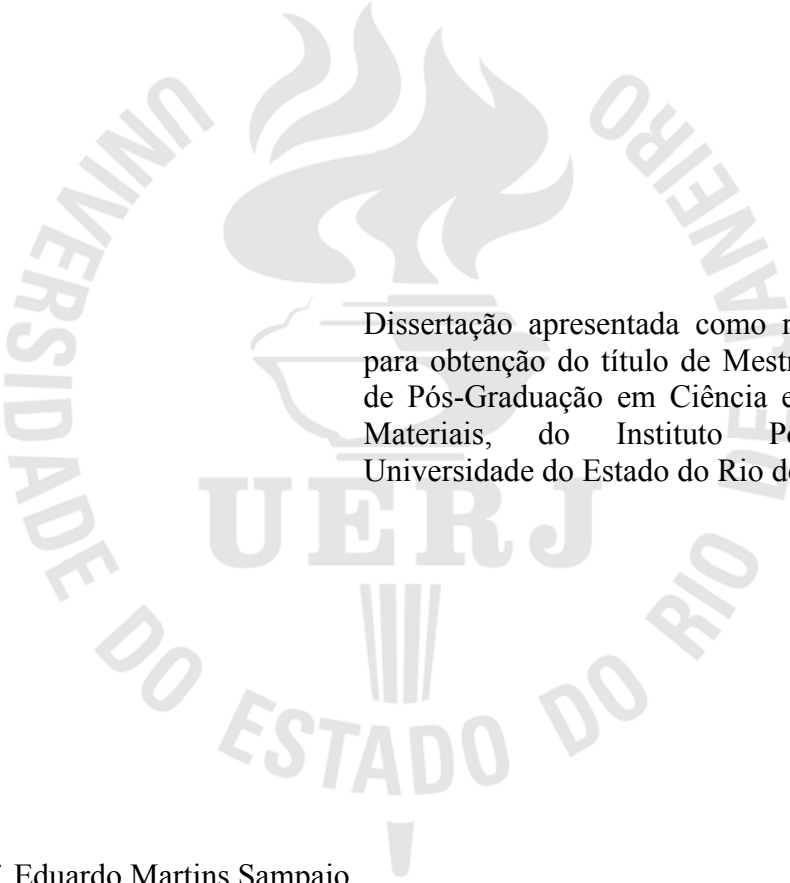
Marcelo Badini Daflon

**Estudo de aderência de arames da armadura de
tração em conectores de dutos flexíveis**

Nova Friburgo
2010

Marcelo Badini Daflon

**Estudo de aderência de arames da armadura de
tração em conectores de dutos flexíveis**



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo
2010

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

D124

Daflon, Marcelo Badini.

Estudo da aderência de arames da armadura de tração em conectores de dutos flexíveis/ Marcelo Badini Daflon. - 2010.

110 f. : il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Oleodutos submarinos - Acoplamentos – Teses.
2. Arame – Adesão – Ensaios - Teses. 3. Arame – Resistência à tração – Teses. 4. Ancoragem (Engenharia de estruturas) – Teses. 5. Risers (Fundição) – Teses.
I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 621.643.4

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Marcelo Badini Daflon

**Estudo de aderência de arames da armadura de
tração em conectores de dutos flexíveis**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 08 de Setembro de 2010

Banca examinadora:

Prof. Eduardo Martins Sampaio, D.Sc (Orientador).
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico

Prof. Norberto Cella, D. Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico

Prof. Silvio de Barros D. Sc.
Universidade Federal da Paraíba

Nova Friburgo
2010

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

Célia Maria Badini Daflon e

Edesio Daflon.

A meus irmãos,

Eduardo Badini Daflon e

Renata Badini Daflon.

A minha noiva,

Camila Coelho Moraes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar saúde e força para poder concluir meus estudos, sabendo de todas as dificuldades que tive que enfrentar para poder realizar este curso com dedicação e comprometimento.

Ao meu amigo, José Maurício, por ter me apoiado na decisão de cursar o mestrado.

Ao meu Coordenador, Robson Vieira Marnet, e ao Gerente Setorial, Mauro Vitor, por acreditarem na minha capacidade, assim podendo associar o trabalho com o mestrado gerando o conhecimento para mim e também para a empresa.

Ao Consultor Técnico, Joilson Monteiro, pela ajuda técnica e pela credibilidade em mim depositada.

Ao meu orientador Eduardo Martins Sampaio pela atenção e contribuição na solução dos problemas abordados no projeto.

Ao professor Gil Carvalho no apoio pela elaboração de relatórios técnicos e carta de recomendação para o curso.

Ao Laboratório de Adesão e Aderência pela disposição de profissionais para auxílio de minhas atividades, em especial o técnico Aselmo Luiz Duarte.

Ao técnico Ricardo Hudson, que me auxiliou nos ensaios de tração operando o equipamento.

Ao técnico, Umberto, pelo apoio nos desenhos e na fabricação das peças para ensaios de tração.

Ao meu amigo e discente do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Ney Robson Rohen, pelo envio de materiais enquanto estava no trabalho.

*“Se você conta com alguém que tem menos qualidades que você,
isso levará à sua degeneração.*

*Se você conta com alguém com qualidades iguais às suas,
você permanece onde está.*

*Somente quando conta com alguém cujas qualidades são superiores às suas
é que você atinge uma condição sublime.*

Dalai Lama

RESUMO

DAFLON, Marcelo Badini. Estudo da aderência de arames da armadura de tração em conectores de dutos flexíveis. 2010. 110 f Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.

Este projeto tem o objetivo de apresentar o estudo dos arames da armadura de tração que são empregados no transporte de óleo, gás e umbilicais hidráulicos na indústria petrolífera. Este estudo foi desenvolvido sob a necessidade de melhor ancoragem dos arames da armadura de tração de modo a garantir que, mesmo após a ruptura do arame dentro do conector não haverá o escorregamento do mesmo provocando a queda do duto flexível. Assim sendo, foi estabelecido o estudo de aderência da interface dos arames da armadura de tração dos dutos flexíveis. Com os ensaios concluídos se estudou um novo procedimento para o melhoramento de aderência mecânica dos arames com a resina epóxi. Após os ensaios de aderência e adesão concluídos foi realizado ensaio de tração em cada arame da armadura de tração sob sua montagem no conector de extremidade para verificação de carregamento que chegam nos ganchos dos arames da armadura de tração. Os estudos realizados no conector de extremidade de 2,5” demonstram que os ganchos dos arames da armadura de tração são de grande importância para a integridade estrutural do duto flexível, visto que o cone de resina formado dentro do conector não está em contato com toda a área dos arames das armaduras de tração.

Palavras-chave: Conector de extremidade; Duto flexível; Arame da armadura de tração.

ABSTRACT

This project aims to present the study of tensile armor wires usually employed in the transport of oil, gas and hydraulic umbilicals in the petroleum industry. This study was developed as a need for better anchoring of the tensile armor wires in order to guarantee that even after the rupture of the wire within the connector it will not slip causing the fall of the flexible riser. Thus was established the adhesion study of the interface of the tensile armor wires of the flexible risers. After the end of the tests a new procedure for improving mechanical adhesion between the wires and the epoxy resin was studied. After the end of the adhesion tests tensile test was performed on each wire of the tensile armor under its mounting on the end fitting for checking the loading that reaches the hook of the armor wires. The trials performed in the 2.5" end fitting show that the tensile armor wire hooks are of great importance for the structural integrity of the flexible riser, as there is no contact between the resin cone formed within the end fitting and the tensile armor wires area.

Keywords: End fitting; Flexible riser; Tensile armor wire.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Composição estrutural do duto flexível.....	23
Figura 2.2: Seção do duto flexível.....	24
Figura 2.3.: Perfil da camada da carcaça intertravada.....	24
Figura 2.4: Assentamento da camada carcaça intertravada.....	25
Figura 2.5: Extrusão da barreira de pressão.....	26
Figura 2.6: Assentamento da armadura de pressão.....	27
Figura 2.7: Perfil da armadura de pressão.....	27
Figura 2.8: Bobina de assentamento das armaduras de tração.....	28
Figura 2.9: Final da extrusão da capa externa.....	29
Figura 2.10: Configuração final do uraduct.....	29
Figura 2.11: Aplicação de dutos flexíveis.....	30
Figura 2.12.: Arranjo submarino de um sistema de produção.....	31
Figura 2.13: Suporte de conectores emerso.....	31
Figura 2.14: Conector na posição vertical.....	32
Figura 2.15: Desenho esquemático do conector de extremidade.....	33
Figura 2.16: Representação de sítios de ancoragem.....	35
Figura 2.17: Representação esquemática do modelo de uma gota de líquido em repouso sobre uma superfície sólida.....	36
Figura 2.18: Representação da molhabilidade.....	37
Figura 2.19: Representação da ligação química.....	38

Figura 3.1: Dobramento dos ganchos dos arames da armadura de tração.....	40
Figura 3.2: Fechamento do flange traseiro.....	41
Figura 3.3: Injeção de resina epóxi no conector de extremidade.....	41
Figura 3.4: Corte da jaqueta e do preenchimento da resina epóxi.....	42
Figura 3.5: Escorregamento dos arames dentro da resina epóxi	43
Figura 3.6: Vista inferior do final do dobramento dos ganchos.....	43
Figura 3.7: Vista superior do final do dobramento dos ganchos.....	44
Figura 3.8: Vista interna do final do dobramento dos ganchos.....	44
Figura 4.1: Sequência do estudo de aderência.....	45
Figura 4.2: Moldes do corpo de prova.....	46
Figura 4.3: Secção do molde definitivo.....	47
Figura 4.4: Base de fixação do corpo de prova.....	47
Figura 4.5: Arame da armadura de tração.....	48
Figura 4.6: Aplicação de desmoldante.....	49
Figura 4.7: Moldes do corpo de prova.....	49
Figura 4.8: Suporte do corpo de prova.....	50
Figura 4.9: Ensaio de arrancamento na máquina de tração.....	51
Figura 4.10: Ensaio de arrancamento.....	51
Figura 5.1: Tensão em função da deformação para o arame íntegro.....	53
Figura 5.2: Arame da armadura de tração após desfazimento da hélice.....	54
Figura 5.3: Tensão de ruptura após desfazimento de hélice.....	55
Figura 5.4: Força de aderência nos cp's 1, 2, 3, 4 e 5.....	56

Figura 5.5: Preparação dos arames com a profundidade de 200 mm.....	58
Figura 5.6: Base para preenchimento de resina.....	58
Figura 5.7: Força de aderência ao arrancamento dos arames encravados na resina epóxi com perfil helicoidal sem tratamento superficial.....	59
Figura 5.8: Abertura de resina em arames com perfil em hélice sem tratamento superficial.....	60
Figura 5.9: Deslizamento do arame sobre a resina.....	61
Figura 5.10: Perfil com rugosidade e desmoldante.....	62
Figura 5.11: Perfil de rugosidade.....	62
Figura 5.12: Perfil do arame sem tratamento superficial no microscópio (50x).....	63
Figura 5.13: Perfil de rugosidade no microscópio (50x).....	63
Figura 5.14: Aplicação de silano após limpeza com acetona.....	64
Figura 5.15: Força de aderência ao arrancamento dos arames encravados na resina epóxi com perfil helicoidal e tratamento superficial.....	65
Figura 5.16: Ruptura dos arames na interface com a resina.....	66
Figura 5.17: Abertura de resina em arames com perfil em hélice com tratamento superficial.....	67
Figura 5.18: Visualização da superfície no microscópio (50x).....	68
Figura 5.19: Arames com perfil linear.....	69
Figura 5.20: Força de aderência dos arames com perfil linear com tratamento superficial.....	70
Figura 5.21: Rupturas dos arames com a interface com a resina.....	71
Figura 5.22: Força de aderência para profundidade de 50 mm de ancoragem.....	72

Figura 5.23: Deslocamento do arame sobre a resina para o comprimento de ancoragem de 50 mm.....	73
Figura 5.24: Força de aderência para profundidade de 55 mm de ancoragem.....	74
Figura 5.25: Comprimento mínimo de ancoragem de 55 mm.....	75
Figura 6.1: Desenho esquemático da mesa de ajuste sobre a máquina de tração.....	77
Figura 6.2: Fixação da chapa da mesa sobre a máquina de tração.....	78
Figura 6.3: Abertura de janela no conector de extremidade.....	79
Figura 6.4: Montagem do conector sobre a mesa de ajuste.....	80
Figura 6.5: Vista lateral do conector sobre a mesa de ajuste.....	81
Figura 6.6: Força de aderência nos arames 1, 2 e 3.....	82
Figura 6.7: Verificação do ângulo de tração.....	83
Figura 6.8: Identificação dos arames correspondentes.....	83
Figura 6.9: Força de aderência nos arames 4, 5 e 6.....	84
Figura 6.10: Arames a serem tracionados.....	84
Figura 6.11: Força de aderência dos arames 7 e 8.....	85
Figura 6.12: Abrasão na resina.....	85
Figura 6.13: Instalação de <i>strain gages</i>	86
Figura 6.14: Força de aderência dos arames 9, 10, 11 e 12.....	87
Figura 6.15: Deslocamento do <i>strain gage</i> para dentro da resina.....	87
Figura 6.16: Deformação em função do tempo no arame 9.....	88
Figura 6.17: Força em função do tempo no arame 9.....	89
Figura 6.18: Deformação em função do tempo no arame10.....	90

Figura 6.19: Escorregamento da fita bandit.....	90
Figura 6.20: Força em função do tempo no arame10.....	91
Figura 6.21: Ganchos cobertos com resina epóxi.....	92
Figura 6.22: Força de aderência nos arames 13, 14, 15, 16, 17 e 18.....	92
Figura 7.1: Janela sobre a jaqueta do conector.....	95
Figura 7.2: Modelo de janela aberta.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Composição química do arame em peso (%). Propriedades do arame fornecidas pela TECMETAL – Macaé.....	48
Tabela 4.2: Propriedades mecânicas em tração.....	48
Tabela 5.1: Ensaio de tração dos arames íntegros.....	53
Tabela 5.2: Tensão após desfazimento da hélice.....	54
Tabela 5.3: Resistência ao arrancamento dos arames com perfil linear.....	56
Tabela 5.4: Tensão ao arrancamento dos arames com perfil helicoidal sem tratamento superficial.....	59
Tabela 5.5: Tensão ao arrancamento dos arames com perfil helicoidal e tratamento superficial	64
Tabela 5.6: Tensão ao arrancamento dos arames com perfil linear e tratamento superficial.....	69
Tabela 5.7: Tensão ao arrancamento do arame para uma profundidade de ancoragem de 50 mm.....	72
Tabela 5.8: Tensão ao arrancamento do arame para uma profundidade de ancoragem de 55 mm.....	74
Tabela 6.1: Força de aderência nos arames 1, 2 e 3.....	82
Tabela 6.2: Força de aderência nos arames 4, 5, 6, 7 e 8.....	86
Tabela 6.3: Força de aderência nos arames 9, 10, 11 e 12.....	88
Tabela 6.4: Força de aderência nos arames 13, 14, 15, 16, 17 e 18.....	93
Tabela 6.5: Força de aderência de todos ensaios dos arames no conector.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS

- γ_{SV} - energia livre superficial do sólido em presença do vapor do líquido L
- γ_{SL} - energia livre superficial da fase sólido-líquido (interface)
- γ_{LV} - energia livre superficial da fase sólido-líquido
- θ - ângulo de contato
- τ - tensão média tangencial de aderência
- F_{\max} - força máxima de arrancamento
- l - largura do arame da armadura de tração
- e - espessura do arame da armadura de tração
- cp - corpo de prova
- ϵ_l - deformação
- F - força
- A - área da seção transversal
- E - módulo de elasticidade, para o aço 210 GPa

LISTA DE ABREVIATURAS

Manifold - Estrutura metálica apoiada no fundo do mar e que acomoda válvulas e acessórios que permitem que este esteja conectado à árvore-de-natal molhada, outros sistemas de produção, de tubulações e risers.

FPSO – *Floating Production Storage and Offloading* é um tipo de navio utilizado pela indústria petrolífera para a exploração (produção), armazenamento petróleo e/ou gás natural e escoamento da produção por navios aliviadores.

FSO – *Floating Storage and Offloading* é um tipo de navio utilizado pela indústria petrolífera para a o armazenamento e escoamento de petróleo e/ou gás natural.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Histórico de instalação de dutos flexíveis.....#	20
1.2	Instalação de duto flexível no Brasil.....#	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Duto flexível.....#	23
2.1.1	<u>Carcaça Intertravada</u>	24
2.1.2	<u>Barreira de Pressão</u>	25
2.1.3	<u>Armadura de Pressão (Zeta)</u>	26
2.1.4	<u>Armadura de Tração</u>	27
2.1.5	<u>Capa Externa</u>	28
2.1.6	<u>Outerwrap e/ou Uraduct</u>	29
2.2	<i>Risers e flowlines</i>.....#	30
2.3	Conector de extremidade.....#	31
2.4	Compósito.....#	34
2.5	Resinas epóxis.....#	34
2.6	Mecanismo de adesão.....#	34
2.7	Molhabilidade.....#	36
2.8	Rugosidade e tratamento de superfície.....#	38
2.9	Ligação química.....#	38
2.10	Agentes de acoplamento.....#	39

3	HISTÓRICO DE PROBLEMAS NO CONECTOR DE EXTREMIDADE.....	40
3.1	Final de um procedimento de montagem de conector de extremidade.....#	40
3.2	Falha de dutos flexíveis.....#	41
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	45
4.1	Materiais e métodos.....#	48
4.2	Confeção dos corpos de prova.....#	50
4.3	Procedimento do ensaio de arrancamento.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.1	Verificação de resistência mecânica.....#	54
5.2	Primeiro ensaio de arrancamento.....#	55
5.3	Segundo ensaio de arrancamento.....#	57
5.3.1	<u>Preparação dos corpos de prova.....</u>	57
5.4	Terceiro ensaio de arrancamento.....#	61
5.5	Quarto ensaio de arrancamento.....#	69
5.6	Comprimento mínimo de ancoragem.....#	71
6	ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS ARAMES COM CONECTOR MONTADO.....	76
6.1	Preparação do conector de extremidade.....#	79
6.2	Ajuste do conector sobre a mesa.....#	80
6.3	Primeiro ensaio dos arames.....#	81
6.4	Segundo ensaio dos arames.....#	83
6.5	Terceiro ensaio dos arames.....#	86
6.5.1	<u>Primeiro ensaio com <i>strain gage</i>.....</u>	88

6.5.2	<u>Segundo ensaio com <i>strain gage</i></u>	89
6.6	Quarto ensaio dos arames.....#	91
7	DISCUSSÕES SOBRE ENSAIO DE CONECTOR	94
8	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS	98
	ANEXO A: PROPRIEDADES DA RESINA SW404 BR	100
	APÊNDICE 1: MOLDE DO CORPO DE PROVA	102
	APÊNDICE 2: BASE CORPO DE PROVA	104
	APÊNDICE 3: DESENHOS DA MESA DE AJUSTE DO CONECTOR DE EXTREMIDADE	106
	Mesa sobre a máquina de tração.....	107
	Mesa inclina da chapa de deslocamento do conector (Vista lateral).....	108
	Mesa inclina da chapa de deslocamento do conector (Vista inferior).....	109
	Mesa inclina da chapa de deslocamento do conector (Vista frontal).....	110
	Mesa de ajuste horizontal.....	111
	Mesa de ajuste vertical e rotacional.....	112

1 INTRODUÇÃO

A produção submarina de petróleo e gás é, e tem sido, um constante motivador desafio para a indústria, no qual aspectos como dificuldades ambientais e locação são críticos. O aumento da utilização de sistemas submarinos de produção tem implicado em um maior emprego de dutos flexíveis e cabos umbilicais na indústria *offshore*.

Com a redução das reservas em águas rasas, a indústria do petróleo expandiu a exploração para águas profundas ampliando os processos e equipamentos envolvidos na exploração e produção de petróleo.

A crescente demanda destes *risers* capazes de operar em lâminas d'águas cada vez mais profundas tem incentivado a realização de pesquisas, principalmente em relação à redução do peso e conseqüentemente das cargas axiais.

A indústria petrolífera está em constante desenvolvimento para que novas técnicas sejam empregadas com o objetivo de tornar viável a produção dos campos descobertos em águas profundas. E entre estes desenvolvimentos, os dutos flexíveis tem o desafio de viabilizar a exploração de petróleo onde, por exemplo, o próprio peso pode vir a ser um limitador de projeto [1].

1.1 Histórico de instalação de dutos flexíveis

Com o registro de utilização desde a segunda Guerra Mundial para viabilizar o transporte de combustível entre a Inglaterra e França, o duto flexível, tem a sua tecnologia melhorada de acordo com as necessidades de escoamento. Neste sentido, as atuais estruturas existentes começaram a serem desenvolvidas desde 1970 [2].

Os dutos flexíveis são aplicados para conectar poços aos “*manifolds*”, poços aos Navios de armazenagem e escoamento de petróleo e/ou gás natural (FSO's), “*manifolds*” aos SFO's, etc. Além de serem utilizados para transporte de gás e óleo nas unidades *offshore*, também são utilizados para produção, injeção de água, produtos químicos e gás, produção de óleo e gás.

Conforme a necessidade do cliente, especificações de projeto, tais como: instalação, operação e desmobilização, o duto flexível pode variar o diâmetro, comprimento, estruturas de camadas e materiais de composição.

Tais condições, inclusive, são julgadas fundamentais desde a implantação do primeiro poço, em West Cameron, a 17 metros de profundidade. O projeto de instalação e operação foi realizado sem auxílio de mergulhadores, demonstrando a viabilidade do uso do equipamento e dutos em profundidades não alcançáveis pelo ser humano.

Sua utilização apresenta diversos benefícios, dentre os quais podem ser destacados.

- Antecipação da produção através de sistemas piloto de produção;
- Reutilização dos dutos em diferentes sistemas, seja de produção, injeção, etc.;
- Facilidade de instalação, contemplando a possibilidade de lançamento de três dutos simultaneamente;
- Capacidade de lançamento de grandes trechos de dutos numa única campanha de um navio [3].

1.2 Instalação de duto flexível no Brasil

O duto flexível sempre teve importância fundamental no sistema de exploração e produção brasileiro. Este tipo de tubo não é apenas mais fácil de manusear do que as tubulações rígidas, mas também ao transporte, instalação e operação. Sua utilização apresenta diversos benefícios, dentre os quais podem ser destacados a antecipação da produção através de sistemas pilotos de produção e reutilização de dutos em diferentes sistemas.

O histórico de utilização do duto flexível coincide com a descoberta do primeiro campo de exploração na bacia de Campos, em 1975. Em 1976, a Petrobras começa a realizar lançamento de dutos flexíveis através de empresas especializadas. A profundidade de instalação destes equipamentos inicialmente era de aproximadamente 100 m.

Com o passar do tempo, a descoberta de reservatórios, e sua conseqüente exploração, tende para águas cada vez mais profundas. As tecnologias de fabricação de flexíveis são aperfeiçoadas e diferentes estruturas são criadas em função das necessidades particulares de cada projeto. Diante do intenso desenvolvimento de novas estruturas de flexíveis, surge a necessidade de padronização do produto e elaboração de normas específicas torna-se indispensáveis.

Desta forma, a norma API Spec 17 J é utilizada para a normalização de dutos flexíveis pelas indústrias, sendo adotada como padrão para especificação, projeto, fabricação, seleção de matérias e testes de produtos [4].

No início da década de 90, a exploração a 900 metros de profundidade já é uma técnica dominada, com dez poços e uma rede de 168 km de flexíveis. E em meados desta mesma década, a instalação em lâminas d'água de 1500 metros já era uma realidade. Pouco tempo depois, no final dos anos noventa, a instalação de dutos flexíveis atinge marcas próximas aos 2000 metros. O progresso dos primeiros anos do novo século é veloz, já que a rede de dutos flexíveis passa a ser composta por aproximadamente 2500 km de linhas de fluxo e 1500 km de umbilicais.

Com este histórico, os dutos flexíveis têm tido um importante papel na história de exploração e produção de petróleo no Brasil, construindo gradualmente uma reputação de confiança e viabilidade econômica. Nenhum lugar do mundo tem uma rede de dutos flexíveis como à instalada na bacia de Campos.

Este fator, agregado à variação de parâmetros determinantes num cenário dinâmico, promove a constante necessidade de otimização das configurações do arranjo submarino de exploração e produção [5].

Estas condições são ainda mais críticas na exploração em águas ultra profundas e a consequência disto é a exigência de um salto de desenvolvimento que requer não só estruturas mais resistentes de dutos flexíveis, como também avanços em todos os elementos que fazem parte do processo de exploração e produção de petróleo “offshore”. É necessário que a exploração e produção se tornem mais que tecnicamente possíveis: deve ser economicamente viável.

Esta perspectiva representa a necessidade de avanço dos projetos de dutos flexíveis atuais, bem como dos conceitos e equipamentos envolvidos na instalação dos mesmos, já que a barreira dos 2000 metros é comumente apresentada como o limite técnico-econômico para instalação [6].

Atualmente, cerca de 80% do petróleo brasileiro e produção de gás é transportado através de tubos flexíveis. Hoje existe uma rede de 5.300 km destas tubulações, ligando árvores de natal, manifolds, plataformas fixas e semi-submersível, FPSO e monobóias, e cerca de 1.200 risers flexíveis em operação [7].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Duto flexível

O Duto Flexível é uma estrutura composta por diversas camadas metálicas e plásticas que, trabalhando em conjunto, propiciam resistência e estanqueidade ao duto sem comprometer a necessária flexibilidade para a condução de diversos fluidos da indústria do petróleo, principalmente, na produção offshore. A estrutura é feita “sob medida”, isto é, construída de acordo com a necessidade do comprador. E as camadas da linha flexível têm funções bem determinadas. Podendo ser do tipo *smooth bore* (interior liso), tendo como a primeira camada a barreira de pressão, ou *rough bore* (interior rugoso), tendo como a primeira camada a carcaça intertravada. A escolha dos materiais e dos perfis a serem utilizados segue critérios próprios. Na Fig. 2.1 é mostrado a estrutura de um duto flexível [8].

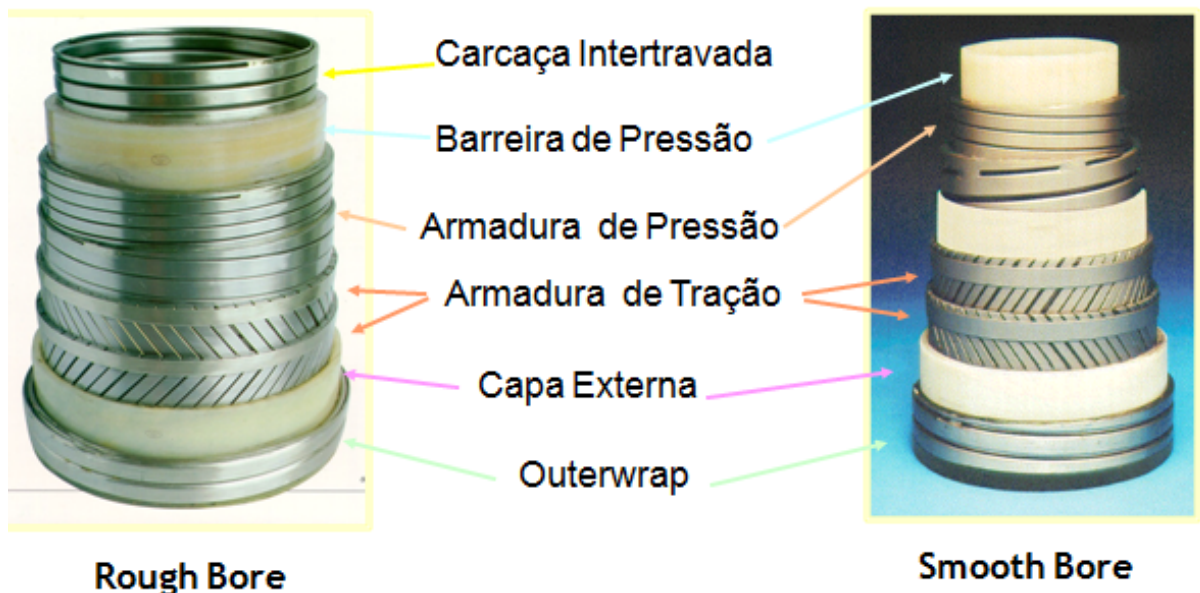


Figura 2.1: Composição estrutural do duto flexível (Petrobras)

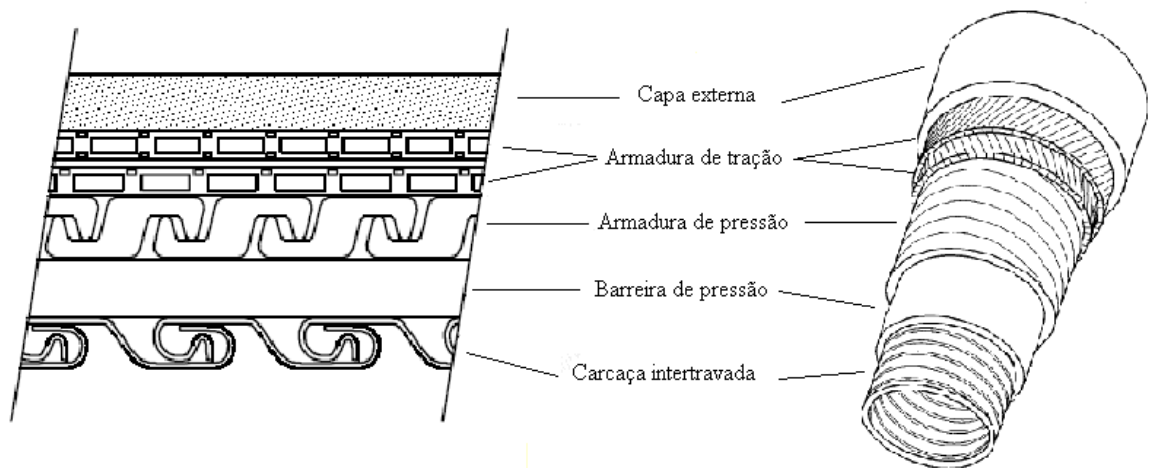


Figura 2.2: Seção do duto flexível [9]

2.1.1 Carcaça Intertravada

Camada não estanque que compõem os dutos flexíveis composta por um elemento contínuo e perfilado, Fig. 2.4. Esta camada tem o objetivo de impedir que a seção seja esmagada por efeito da pressão externa ou colapse por diferencial de pressão. A carcaça é de aço inox, pois está exposta à ação química de fluidos corrosivo que são transportado. A Fig. 2.3 mostra o perfil da carcaça intertravada [8].

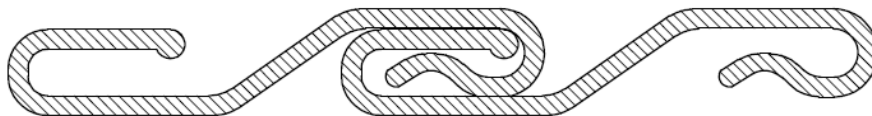


Figura 2.3: Perfil da camada da carcaça intertravada [9]



Figura 2.4: Assentamento da camada carcaça intertravada (Petrobras)

2.1.2 Barreira de Pressão

Camada estanque do duto flexível cujo material polimérico, em geral poliamida, possibilita pequenas permeações a gases. Presente entre a carcaça intertravada e a camada de resistência a pressão interna. Possui uma camada suficientemente espessa para evitar a permeação mesmo em temperaturas de trabalho além da nominal, reduzir a troca térmica e coibir sua própria extrusão para dentro dos espaços livres das camadas metálicas mais externa

e mais interna, Fig. 2.5. A face interna desta camada, em geral está diretamente exposta à pressão do fluido transportado [8].

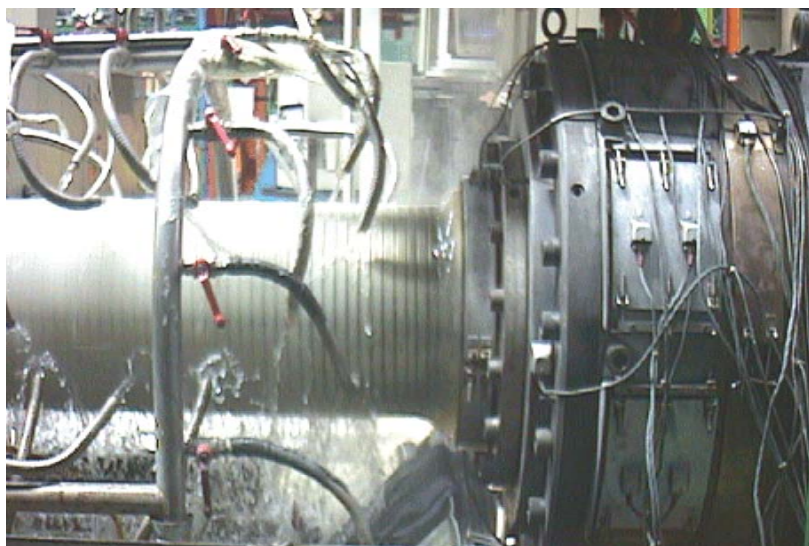


Figura 2.5: Extrução da barreira de pressão (Petrobras)

2.1.3 Armadura de Pressão (Zeta)

Camadas espiraladas de resistência à pressão interna. São camadas helicoidais de material metálico, em geral dois perfis de relativamente grande inércia de área, encaixados, mas que não se travam mutuamente enquanto o duto não está pressurizado, Fig. 2.6. Também chamada de camada zeta. Tendo como a função principal aumentar a resistência a pressão interna de operação. O ângulo de assentamento é cerca de 85 graus, logo os perfis apresentam pequeno passo e sua linha central está quase alinhada ao plano de uma seção [8].



Figura 2.6: Assentamento da armadura de pressão (Petrobras)

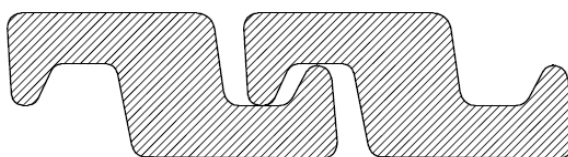


Figura 2.7: Perfil da armadura de pressão [9]

2.1.4 Armadura de Tração

Camadas de arames metálicos de aço de alta resistência enrolados helicoidalmente em ângulos de passo (medidos em relação ao eixo longitudinal) entre 15 e 55 graus. Em geral existem duas armaduras, enroladas em direções opostas, Fig. 2.8. A principal tarefa dessas camadas é proporcionar resistência à tração e torção sem impedir a flexão do duto flexível. Os arames da armadura de tração sustentam em quase a totalidade o carregamento de tração enquanto sua contribuição na rigidez é pequena. Os arames da armadura de tração podem ser chatos ou cilíndricos. O uso de arames chatos garante maior fator de ocupação da camada e menor espessura, mas está associado também a dificuldades de conformação durante a fabricação, problemas com o contato lateral e mecanismos de desgaste que são menores quando tendões cilíndricos são usados. As armaduras estão ancoradas diretamente nos

conectores nas extremidades das linhas de umbilicais ou dutos, de forma a descarregar neles a tração. Pode-se também utilizar arames de fibra de vidro ou carbono para redução de peso [8].

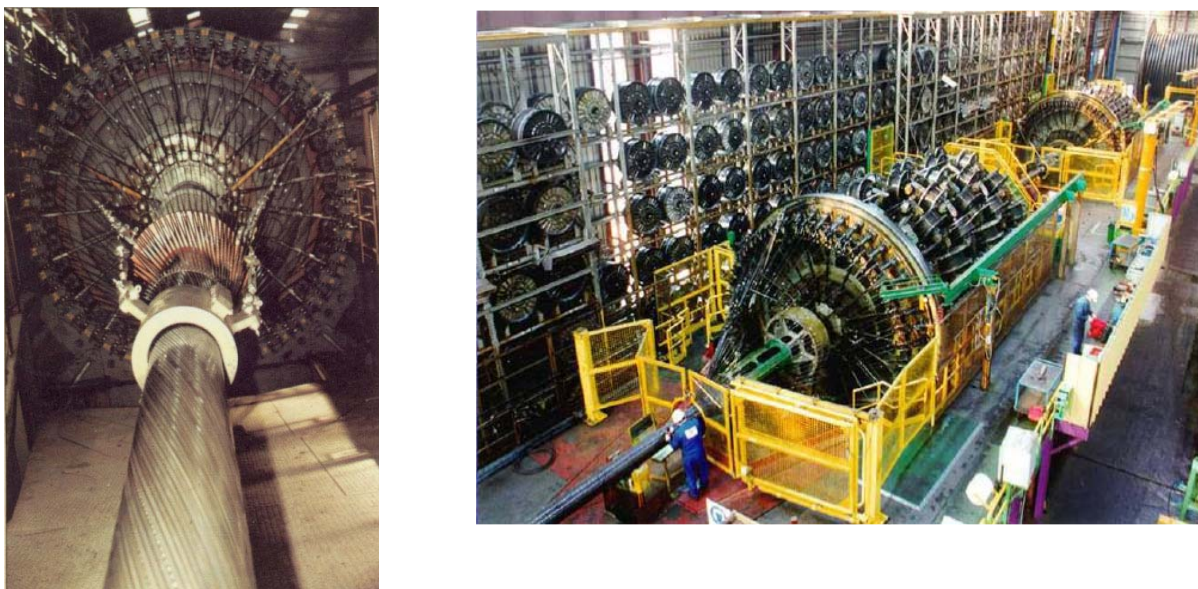


Figura 2.8: Bobina de assentamento das armaduras de tração (Petrobras)

2.1.5 Capa Externa

Camada mais externa da estrutura constituída de polímero como polietileno de alta densidade (HDPE). Ela é projetada para resistir aos danos mecânicos, protegendo a estrutura contra corrosão e abrasão, evitando o ingresso de água do mar e fornecendo isolamento térmico adicional, degradação prematura e danos nas camadas mais internas pela manipulação durante o lançamento e pela movimentação no leito marinho. Além disso, a capa dificulta a falha por compressão axial nas armaduras. A capa externa proporciona uma parcela da rigidez à flexão do produto que é majoritária nos umbilicais e razoável nos dutos flexíveis. Desde que os materiais poliméricos estão sujeitos à degradação provocada pela radiação solar, pigmentos são aplicados nos materiais da capa externa para aumentar-lhes a resistência e a estabilidade química [8].



Figura 2.9: Final da extrusão da capa externa (Petrobras)

2.1.6 Outerwrap e/ou Uraduct

O outerwrap é uma estrutura metálica de aço inoxidável vinda da fabricação de dutos flexíveis com o objetivo de proteger o riser do desgaste causado pelo contato com o solo marinho no trecho dinâmico. O Uraduct tem o mesmo objetivo, mas a sua estrutura é polimérica e pode ser colocado no duto na fase de instalação da linha flexível.

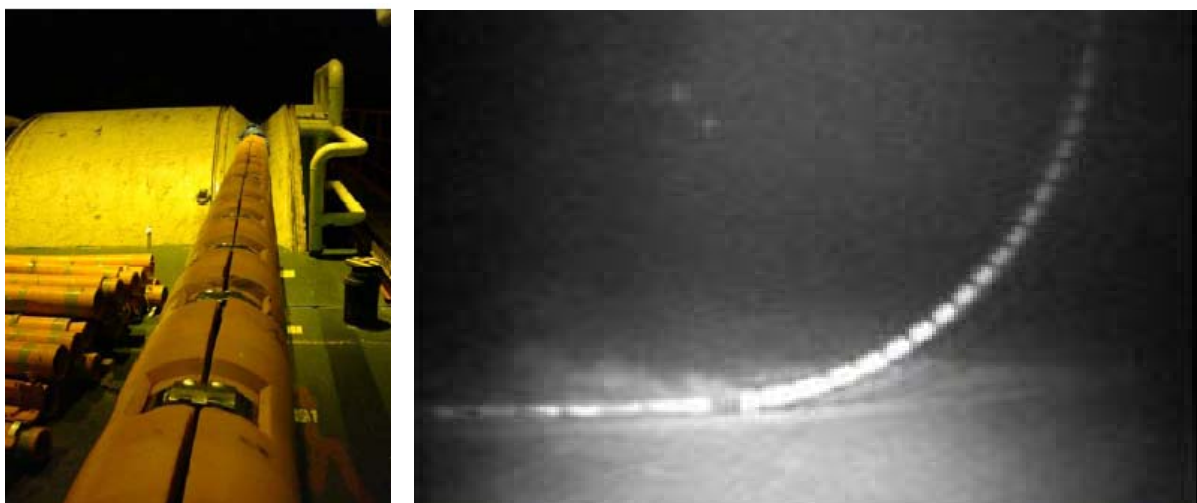


Figura 2.10: Configuração final do uraduct (Petrobras)

2.2 Risers e flowlines

Classificação quanto à aplicação de projeto, o duto flexível do sistema submarino poderá ser:

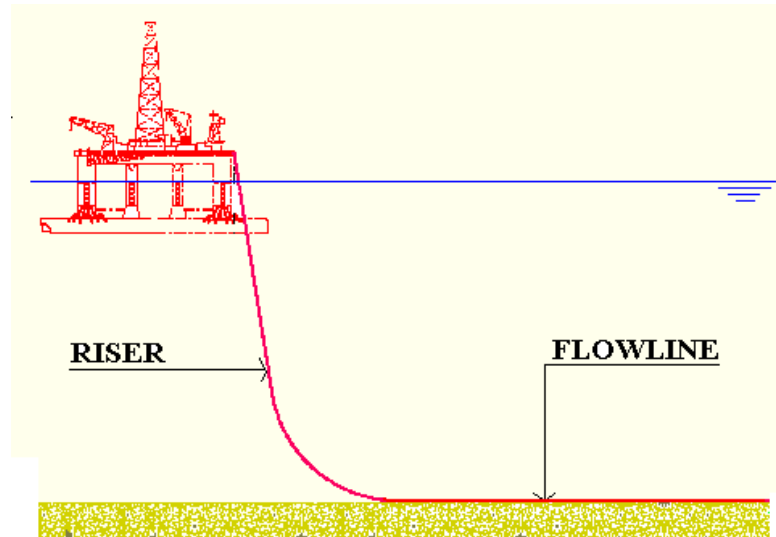


Figura 2.11: Aplicação de dutos flexíveis (Petrobras)

- *Flowline*, é um duto inteiramente ou parcialmente, depositada no leito marinho. Aplicações estáticas.
- *Riser*, é um duto conectando uma plataforma/ monobóia/ navio em um flowline ou instalação submarina. Aplicações dinâmicas.

Na Fig. 2.12 é apresentado o arranjo submarino de uma Unidade de Exploração e Produção, UEP.

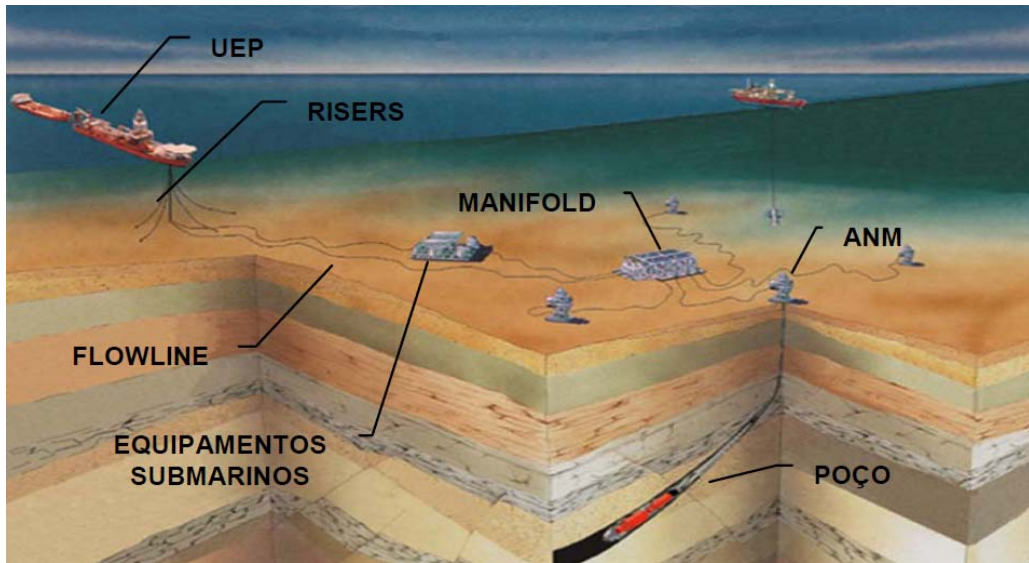


Figura 2.12: Arranjo submarino de um sistema de produção [10]

2.3 Conector de extremidade

Devido ao arranjo submarino em que se dispõem os poços, sistema de produção, e a logística de transporte, o duto flexível é fabricado em tramos, (quando o duto flexível é muito comprido ele tem que ser cortado em tramos, comprimentos menores). Onde sua interligação é através de conectores de extremidades. A conexão dos tramos é feita através de um conector que possui um flange (conector) e um corpo metálico (end fitting), preenchido com resina epóxi, onde a resina tem a função de ancoragem das armaduras de tração, como mostra a Fig. 2.13. Na interligação com a unidade flutuante, riser, o conector faz a transmissão dos esforços do duto flexível para o suporte na unidade.



Figura 2.13: Suporte de conectores emerso (Petrobras)

Cada camada da estrutura flexível é ancorada individualmente dentro do conector. O material usado na confecção do conector é AISI 4130. Os conectores ainda recebem o tratamento com NIKAFLEX (Níquel químico com interdifusão de fósforo).



Figura 2.14: Conector na posição vertical (Petrobras)

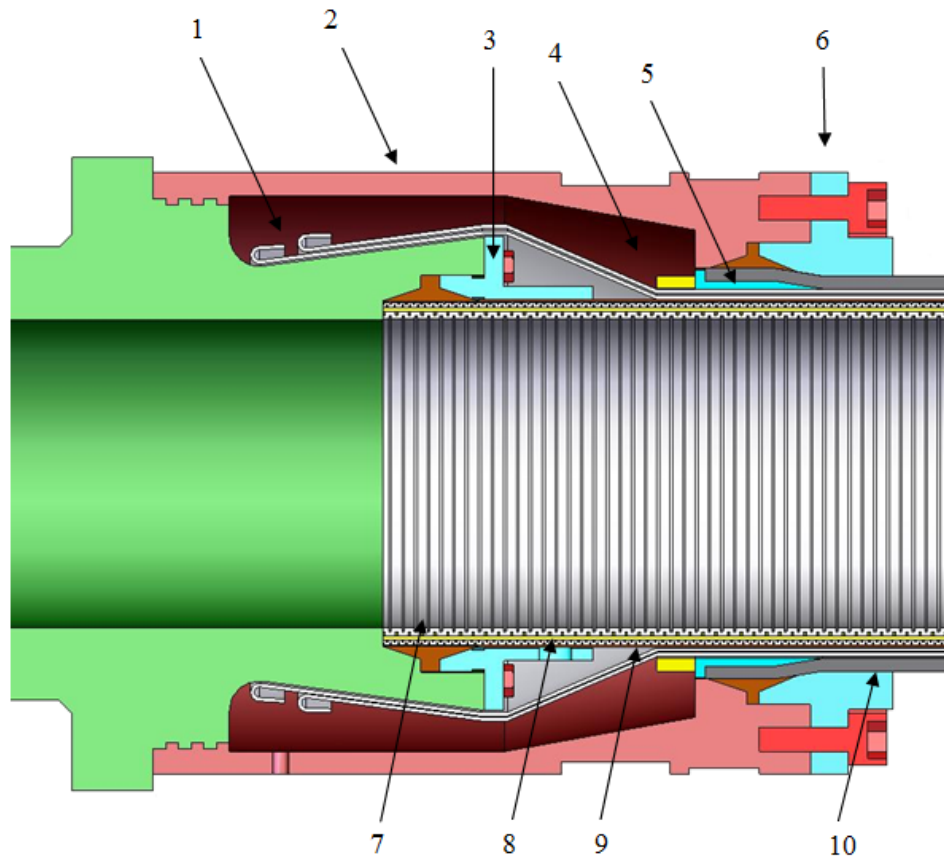


Figura 2.15: Desenho esquemático do conector de extremidade

- 1- Ancoragem dos arames da armadura de tração
- 2- Capa (jaqueta)
- 3- Flange dianteiro
- 4- Resina epóxi
- 5- Canule
- 6- Flange traseiro
- 7- Carcaça intertravada
- 8- Barreira de pressão
- 9- Zeta
- 10- Capa externa

2.4 Compósito

Conquistas tecnológicas recentes, com aplicações relacionadas nas áreas como aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, construção civil e artigos esportivos, entre outras, somente se tornaram viáveis com implemento dos materiais compósitos. São classes de materiais amplo e abrangente, que vai desde os polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos (metal/compósito) e os concretos estruturais, e outros compósitos com matriz metálica ou matriz cerâmica. Com isto sua característica básica é combinar, a nível macroscópico, pelo menos, duas fases distintas, matriz e fibra (reforço) [11].

2.5 Resinas epóxis

As resinas epóxis são termorrígidos de alto desempenho que contem pelo menos dois grupos epóxis terminais, conhecidos também como grupos oxirano ou etoxilina, por molécula. Estas resinas são matérias primas em vários setores industriais como a indústria eletroeletrônica, de embalagem, construção civil e transporte. As aplicações de maior importância incluem recobrimentos protetivos, adesivos, equipamentos para a indústria química, compósitos estruturais, laminados elétricos e encapsulados eletrônicos. Os maiores produtores mundiais de resinas epóxi atualmente são a Shell, a Dow Química e a Huntsman e respondem por aproximadamente 70% da produção mundial [12].

2.6 Mecanismo de adesão

O mecanismo e a propriedade de adesão constituem um dos tópicos mais importantes no estudo dos adesivos. A adesão, enquanto propriedade está ligada à capacidade de um adesivo em manter unidos dois ou mais substratos, mesmo sob condições de tensão. Esta propriedade é influenciada principalmente pelas características físico-químicas dos componentes da junta, tais como: tensão superficial do adesivo e do substrato, polaridade, rugosidade, molhabilidade e o estudo da interface.

O mecanismo de adesão segundo a teoria, tem dividido o processo de colagem em quatro formas possíveis: interligação mecânica, interações de absorção, forças eletrostáticas e mecanismo de difusão. Estes mecanismos atuam em conjunto na maioria dos sistemas colados, no qual um ou outro pode se destacar dependendo das características físico-químicas dos componentes da junta. Tirando o mecanismo de adesão por ancoramento mecânico, que atua numa dimensão macro do processo de colagem, os outros mecanismos são altamente

influenciados pela estrutura química dos componentes da junta (dimensão micro) e o conhecimento dos tipos de interações químicas possíveis ajuda na determinação do mecanismo de adesão envolvido. Todos os trabalhos demonstram que a interligação mecânica em micro escala é um fator importante para conseguir uma alta resistência da cola adesiva. Para materiais fibrosos, a interligação mecânica pode parecer óbvia, embora para metais/óxidos metálicos um alto grau de sofisticação para exame da superfície em micro escala é necessário.

As teorias da interligação mecânicas propõem o mecanismo de adesão através da penetração do adesivo nas irregularidades superficiais dos substratos. A medida que o adesivo cura, ele promove o ancoramento entre os substratos, preenchendo os espaços entre os substratos, devido às irregularidades entre eles, criando milhares de ‘ganchos’ que promovem a adesão, conforme mostra a Fig. 2.16. A eficácia deste mecanismo de adesão deve ser avaliada em nível microscópico, já que em escala macroscópica não há promoção de uma efetiva adesão.

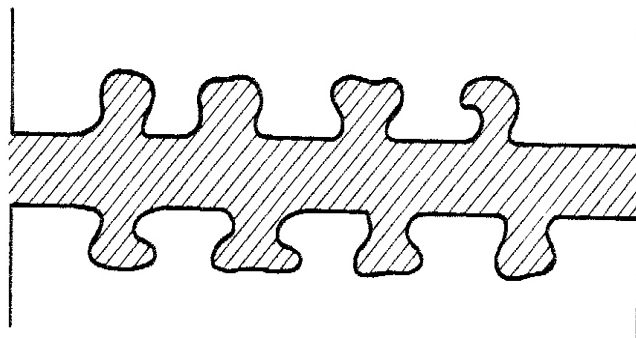


Figura 2.16: Representação de sítios de ancoragem [12]

A adesão é quase sempre influenciada pelo ancoramento mecânico sendo diretamente relacionada à rugosidade da superfície [12].

2.7 Molhabilidade

Para se estimar a eficiência do processo de colagem de adesivo sobre um substrato utiliza-se normalmente o conceito de molhabilidade entre eles, ou seja, como o adesivo líquido irá se comportar sobre o substrato. Uma forma de quantificar a capacidade de um líquido em molhar uma superfície, é através da deposição de uma gota deste líquido sobre a superfície e em seguida determinar o ângulo de contato, θ , como mostra a Fig. 2.17 abaixo:

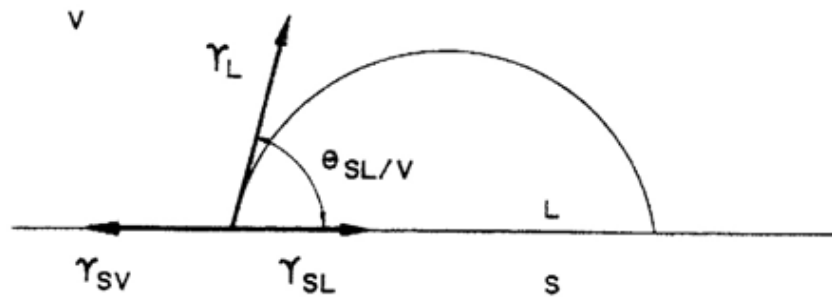


Figura 2.17: Representação esquemática do modelo de uma gota de líquido em repouso sobre uma superfície sólida [13]

A equação de Young, que define o equilíbrio das tensões superficiais entre o sólido, o líquido e o vapor é dada por:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2.1)$$

Sendo:

γ_{SV} = energia livre superficial do sólido em presença do vapor do líquido L

γ_{SL} = energia livre superficial da fase sólido-líquido (interface)

γ_{LV} = energia livre superficial da fase sólido-líquido

$\cos \theta$ = ângulo de contato

A equação de Young relaciona as três tensões superficiais envolvidas durante o processo de molhabilidade descrito na Fig. 2.17 e a partir dela obtém-se o ângulo de contato. Se o valor de θ for igual a 0° ou menor que 90° , o líquido é dito difuso ou capaz de molhar espontaneamente a superfície. Caso θ seja igual ou maior que 90° , o líquido tende a não molhar a superfície em estudo.

A aplicação destes conceitos na tecnologia de adesivos está diretamente ligada ao início da preparação da junta. É fundamental para se obter um bom processo de adesão, que o adesivo molhe completamente o substrato. Para isso deve-se obter o valor do ângulo de contato, θ , o mais próximo possível de zero.

A Fig. 2.18 abaixo mostra uma representação esquemática da molhabilidade, considerando-se : γ_{LV} = energia livre superficial da fase sólido-líquido e γ_{SV} = energia livre superficial do sólido em presença do vapor do líquido L [13].

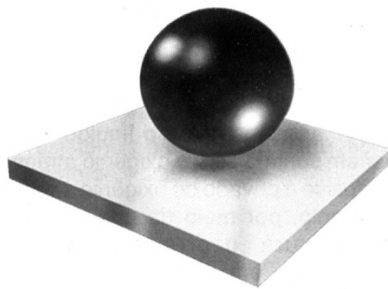
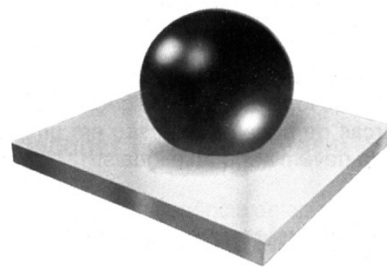
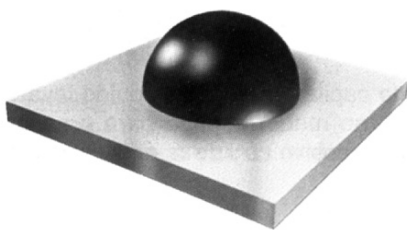
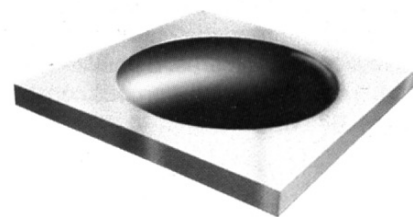
a) $\gamma_{lv} \gg \gamma_{sv}$ b) $\gamma_{lv} > \gamma_{sv}$ c) $\gamma_{lv} = \gamma_{sv}$ d) $\gamma_{lv} \ll \gamma_{sv}$

Figura 2.18: Representação da molhabilidade [13]

2.8 Rugosidade e tratamento de superfície

A rugosidade responsável pelo mecanismo de adesão por ancoramento pode ser produzida tanto por tratamento mecânico da superfície do substrato ou por tratamento químico com soluções ácidas. Estudos revelam que a utilização destes dois tipos de tratamentos em conjunto, promovem um controle maior da rugosidade associado a uma melhora nas propriedades de adesão do sistema.

Os diferentes tipos de tratamentos de superfície que podem ser aplicados nos substratos possuem a função de criar uma superfície homogênea, ou seja, com camadas definidas e rugosidade controlada, que por sinal, deverá melhorar a molhabilidade e proporcionar um mecanismo de adesão eficiente. Todas as superfícies devem ser preparadas de uma forma prática e segura com o objetivo das mesmas ficarem estruturalmente sólidas, limpas de resíduos que impeçam a adesão e com a rugosidade no grau especificado [12].

2.9 Ligação química

É a forma mais eficiente de adesão em compósitos. Ocorre geralmente com a aplicação de agentes de acoplamento na superfície da carga, que serve como ponte entre o polímero e a fibra. Estes materiais devem conter uma parte de sua estrutura que interage com a superfície da fibra e outra deve conter grupos orgânicos semelhantes às cadeias da matriz polimérica, fig. 2.19. A resistência mecânica da interface depende do número e tipo de ligações químicas presentes.

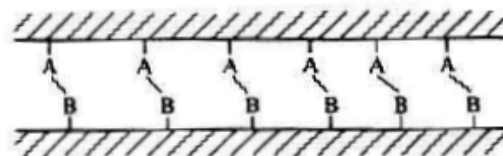


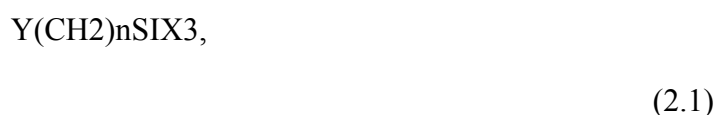
Figura 2.19: Representação da ligação química [12]

A forma mais significativa para obter um aumento da adesão entre matriz/carga é a absorção e a ligação química. Devido à falta de afinidade entre o polímero e a carga, a modificação superficial de uma das fases tem grande importância no desenvolvimento do compósito.

A modificação química da superfície das cargas tem sido o modo mais bem sucedido de unir quimicamente a matriz ao agente de reforço. Esta modificação é realizada com os agentes de acoplamento, que promovem a união química entre as fases ou altera a energia superficial da carga, permitindo um molhamento eficiente [12].

2.10 Agentes de acoplamento

A escolha dos agentes de acoplamento dependerá da estrutura química e composição da fibra a ser modificada e da matriz do compósito. Para fibras, que contém como elemento principal o silício, como, por exemplo, fibras de vidro, os agentes de acoplamentos mais usados são os silanos. Os agentes silanos apresentam uma fórmula geral



onde Y - grupo orgânico funcional (-CH=CH₂, -Cl, -NH₂, ou -N=C=O) e X - sílico funcional (OCH₃, OC₂H₅)

O grupo sílico-funcional reage com as hidroxilas na superfície da fibra enquanto que o grupo orgânico funcional interage (ou forma ligações secundárias fortes) com o polímero, melhorando a adesão na interface. É essencial, portanto, que as cargas particuladas ou fibras possuam grupos hidroxilas na sua superfície. Desta forma, a efetividade dos agentes de ligação depende da natureza e do tratamento prévio do substrato, do tipo de silano utilizado, da espessura da camada de silano formada e do processo pelo qual estes agentes são aplicados.

Além de serem usados como agentes de acoplamento, os silanos encontram outros tipos de aplicações tecnológicas, como, por exemplo melhorar as propriedades adesivas entre polímeros e outros tipos de superfícies, conferir uma camada hidrofóbica em vidro e concreto e para atuar como agente de reticulação em poliuretanos, epóxi, polietileno e poliéster.

Uma grande variedade de agentes de ligação silano se encontra disponível, com os grupos funcionais otimizados para uso com diversos polímeros e substratos (agentes de reforço). Agentes de ligação à base de titanato possuem comportamento similar. Os titanatos são bem menos eficientes que os silanos, mas conferem propriedades de impacto superiores [12].

3 HISTÓRICO DE PROBLEMAS NO CONECTOR DE EXTREMIDADE

Desde meados de 2000 quando detectado uma das primeiras ocorrências relacionadas a procedimento de montagem de conector, muito vem sendo discutido a respeito a procedimento de montagem e projeto de conectores de extremidade de dutos flexíveis. O problema existe e vem sendo evidenciado por causa dos altos carregamentos nos arames da armadura de tração devido à aplicação de dutos flexíveis na exploração de petróleo em lâminas d'águas cada vez mais profundas.

O carregamento chega aos ganchos da armadura de tração devido à, movimentação da unidade, pressão interna, peso próprio do riser, e outras variáveis de montagem do conector. Após a ruptura do gancho, a carga é transferida para os ganchos adjacentes e como consequência, ruptura seqüencial dos arames da armadura de tração fazendo com que os arames escorreguem dentro do conector sobre a resina epóxi levando a queda do *riser* [14].

3.1 Final de um procedimento de montagem de conector de extremidade

Na Fig. 3.1 está mostrado a etapa final no procedimento de montagem do conector do duto flexível, onde mostra o fechamento da jaqueta (capa do conector) e o assentamento dos arames das armaduras interna e externa com o dobramento dos ganchos.



Figura 3.1: Dobramento dos ganchos dos arames da armadura de tração (Petrobras)

Após o fechamento do flange traseiro, Fig. 3.2, o conector de extremidade está preparado para a injeção da resina epóxi.



Figura 3.2: Fechamento do flange traseiro (Petrobras)

Na Fig. 3.3 é mostrado a injeção de resina epóxi no conector de extremidade. O excesso de resina epóxi é retirado e com a mesma são feitos corpos de prova para verificar a cura da mesma, isto é, condição de cura para movimentação do conector de extremidade.



Figura 3.3: Injeção de resina epóxi no conector de extremidade (Petrobras)

3.2 Falha de dutos flexíveis

Após falha em campo (ruptura ou queda) os risers são submetidos à análise para evidenciar o motivo da ocorrência. Estas análises são feitas através de dissecações de

conectores. Na Fig. 3.4 é ilustrado um procedimento de dissecação de conector de extremidade.



Figura 3.4: Corte da jaqueta e do preenchimento da resina epóxi (Petrobras)

Com a retirada do material, corte da resina, são evidenciados os “vazios”, pontos de escorregamento dos arames da armadura de tração entre a resina, como é mostrado na Fig. 3.5.



Figura 3.5: Escorregamento dos arames dentro da resina epóxi (Petrobras)

Detalhe do escorregamento dos arames dentro da resina epóxi, Fig. 3.6.



Figura 3.6: Vista inferior do final do dobramento dos ganchos



Figura 3.7: Vista superior do final do dobramento dos ganchos



Figura 3.8: Vista interna do final do dobramento dos ganchos

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Fig. 4.1 simplifica a sequência adotada para o estudo a aderência dos arames da armadura de tração sobre a resina epóxi.

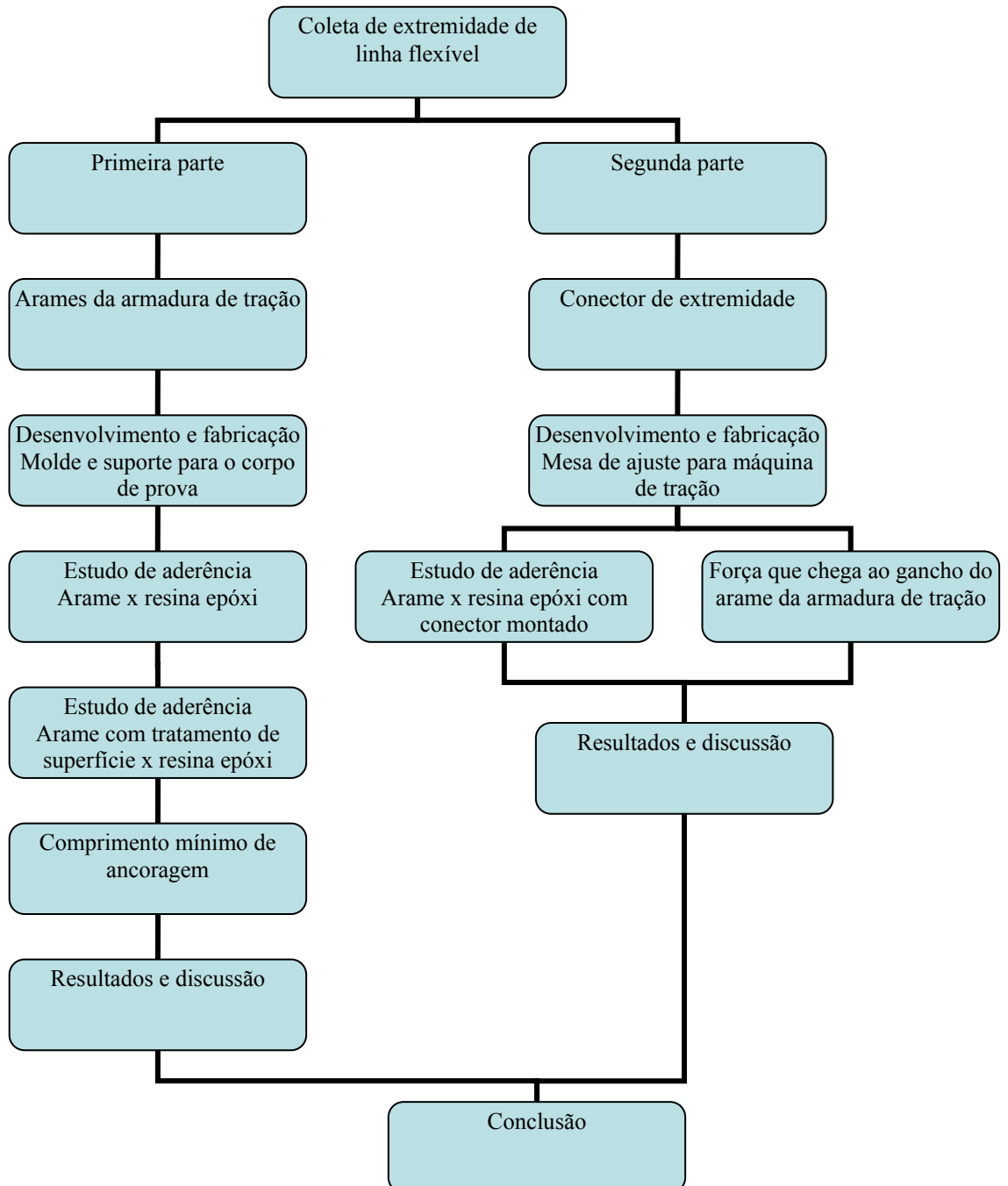


Figura 4.1: Sequência do estudo de aderência

O primeiro passo do procedimento experimental foi desenvolver corpos de prova que simulasse uma situação extrema de adesão, onde não haveria a compressão da resina sobre o arame da armadura de tração quando submetido ao ensaio de tração, Fig. 4.1.

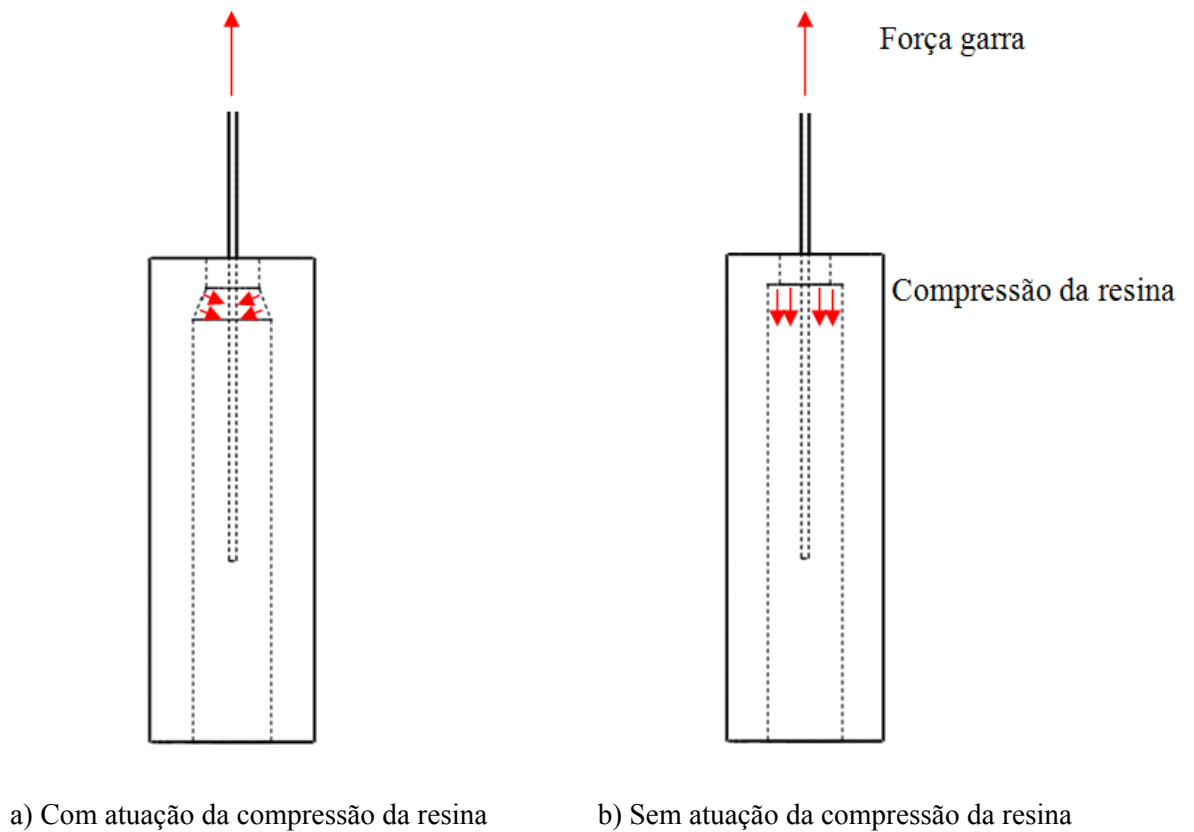


Figura 4.2: Moldes do corpo de prova

Sendo assim o molde para o corpo de prova foi da Fig. 4.2 (b). A Fig. 4.2 representa o molde na sua configuração final.

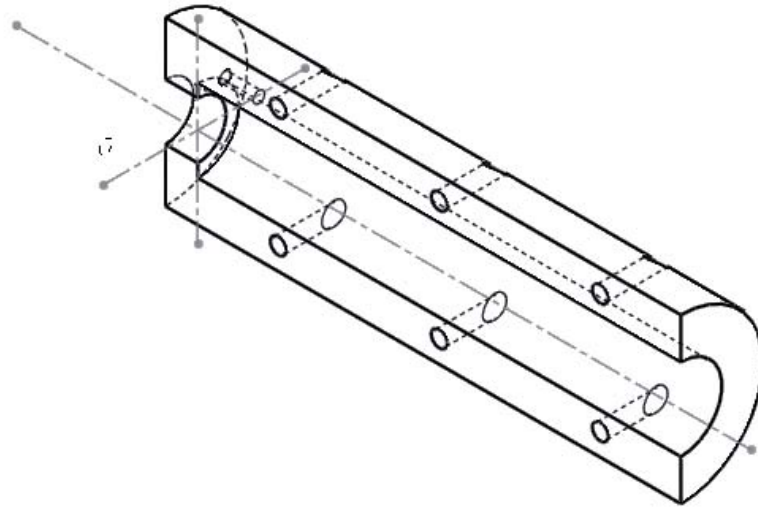


Figura 4.3: Secção do molde definitivo

Também se fez necessário uma base para este molde do corpo de prova, Fig. 4.4, pois a máquina de ensaio de tração não dispõe de acessório para este tipo de travamento de molde de corpo de prova.

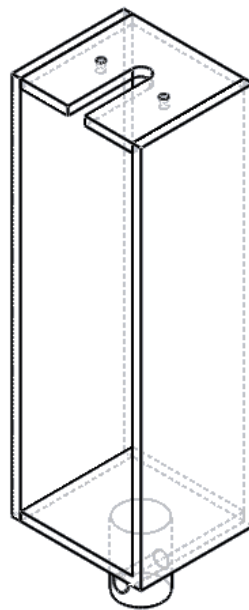


Figura 4.4: Base de fixação do corpo de prova

4.1 Materiais e métodos

Foram recolhidas amostras de arames da armadura de tração de um duto flexível (riser) com seção de 2 mm x 5 mm conforme Fig. 4.5.



Figura 4.5: Arame da armadura de tração

Os arames foram tratados com WD-40 (óleo de penetração utilizado como limpador, lubrificante e solução anticorrosiva) a fim de garantir que os mesmos não sofreriam processo de oxidação gerando assim um perfil de rugosidade que afetasse os resultados obtidos. A composição química dos arames estão especificadas na Tab. 4.1.

Tabela 4.1: Composição química do arame em peso (%). Propriedades do arame fornecidas pela TECMETAL - Macaé

material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
aramé	0,62	0,65	0,22	0,020	0,013	0,07	0,06	0,06
<i>AISI/SAE 1060</i>	<i>0,55 a 0,66</i>	<i>0,60 a 0,90</i>	<i>0,15 a 0,35</i>	<i>0,040 máx.</i>	<i>0,050 máx.</i>	-	-	-

Na Tab. 4.2 são mostradas as propriedades mecânicas do arame da armadura de tração.

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas em tração

material	limite de resistência	limite de escoamento	alongamento (%)	redução de área (%)
aramé	1522 MPa ± 45	1397 MPa ± 41	4,8 ± 1	34 ± 2

A resina epóxi selecionada é a mesma utilizada na indústria petrolífera, Rengel SW 404 BR fabricado por HUNTSMAN ADVANCED MATERIALS a qual foi adquirida proveniente a compra à sua representante no Brasil, MAXI EPOXI – São Paulo.

Antes da confecção dos corpos de prova, Fig. 4.6, era aplicado nos moldes desmoldantes (cera desmoldante, silicone spray).



Figura 4.6: Aplicação de desmoldante

Após a confecção dos moldes dos corpos de prova (APÊNDICE A) os arames foram submetidos ao ensaio de tração.

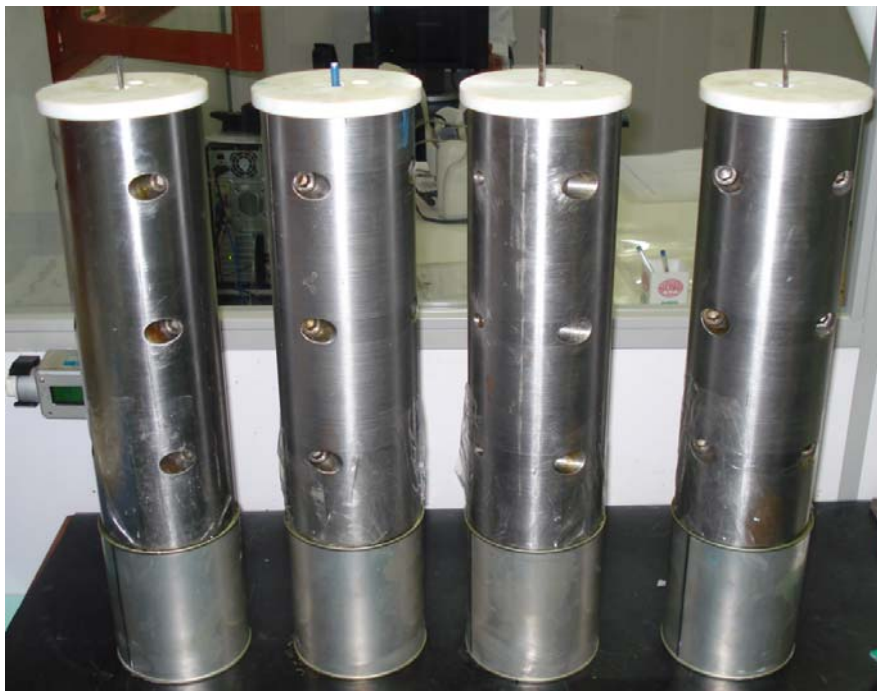


Figura 4.7: Moldes do corpo de prova

A resina teve um processo de cura de 72 horas com uma temperatura de 25°C. A propriedade da resina fornecida pela MAXI EPOXI – São Paulo (ANEXO A).

4.2 Confeção dos corpos de prova

No primeiro ensaio de arrancamento foram consideradas três profundidades de ancoragem: 100 mm, 137 mm e 150 mm, com três repetições em 100 mm e uma em cada nas outras profundidades. A disponibilidade dos ensaios foi estabelecida pelo número dos moldes de corpos de prova. Para a avaliação da aderência considerou-se o trecho de ancoragem de 100 mm.

4.3 Procedimento do ensaio de arrancamento

O ensaio de arrancamento, Fig. 4.8, foi realizado em máquina Shimadzu, Modelo AGI 100kN, adotando uma velocidade de 2 mm/s.

Para a fixação dos moldes dos corpos de prova à máquina de tração, foi realizada a adaptação de uma base para o molde (APÊNDICE 2) de forma que o eixo de acoplamento da garra inferior fixasse o molde.



Figura 4.8: Suporte do corpo de prova

A garra superior da máquina de ensaio prendia o arame, puxando-o para cima e exercendo, assim, uma força de arrancamento, de tal modo que o arame escorregue dentro da

resina, Fig. 4.9. A tensão aplicada e o deslocamento são registrados em planilha pela máquina onde pode ser visto através de gráficos.



Figura 4.9: Ensaio de arrancamento na máquina de tração

Obteve-se o valor da resistência (tensão em MPa) de aderência pela divisão do valor da força máxima de arrancamento pela área de contato entre o arame e a resina epóxi, região onde se desenvolve a força de atrito, conforme a Eq. 4.1. A área de contato corresponde ao valor do perímetro da seção transversal do arame encravado, multiplicado pela profundidade de ancoragem correspondente.

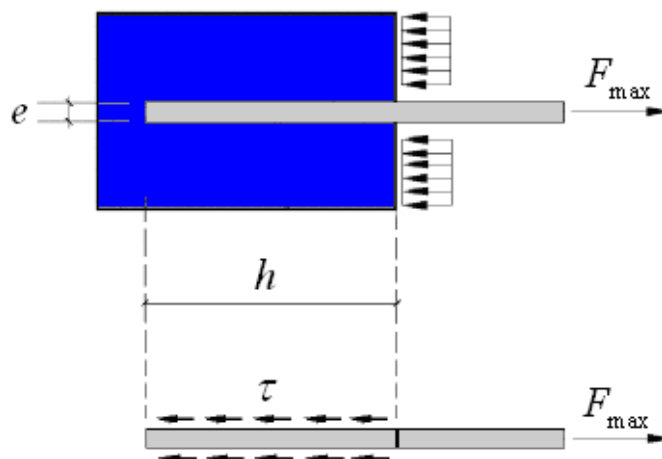


Figura 4.10: Ensaio de arrancamento

O deslocamento relativo entre o arame e a resina epóxi foi estipulado em 2 mm/min. Com esta velocidade de avanço da garra, a célula de carga do equipamento registra a força correspondente que é visualizada através de tabelas e gráficos.

Obtido o valor máximo de resistência, a tensão média de aderência é dada por:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{(2l + 2e)h}$$

(4.1)

onde:

τ : Tensão média tangencial de aderência

Fmax: força máxima de arrancamento

l: largura do arame da armadura de tração

e: espessura do arame da armadura de tração

h: profundidade de ancoragem

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro passo foi realizar o ensaio de tração nos arames íntegros para verificar o limite de ruptura dos arames da armadura de tração do duto flexível. A Tab. 5.1 demonstra os resultados obtidos no ensaio de tração dos arames íntegros.

Tabela 5.1: Ensaio de tração dos arames íntegros

Corpo de prova	e (mm)	l (mm)	Comprimento entre as garras (mm)
	2	5	50
	Tensão Máxima (MPa)		Força Máxima (kN)
1	1.434,53		14,34
2	1.473,91		14,74
3	1.482,50		14,83
4	1.469,60		14,70
5	1.462,03		14,62
Média	1.464,51 ± 18,32		14,65 ± 0,18

Os resultados obtidos conferem com os realizados com o da TECMETAL – Macaé. O resultado do ensaio também é demonstrado no gráfico da Fig. 5.1.

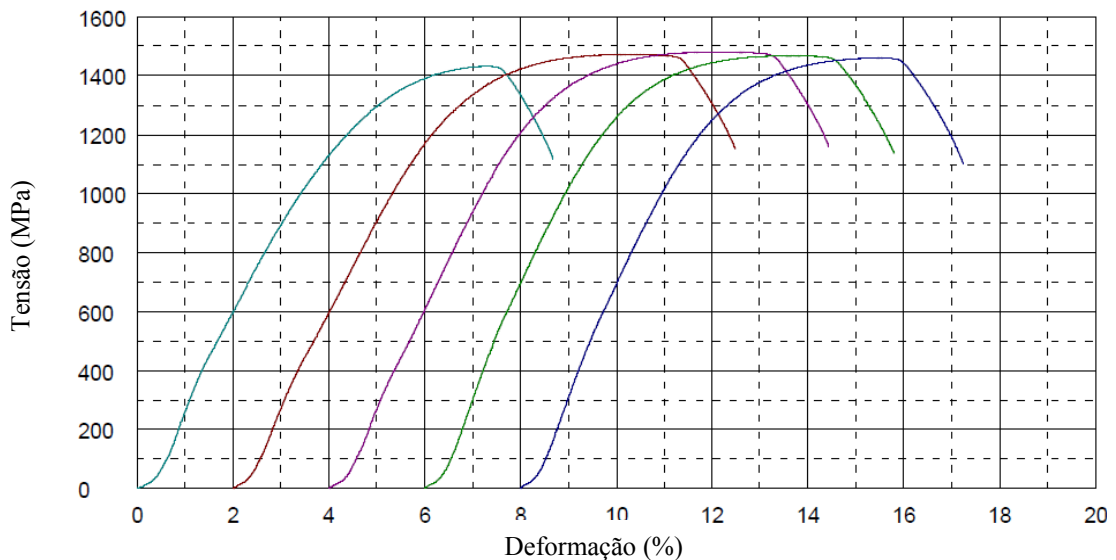


Figura 5.1: Tensão em função da deformação para o arame íntegro

5.1 Verificação de resistência mecânica

Com o objetivo de verificar interferência na resistência mecânica do arame devido ao desfazimento, Fig. 5.2, da hélice em seu formato original foi realizado um ensaio de tração após desfazimento da hélice do arame. Pois o perfil linear também seria utilizado nos ensaios de arrancamento.



Figura 5.2: Arame da armadura de tração após desfazimento da hélice

A Tab. 5.2 mostra o resultado obtido no ensaio de tração.

Tabela 5.2: Tensão após desfazimento da hélice

Tensão de ruptura em MPa	
Corpo de Prova	
1	1.449,22

Foi realizado somente um ensaio, confirmando que o desfazimento realizado não interferiu na resistência mecânica do material em questão, pois o resultado encontrado está dentro da barra de erro do valor encontrado nos ensaios mostrados na Tab. 5.1.

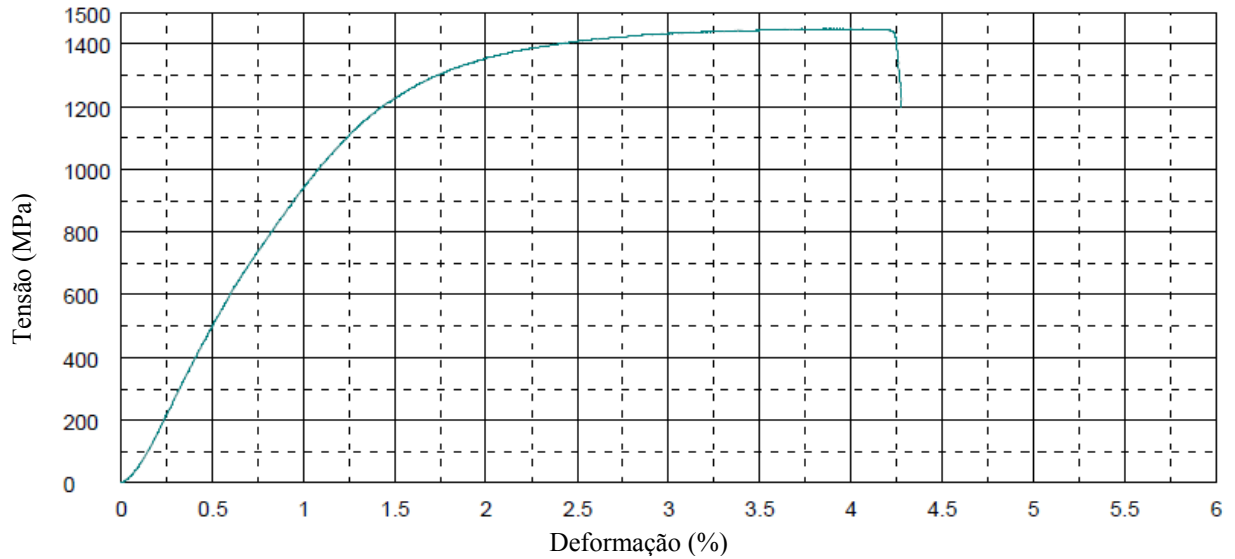


Figura 5.3: Tensão de ruptura após desfazimento de hélice

Com base nos resultados concluímos que o desfazimento não alterou a resistência mecânica do arame.

5.2 Primeiro ensaio de arrancamento

O primeiro ensaio de arrancamento teve como objetivo direcionar os ensaios experimentais seguintes, como parâmetros de profundidade e perfil do arame a ser adotado.

Os dados da resistência ao arrancamento (resistência de aderência) em MPa, dos arames da armadura de tração do duto flexível encravadas na resina epóxi, em função das profundidades de ancoragem consideradas para o ensaio de arrancamento, estão apresentados na Tab. 5.3.

Tabela 5.3: Resistência ao arrancamento dos arames com perfil linear

Tensão ao arrancamento em MPa			
Corpo de prova	Profundidade de ancoragem (mm)		
	100	137	150
1	2,66	-	-
2	2,65	-	-
3	2,06	-	-
4	-	-	2,41
5	-	2,46	-
Média	2,46± 0,34		

Os ensaios realizados com os corpos de prova diferentes de 100 mm de profundidade foram somente para aproveitamento dos corpos de prova.

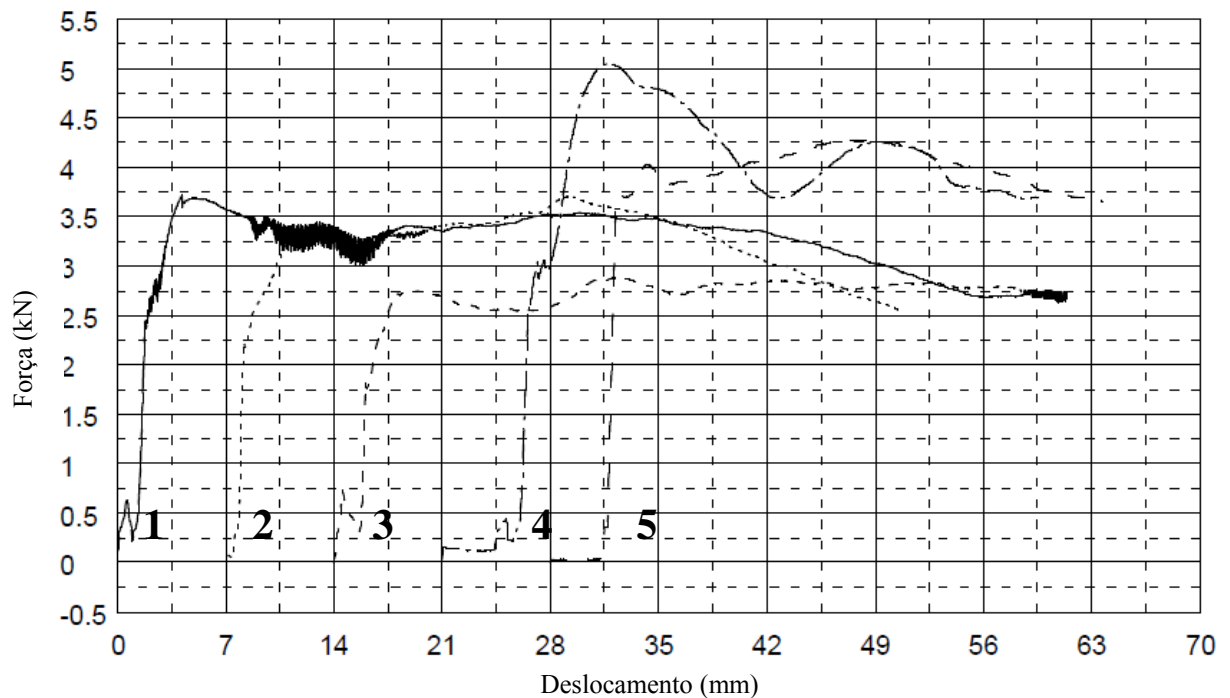


Figura 5.4: Força de aderência nos cp's 1, 2, 3, 4 e 5

Se considerarmos estes primeiros dados obtidos, podemos afirmar que para uma condição estática de carregamento dos arames da armadura de tração a profundidade

necessária para ancorar os arames de modo a suportar a carga de ruptura nominal de 14kN seria:

utilizando a Eq. 4.1 temos:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{(2l + 2e)h}$$

Onde:

τ : 2,46MPa (média da tensão de aderência)

F_{\max} : 14kN (força nominal de ruptura)

l: 5 mm

e: 2 mm

h: profundidade de ancoragem

logo, a profundidade de ancoragem para uma condição estática de carregamento com toda área do arame em contato com a resina epóxi seria de 406 mm. Esta profundidade seria o suficiente para garantir um aproveitamento melhor das propriedades mecânicas do arame da armadura de tração, isto é, resistência ao arrancamento de 14kN.

5.3 Segundo ensaio de arrancamento

O segundo ensaio de arrancamento foi realizado com cinco corpos de prova com perfil helicoidal (conforme duto flexível), com profundidade de 200 mm para verificar se a tensão de arrancamento com o arame em perfil de hélice diferia do perfil linear.

5.3.1 Preparação dos corpos de prova

Como o perfil do arame era em hélice, para a medição do comprimento exato foi utilizado um barbante com 200 mm para poder marcar a profundidade em que o arame ficaria dentro da resina epóxi.



Figura 5.5: Preparação dos arames com a profundidade de 200 mm

Depois de estabelecido a profundidade de 200 mm os arames são submetidos ao preenchimento com resina epóxi, conforme mostrado na Fig. 5.6.



Figura 5.6: Base para preenchimento de resina

Neste segundo ensaio os dados da resistência ao arrancamento (tensão de aderência) em MPa, dos arames da armadura de tração do duto flexível encravadas na resina epóxi, em função das profundidades de ancoragem de 200 mm estão demonstrados na Tab. 5.4.

Tabela 5.4: Tensão ao arrancamento dos arames com perfil helicoidal sem tratamento superficial

Tensão ao arrancamento em MPa	
Corpo de prova	Profundidade de ancoragem de 200mm
1	2,44
2	2,61
3	2,44
4	2,29
5	2,69
Média	$2,50 \pm 0,16$

O gráfico do ensaio encontra-se abaixo.

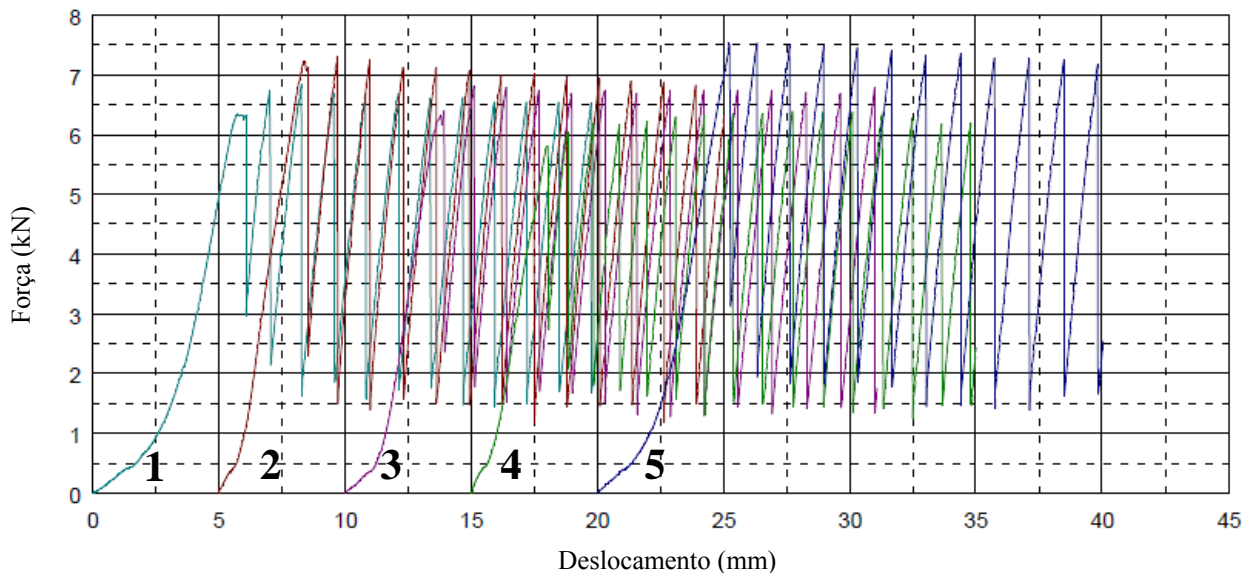


Figura 5.7: Força de aderência ao arrancamento dos arames encravados na resina epóxi com perfil helicoidal sem tratamento superficial

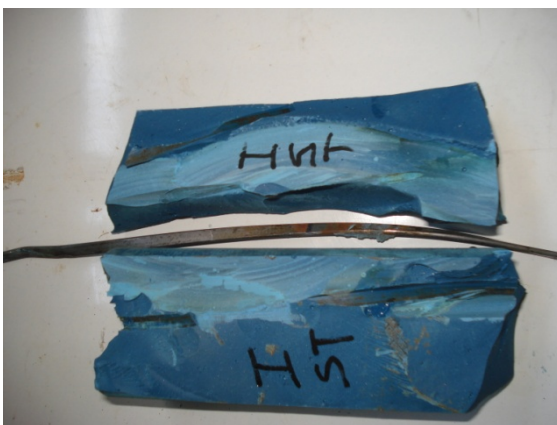
Pelo gráfico da Fig. 5.7, tomando como exemplo o ensaio do arame 2, percebemos que conforme o arame diminui a sua área de contato a força máxima de arrancamento vai diminuindo (menor área de contato, menor força de aderência).



a) Abertura parcial corpo de prova



b) Ruptura adesiva



c) Abertura total do corpo de prova

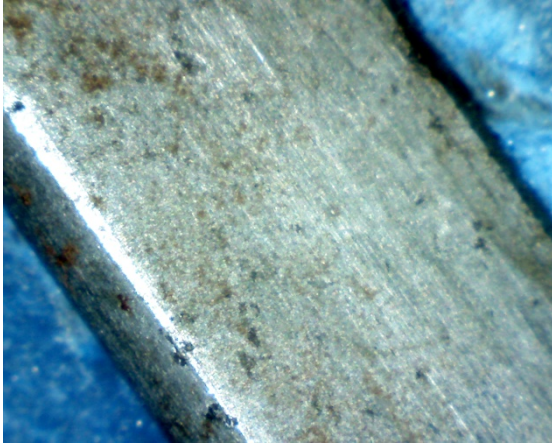


d) Ruptura adesiva

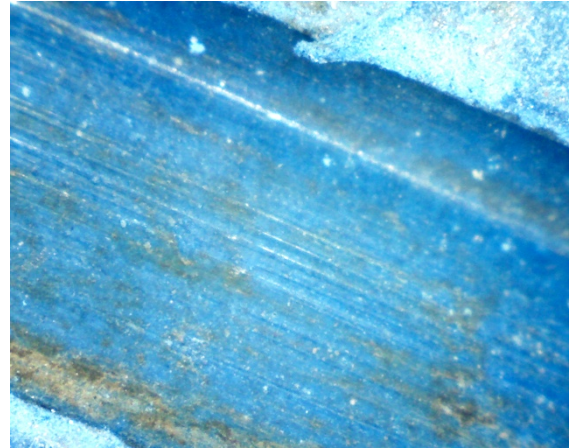
Figura 5.8: Abertura de resina em arames com perfil em hélice sem tratamento superficial

Após escorregamento do arame com perfil em hélice sem tratamento superficial sobre a resina epóxi podemos ver que não há presença de arrancamento de material sobre o arame e sim um deslizamento do mesmo na resina.

Com auxílio de um microscópio (Proscope HR, ampliação de 400x) podemos ampliar a interface resina e arame comprovando que não existe ruptura adesiva sobre o arame após abertura da resina.



a) Ampliação arame (50x)



b) Ampliação da resina epóxi (50x)

Figura 5.9: Deslizamento do arame sobre a resina

5.4 Terceiro ensaio de arrancamento

O terceiro ensaio de arrancamento tem o objetivo de aplicar um procedimento de tratamento superficial de aderência sobre o perfil em hélice do arame com rugosidade e aplicação de silano. A mesma profundidade será utilizada, porém com um aumento de 25 mm onde a superfície não será jateada e receberá aplicação de um desmoldante, para não haver interferência no ensaio de arrancamento, ou seja, resistência a tensão de topo.

Dados do silano: Dynasytan Glymo – Degussa (3 glycidyl oxypropyl trimethoxysilane 2530-83-3)

Solução 1% em H₂O destilada/deionizada, ph em torno de 5.



Figura 5.10: Perfil com rugosidade e desmoldante

Para se obter o perfil de rugosidade foi utilizado o jateamento com granalha G-40 a uma pressão de 6,5 bar. Tendo uma média de perfil de rugosidade de $68,3 \mu\text{m}$. Na Fig. 5.11 é mostrado o perfil de rugosidade de um arame após o tratamento de superfície por meio de jateamento.

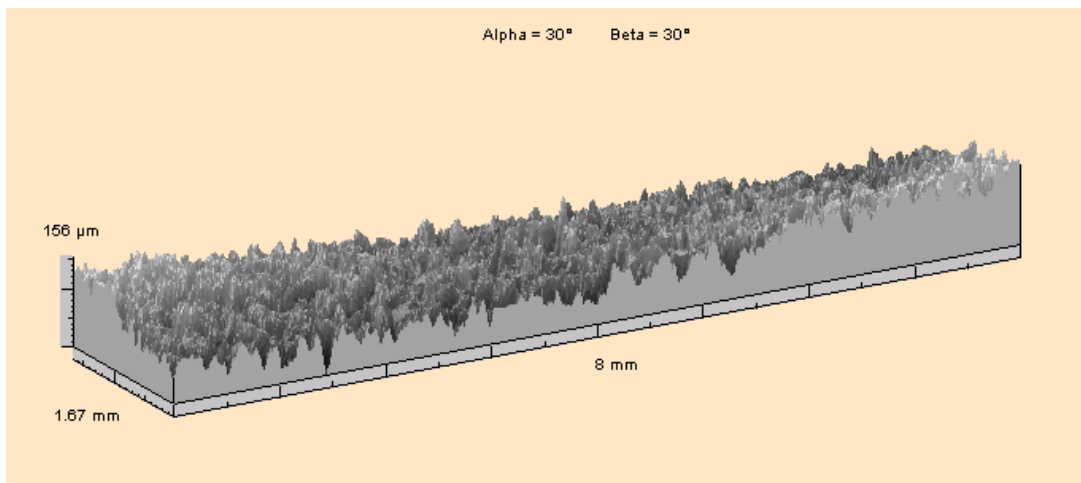


Figura 5.11: Perfil de rugosidade

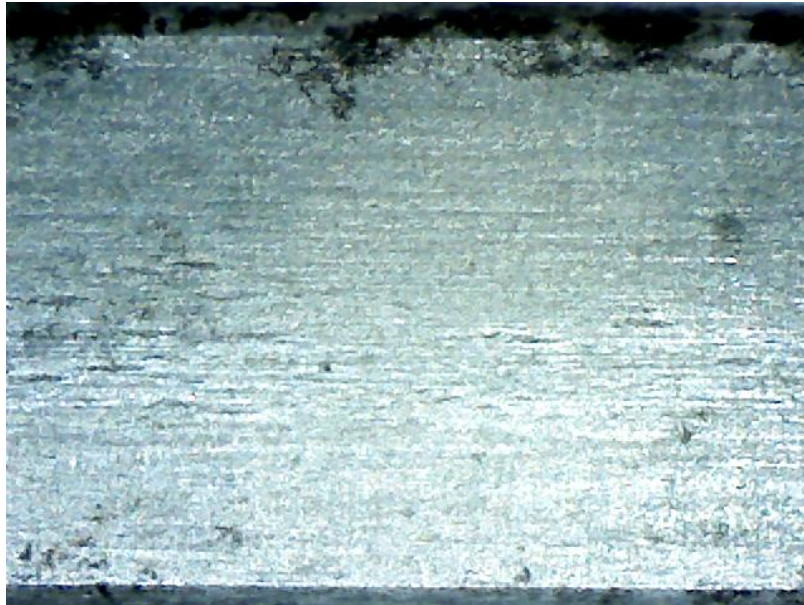


Figura 5.12: Perfil do arame sem tratamento superficial no microscópio (50x)

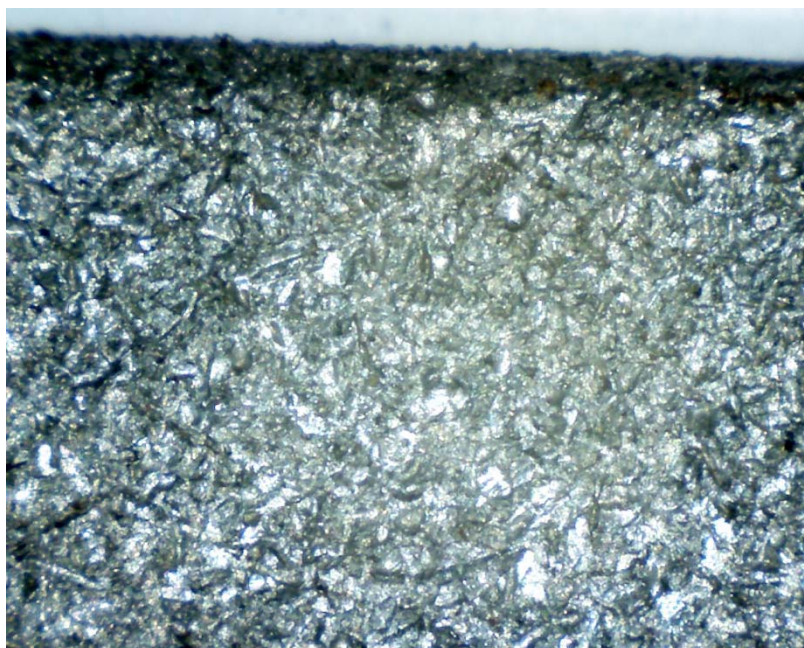


Figura 5.13: Perfil de rugosidade no microscópio (50x)

Após o processo de tratamento de superfície por meio de jateamento, os arames foram preparados para a aplicação do silano com acetona (função de desengraxante e secagem da superfície).

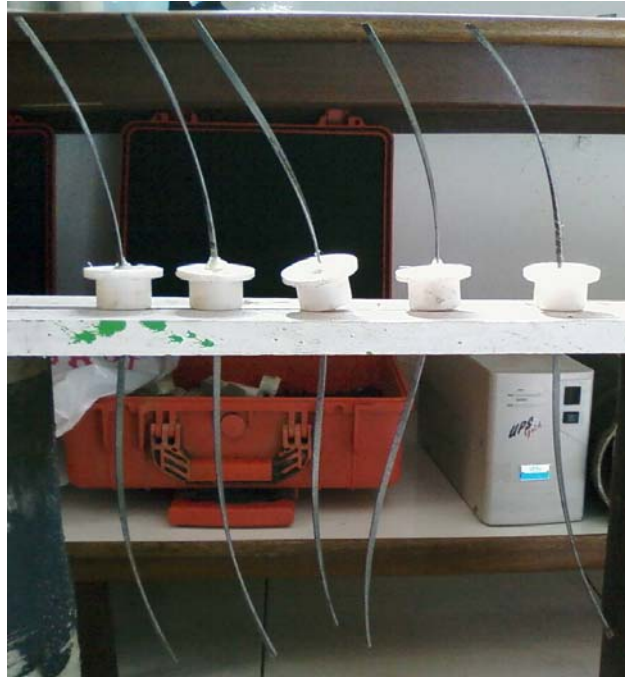


Figura 5.14: Aplicação de silano após limpeza com acetona

A Fig. 5.14 mostra o suporte onde os arames encontram-se suspensos por meio de uma base de madeira para facilitar a aplicação do silano com borrifador (aspersão). Após 10 minutos a resina epóxi é adicionada, confecção dos corpos de prova, e depois da cura dos corpos de prova os arames foram submetidos ao ensaio de tração. A Tab. 5.5 demonstra os dados do ensaio de tração.

Tabela 5.5: Tensão ao arrancamento dos arames com perfil helicoidal e tratamento superficial

Tensão ao arrancamento em MPa	
Corpo de prova	Profundidade de ancoragem de 200mm
1	4,98
2	5,13
3	5,30
4	5,18
5	5,13
1	5,13
Média	5,18 ± 0,07

O gráfico da Fig. 5.15 ilustra dos dados do ensaio de tração.

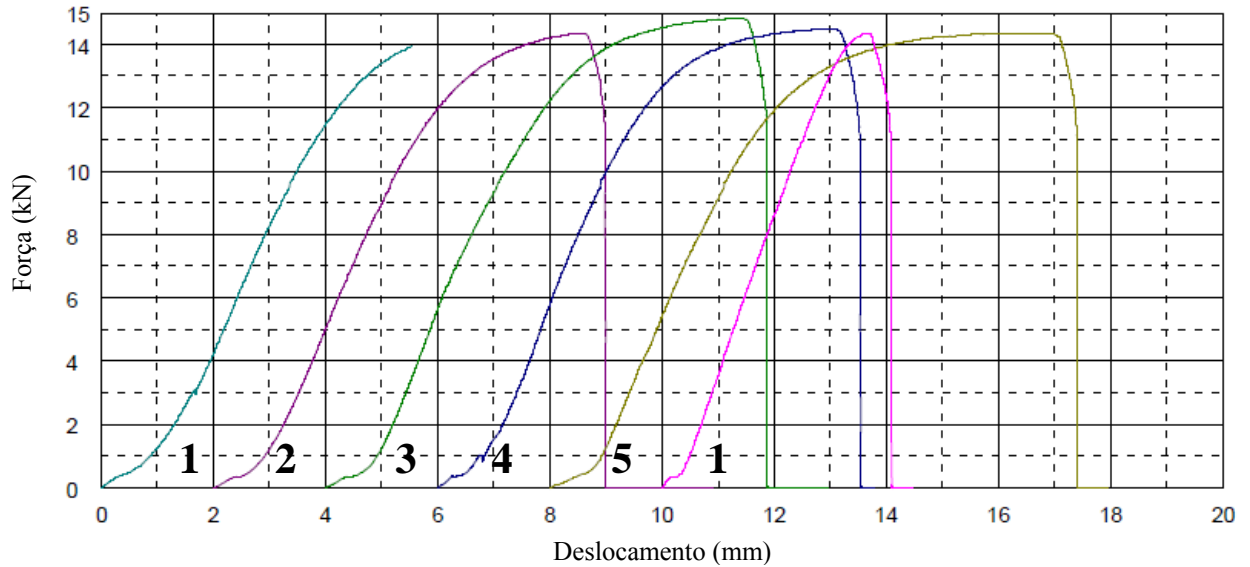


Figura 5.15: Força de aderência ao arrancamento dos arames encravados na resina epóxi com perfil helicoidal e tratamento superficial

Observando o gráfico da Fig. 5.15 vimos que a força de aderência atinge a força nominal do arame, ou seja, o tratamento superficial de 200 mm no arame foi suficiente para garantir a carga máxima de resistência do arame sem o escorregamento sobre a resina epóxi.



a) Ruptura fora do bloco de resina, cp 1



b) Ruptura fora do bloco de resina, cp 2



c) Ruptura fora do bloco de resina, cp 3



d) Ruptura fora do bloco de resina, cp 4



e) Ruptura fora do bloco de resina, cp 5

Figura 5.16: Ruptura dos arames na interface com a resina

Após os ensaios de arrancamento, foi realizado a abertura dos moldes e quebra dos corpos de prova para observação da interface resina epóxi e arame da armadura de tração.



a) Abertura parcial corpo de prova



b) Resina aderida à superfície do arame



c) Separação total do corpo de prova



d) Arrancamento da resina epóxi

Figura 5.17: Abertura de resina em arames com perfil em hélice com tratamento superficial

Diferentemente do arame sem tratamento superficial, a resina epóxi fica impregnada no arame comprovando a melhor ancoragem do arame na resina. A separação da resina epóxi do arame torna mais difícil como pode ser visto na Fig. 5.17 b. Na Fig. 5.18, é mostrado no microscópio, ampliação 50x, as superfícies do arame e da resina.

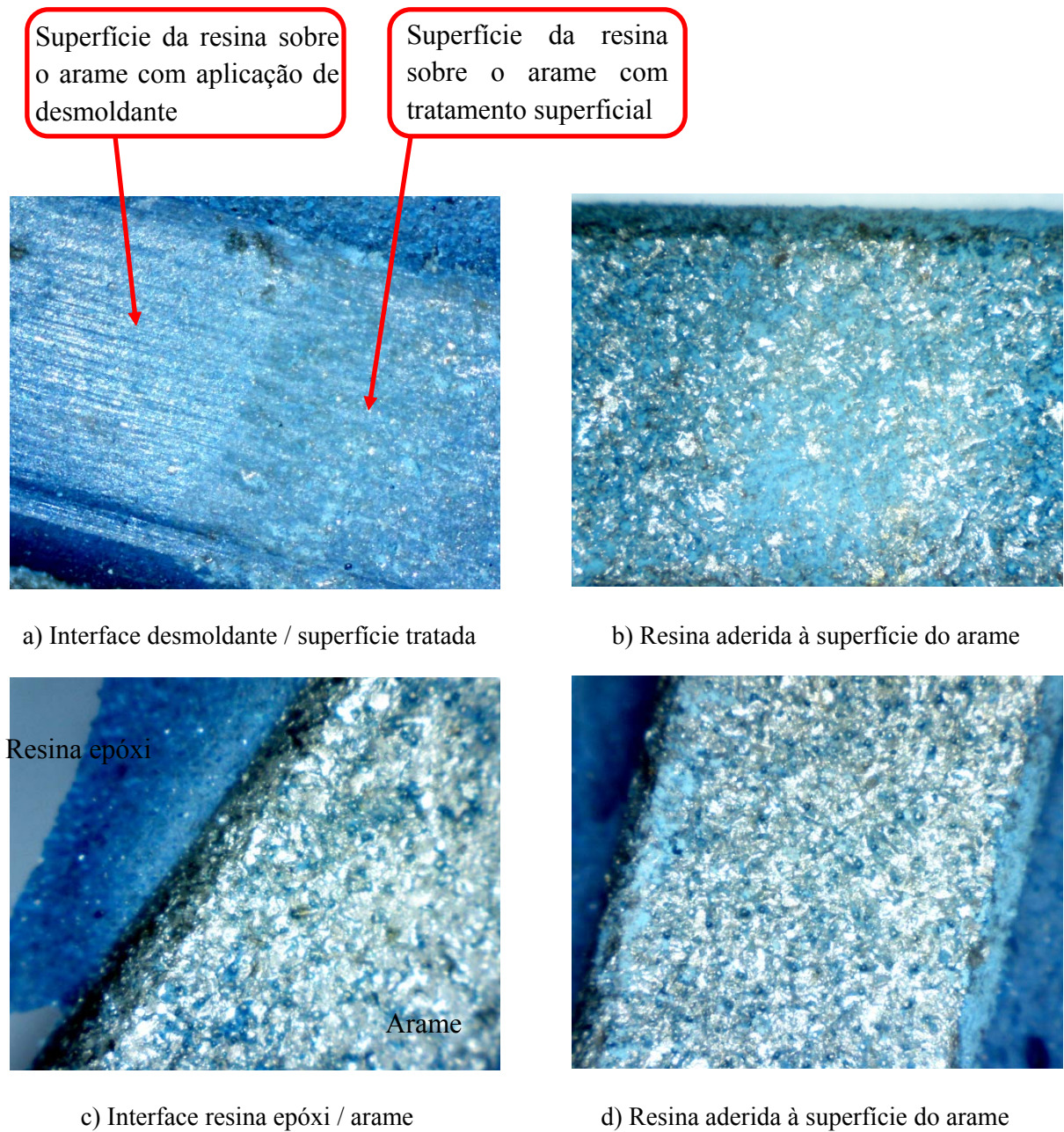


Figura 5.18: Visualização da superfície no microscópio (50x)

Podemos observar pelas imagens que a resina fica impregnada no arame da e mesmo após a abertura dos moldes alguns fragmentos maiores da resina epóxi ficam retidos sobre o arame.

5.5 Quarto ensaio de arrancamento

O quarto ensaio de arrancamento tem o objetivo de aplicar o mesmo procedimento que foi realizado no terceiro ensaio, subtítulo 5.4, porém com arames com perfil linear. Este perfil linear foi obtido através do desfazimento do perfil em hélice da configuração original do arame da armadura de tração, onde foi demonstrado na Tab. 5.2 que não houve alteração em suas propriedades mecânicas.



Figura 5.19: Arames com perfil linear

A Tab. 5.6 mostra os resultados obtidos após ensaio de tração.

Tabela 5.6: Tensão ao arrancamento dos arames com perfil linear e tratamento superficial

Tensão ao arrancamento em MPa	
Corpo de prova	Profundidade de ancoragem de 200mm
1	5,24
2	5,19
3	5,18
4	4,95
5	5,26
Média	5,17 ± 0,12

O gráfico da Fig. 5.20 ilustra os resultados obtidos no ensaio de tração.

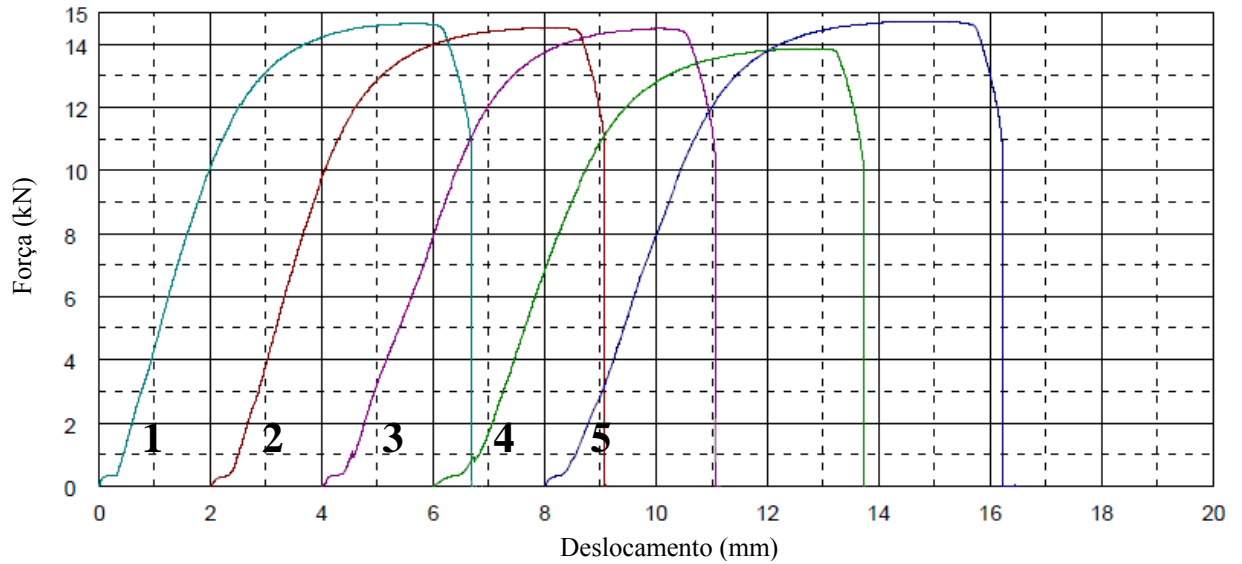


Figura 5.20: Força de aderência dos arames com perfil linear com tratamento superficial

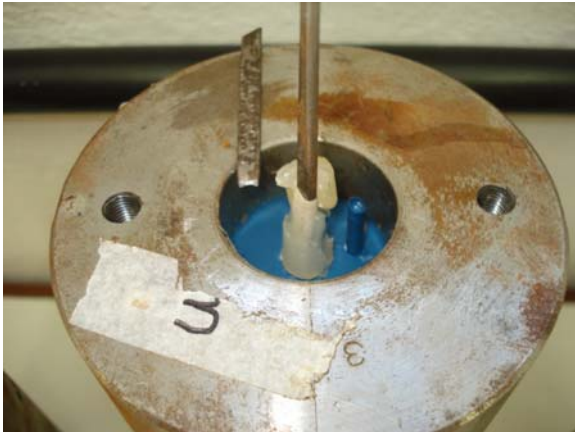
Comparando os resultados da Tab.5.5 (arames com perfil helicoidal e tratamento superficial) com os da Tab. 5.6 (arames com perfil linear e tratamento superficial), observamos que não existe diferença da tensão de aderência para os arames com perfis diferentes.



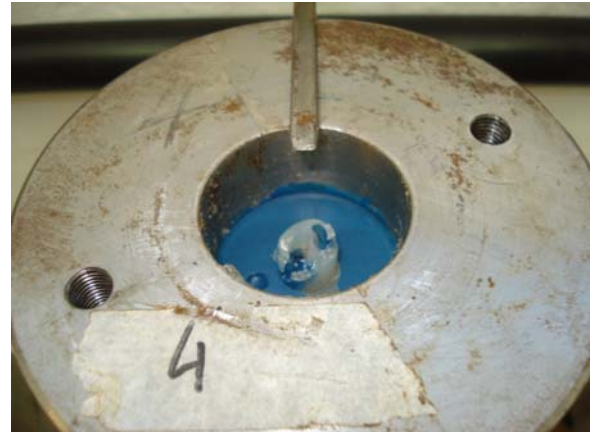
a) Ruptura fora do bloco de resina, cp 1



b) Ruptura fora do bloco de resina, cp 2



c) Ruptura fora do bloco de resina, cp 3



d) Ruptura fora do bloco de resina, cp 4



e) Ruptura fora do bloco de resina, cp 5

Figura 5.21: Rupturas dos arames com a interface com a resina

5.6 Comprimento mínimo de ancoragem

Neste ensaio de arrancamento foi estipulado um valor de ancoragem no qual o arame provavelmente escorregaria dentro da resina, ou seja, um valor mínimo da tensão de aderência para podermos calcular o comprimento mínimo de ancoragem. O mesmo procedimento foi adotado para este ensaio sendo que a única variação foi a profundidade de ancoragem de 50 mm.

Tabela 5.7: Tensão ao arrancamento do arame para uma profundidade de ancoragem de 50 mm

Tensão e força ao arrancamento para 50mm de profundidade		
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Força (kN)
1	19,24	13,47

O gráfico da Fig. 5.22 mostra o resultado obtido no ensaio de tração.

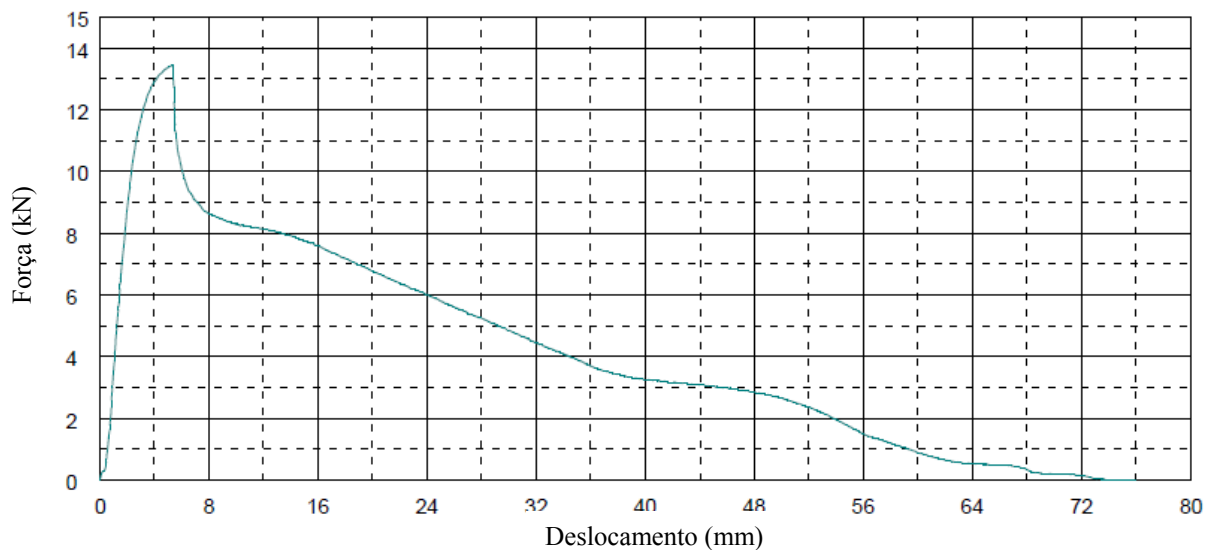
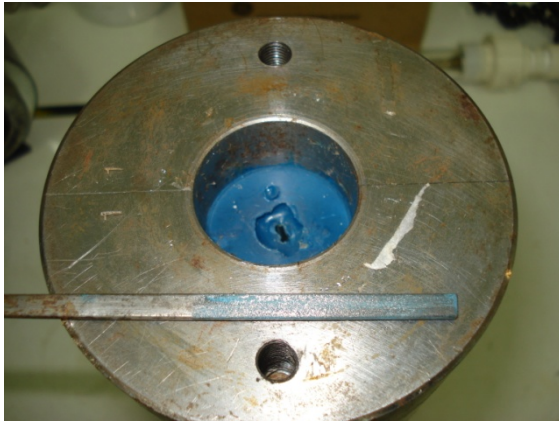


Figura 5.22: Força de aderência para profundidade de 50 mm de ancoragem

Com este ensaio, Tab. 5.7, vimos que a tensão de aderência para uma superfície com o tratamento aplicado é de 19,24 MPa. Observando o gráfico concluímos que a força de aderência está próxima a força de ruptura do material, que é de 14 kN ou 1400 MPa.



a) Deslizamento do arame sobre a resina



b) Cp retirado do molde



c) Resina epóxi aderida ao arame

Figura 5.23: Deslocamento do arame sobre a resina para o comprimento de ancoragem de 50 mm

Na Fig. 5.23 (c) é possível identificar que a resina epóxi impregna o arame, aderência mecânica.

Com base neste resultado é possível calcular o comprimento mínimo de ancoragem dos arames da armadura de tração utilizando a Eq. 4.1.

$$\tau = \frac{F_{\max}}{(2l + 2e)h}$$

Onde:

$F_{\max} = 14,0 \text{ kN}$ (força de ruptura do arame, segundo folha de dados)

$\tau = 19,24 \text{ MPa}$

logo, o comprimento mínimo de ancoragem seria 52 mm.

Após o cálculo do comprimento mínimo de ancoragem foi realizado novo ensaio de tração com uma profundidade de 55 mm.

Tabela 5.8: Tensão ao arrancamento do arame para uma profundidade de ancoragem de 55 mm

Tensão e força ao arrancamento para 55mm de profundidade		
Corpo de prova	Tensão (MPa)	Força (kN)
1	19,00	14,62

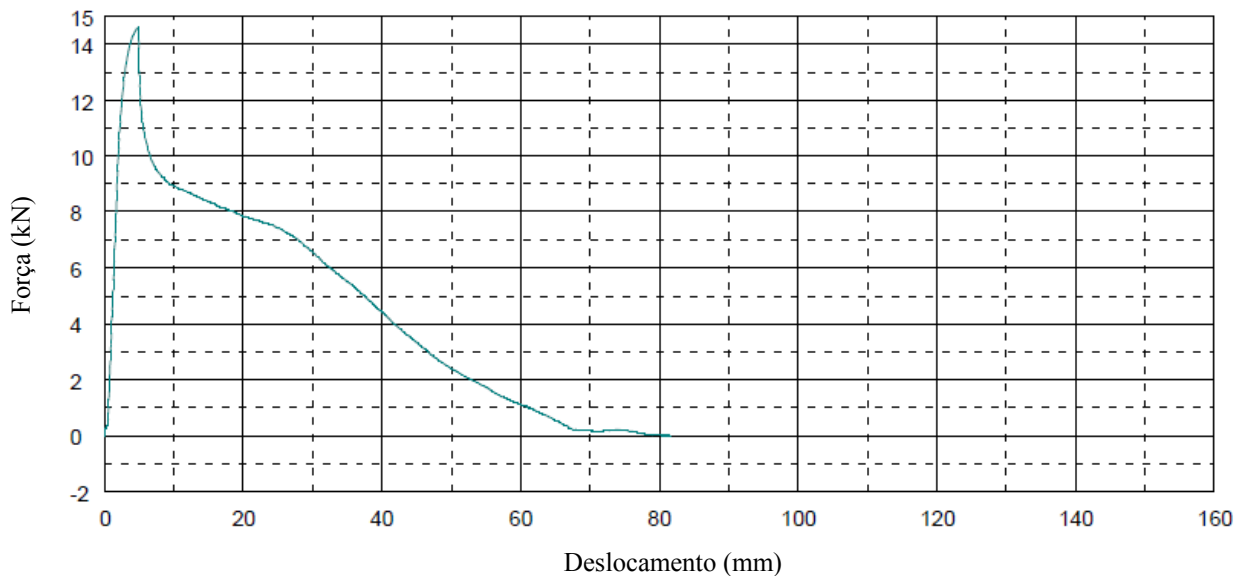


Figura 5.24: Força de aderência para profundidade de 55 mm de ancoragem

Apesar do arame ter escorregado dentro da resina epóxi, o resultado foi satisfatório pois a força até o escorregamento foi superior a força nominal de ruptura informado na folha de dados do duto flexível, 14 kN.



a) Deslizamento do arame sobre a resina



b) Cp retirado do molde

Figura 5.25: Comprimento mínimo de ancoragem de 55 mm

Após o ensaio o corpo de prova foi retirado do molde e aberto para verificar as superfícies de contato. E conforme visto no ensaio anterior há impregnação de resina sobre o arame, aderência mecânica.

6 ENSAIOS DE TRAÇÃO DOS ARAMES COM CONECTOR MONTADO

Este ensaio teve como objetivo verificar a aderência da interface resina / arame e quantificar a carga que chega ao gancho dos arames da armadura com um conector de extremidade de 2,5” montado.

Este duto apresentou problema longe de sua extremidade, fora do conector, e a eliminação do problema se deu através do corte do comprimento danificado, aproximadamente 30 m da extremidade.

Por se tratar de uma estrutura com ângulo de assentamento dos arames da armadura de tração em 35° , para a realização do ensaio de tração a mesa de ajuste para fixação do conector deveria seguir alguns critérios para êxito do ensaio.

Os critérios de projeto para esta mesa foram:

- A mesa de ajuste deveria formar um ângulo de 55° com a base da máquina de ensaio de tração para que o arame da armadura de tração ficasse à 0° em relação ao eixo da garra da máquina de ensaios. Pois o ângulo de assentamento dos arames da armadura de tração é de 35° ;
- A mesa teria liberdade de movimentos para ajuste de posição dos arames da armadura de tração.

A Fig. 6.1 ilustra a configuração final da mesa de ajuste do conector em relação a máquina de ensaio de tração.

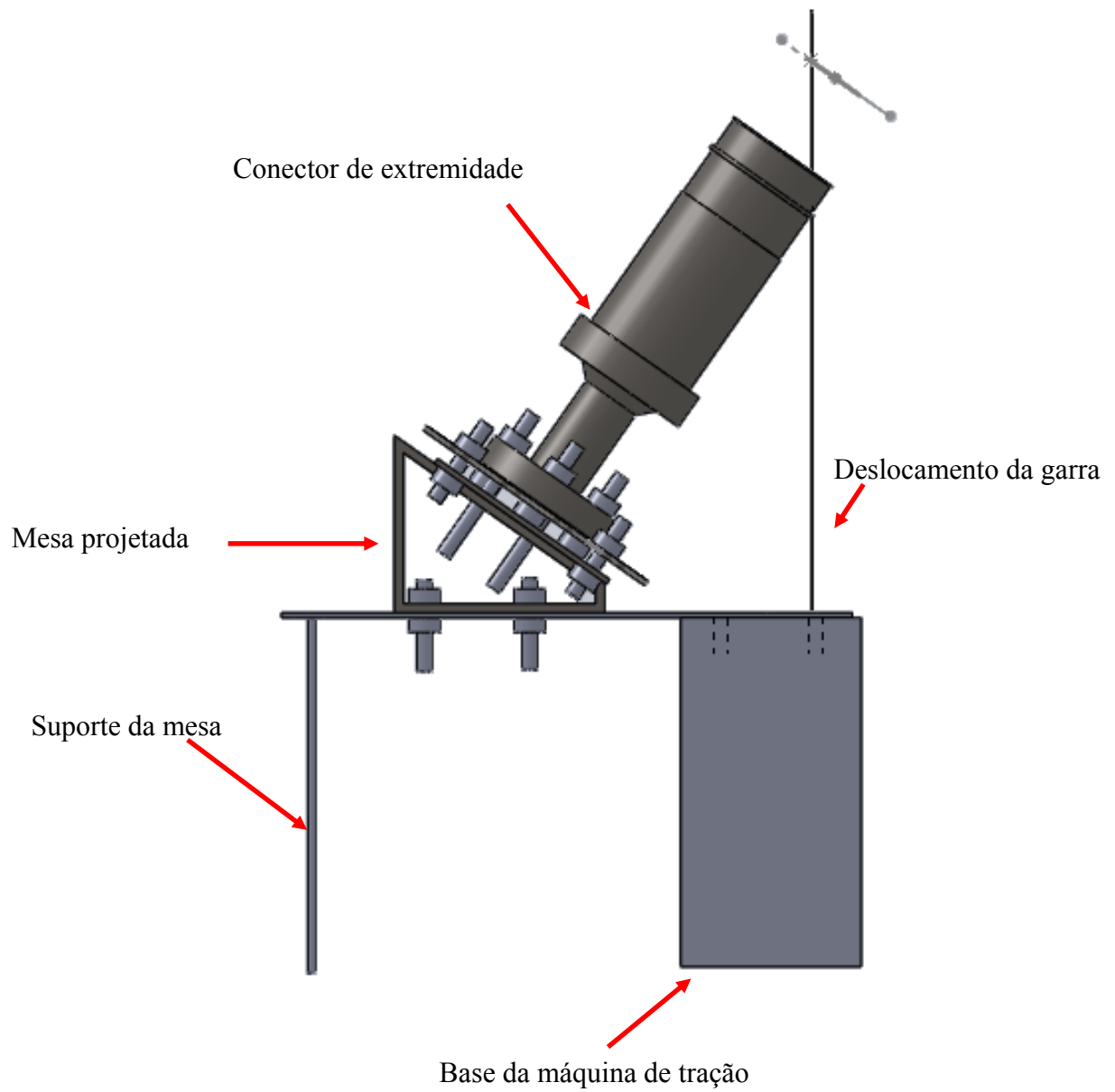


Figura 6.1: Desenho esquemático da mesa de ajuste sobre a máquina de tração

A vista isométrica do conector sobre a mesa de ajuste é mostrada da Fig. 6.2.

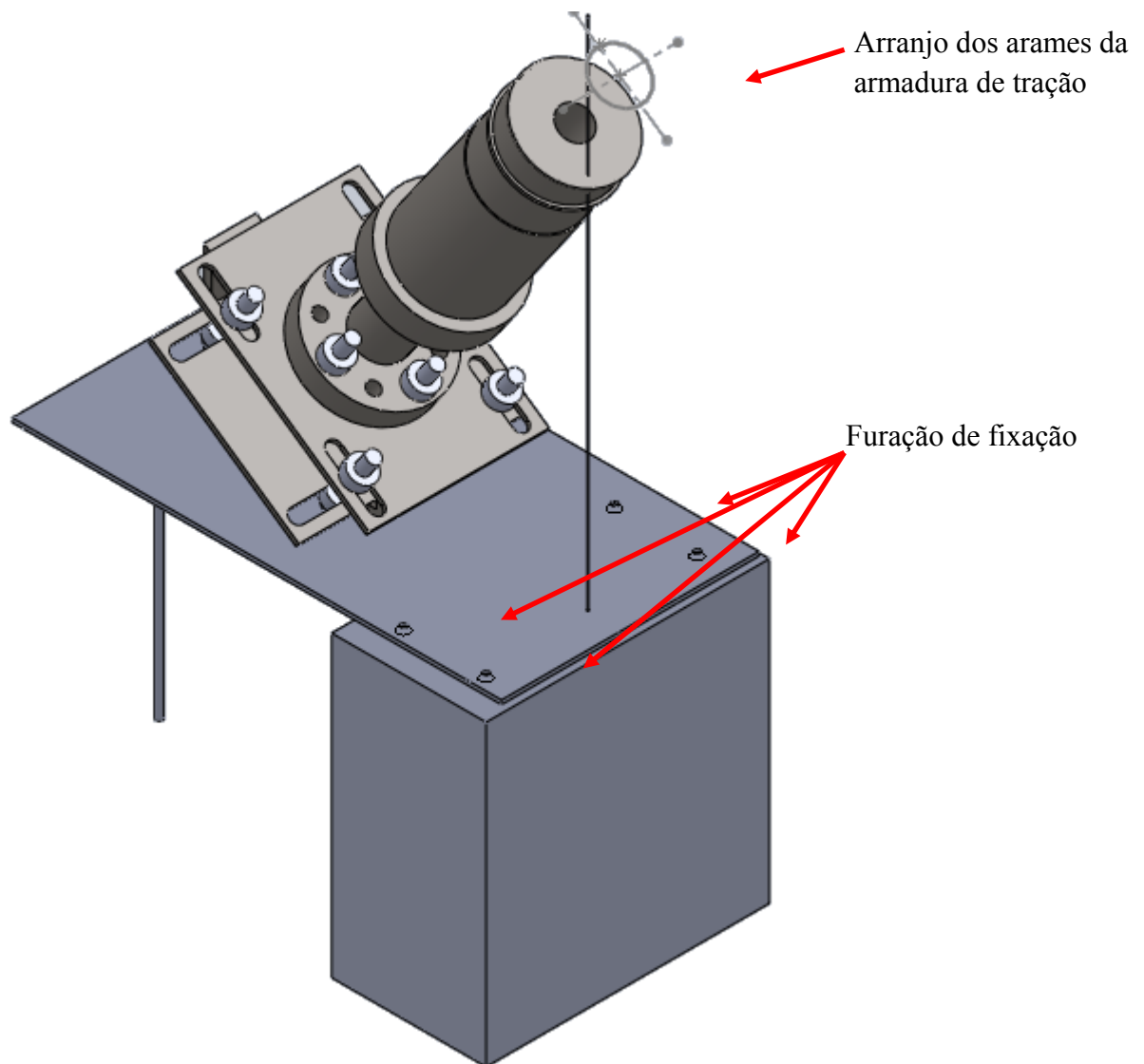


Figura 6.2: Fixação da chapa da mesa sobre a máquina de tração

Após a fabricação da mesa, cujos desenhos técnicos estão apresentados no APÊNDICE 3, foram iniciados os ensaios nos arames do conector de extremidade.

6.1 Preparação do conector de extremidade

Com o projeto da mesa concluído foi realizado o corte da linha para adequação de tamanho na máquina de tração e também uma abertura de janela na jaqueta do conector, Fig. 6.3, com quebra da resina epóxi para identificação dos arames que serão solicitados no ensaio de tração.

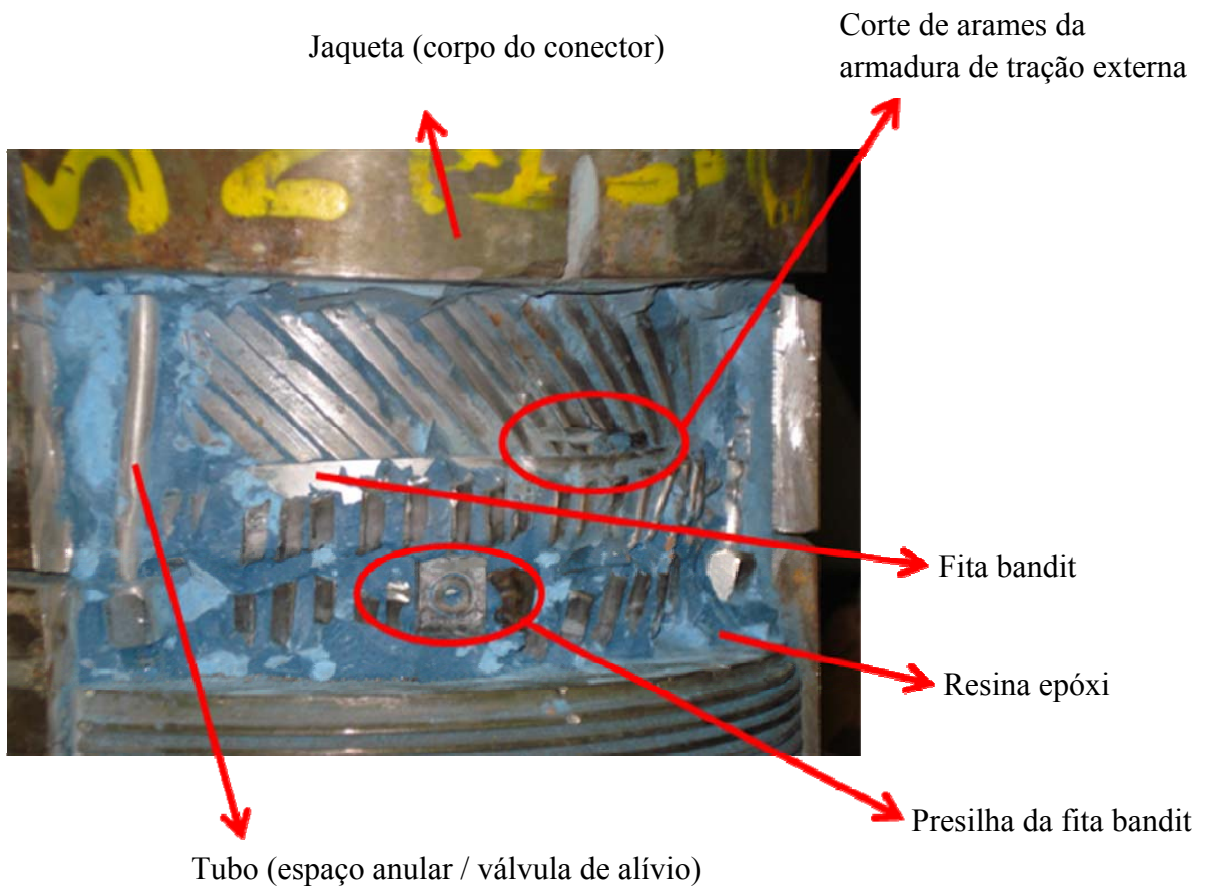


Figura 6.3: Abertura de janela no conector de extremidade

6.2 Ajuste do conector sobre a mesa

Finalizado a abertura de janela na jaqueta do conector e o corte na linha flexível, o conjunto foi montado sobre a mesa para iniciar os ensaios de tração.

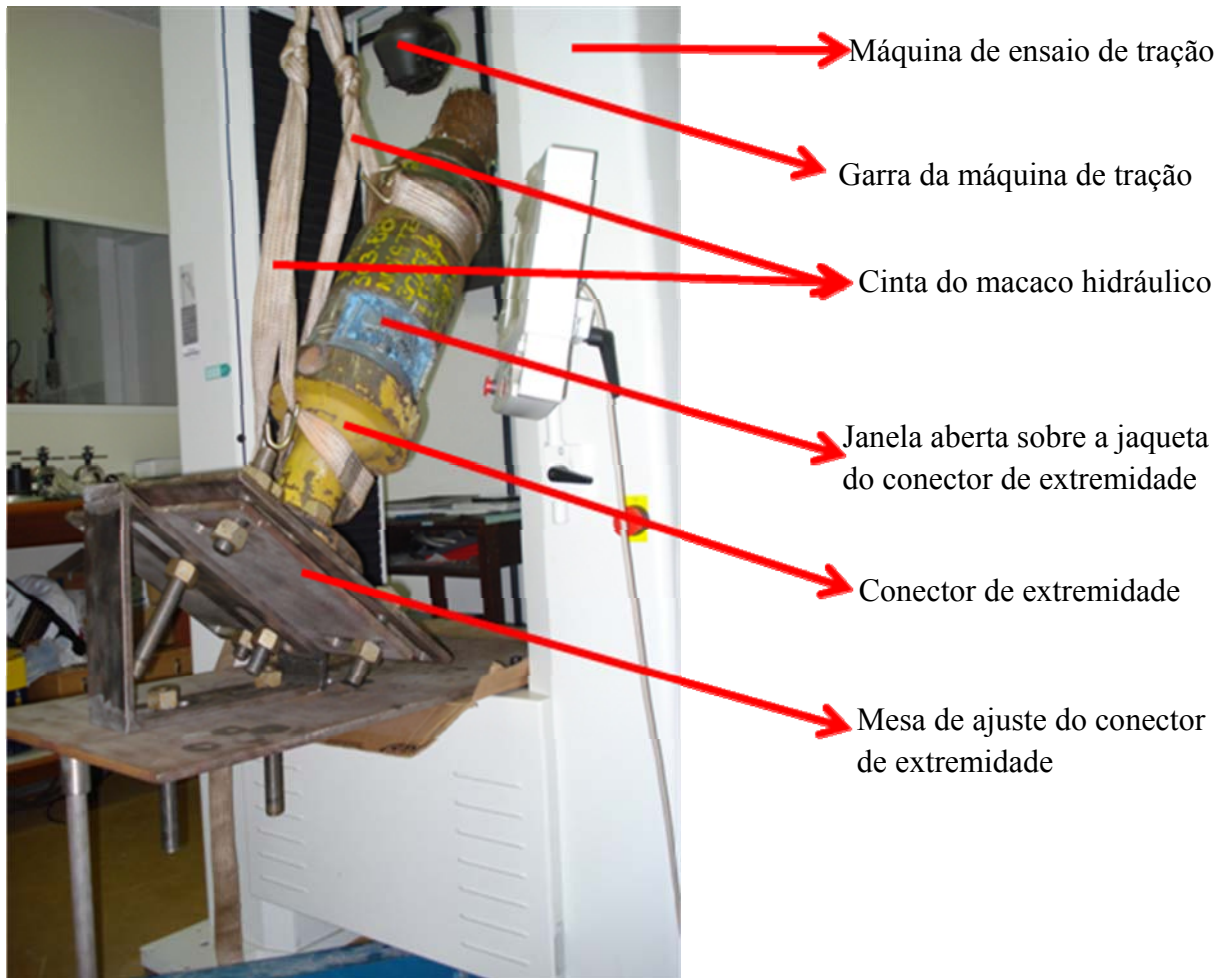


Figura 6.4: Montagem do conector sobre a mesa de ajuste

A vista lateral da montagem final da mesa de ajuste é mostrada na Fig. 6.5.



Figura 6.5: Vista lateral do conector sobre a mesa de ajuste

6.3 Primeiro ensaio dos arames

No primeiro ensaio dos arames da armadura de tração tinha como o objetivo identificar os arames aparentes da janela que foi aberta na jaqueta do conector de extremidade. Então foi realizado três primeiros ensaios.

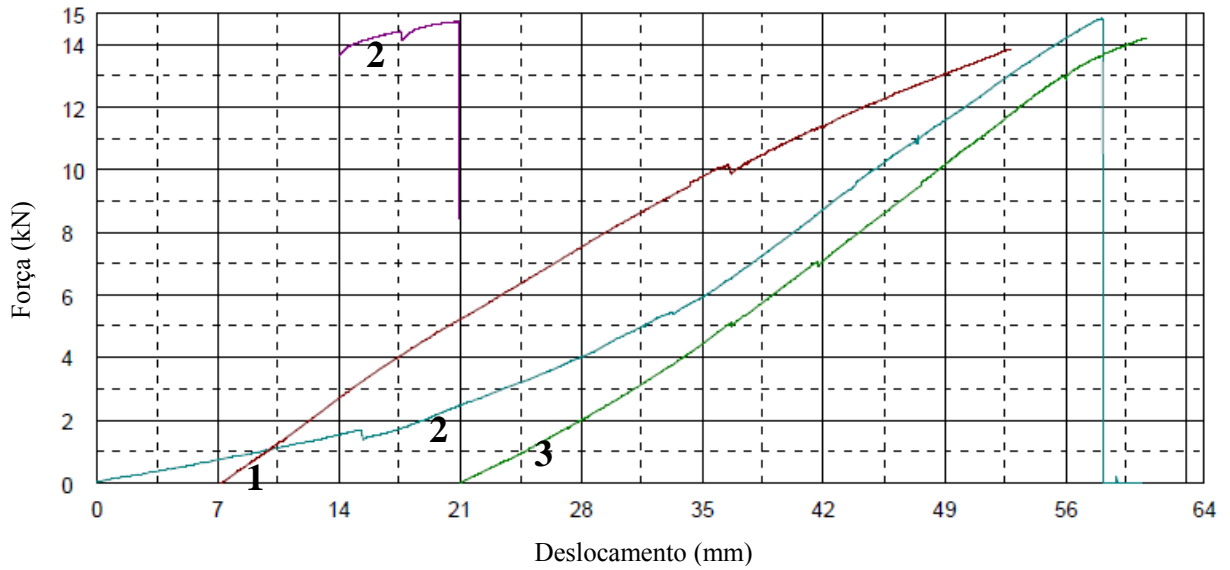


Figura 6.6: Força de aderência nos arames 1, 2 e 3

O primeiro ensaio serviu para ajustar a posição do conector de forma que o arame da armadura de tração seria tracionado à 0° em relação à garra da máquina de ensaios, ou seja, normal a força aplicada. Todos os arames romperam com aproximadamente 14 kN e a curva mais isolada, Fig. 6.6, é continuação do segundo ensaio. A Tab. 6.1. mostra os resultados obtidos.

Tabela 6.1: Força de aderência nos arames 1, 2 e 3

Arame	Força de aderência (kN)
1	14,83
2	14,74
3	14,20
Média	$14,59 \pm 0,34$

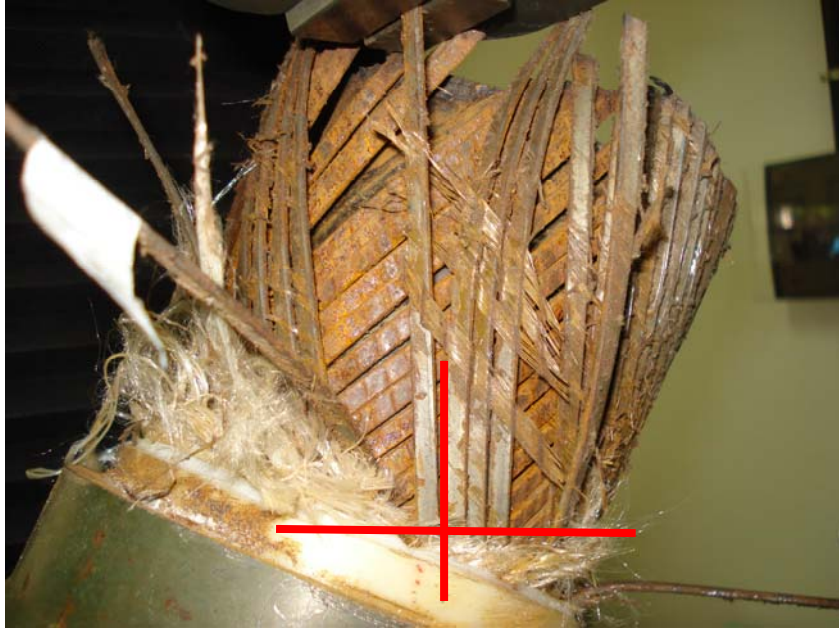


Figura 6.7: Verificação do ângulo de tração

Foi verificado, Fig. 6.7, que não há sobreposição do arame com os arames adjacentes, formando um ângulo de 0° em relação da garra da máquina de ensaios de tração.

6.4 Segundo ensaio dos arames

Como todo processo de ensaio é novo, inicialmente foi verificada a dificuldade de alinhamento do conector com a garra e o arame correspondente na janela aberta com o que seria tracionado.

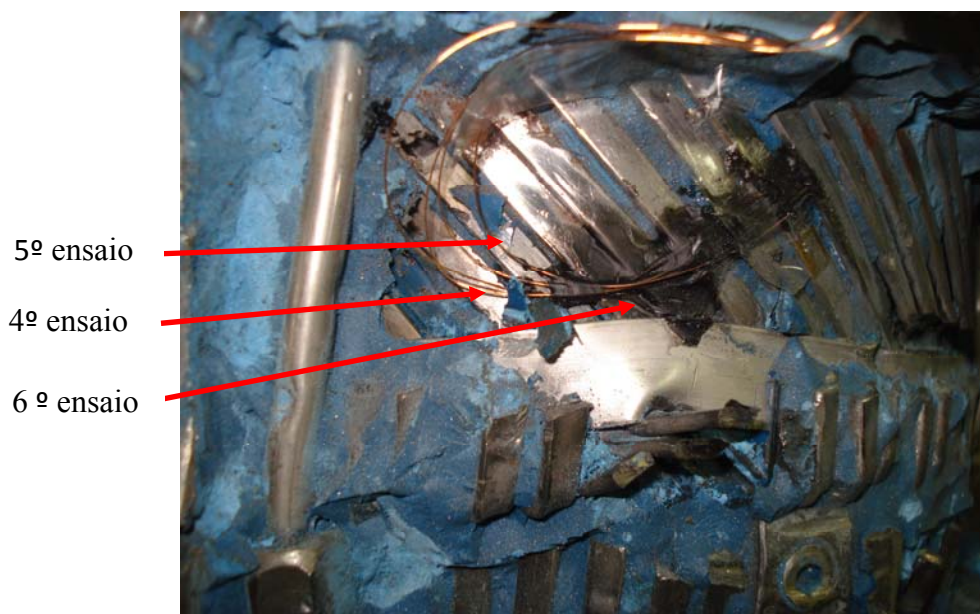


Figura 6.8: Identificação dos arames correspondentes

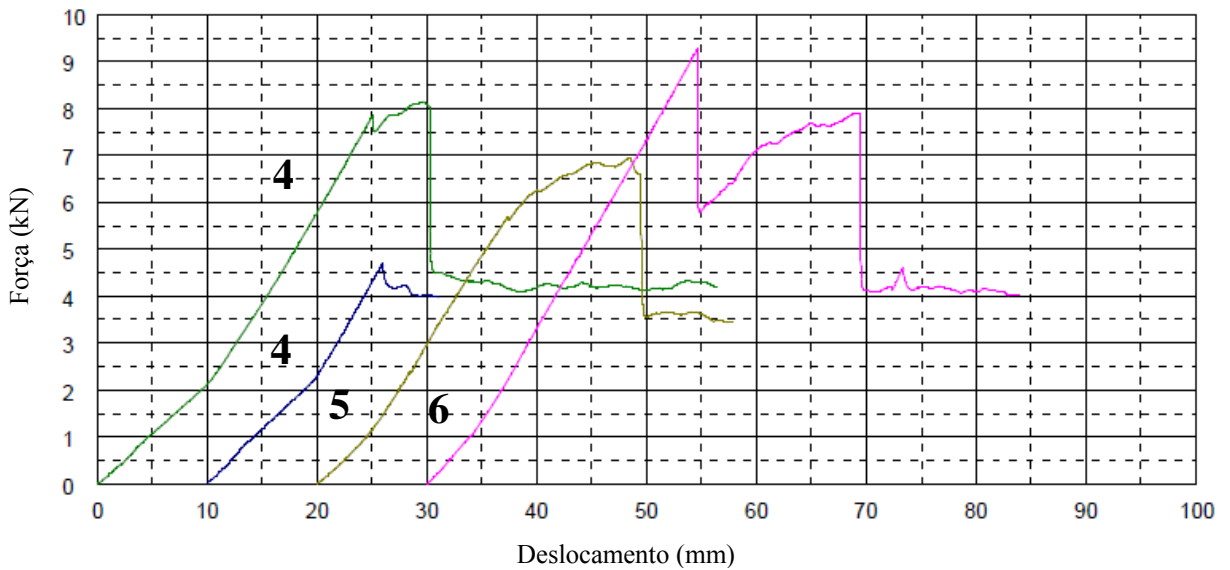


Figura 6.9: Força de aderência nos arames 4, 5 e 6

O quarto ensaio de tração foi o que demonstrou o arame correspondente (arame 4) na janela que foi aberta na jaqueta do conector de extremidade. Devido ao curso da máquina, o ensaio do arame 4 foi interrompido e repetido até o escorregamento total do arame. A força de 4,71 kN se manteve constante até o escorregamento total do arame dentro da resina.

Após a identificação dos arames foi realizado o ensaio em mais dois arames com o gancho cortado para identificar a máxima força para que o arame comece a deslocar sobre a resina.

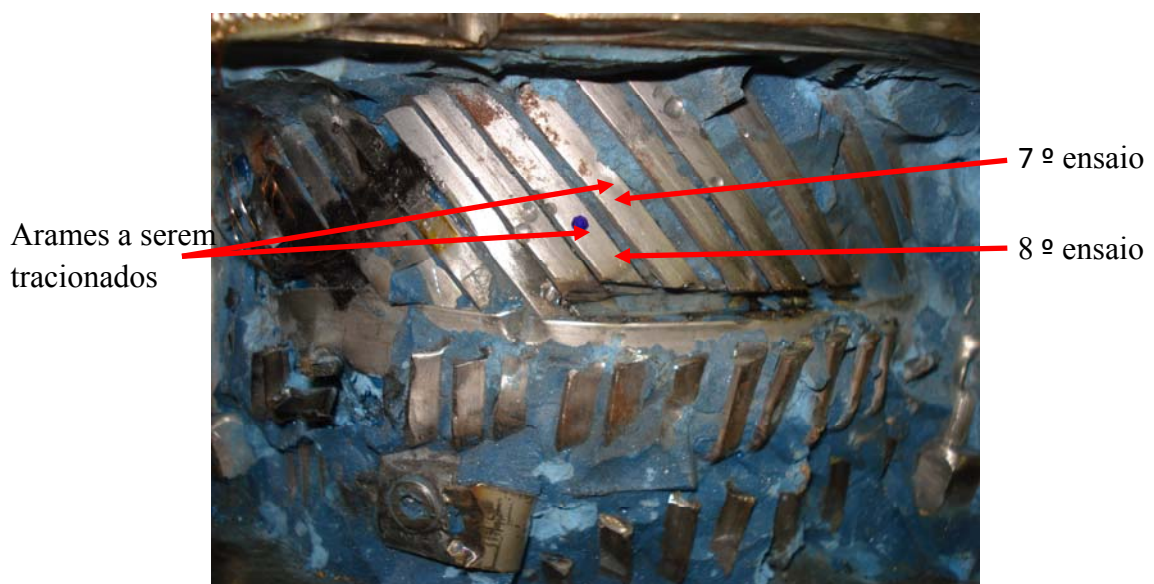


Figura 6.10: Arames a serem tracionados

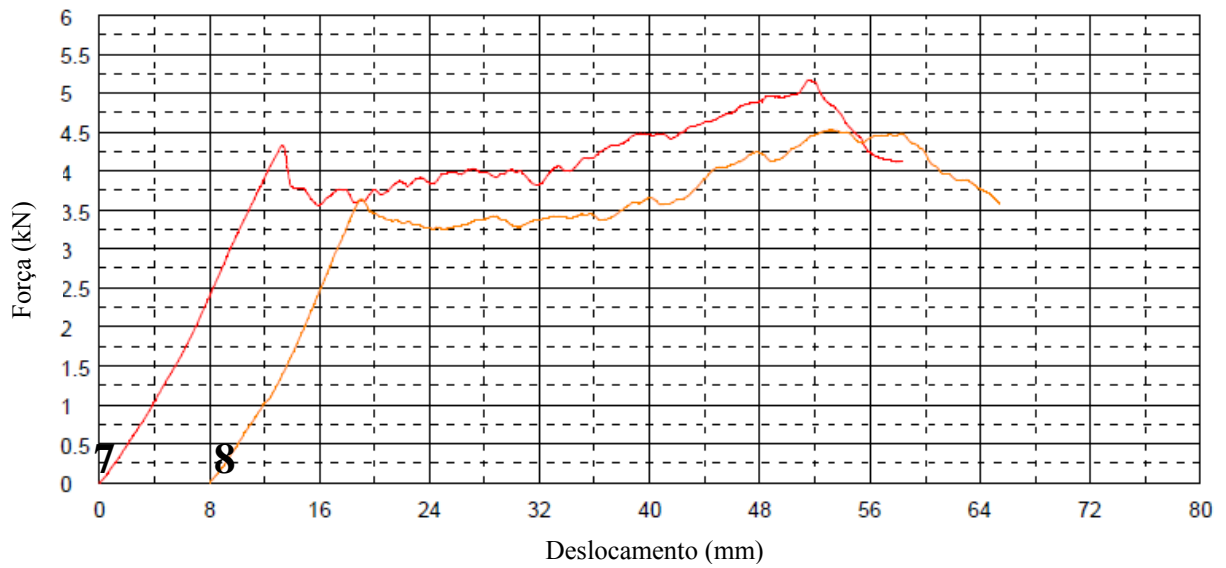


Figura 6.11: Força de aderência dos arames 7 e 8

No gráfico da Fig. 6.11, observamos que após a queda da força o arame começa a adquirir carga novamente. Isso se deve ao fato de que ao cortar os arames da armadura externa, a rebarba proveniente do corte com esmerilhadeira, ao entrar na resina provoca uma resistência mecânica fazendo com que a força aumente.

Abrasão devido a atrito mecânico



Figura 6.12: Abrasão na resina

A Tab. 6.2 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento realizado nos arames 4 ao 8.

Tabela 6.2: Força de aderência nos arames 4, 5, 6, 7 e 8

Arame	Força de aderência (kN)
4	8,16
4	4,72
5	6,96
6	9,28
7	5,18
8	4,53

6.5 Terceiro ensaio dos arames

Neste ensaio foi instalados *strain gages* (modelo PA-06-125AA-350-LEN) para verificação da carga que chega aos ganchos dos arames da armadura de tração.

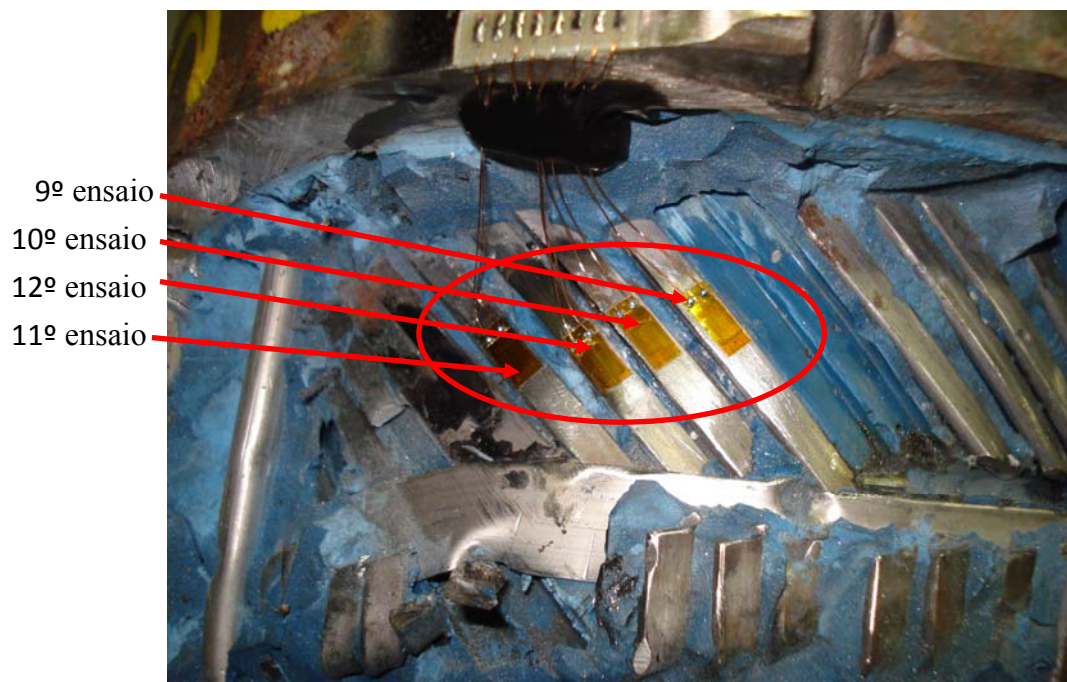


Figura 6.13: Instalação de *strain gages*

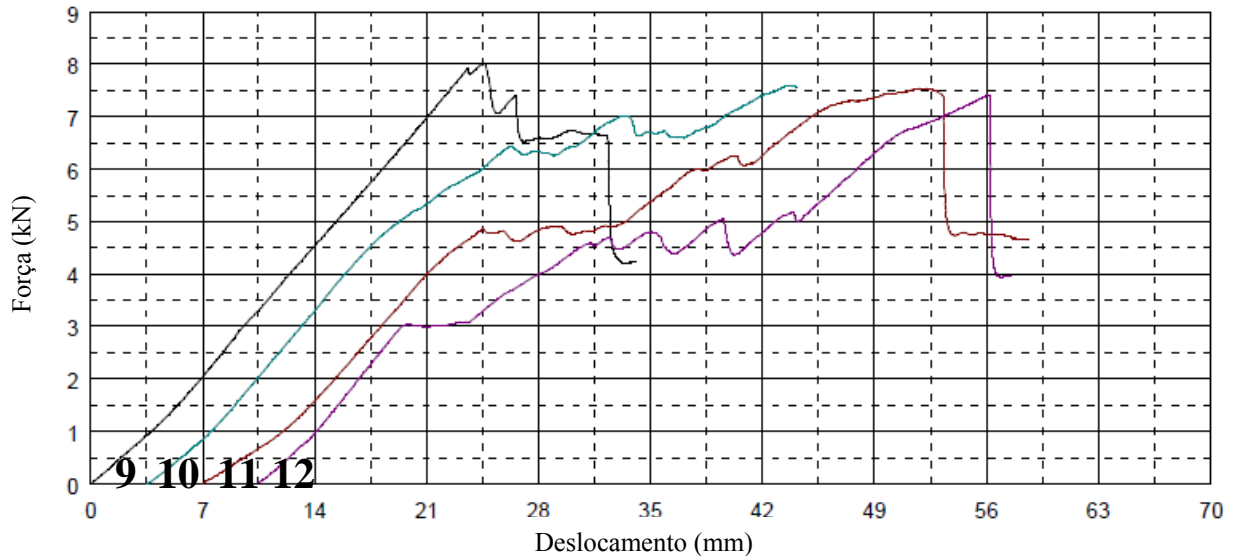


Figura 6.14: Força de aderência dos arames 9, 10, 11 e 12

Todos os picos do gráfico da Fig. 6.14 com a máxima força no gráfico representam as rupturas dos ganchos dos arames. E a terminação dos ensaios está associado à danificação dos *strain gages* que se danificavam conforme o deslocamento dos arames para dentro da resina.

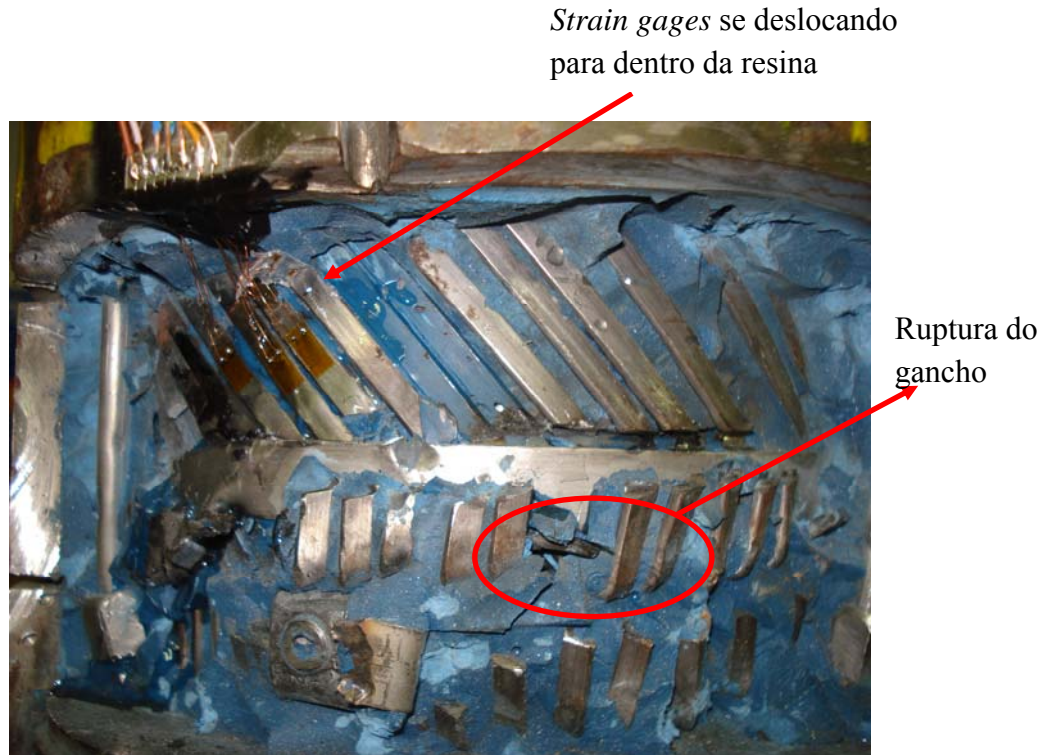


Figura 6.15: Deslocamento do *strain gage* para dentro da resina

Tabela 6.3: Força de aderência nos arames 9, 10, 11 e 12

Arame	Força de aderência
9	8,05
10	7,60
11	7,56
12	7,42
Média	7,65 ± 0,27

6.5.1 Primeiro ensaio com *strain gage*

O primeiro ensaio com *strain gage*, arame 9, apresentou está representado no gráfico da Fig. 6.16.

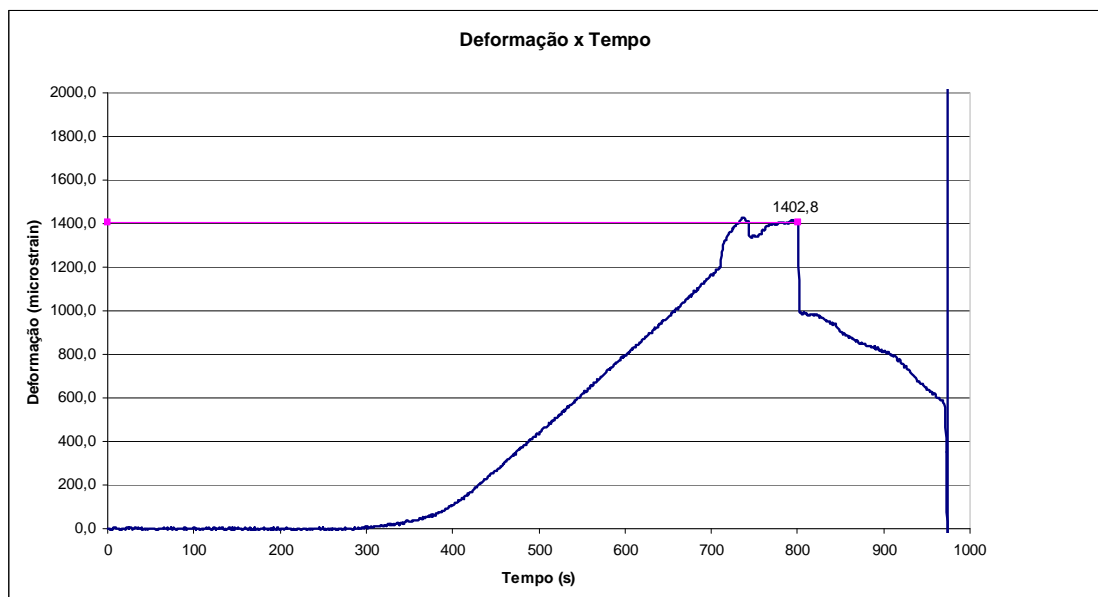


Figura 6.16: Deformação em função do tempo no arame 9

Este gráfico da Fig. 6.16 nos fornece o valor da deformação, ε , em microstrain em função do tempo. Conforme o avanço da garra, 2 mm/min, o *strain gage* registrava a deformação do arame através de um gráfico. Assumindo a seguinte fórmula:

$$\varepsilon_l = \frac{F}{A \cdot E}$$

(6.1)

onde,

ε_l = deformação

F = força

A = área da seção transversal

E = módulo de elasticidade, para o aço 210 GPa

Substituindo os valores temos um gráfico de força em função do tempo, Fig. 6.17.

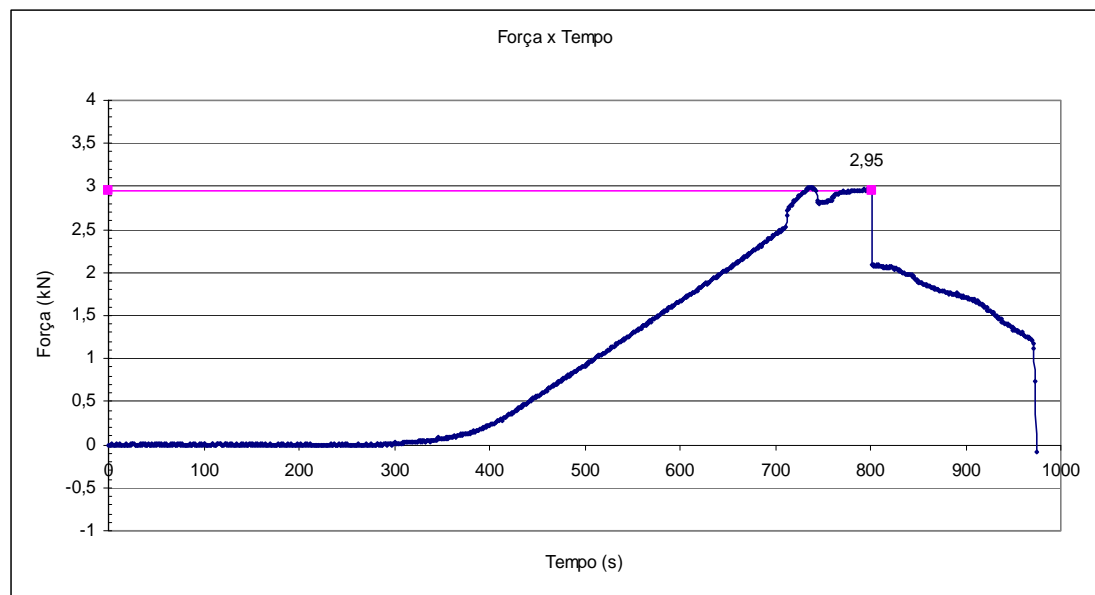


Figura 6.17: Força em função do tempo no arame 9

O gráfico da Fig. 6.17 nos fornece o valor do carregamento, força, que chega ao gancho da armadura de tração. Esta força de 2,95 kN é o suficiente para romper o gancho do arame na região em que foi aberto a janela na jaqueta do conector.

6.5.2 Segundo ensaio com *strain gage*

O segundo ensaio com *strain gage*, arame 10, está representado no gráfico da Fig. 6.18.

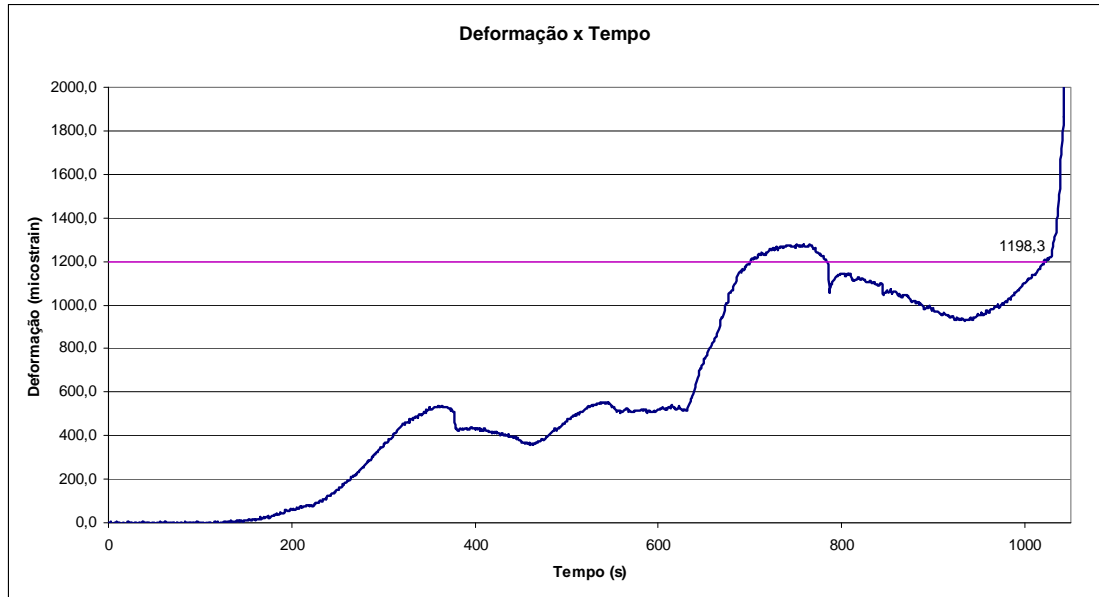


Figura 6.18: Deformação em função do tempo no arame10

Estes sucessivos picos, aumento e diminuição na deformação, estão associados ao escorregamento da fita bandit que não resistiu ao ensaio de tração movimentando-se junto com o gancho da armadura de tração. Porém a danificação do strain gage se tem quando atinge 1198,3 microstrain e a ruptura no gancho com 7,6 kN conforme gráfico da Fig. 6.20. A Fig. 6.19 indica o escorregamento da fita bandit.



Figura 6.19: Escorregamento da fita bandit

Substituindo os valores e aplicando a Eq. 6.1 obtemos um gráfico de força em função do tempo, Fig. 6.20.

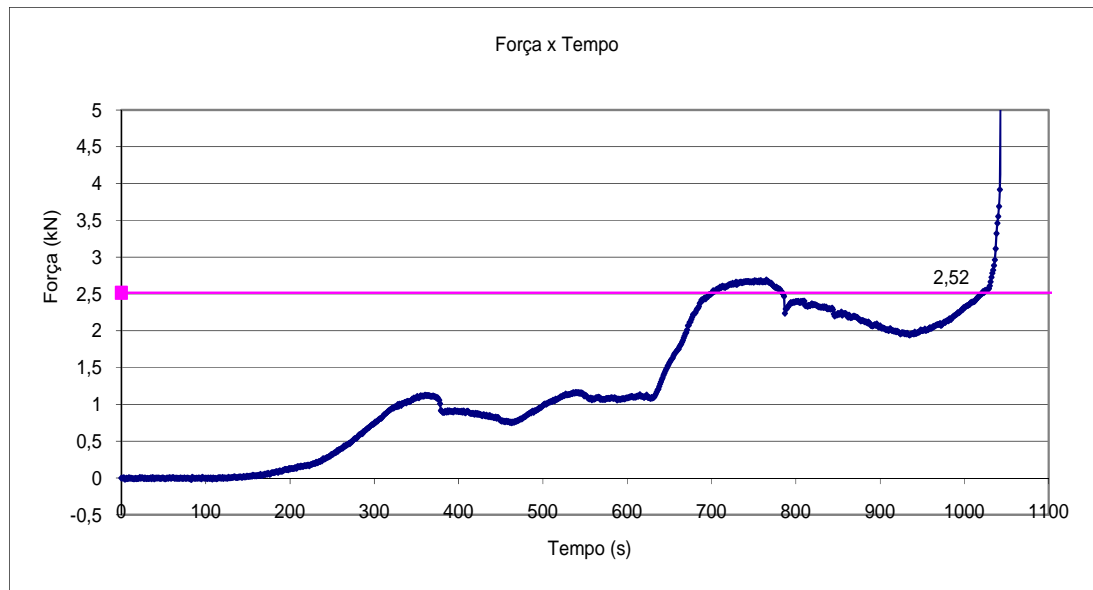


Figura 6.20: Força em função do tempo no arame10

Os outros ensaios com strain gages não foram inseridos devido a destruição dos mesmos por causa do deslocamento do arame por dentro da resina pelo fato da fita bandit já estar muito deslocada.

6.6 Quarto ensaio dos arames

O terceiro ensaio teve o objetivo de verificar a força de aderência na região em que os arames estavam envolvidos completamente pela resina e protegidos pela jaqueta do conector de extremidade.

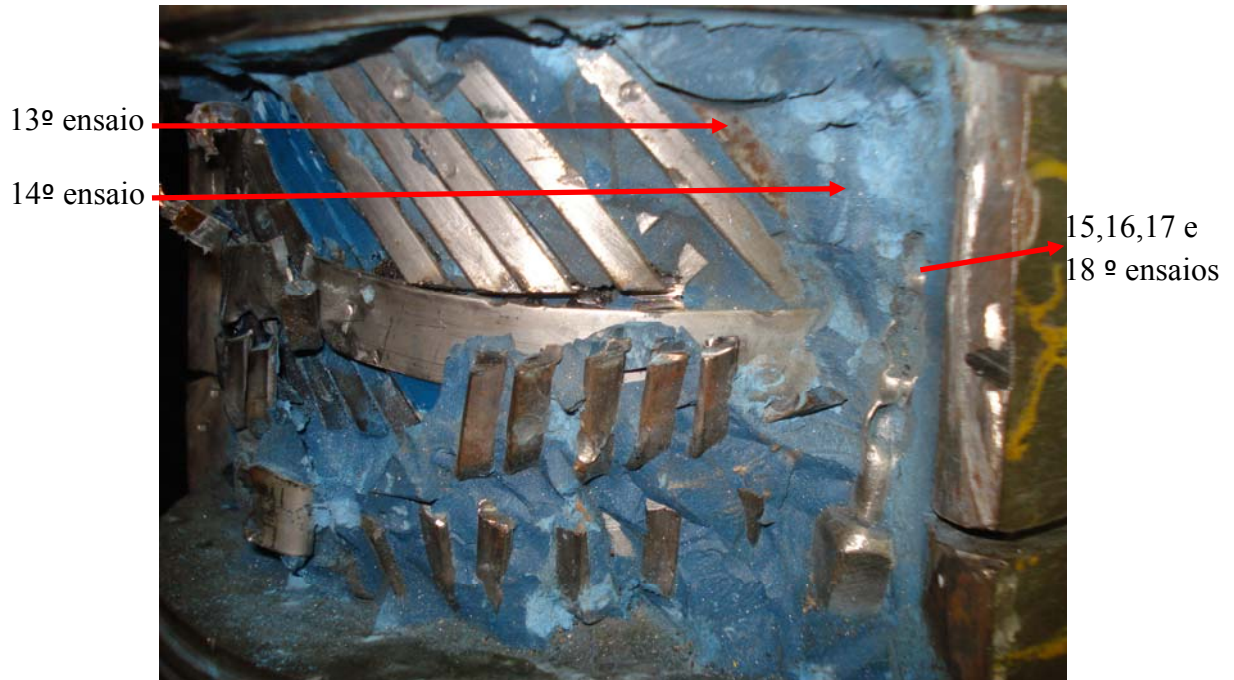


Figura 6.21: Ganchos cobertos com resina epóxi

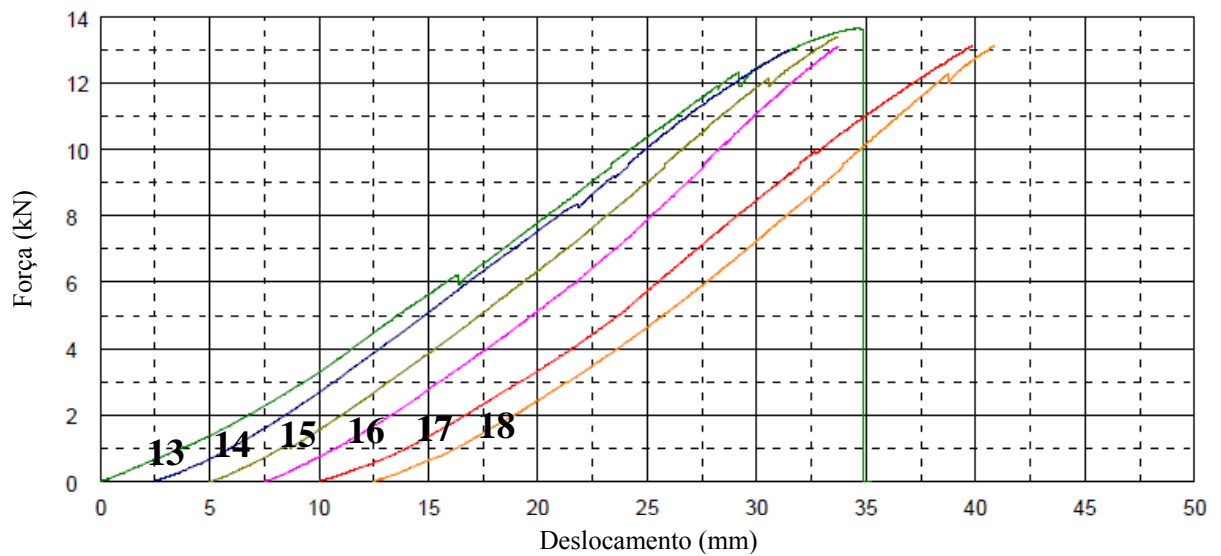


Figura 6.22: Força de aderência nos arames 13, 14, 15, 16, 17 e 18

No 13º ensaio de tração houve ruptura do arame fora da garra da máquina tração com 13,67 kN provocando um tranco muito forte no conjunto. Com isto foi estipulado que o ensaio seria interrompido quando a força aproximasse de 13 kN.

Seguindo o andamento dos ensaios, não houve mais nenhuma ruptura de arame devido à paralisação dos ensaios em 13 kN, lembrando que a ruptura do arame é de 14 kN.

Tabela 6.4: Força de aderência nos arames 13, 14, 15, 16, 17 e 18

Arame	Força de aderência (kN)
13	13,67
14	13,01
15	13,42
16	13,11
17	13,12
18	13,13

7 DISCUSSÕES SOBRE ENSAIO DE CONECTOR

Considerando todos os ensaios no conector, todos os valores encontrados estão apresentados na Tab. 7.1.

Tabela 6.5: Força de aderência de todos ensaios dos arames no conector

Arame	F. de aderência (kN)	Ruptura	Localização
1	14,83	Garra	Arame coberto
2	14,74	Garra	Arame coberto
3	14,20	Garra	Arame coberto
4	8,16	Gancho	Janela aberta
5	6,96	Gancho	Janela aberta
6	9,28	Gancho	Janela aberta
7	5,18	Corte	Janela aberta
8	4,53	Corte	Janela aberta
9	8,08	Gancho	Janela aberta
10	7,60	Gancho	Janela aberta
11	7,56	Gancho	Janela aberta
12	7,42	Gancho	Janela aberta
13	13,67	Fora da garra	Arame coberto
14	13,01	Interrompido	Arame coberto
15	13,42	Interrompido	Arame coberto
16	13,11	Interrompido	Arame coberto
17	13,12	Interrompido	Arame coberto
18	13,13	Interrompido	Arame coberto

Através dos resultados obtidos podemos concluir que uma carga estática de aproximadamente 4,85 kN é o suficiente para que chegue carga nos ganchos dos arames das armaduras de tração e caso este gancho já esteja rompido ele deslocará por dentro da resina. Primeira parte do conjunto, Fig. 7.2.

Também podemos concluir que a força necessária para o rompimento do gancho na janela aberta na jaqueta do conector é de aproximadamente 3 kN para este conector de 2,5". Que após a ruptura da aderência com a resina, esta força é o suficiente para romper o gancho conforme mostrado no ensaio realizado com *strain gages*.

Nos casos em que os arames estavam totalmente envolvido por resina e protegidos pela jaqueta do conector de extremidade é visto que o somatório dos três conjuntos obtidos nos ensaios experimentais seria de 9,95 kN. Conforme ensaios experimentais realizados com a abertura de janela na jaqueta do conector de extremidade este valor seria o suficiente para a

ruptura do gancho dos arames da armadura de tração. A Fig. 7.2 mostra as três partes dos ensaios de arrancamento.

- A primeira parte do conjunto é a resina coberta com a jaqueta. Sétimo e oitavo ensaios realizados, média de 4,85 kN.
- A segunda parte do conjunto é a região da janela que foi aberta 55 mm.

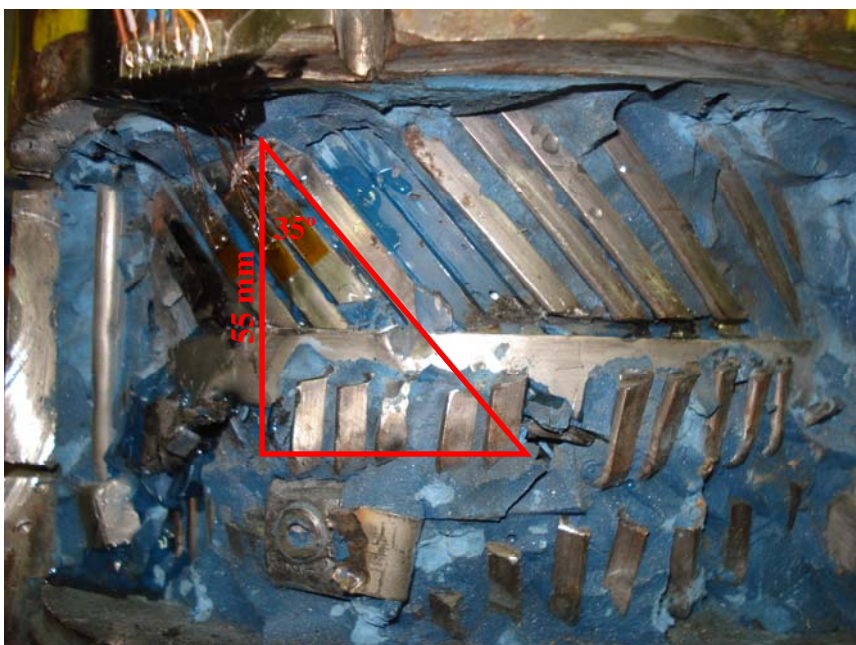


Figura 7.1: Janela sobre a jaqueta do conector

Logo a parte coberta com resina é 67 mm. Aplicando a Eq. 4.1 e considerando a tensão de 2,44 MPa (ensaios realizados com a resina), temos uma força de 2,3 kN.

- A terceira parte do conjunto é o gancho que atingiu aproximadamente 2,8 kN.

Porém vimos que o arame sobre a resina coberto com a jaqueta do conector rompia o arame fora da região da resina e próximo a garra da máquina com o limite de ruptura nominal do arame, aproximadamente 14 kN. Esta diferença de força pode estar associado ao fato de que ao tracionar o arame, o ângulo de entrada do arame no conector haja de forma a reter o uma parte desta carga fazendo com que chegue uma força menor ao gancho da armadura de tração.

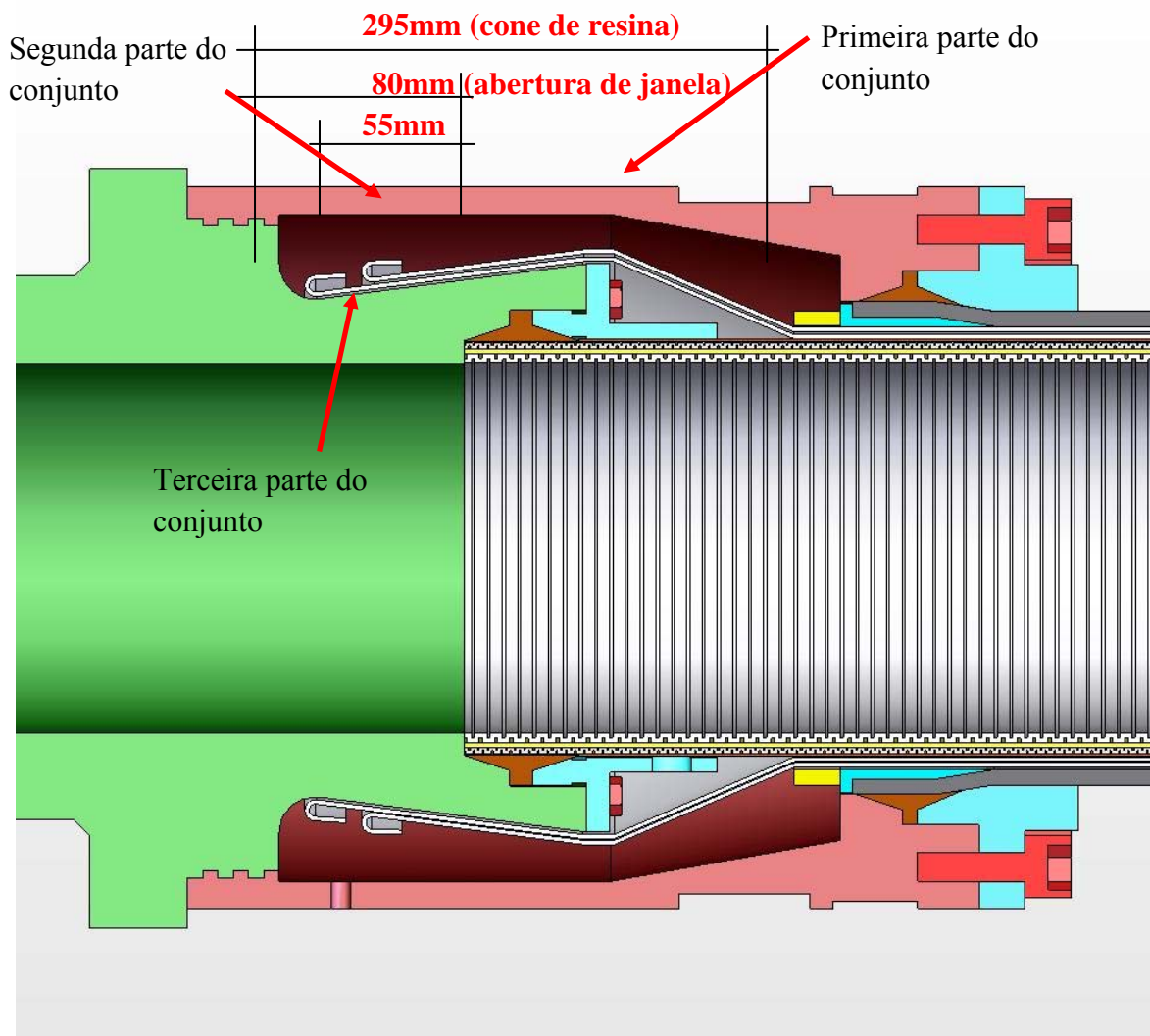


Figura 7.2: Modelo de janela aberta

Considerando os ensaios realizados com tratamento superficial, em que a superfície foi jateada e adicionado silando (provedor de aderência) com comprimento de 55 mm, este comprimento seria o suficiente para garantir que os arames da armadura de tração não escorregassem sobre a resina tornando desnecessário o gancho das armaduras no final do conector de extremidade.

8 CONCLUSÕES

Devidos a novos desafios para a exploração de petróleo em lâminas d'águas cada vez mais profundas, os risers estão se tornando mais robustos. O modo de ancoragem é um fator essencial para que garanta a integridade do duto flexível visto que a sustentação do mesmo se dá pelos arames da armadura de tração. Este novo processo de montagem com tratamento superficial garantiria que estes dutos fossem submetidos a cargas (lâminas d'águas mais profundas) mais elevadas.

Com os resultados obtidos, podemos afirmar que para uma melhor interface entre a resina epóxi e o arame é necessário uma tensão de aderência de aproximadamente 19 MPa, que neste trabalho é proposto por meio de tratamento superficial nos arames da armadura de tração. Este procedimento de tratamento superficial garantiria uma eficiência total da resistência mecânica do arame, visto que, o mesmo escorregou sobre a resina com uma carga superior a carga nominal.

Como conclusão para o conector de 2,5" sob carga estática, podemos dizer que os ganchos no processo de montagem são de grande importância, suportando cerca de 21,4% de sua carga nominal na região em que a janela foi aberta.

Como sugestão para trabalhos futuros é o aprofundamento através de ensaio de fadiga para verificação se não será um problema para a propagação de trincas na região onde o arame recebeu este tratamento superficial.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, ALEX PEREIRA. Análise da influência da temperatura na rigidez à flexão de linhas flexíveis. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [2] PALMER, A.C.; KING, R. A. Subsea piperliner engineering. [London]: Pennwell, 2004.
- [3] EYLES, T.; HATTON, S. Threaded risers and flowlines for field architecture. In: ADVANCES IN RISER TECHNOLOGIES, IBC, 2000. [Proceedings...]. Aberdeen, June 2000.
- [4] MCS INTERNATIONAL. UKOOA guidance note on monitoring methods and integrity assurance for unbonded flexible pipe. Aberdeen: MCS International, 2002. Job nº 2-1-4-221 GN01 Rev.05.
- [5] PETROBRAS. Áreas de atuação: produção em águas profundas. Disponível em: http://www2.petrobras.com.br/portal/frame.asp?pagina=/tecnologia2/port/areadeatuacao_exploracaoaguas.asp
- [6] FRAZER, I. Deepwater: the challenges associated with adapting deep water technology to ultra deep water requirements. Houston, 2003.
- [7] CARNEVAL, Ricardo; MARINHO, Mauro, SANTOS, Joilson. Flexible line inspection. In: EUROPEAN CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING 2006. [Proceedings...]. 2006. 106 p.
- [8] SOUZA, Paula; ALVES, Teresinha; ESTEFEN, Segen et al. Colapso de dutos flexíveis sob pressão externa. Bol. Téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, v. 43, n. 3/4, p. 141-152, jul./dez. 2000.
- [9] API RP 17B: Recommended practice for flexible pipe. 4st. ed. Washington: American Petroleum Institute, 2008.
- [10] PADILHA, José Augusto P. Análise estrutural de riser flexível com armadura de titânio. 2009. Dissertação (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [11] CALLISTER, W. D. Materials science and engineering: an introduction. 7th. ed. New York: Wiley, 2007.

[12] PARDINI, L. C. ; LEVY, F. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

[13] SAMPAIO, E. M. Um modelo de danos para juntas coladas. 1998. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

[14] VARDARO, Eduardo; LONTRA FILHO, Lauro Lemos; ALMEIDA, Marcos Carpigiani de; COSTA, Carlos Henrique Oliveira da; MACHADO, Leonardo Magalhães; LEMOS, Carlos Alberto Duarte. Projeto do conector de risers flexíveis – aspectos técnicos e testes de qualificação. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA SUBMARINA, 2., 2006, Búzios-RJ. [Anais...]. Búzios: PETROBRAS, 2006.

[15] LEMOS, Carlos Alberto Duarte. Análise de fadiga em risers flexíveis. 2005. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

[16] PETROBRAS. Comissão de Normas Técnicas. N-2409 REV. A: Specifications for flexible pipe. Rio de Janeiro, 1994.

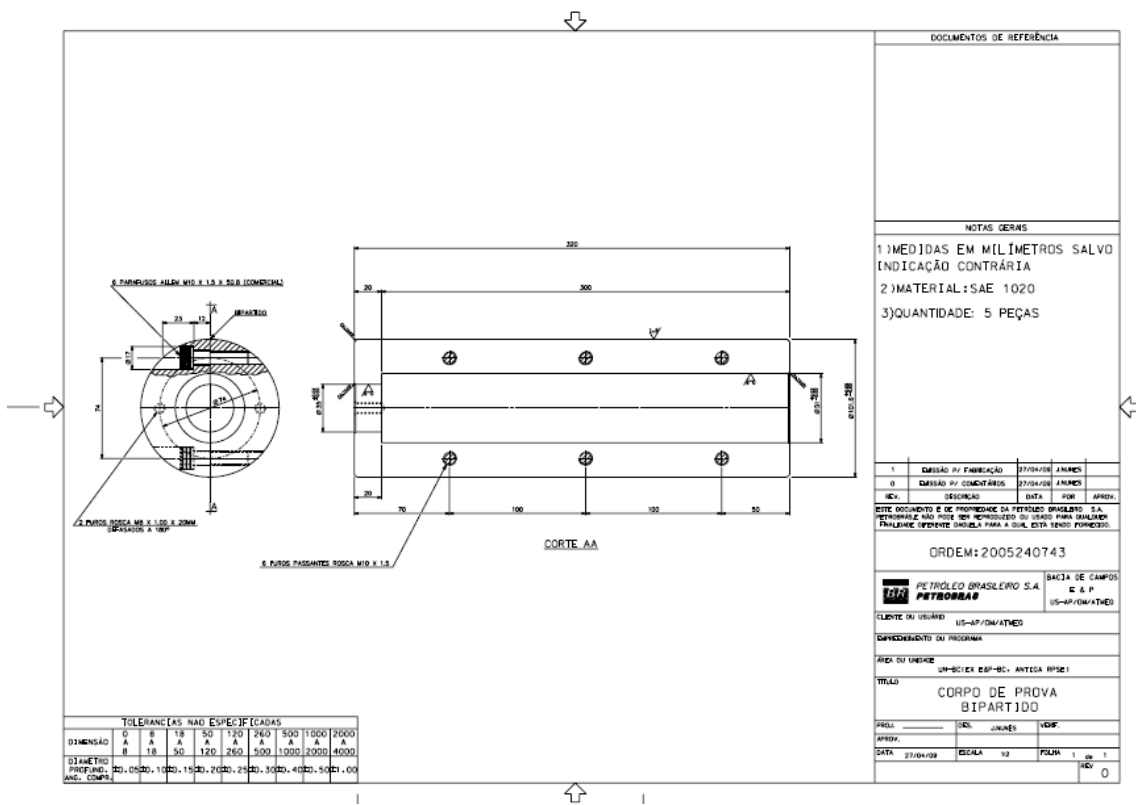
[17] VIANA, Cassiano. Uma odisséia submarina. Revista TN Petróleo, n. 59, p.23, mar./abr. 2008.

[18] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10719: Apresentação de relatórios técnico – científicos. Rio de Janeiro, 1989. 9 p.

ANEXO A: PROPRIEDADES DA RESINA SW404 BR

Resina: RenGel SW 404			
Endurecedor: HY 404			
Características Iniciais	Produto / °C	Dados	Unidade
Cor	Resina:	Azul	-
	Endurecedor:	Amarelo Transparente	-
Viscosidade a 25°C	Resina:	Tixotrópica	cPs
	Endurecedor:	3.000 - 5.000	cPs
Densidade (peso por volume)	Mistura:	Tixotrópica	cPs
	Resina:	1,85 - 1,95	G / cm ³
Proporção de Mistura (em peso)	Endurecedor:	1,05 - 1,10	G / cm ³
	Resina:	100	-
Temperatura de Trabalho	Endurecedor:	9	-
	Reforço:	< >	-
Tempo de uso	Mistura:	20 - 25	°C
	Mistura:	20 - 30 (4)	Minutos
Tempo de Endurecimento a 25°C	Mistura:	(6 - 8)	Horas
	25°C:	(3 - 5)	Dias
Tempo de Cura a	50°C:	20 - 24	Horas
	80°C:	< >	Horas
	100°C:	< >	Horas
	120°C:	< >	Horas
Propriedade após cura	Norma	Após Cura de 7 dias a 25°C	Unidade
Resistência a Tração	VSM - 77101	(5 - 6)	KG / mm ²
Resistência a Pressão	VSM - 77102	13 - 15	KG / mm ²
Resistência a Flexão	VSM - 77103	(12 - 14)	KG / mm ²
Resistência ao Impacto	ISO 179	7,5 - 9,5	KJ / m ²
Densidade	VSM - 77109	1,8 - 1,9	G / cm ³
Coefic. de Dilatação Térmica Linear	VSM - 77110	35 - 40	10-6°C
Retração Linear (Objeto: 28x1x3cm)	< >	0,06 - 0,08	%
Condutividade Térmica	DIN 52612	0,7	KCAL / MH°C
Módulo de Elasticidade	VSM - 77111	900 - 1000	KG / mm ²
Dureza Shore D	ISO 868	85 - 90	Unidades
Estabilidade Dimensional: Martens	Din - 53458	45 - 65	°C
Aplicações	Modelos padrão, copiador, fundição. Gabaritos. Moldes para PRFV.		
Métodos de Aplicações	Sistemas de superfície aplicáveis a pincel. Não escorrem em espessuras entre 0,8mm e 1mm.		
Características Especiais	Superfície com alta resistência a abrasão. Fornecido em conjunto de trabalho. Sistemas de resinas epóxi formuladas com cargas especiais para os requisitos de cada utilização específica.		

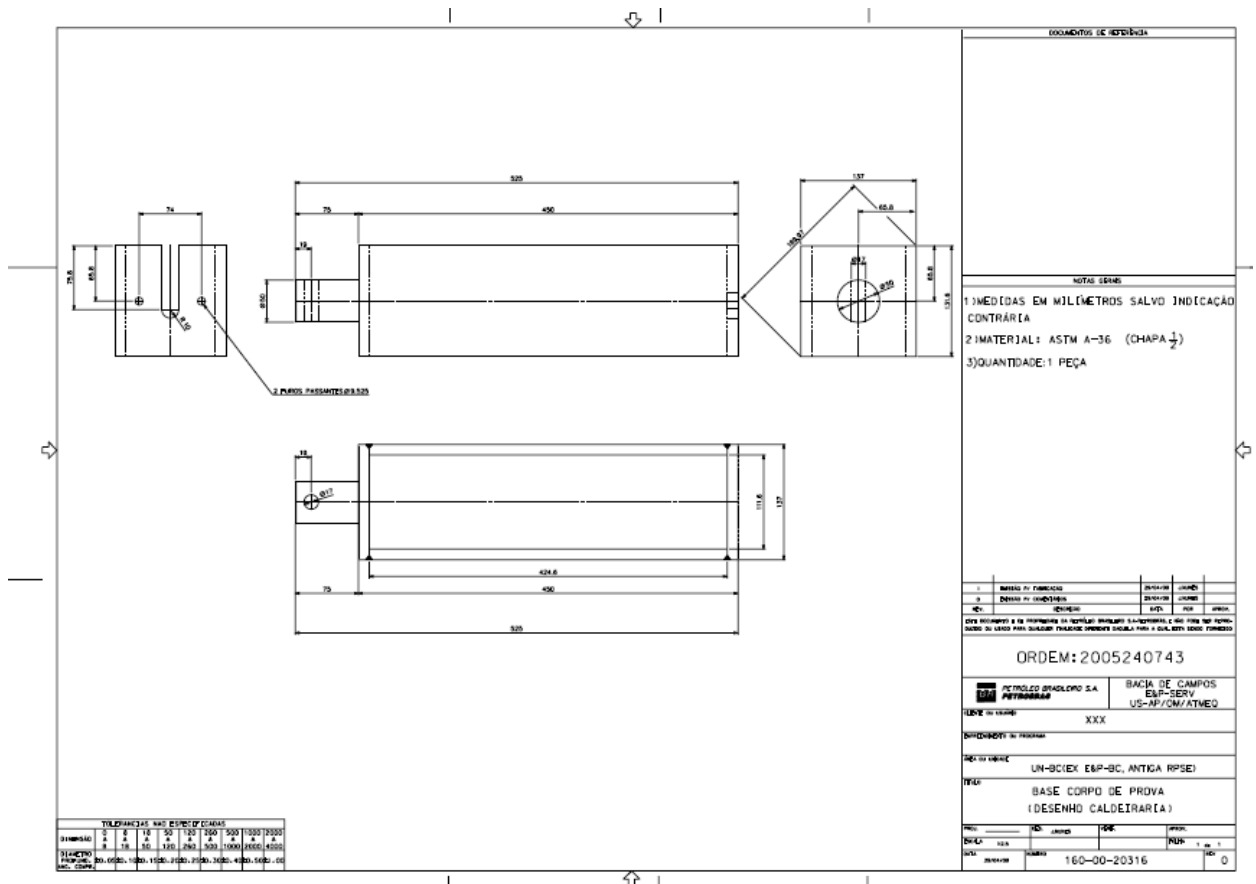
APÊNDICE 1: MOLDE DO CORPO DE PROVA



DIMENSÃO	TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS							
	0-8	8-18	18-30	30-50	50-120	120-260	260-500	500-1000
DIÂMETRO	H8	f8	f7	f7	f7	f7	f7	f7
PROFUND.	H8	f8	f7	f7	f7	f7	f7	f7
ANG. COMP.	H8	f8	f7	f7	f7	f7	f7	f7

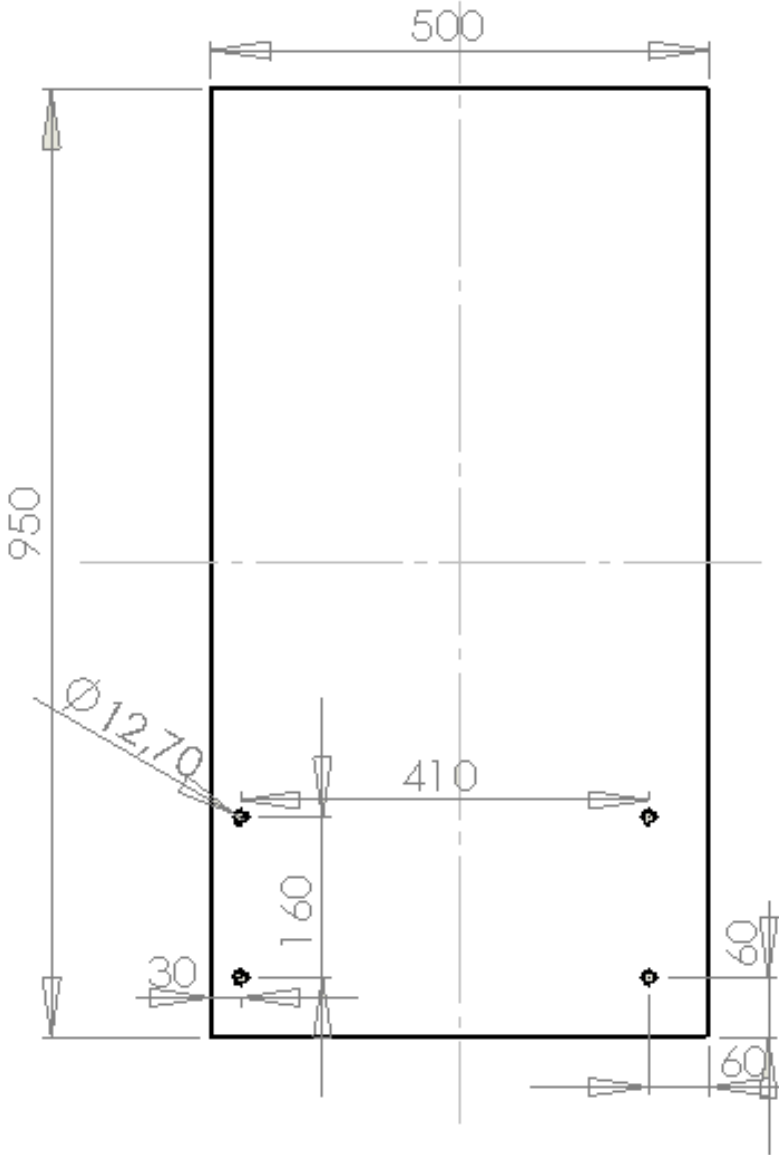
DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA			
NOTAS GERAIS			
1) MEDIDAS EM MILÍMETROS SALVO INDICAÇÃO CONTRÁRIA			
2) MATERIAL: SAE 1020			
3) QUANTIDADE: 5 PEÇAS			
1	DESCRIÇÃO DE FABRICAÇÃO	27/04/08	AMMER
0	DESCRIÇÃO DE COBERTURAS	27/04/08	AMMER
REV.	DESCRIÇÃO	DATA	FOR. APROV.
ESTE DOCUMENTO É DE PROPRIEDADE DA PETROBRAS BRASILEIRO S.A. PETROBRAS NÃO PODE SER REPRODUZIDO OU USADO PARA QUALQUER FINALIDADE SEMPRETE DANEJADA PARA A QUAL ESTÁ SENDO FORNECIDO.			
ORDEM: 2005240743			
PETROBRAS		SACIA DE CAMPOS	
PETROBRAS		C A P	
CLIENTE OU USUÁRIO		US-AP/DMA/THED	
DESENVOLVEDOR DO PROGRAMA			
NOME DO USUÁRIO			
US-BO/EX ESP-BC: ANTES RISEI			
TÍTULO			
CORPO DE PROVA BIPARTIDO			
FECH.	SEN.	JUNHEI	NDP.
ASSIN.			
DATA	27/04/08	ESCALA	1:2
		FOLHA	1 DE 1
			0

APÊNDICE 2: BASE CORPO DE PROVA

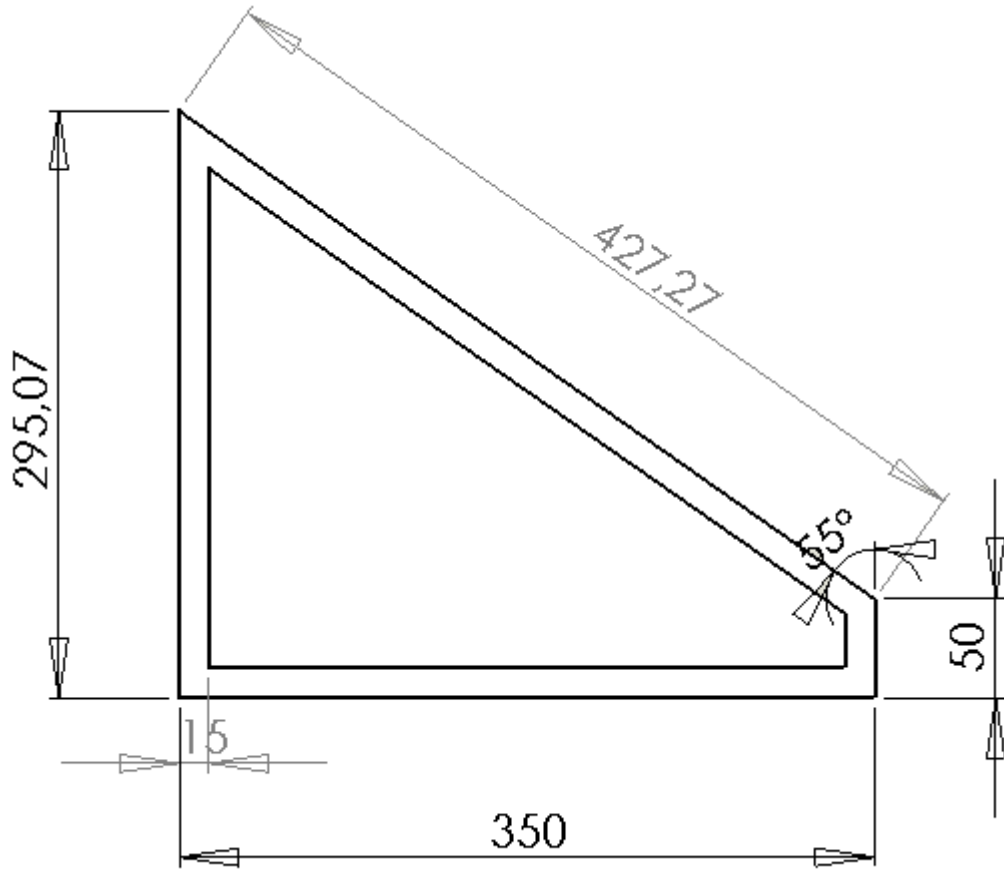


APÊNDICE 3: DESENHOS DA MESA DE AJUSTE DO CONECTOR DE
EXTREMIDADE

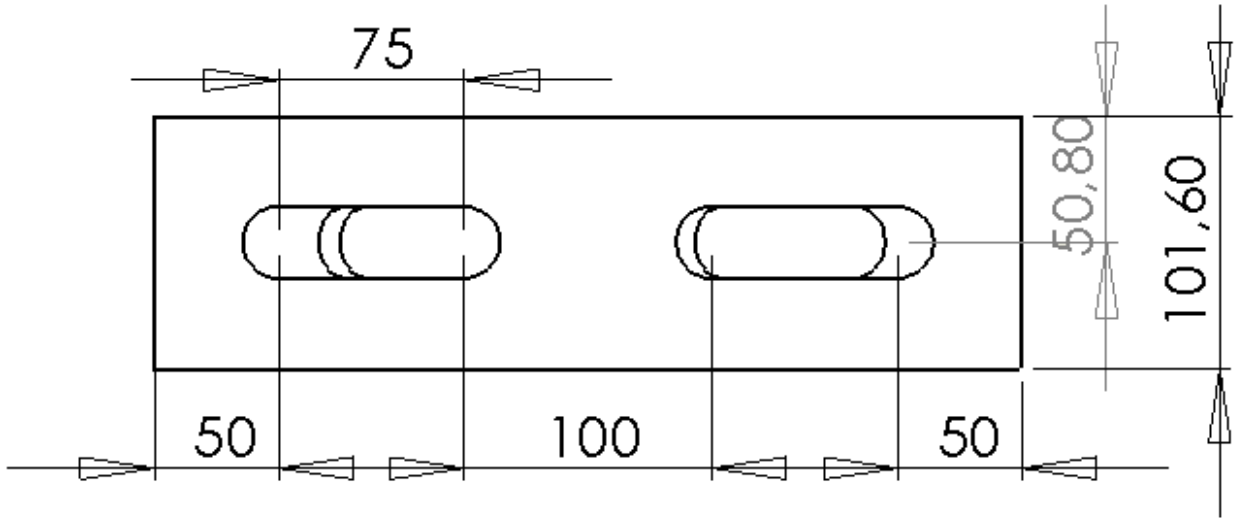
Mesa sobre a máquina de tração



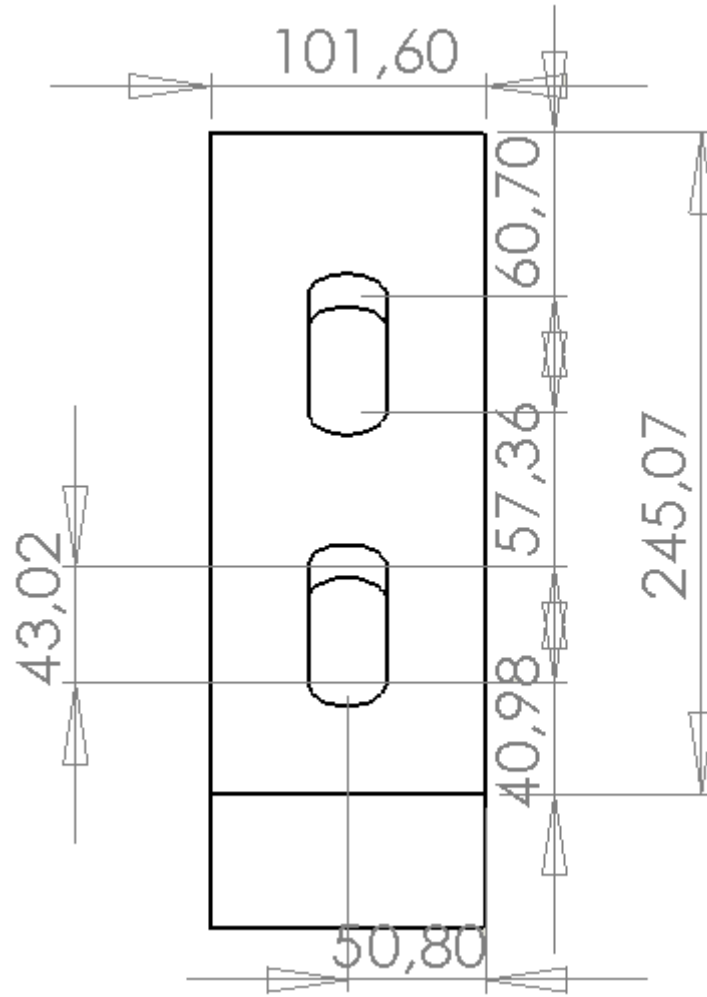
Mesa inclina da chapa de deslocamento do conector (Vista lateral)



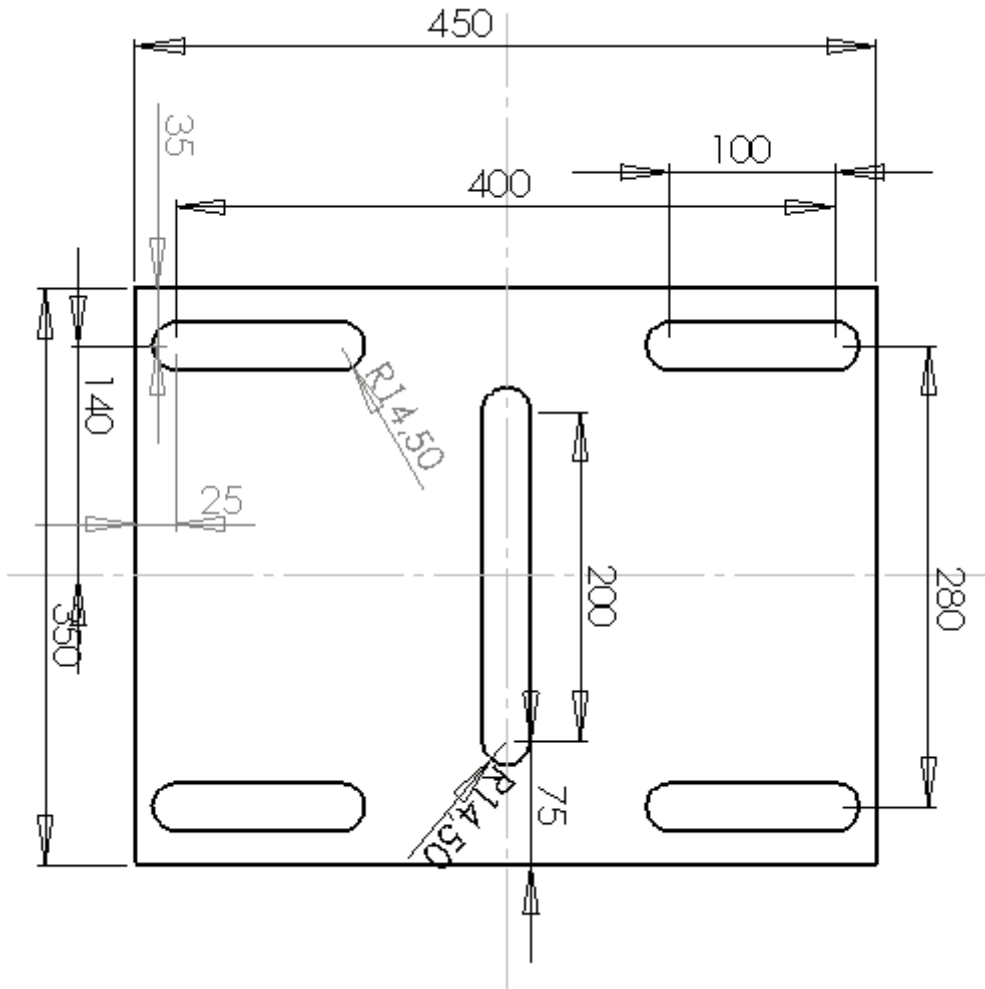
Mesa inclina da chapa de deslocamento do conector (Vista inferior)



Mesa inclina da chapa de deslocamento do conector (Vista frontal)



Mesa de ajuste horizontal



Mesa de ajuste vertical / rotacional

