

Anna Camila Sousa e Silva

Estudo de colas para fixação de sensores de alta deformação

PROJETO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

MECÂNICA

Programa de Graduação em
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro, Julho de 2015

Anna Camila Sousa e Silva

Estudo de colas para fixação de sensores de alta deformação

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Projeto apresentado como requisito para obtenção de
grau de Bacharel pelo Programa de
Graduação em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador

Roberth W. A. Llerena

Rio de Janeiro, Julho de 2015



Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de graduação

Estudo de colas para fixação de sensores de alta deformação

Anna Camila Sousa e Silva

Orientador: Roberth W. A. Llerena

Rio de Janeiro, Julho de 2015



Department of Mechanical Engineering

Graduation project

Adhesives study for fixing high deformation sensors

Anna Camila Sousa e Silva

Mentor: Roberth W. A. Llerena

Rio de Janeiro, July de 2015

Agradecimentos

À Deus, por sempre ter me dado força e fê para persistir na realização deste sonho.

Ao meu orientador Roberth W. A. Llerena pela orientação nesse trabalho e todo o apoio desde a época da iniciação científica.

Ao professor Arthur Martins Barbosa Braga, pela orientação do trabalho de iniciação científica, que foi quando esse trabalho teve seu início.

À toda equipe do Laboratório de Sensores à Fibra Óptica, por todo o apoio, ajuda e aprendizado.

À equipe do ITUC pelo auxílio durante a realização dos testes.

Ao meu pai e à minha mãe por todo carinho, amor, atenção, conselhos e incentivos.

Aos meus avós Raul, Dalva, Antonio e Lourdes, por todo o apoio e incentivos.

Ao meu irmão Marquinhos, pelo companheirismo, amizade, apoio e confiança.

Ao meu namorado José Carlos por toda paciência, amor e incentivo.

A todos os meus amigos, primos, tios e tias que indiretamente sempre me apoiaram e
deram forças para concluir essa etapa.

Resumo

O presente trabalho trata do estudo de colas para altas deformações que possam ser usadas na fixação de sensores para o monitoramento de estruturas entre elas *risers* flexíveis.

Os *risers* flexíveis são dutos que transportam o petróleo e o gás produzidos dos poços até a plataforma ou FPSO e daí, após o processamento, para navios ou para a terra. A produção de petróleo em águas profundas no Brasil utiliza em larga escala as linhas flexíveis pois elas possuem várias vantagens em relação a outras soluções, em especial a grande versatilidade de uso.

O foco do trabalho foi a adesivo de fixação dos sensores nos *risers* para o monitoramento da integridade estrutural. Foram feitos diversos testes a fim de chegar-se a uma conclusão quanto ao tipo de cola que seria mais apropriada.

Quanto aos tipos de colas, foram testados três tipos. As colas deveriam seguir algumas exigências como, o tempo e temperatura de cura, a viscosidade para que a cola não escorresse, também era necessário garantir que o sensor não escorregaria, e que a cola não iria descolar ou fragmentar quando o *riser* sofresse altas deformações.

Foram realizados ensaios de tração a fim de determinar quanto as colas escolhidas podem se deformar sem colapsar. Primeiramente foram testados arames retos com foco de identificar a melhor resina, e posteriormente foram testado arames torcidos com o objetivo de aproximar-se mais da realidade uma vez que os arames não ficam retos no *riser*, eles possuem uma inclinação que pode ser de 25° à 55°. Com esses testes foi possível saber se as colas eram apropriadas ou não para a aplicação e chegar-se a uma conclusão de qual seria mais indicada para a aplicação.

Palavras-chave

Monitoramento da integridade estrutural; *Risers* flexíveis; Monitoramento de dutos.

Abstract

This study aims to monitor the structural health of subsea flexible *risers*.

Flexible *risers* are pipes that carry oil and gas produced from the wells to the platform or FPSO, and then, after processing, to ships or land. The production of oil in deep water in Brazil uses large-scale flexible lines as they have several advantages over other solutions, particularly their great versatility of use.

The focus of the work was the fixation of the *riser*'s sensors for monitoring the structural health. Several tests were completed in order to determine which type of glue would be most appropriate.

Four types of glue were tested in total. Glues should follow certain requirements; curing time and temperature, and the viscosity so that the glue does not ooze. It was also necessary to ensure that the sensor does not slip and that the glue would not slide off when the *riser* suffers deformation.

Tensile stress testing was carried out to simulate what would happen to the *riser* on the platform. Firstly, the straight wires were tested to identify the best glue. To give a more realistic approach, these wires were then bent and retested, as with this application, the wires do not lie straight to the *riser*; they are usually at an inclination of 25° to 55°. With these tests, it was possible to determine if the glues were appropriate for the application and to decide which would be most suitable.

Keywords

Structural Health Monitoring; Flexible *Risers*; Pipeline Monitoring.

Sumário

Capítulo 1: Introdução	13
1.1-Pré-Sal	14
1.2- Estrutura básica de um <i>riser</i> flexível	16
1.2.1- Carcaça	17
1.2.2- Camada de pressão	17
1.2.3- Armadura de pressão	17
1.2.4- Camada anti-colapso	17
1.2.5- Armadura de tração	17
1.2.6- Fitas de alta resistência	18
1.2.7- Camada anti-desgaste	18
1.2.8- Capa externa.....	18
1.3- FPSO	18
Capítulo 2: Monitoramento de <i>Riser</i> Flexível.....	21
2.1- MODA.....	21
2.2- Redes de Bragg.....	22
Capítulo 3: Teste	24
3.1- Objetivo	24
3.2- Metodologia.....	24
3.3- Instrumentação.....	24
3.4- Ensaio de Tração.....	27
4.1- Teste 1	32

4.2.1- Amostra 1	33
4.2.2- Amostra 2	35
4.2.3- Amostra 3	36
4.2.4- Amostra 4	37
4.2.5- Amostra 5	39
4.2.6- Amostra 6	41
Capítulo 5: Conclusão	44
Referências bibliográficas:.....	46

Índice de figuras

Figura 1: Esquema exploração de petróleo (3)	14
Figura 2: Pré-sal (7).....	15
Figura 3: Estrutura de um <i>Riser</i> (9).....	16
Figura 4: FPSO (5)	19
Figura 5: ROV em operação (10).....	20
Figura 6: Rede de Bragg gravada em fibra ótica (11)	22
Figura 7: Espectro retro-refletido e espectro transmitido pela rede de Bragg (4).....	23
Figura 8: Barra com gabarito	25
Figura 9: Posicionamento da rede de Bragg	26
Figura 10: Fixação das amostras	27
Figura 11: Ensaio de Tração	28
Figura 12: Ensaio de Tração	29
Figura 13: Máquina INSTRON.....	30
Figura 14: Interrogador de sensores ópticos	31
Figura 15: Amostras para testes de 4 à 10	32
Figura 16: Classificação das colas.....	33
Figura 17: Amostra 1 – Cola A	34

Figura 18: Amostra 2 – Cola B	35
Figura 19: Amostra 3	37
Figura 20: Amostra 4	38
Figura 21: Arame torcido, amostra 5	39
Figura 22: Amostra 5	40
Figura 23: Arame torcido, amostra 6	41
Figura 24: Amostra 6	42

Capítulo 1: Introdução

Os *risers* flexíveis são responsáveis por transportar o petróleo e o gás produzidos dos poços até a plataforma ou FPSO e depois para navios ou para a terra. O *riser* é considerado uma parte crítica do processamento do petróleo offshore, pois este é exposto a ação das ondas, correntes marítimas, movimentação da plataforma e ação dos ventos. Por isso a necessidade do acompanhamento dos esforços sofridos pelos *risers*.

Os esforços sofridos pelo *riser* se concentram principalmente no conector do *riser* de topo com a plataforma, pois ali há uma transição de rigidez muito grande entre o *riser* flexível e a plataforma rígida ou móvel, o que pode levar ao colapso do equipamento. Portanto, para garantir a integridade estrutural do sistema de produção é importante realizar o acompanhamento da evolução dos esforços mecânicos e seus efeitos no *riser*.

Na figura 1 é possível analisar a estrutura da ligação da cabeça de um poço até ao FPSO (Floating Production Storage and Offloading ou unidade flutuante de armazenamento e transferência). Pode-se identificar *flowlines* que são as estruturas que ficam próximas ao solo, essas estruturas normalmente são rígidas e sua aplicação é estática. Pode-se identificar *risers* flexíveis que são objetos de estudo desse trabalho que possuem aplicações dinâmicas.

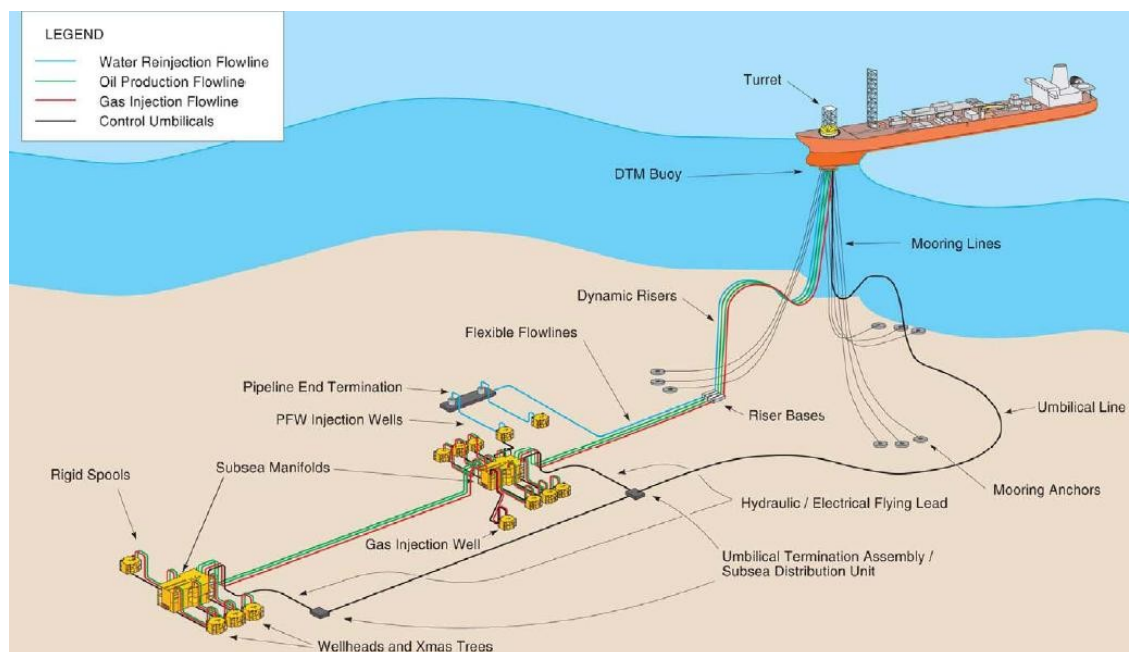


Figura 1: Esquema exploração de petróleo (3)

1.1-Pré-Sal

O pré-sal é uma sequência de rochas sedimentares formadas há mais de 100 milhões de anos no espaço geográfico criado pela separação dos continentes Americano e Africano, que começou há cerca de 150 milhões de anos. Entre os dois continentes formaram-se, inicialmente, grandes depressões, que deram origem a grandes lagos. Ali foram depositadas, ao longo de milhões de anos, as rochas geradoras de petróleo do pré-sal. Como todos os rios dos continentes que se separavam corriam para as regiões mais baixas, grandes volumes de matéria orgânica foram ali se depositando.

À medida que os continentes se distanciavam, os materiais orgânicos então acumulados nesse novo espaço foram sendo cobertos pelas águas do Oceano Atlântico, que então se formava. Dava-se início, ali, à formação de uma camada de sal que atualmente chega até 2 mil metros de espessura. Essa camada de sal depositou-se sobre a matéria orgânica acumulada, retendo-a por milhões de anos, até que processos termoquímicos a transformasse em hidrocarbonetos (petróleo e gás natural).

No atual contexto exploratório brasileiro, a possibilidade de ocorrência do conjunto de rochas com potencial para gerar e acumular petróleo na camada pré-sal encontra-se na chamada província pré-sal, uma área com aproximadamente 800 km de extensão por 200 km de largura, no litoral entre os estados de Santa Catarina e Espírito Santo.

As reservas dessa província ficam a 300 km da região Sudeste, que concentra 55% do Produto Interno Bruto (soma de toda a produção de bens e serviços do país). A área total da província do pré-sal (149 mil km²) corresponde a quase três vezes e meia o estado do Rio de Janeiro.

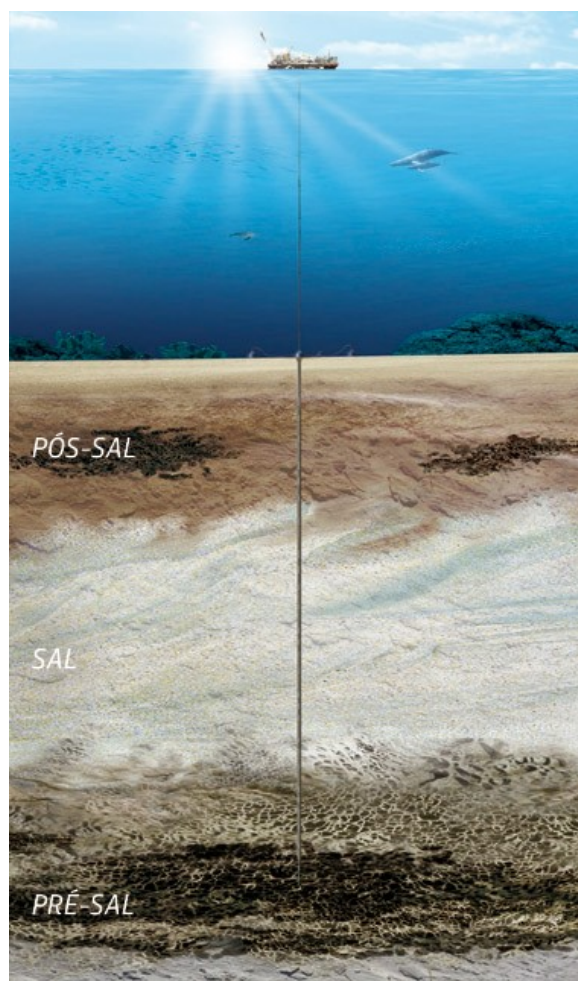


Figura 2: Pré-sal (7)

Em 2014 em todos os poços perfurados no polo Pré-sal da Bacia de Campos foi encontrado óleo pela Petrobras que comprova o sucesso do Pré-sal. Em Dezembro de 2014 a

Petrobras atingiu a marca de até 700 mil barris de petróleo por dia o que demonstra uma elevação da produção média dos poços em campos de águas profundas e ultraprofundas, podendo passar os 2500 metros de profundidade. Em Junho do mesmo ano a produção não passava de 500 mil barris por dia.

Nesse contexto, os *risers* flexíveis passam a ser fundamentais para a exploração do petróleo em águas profundas brasileiras. Diferentemente dos rígidos, os flexíveis permitem certas curvaturas ao longo da linha devido a sua estrutura, detalhada na próxima seção, essas curvaturas possibilitam a ligação de plataformas fixas ou de FPSO com a cabeça de poço. Dependendo da profundidade em questão é possível também instalar boias com o objetivo de aliviar as cargas.

1.2- Estrutura básica de um *riser* flexível

O *riser* flexível é composto de diversas camadas, cada camada possui uma função estrutural diferente.



Figura 3: Estrutura de um *Riser* (9)

1.2.1- Carcaça

A carcaça é a camada mais interna do *riser*, sua função é resistir ao colapso e à carregamentos radiais. É feita a partir de uma fita de aço inox que passa por mandris para obtenção da forma desejada e posteriormente avança para que tubos sejam formados.

1.2.2- Camada de pressão

A camada de pressão é responsável por garantir estanqueidade interna e transmissão do esforço devido à pressão interna. É uma camada não metálica.

1.2.3- Armadura de pressão

Suas funções são resistir à pressão interna, ao colapso hidrostático, proporcionar confinamento da carcaça para aumentar o colapso hidrostático e resistir às compressões mecânicas radiais. Normalmente é feita de um aço carbono.

1.2.4- Camada anti-colapso

Sua função é transmitir a pressão externa para a armadura de pressão.

1.2.5- Armadura de tração

Será dado foco a esta camada ao longo do projeto pois é nessa camada que os sensores à fibra óptica para o monitoramento serão instalados.

Sua principal função é resistir à tração axial. Essa camada é feita em pares, a primeira camada é confeccionada com as armaduras viradas para um lado e a segunda com as armaduras viradas para o lado oposto, as duas com o mesmo ângulo, normalmente é utilizado um par de armadura de tração nos *risers* atuais. Para confecção desta camada coloca-se os arames em uma máquina chamada armadora e essa, gira espiralando os arames com as medidas de ângulo e diâmetro estabelecidos. Esse ângulo pode variar de 25° à 55° de acordo com as necessidades do projeto. Normalmente é feita de um aço carbono.

1.2.6- Fitas de alta resistência

Sua função é resistir ao efeito de fundo inverso, também conhecido como gaiola de passarinho. Esse efeito ocorre devido à perda de resistência à pressão interna do duto e também um destravamento da armadura de pressão levando a uma possível explosão da camada de pressão, vazando fluido interno para o meio ambiente causando danos ambientais e pausa na produção. As fitas de alta resistência são colocadas sobre a última camada de armadura.

1.2.7- Camada anti-desgaste

Essa camada só é utilizada em aplicações dinâmicas pois serve para evitar o desgaste entre as camadas metálicas.

1.2.8- Capa externa

Sua função é garantir a estanqueidade externa além de proteger as camadas internas aos efeitos de corrosão e envelhecimento.

1.3- FPSO

Os FPSOs são utilizados em grande escala no ramo de exploração de petróleo, isso porque ele apresenta vantagens em relação às plataformas fixas. É amplamente aplicado nos campos de pré-sal devido a elevada lâmina d'água, podendo chegar a 2500 metros de profundidade. As unidades flutuantes de armazenamento e transferência, como o nome diz, podem explorar, armazenar e transferir o petróleo e/ou o gás natural para a terra ou para um outro navio desafogador. Além de o mesmo depois de ter explorado um determinado poço poder explorar um outro.



Figura 4: FPSO (5)

Uma ponta do *riser* é fixada no FPSO e a outra fica no fundo do mar, onde é conectado a um flowline que faz a ligação com a cabeça do poço a ser explorado. Atualmente no Pré-sal essa instalação no fundo no mar é feita através de ROVs (Remotely operated underwater vehicle) que são robôs submarinos controlados remotamente por uma pessoa à bordo na embarcação ou em terra. A aplicação de ROVs atualmente é indispensável no pré-sal devido as elevadas lâminas d'água que impossibilitam atuação de mergulhadores no fundo do mar por questões biológicas.

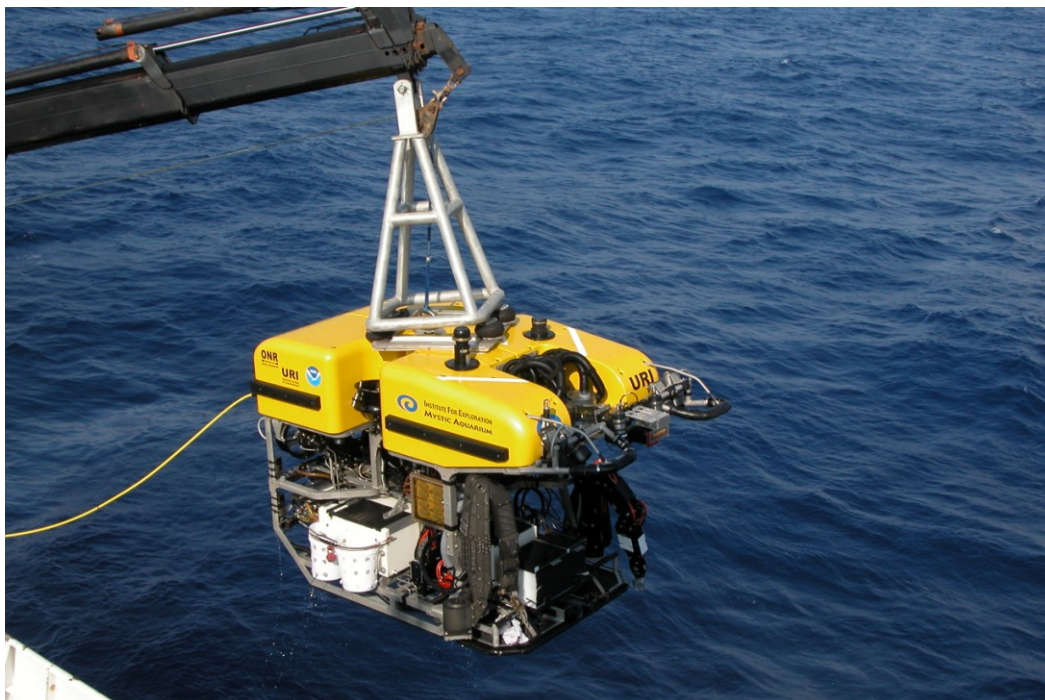


Figura 5: ROV em operação (10)

Capítulo 2: Monitoramento de *Riser* Flexível

Uma técnica para monitorar a integridade estrutural de um *riser* é baseada em sensores a fibra óptica, especificamente os de *Redes de Bragg*, que devido às suas propriedades intrínsecas à fibra óptica são apropriados para serem usados em ambientes voláteis semelhantes aos encontrados em plataformas de petróleo. O sistema de Monitoramento Direto nos Arames (MODA) é baseado nesta técnica.

2.1- MODA

O princípio de funcionamento do MODA consiste em fixar sensores ópticos em cada arame na camada externa da armadura de tração do *riser* para medir a deformação dos arames. Com isso é possível saber se o arame está rompido ou se está íntegro e ainda é possível detectar em tempo real se um arame rompe quando está sendo monitorado. Para isso é feito um rasgo na capa externa do *riser* a fim de chegar-se a camada mais externa da armadura de tração para fazer a instalação dos sensores.

Um componente de extrema importância neste sistema é o fixador dos sensores ópticos no arame, que deve atender diversas solicitações como capacidade de deformação igual ou superior ao do metal do arame, bom comportamento na temperatura de trabalho, resistência a presença de hidrocarbonetos, facilidade de cura e aplicação, entre outras. A qualidade dos resultados obtidos no monitoramento do *riser* depende da escolha da cola.

As redes de Bragg são gravadas no núcleo da fibra óptica, essa gravação é periódica e local. Com um laser grava-se um comprimento de onda específico na fibra, assim a rede de Bragg deixa passar todos os comprimentos de ondas com exceção do que foi gravado que é refletido. Assim é possível obter medidas de deformações sofridas por esse sensor.

Com esse sensor fixado nos arames dos *risers* é possível obter as deformações de cada um dos arames. Por isso a importância da fixação dos sensores nos arames, é preciso garantir que o sensor não escorregue dentro da cola e que esta não descole ou fragmente quando o arame seja solicitado nas condições de trabalho que será submetido.

2.2- Redes de Bragg

Nos últimos anos, redes de Bragg e fibras ópticas vêm sendo cada vez mais utilizadas em diversas aplicações, principalmente em telecomunicações, sensoriamento e laser. Em sensoriamento, as redes de Bragg podem ser usadas em sensores pontuais ou semidistribuídos.

A rede de Bragg é uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica. A rede é feita a partir de uma gravação de um certo comprimento de onda através de um laser no núcleo da fibra, para isso é necessário retirar o revestimento externo (cianoacrilato) que protege a fibra pois esse absorve a radiação UV. Pode-se observar na figura 6 um esquema da rede de Bragg em fibra óptica.

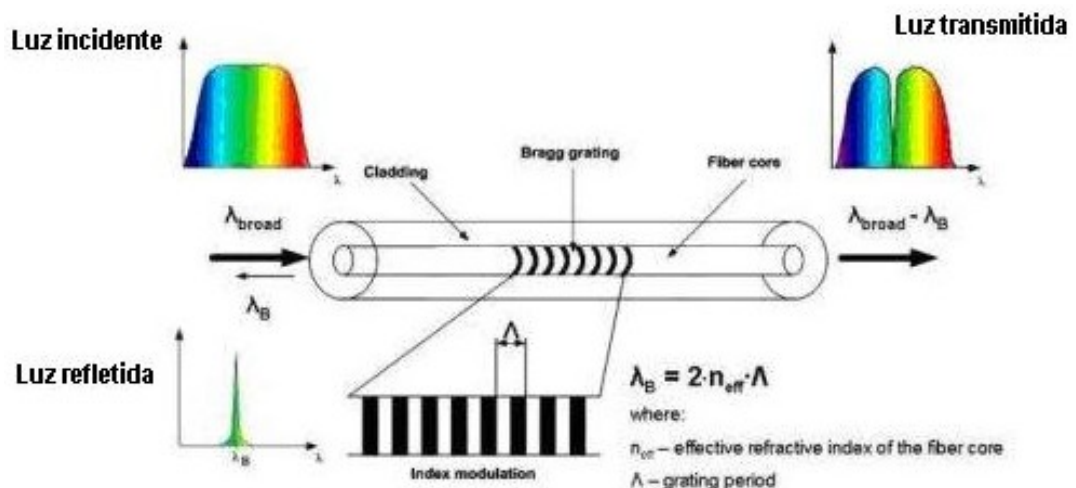


Figura 6: Rede de Bragg gravada em fibra óptica (11)

A rede de Bragg funciona como uma espécie de filtro, onde o comprimento de onda que foi gravado na rede é retro-refletido, enquanto comprimentos de onda diferentes do gravado na

rede são transmitidos. Assim é possível fazer medidas de deformação com uma fibra ótica, os comprimentos de onda da deformação diferentes do gravado na rede são transmitidos possibilitando a leitura dos mesmos. Na figura 7 é possível observar um espectro retro-refletido e um espectro transmitido pela rede de Bragg.

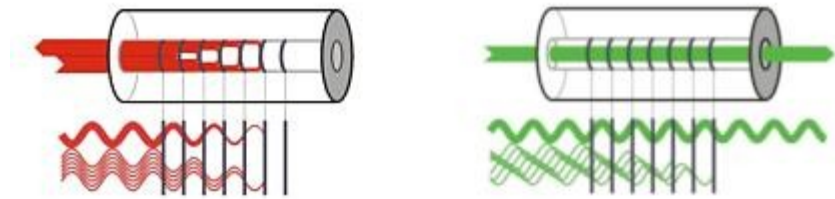


Figura 7: Espectro retro-refletido e espectro transmitido pela rede de Bragg (4)

Capítulo 3: Testes

3.1- Objetivo

O objetivo do trabalho em questão foi encontrar novas resinas para fixação dos sensores a fibra óptica com Redes de Bragg em arames de *Risers*.

As colas tradicionais suportam deformações de até 0,05%. Em testes em laboratório foi comprovado que os arames dos *risers* deformavam acima desse valor não sendo possível o monitoramento com este tipo de adesivos. Se espera que neste trabalho se encontrem colas que suportem deformações acima de 1%..

3.2- Metodologia

Inicialmente foi feito uma ampla pesquisa no mercado com objetivo de encontrar uma cola que atendesse às necessidades, sendo a principal ser de natureza tixotrópica, isto é que a sua consistência seja o suficientemente pastosa para não escorrer no arame após ser aplicada e que cure completamente à temperatura ambiente em um período de tempo curto (foi fixada a meta de 4 horas). Chegou-se a três potenciais colas todas elas epóxicas bicomponentes.

As novas colas foram analisadas para substituição das utilizadas anteriormente que eram baseadas em cianoacrilato e algumas resinas epóxicas bi-componentes..

Depois da triagem das colas, foram feitos diversos testes a fim de observar se as colas atendiam as especificações de operação.

3.3- Instrumentação

Para o teste foram utilizados os seguintes materiais:

- Barras de aço;
- Lixa A400;

- Álcool isopropílico;
- Gabaritos para aplicação da resina;
- Redes de alta deformação e redes feitas no LSFO;
- Máquina de ensaios (INSTRON – 5500R-6233);
- Equipamento interrogador de sensores ópticos (BRAGG METER);

Utilizou-se as mesmas barras utilizadas em um *riser* com comprimento de 300mm para realização dos testes. As barras inicialmente eram lixadas e limpas com álcool para garantir uma melhor fixação das colas.

A fim de garantir uma espessura e tamanho exato da cola na barra foram usados gabaritos de posicionamento em cada lado da barra, conforme a figura 8.



Figura 8: Barra com gabarito

Posteriormente as redes de Bragg eram posicionadas no centro dos gabaritos tal como se mostra na figura 9.



Figura 9: Posicionamento da rede de Bragg

As amostras eram fixadas como na figura 10, para que a cola fosse aplicada. A fim de simular a instrumentação que ocorre nas plataformas os sensores eram colados na parte superior da barra e na inferior para testar se a cola utilizada na parte inferior iria escorrer ou não.

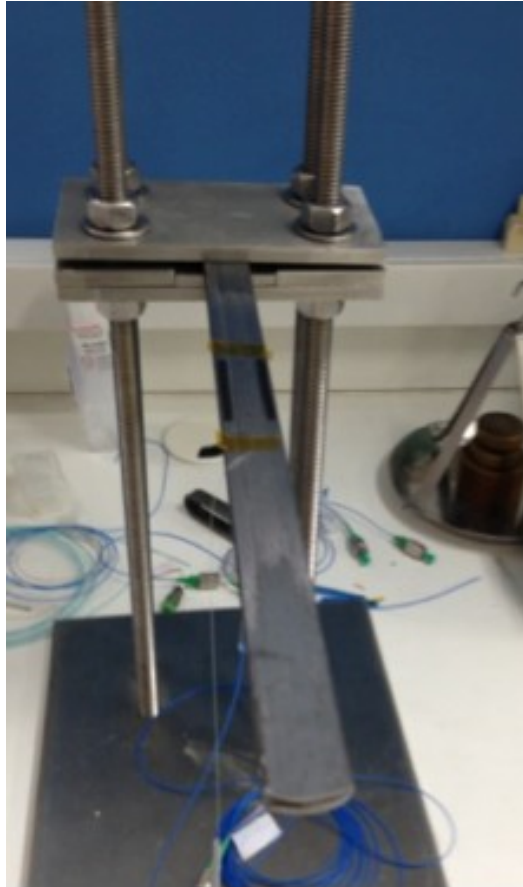


Figura 10: Fixação das amostras

As amostras eram então levadas ao forno à temperatura de 80°C por duas horas para que fossem curadas.

3.4- Ensaio de Tração

Um ensaio de tração é um ensaio mecânico onde um corpo de prova é tensionado. A partir dele pode-se obter a curva Tensão x Deformação. O objetivo do presente teste foi comparar as deformações das três colas selecionadas.

Para que fosse possível medir a deformação das redes, essas foram coladas em barras de aço e submetidas a um ensaio de tração. O cuidado principal foi garantir que as redes fossem muito bem coladas para que essas não escorregassem ao serem tracionadas.

Para realização dos testes utilizou-se a máquina de tração INSTRON – 5500R - 6233. Os ensaios foram feitos da seguinte forma, inicialmente as barras foram fixadas das garras da máquina, as redes foram conectadas ao equipamento interrogador de sensores ópticos para que fosse possível salvar os dados para análise posterior.

Como o projeto tem contrato de sigilo, para que não haja quebra dos termos de sigilo as colas não serão citadas explicitamente. Foi adotado letras do alfabeto para que fosse feita a identificação de cada uma. Abaixo seguem imagens dos testes:



Figura 11: Ensaio de Tração



Figura 12: Ensaio de Tração

Capítulo 4: Análise dos Resultados

Foram feitos gráfico de deformação para analisar o comportamento das amostras em cada teste.

Primeiramente foi feita uma primeira bateria de testes de classificação das colas, posteriormente foram feitos testes de qualificação das colas a partir das classificadas para chegar a uma conclusão de qual tipo seria a mais indicada para o uso (amostras 1 à 6).

A figura 13 ilustra a máquina INSTRON – 5500R – 6233 utilizada para a realização dos ensaios de tração no laboratório ITUC da PUC- Rio.



Figura 13: Máquina INSTRON

A figura 14 mostra o equipamento interrogador de sensores ópticos (BraggMeter) utilizado para medir as deformações sofridas pelas redes durante a realização dos ensaios de tração.

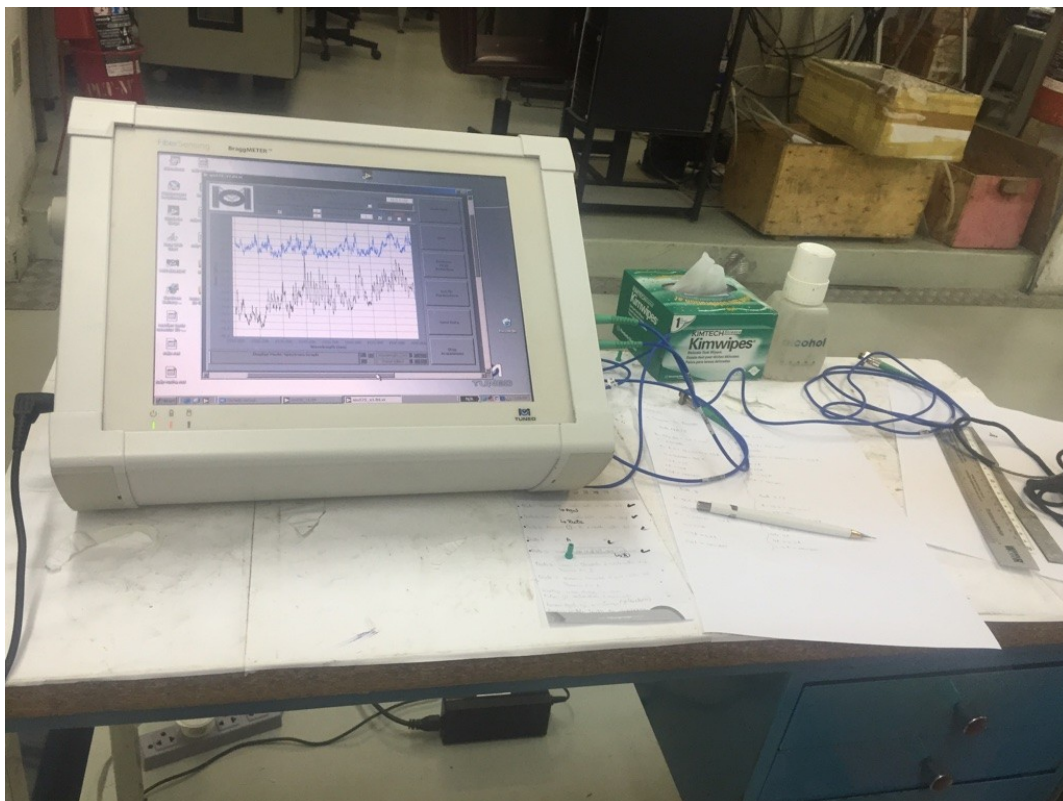


Figura 14: Interrogador de sensores ópticos

A figura 15 mostra as amostras preparadas para segunda bateria de testes, onde foram testados arames retos, e torcidos com redes de alta deformação existentes no mercado e redes feitas no laboratório de sensores a fibra ótica e com as colas classificadas, A e B.

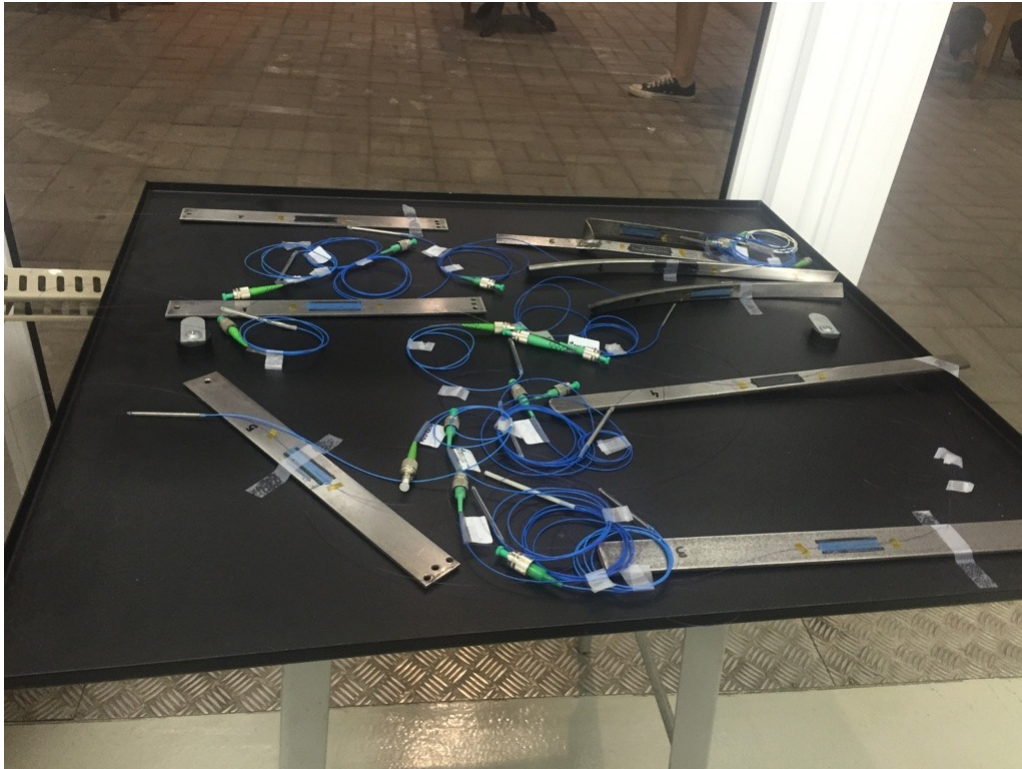


Figura 15: Amostras para testes de 4 à 10

4.1- Teste 1

Abaixo, na figura 16, tem-se os gráficos das colas que foram aceitas por ter um bom desempenho nos testes de estabilidade e escorregamento, comparáveis com o desempenho do tipo C que é a cola para extensometria (cianoacrilato). Porém, nem todas podem ser usadas, a cola tipo D é muito fluida tal que ao ser aplicado no arame na posição vertical escorre comprometendo os demais arames. Então por descarte as colas do tipo A e B foram as elegidas para serem usadas no teste de qualificação, elas tem um excelente desempenho quando comparadas com o tipo C, fácil de serem aplicadas e são o suficientemente pastosas para não escorrerem ao serem aplicadas na vertical.

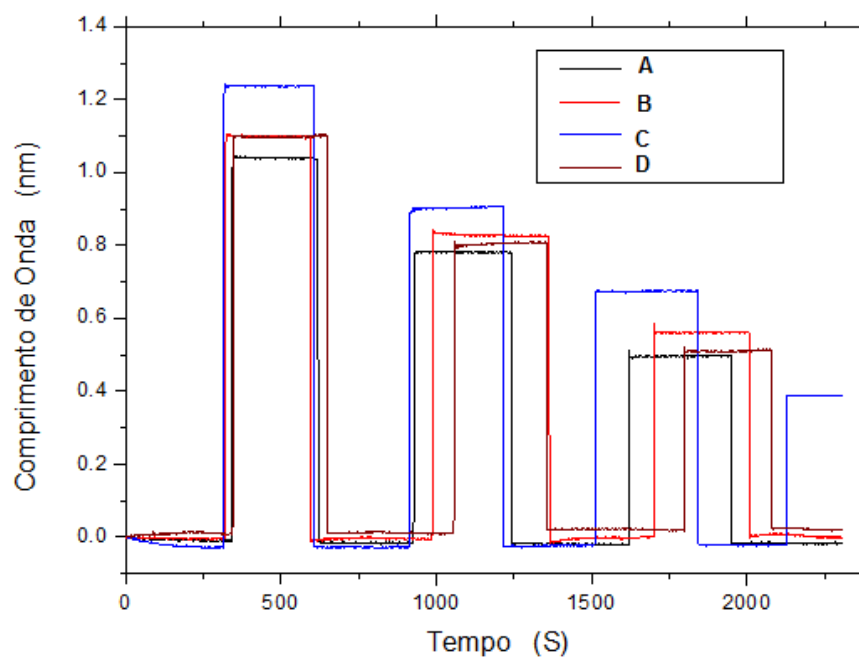


Figura 16: Classificação das colas

A partir desses resultados as colas A e B foram analisadas mais a fundo para chegar-se a uma conclusão quanto ao tipo de cola.

4.2- Ensaio de tração

4.2.1- Amostra 1

Foi realizado um ensaio de tração com a amostra 1, que consiste em um arame de área de seção de $62,5 \text{ mm}^2$ e com limite de escoamento de 250 MPa. Foi aplicada uma carga variável com velocidade constante a fim de observar o comportamento das redes e das colas fixadas nessa barra.

Foram usados dois tipo de rede, uma feita no próprio laboratório de sensores a fibra ótica e a outra foi uma rede de alta deformação existente no mercado. Para a fixação dessas redes no arame foi utilizada a cola A.

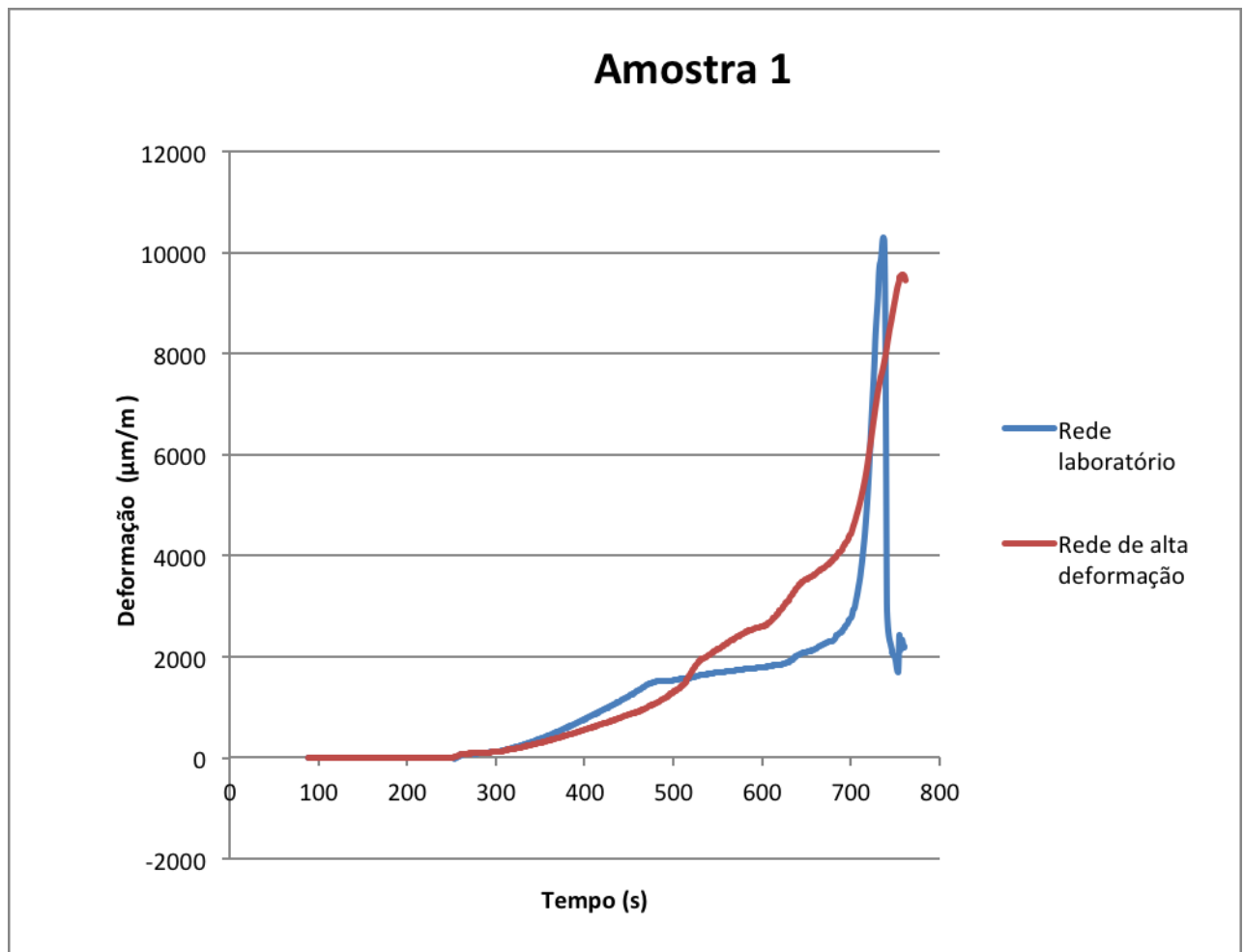


Figura 17: Amostra 1 – Cola A

Com base na figura 17 foi possível analisar o que aconteceu com as redes e a cola A no ensaio de tração. Pode-se afirmar que quando o material começou a escoar a rede feita no laboratório estava com um pouco mais que 10000 $\mu\text{m/m}$ de deformação e a rede de alta deformação com um pouco menos que 10000 $\mu\text{m/m}$.

Após o teste, a amostra foi analisada e observou-se que a cola tinha descolado. Isso pode ser explicado por uma não conformidade na hora da instrumentação.

4.2.2- Amostra 2

Foi realizado um ensaio de tração com a amostra 2, que consiste em um arame de área de seção de $62,5 \text{ mm}^2$ e com limite de escoamento de 250 MPa. Foi aplicada uma carga variável com velocidade constante a fim de observar o comportamento das redes e das colas fixadas nessa barra.

Foram usados dois tipo de rede, uma feita no próprio laboratório de sensores a fibra ótica e a outra foi uma rede de alta deformação existente no mercado. Para a fixação dessas redes no arame foi utilizada a cola B.

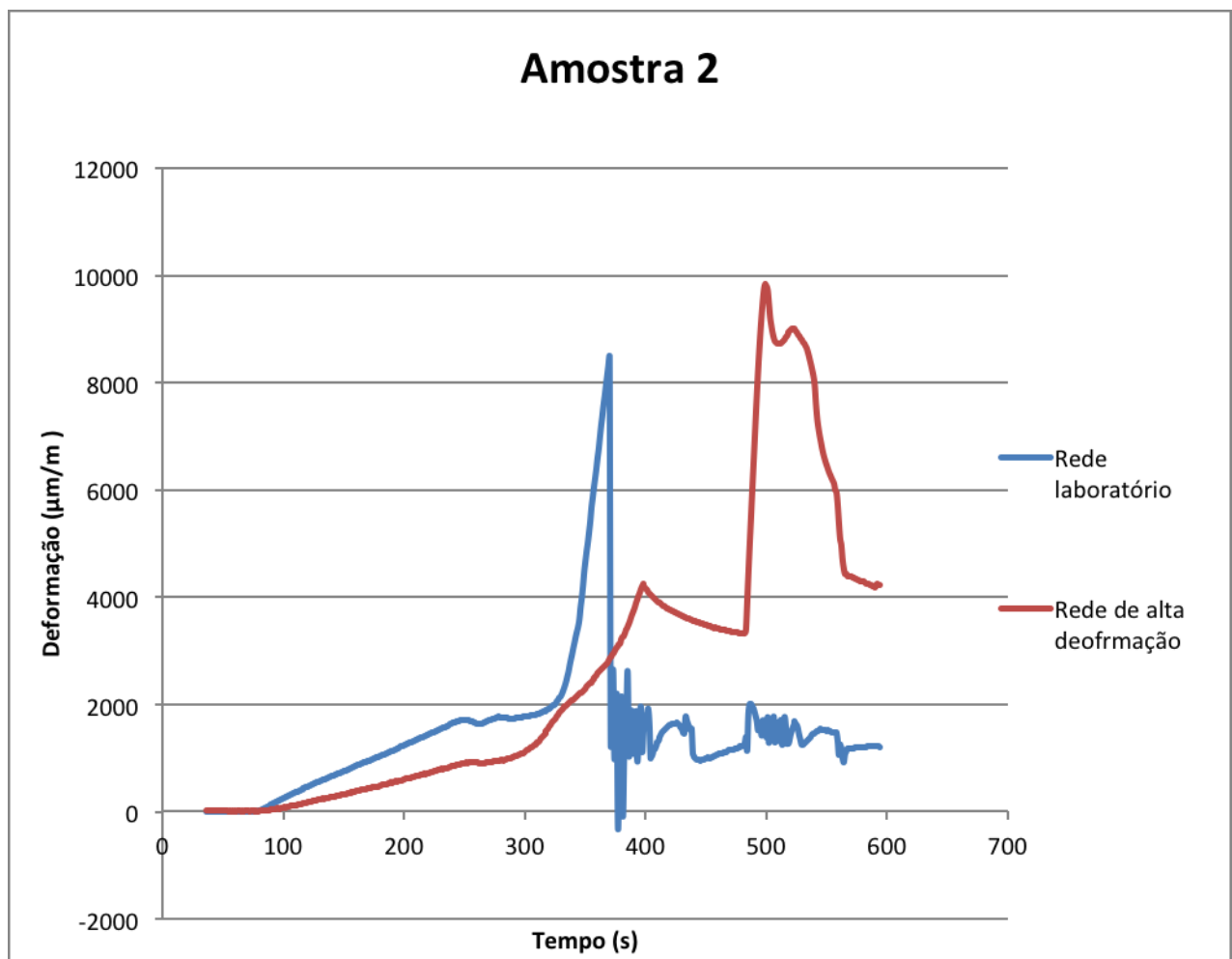


Figura 18: Amostra 2 – Cola B

Com base na figura 18 foi possível observar o que aconteceu com as redes durante a realização do ensaio de tração. A rede do laboratório colapsou com uma deformação de aproximadamente 9000 $\mu\text{m}/\text{m}$ e a rede de alta deformação estava com 10000 $\mu\text{m}/\text{m}$ quando o material começou a escoar.

A amostra foi observada depois da realização do teste e verificou-se que a cola não havia descolado.

4.2.3- Amostra 3

Foi realizado um ensaio de tração com a amostra 3, que consiste em um arame de área de seção de 100 mm² e com limite de escoamento de 250 MPa. Foi aplicada uma carga variável com velocidade constante a fim de observar o comportamento das redes e das colas fixadas nessa barra.

Foram usadas duas redes iguais, a rede de alta deformação existente no mercado. Para a fixação dessas redes no arame foi utilizada a cola A.

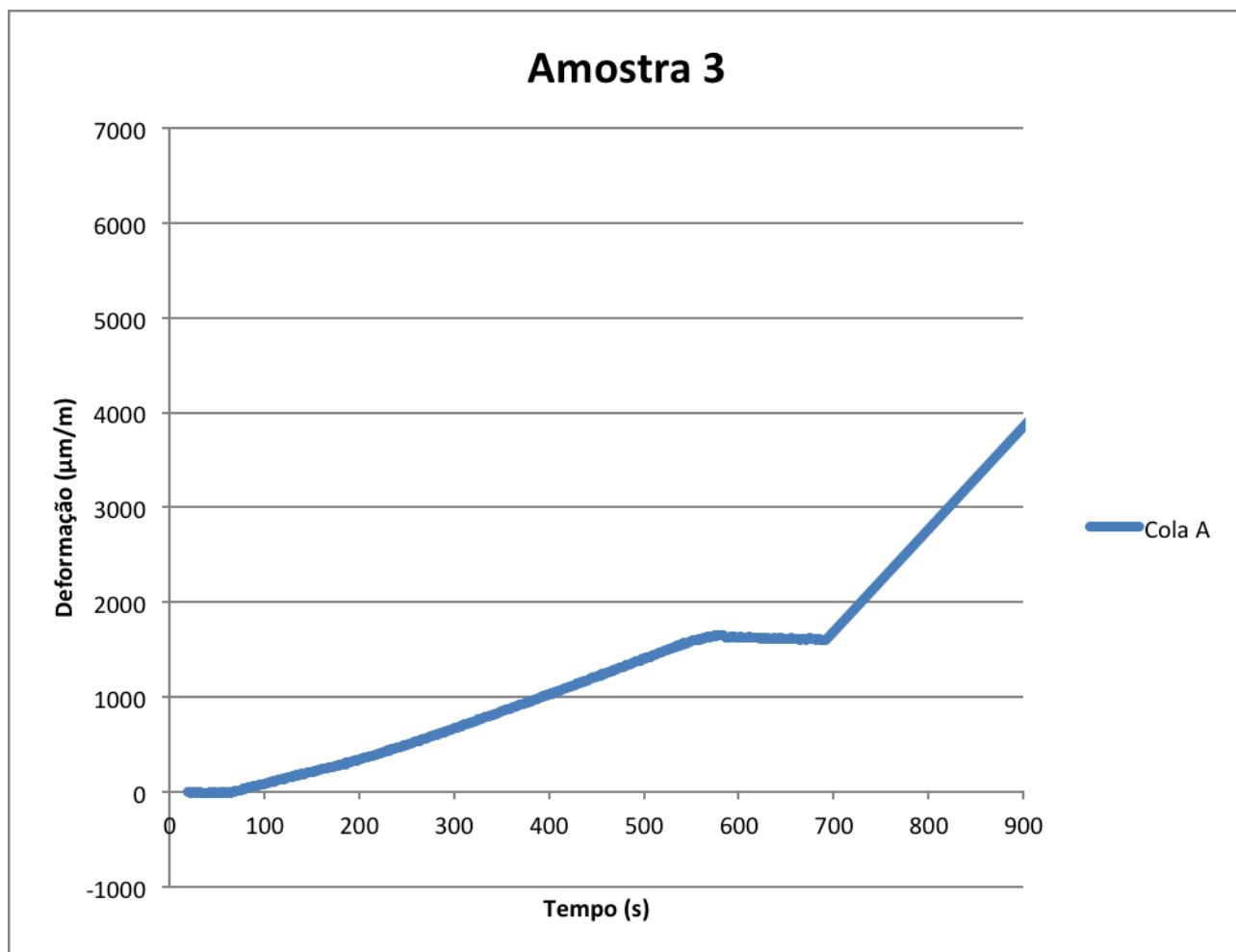


Figura 19: Amostra 3

Com base na figura 19 é possível observar somente uma das redes, isso se deve ao fato de a outra quebrou no processo de montagem do teste. Observou-se que a rede saiu fora do range dinâmico do equipamento de interrogação, com aproximadamente 4000 $\mu\text{m/m}$, porém pela inclinação da curva de deformação facilmente atingiria valores de até 10000 $\mu\text{m/m}$.

A amostra foi observada depois da realização do teste e verificou-se que a cola não havia descolado.

4.2.4- Amostra 4

Foi realizado um ensaio de tração com a amostra 4, que consiste em um arame de área de seção de 62,5 mm^2 e com limite de escoamento de 250 MPa. Foi aplicada uma carga variável

com velocidade constante a fim de observar o comportamento das redes e das colas fixadas nessa barra.

Foram usadas duas redes iguais, a rede de alta deformação existente no mercado. Para a fixação dessas redes no arame foi utilizada a cola A.

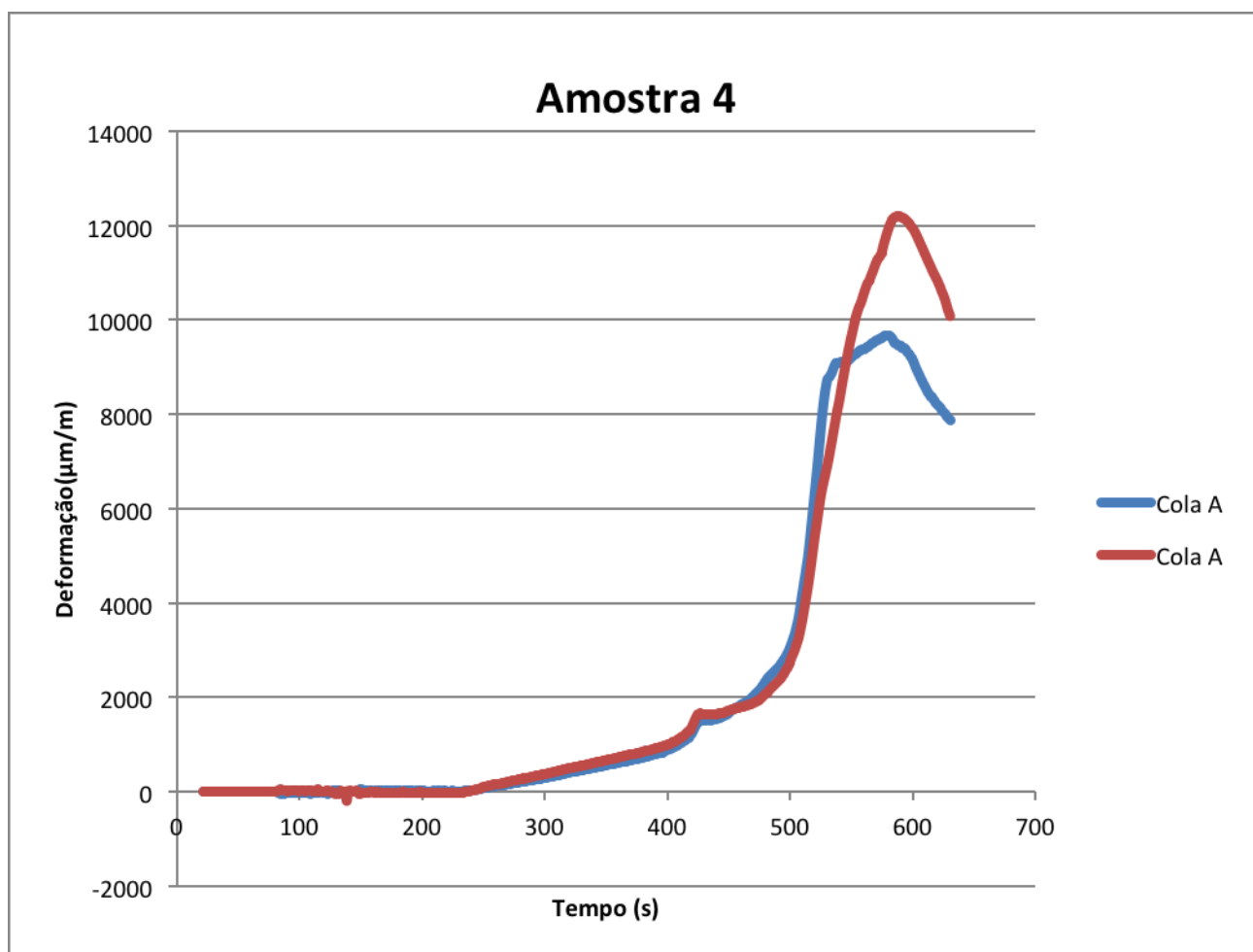


Figura 20: Amostra 4

Com base na figura 20 foi possível observar que quando o material começou a escoar a rede em vermelho no gráfico estava com aproximadamente 12000 $\mu\text{m/m}$ de deformação, e a rede em azul com aproximadamente 10000 $\mu\text{m/m}$ de deformação. A diferença de deformação se deve a diferença na instrumentação, a rede em azul ficava na parte de baixo do arame o que dificulta a

fixação do sensor devido a gravidade, já a rede em vermelho ficava na parte de cima do arame. Por isso a rede em azul apresenta menor deformação quando comparada com a em vermelho.

A amostra foi observada depois da realização do teste e verificou-se que a cola não havia descolado.

4.2.5- Amostra 5

Foi realizado um ensaio de tração com a amostra 5, que consiste em um arame torcido de área de seção de 90 mm^2 e com limite de escoamento de 750 MPa. Foi aplicada uma carga variável com velocidade constante a fim de observar o comportamento das redes e das colas fixadas nessa barra.

Foram usadas duas redes iguais, a rede de alta deformação existente no mercado. Para a fixação dessas redes no arame foi utilizada a cola A.



Figura 21: Arame torcido, amostra 5

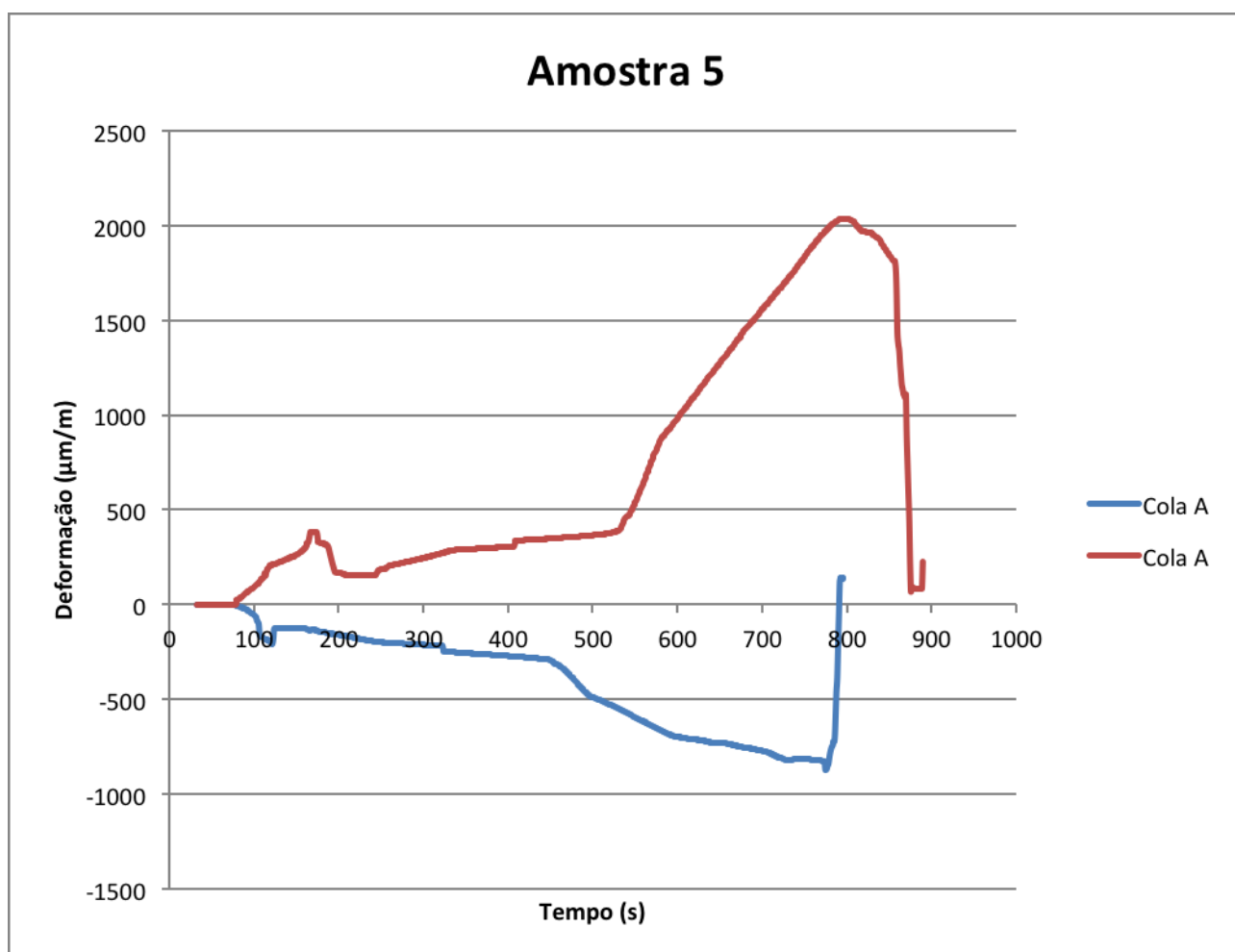


Figura 22: Amostra 5

Com base na figura 22 é possível observar baixas deformações, a rede em vermelho com aproximadamente 2000 $\mu\text{m/m}$ de deformação e a rede em azul com um pouco menos de 1000 $\mu\text{m/m}$ de deformação. Observa-se a curva em vermelho deformação positiva pois esta rede estava no lado côncavo do arame sofrendo tração, já a curva em azul estava no lado convexo sofrendo compressão (vide figura 21).

A amostra foi observada depois da realização do teste e verificou-se que a cola não havia descolado.

Durante a realização desse teste observou-se que o arame escorregou das garras da máquina do ensaio de tração, comprometendo os resultados por isso não foi possível chegar-se a

grandes valores de deformações como o esperado. A fixação desse corpo de prova torcido é mais complicada que a de um corpo de prova de um arame reto isso porque uma ponta do arame não é paralela a outra ponta. Foi possível fixar esse corpo de prova na máquina de tração pois a garra superior é móvel, porém não foi possível aplicar grandes cargas sem que o corpo de prova escorregasse da garra.

4.2.6- Amostra 6

Foi realizado um ensaio de tração com a amostra 6, que consiste em um arame torcido de área de seção de 90 mm^2 e com limite de escoamento de 750 MPa. Foi aplicada uma carga variável com velocidade constante a fim de observar o comportamento das redes e das colas fixadas nessa barra.

Foram usadas duas redes iguais, a rede de alta deformação existente no mercado. Para a fixação dessas redes no arame foi utilizada a cola B.

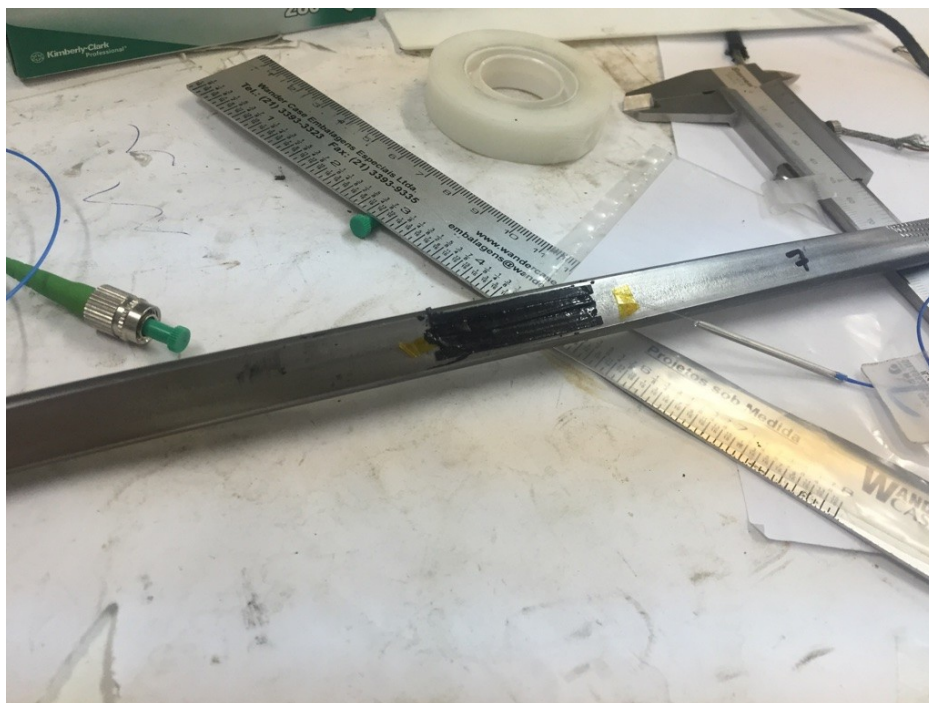


Figura 23: Arame torcido, amostra 6

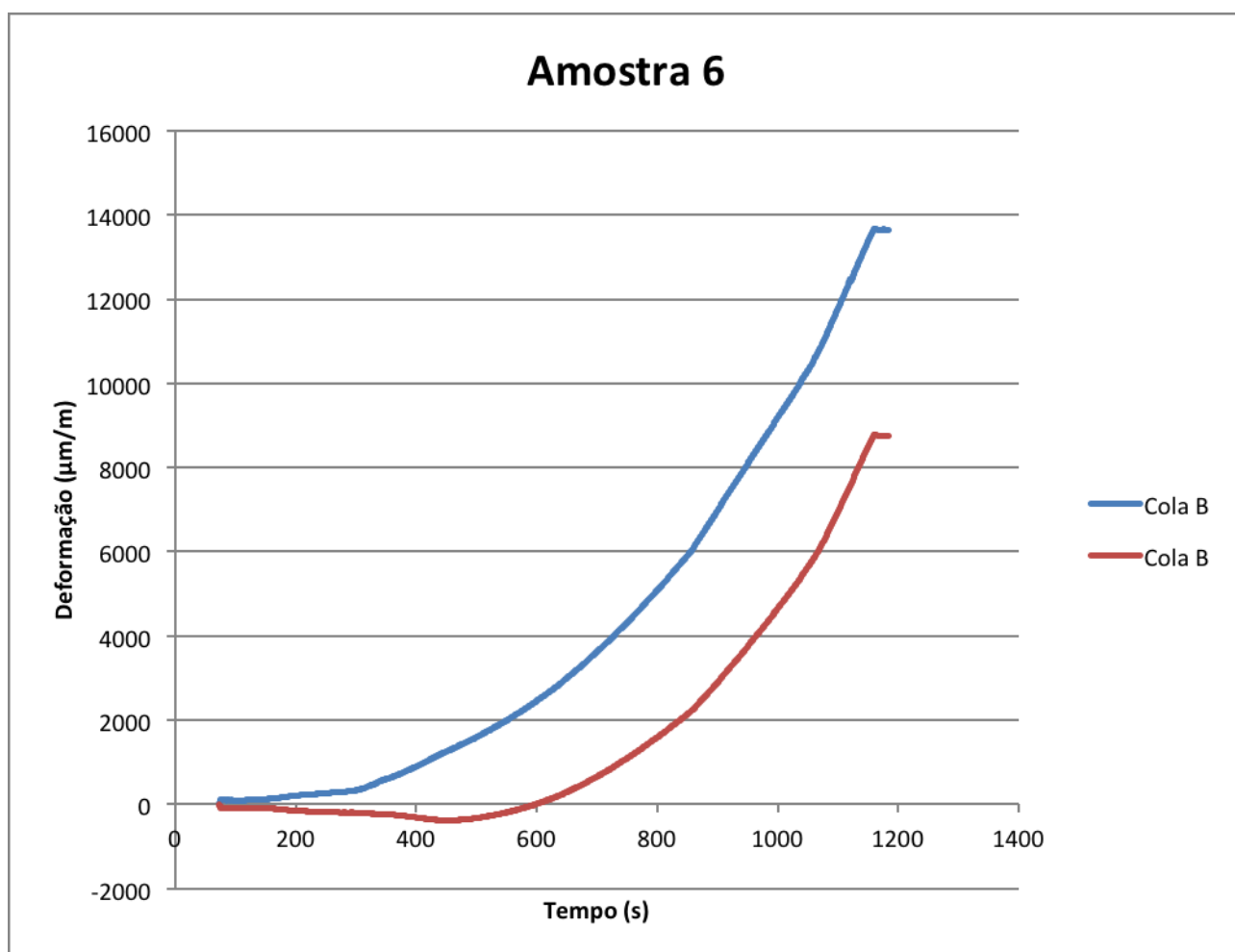


Figura 24: Amostra 6

Com base na figura 24 é possível observar que as duas redes pararam nesse patamar porque a amostra não podia mais ser tracionada, a máquina de ensaios atingiu o seu limite de carga. A rede em vermelho no gráfico estava com aproximadamente 9500 $\mu\text{m/m}$ de deformação (considerando que inicialmente deforma negativamente), e a rede em azul no gráfico com aproximadamente 14000 $\mu\text{m/m}$ de deformação. A rede em vermelho inicialmente sofre compressão e depois tração, já a rede em azul sofre tração. A diferença na deformação é devido à posição das redes no arame e à geometria do arame ser totalmente torcida.

A amostra foi observada depois da realização do teste e verificou-se que a cola não havia descolado.

Nesse teste o corpo de prova não escorregou das garras da máquina do teste de tração, o que possibilitou a chegar a grandes deformações como o esperado.

Capítulo 5: Conclusão

Com base nos estudos realizados no laboratório, nas pesquisas de colas existentes no mercado e nos ensaios de tração realizados foi possível chegar a uma conclusão de qual tipo de cola é a mais indicada para o uso.

A cola A e a cola B foram as colas selecionadas para a aplicação. Essas colas apresentam uma viscosidade aceitável, pois não escorrem quando aplicadas na face do arame que fica para baixo. Seus tempos e temperaturas de cura são aceitas na prática, demoram duas horas a temperatura de 80°C, essa temperatura foi eleita por estar no meio da curva de cura com calor destas resinas. O data sheet das colas indica que quanto maior a temperatura mais rápido acontece a cura, porém existe a dificuldade de se aplicar calor quando usadas em um *riser* em operação. A temperatura ambiente atinge um grau de cura ao tato em até 4 horas, fato que está dentro dos objetivos propostos neste trabalho. Essas colas suportam a deformação solicitada (10000 $\mu\text{m}/\text{m}$), ou seja, com a deformação máxima ela não descola e também não deixa a fibra escorregar o que comprometeria os resultados das medições.

A análise dos testes realizados em laboratório, permitiu verificar que as amostras 1, 2, 4 e 6 atenderam a solicitação sem grandes problemas e restrições. Ou seja, foi possível chegar a deformação de 10000 $\mu\text{m}/\text{m}$ sem que a cola descolasse e sem que o sensor escorregasse. Já com a amostra 3 não foi possível, pois o teste teve que ser interrompido não chegando ao nível de deformação solicitado. No caso da amostra 5, a amostra escorregou das garras da máquina de tração devido as restrições da amostra, que era de um arame do próprio *riser* apresentando aspecto torcido fazendo com que as extremidades da amostras não ficassem na mesma direção, dificultando a fixação da amostra na máquina.

O presente trabalho viabilizou a escolha de resinas apropriadas para a fixação dos sensores à fibra óptica em arames de *risers* flexíveis. Este fato possibilita que haja um monitoramento preciso das deformações não apenas de *risers* mas também de estruturas que sofrem deste tipo de solicitação ao longo de sua vida útil possibilitando a previsão de falhas e consequentemente de acidentes, sejam eles ambientais ou que causem malefícios às pessoas que trabalham nas proximidades.

Referências bibliográficas:

- 1 - Braga, Arthur Martins Barbosa - Notas de aula de mecânica dos sólidos I e II.
- 2 - Camerini, Murilo Giron - “Monitoramento de *Risers* Flexíveis Através de Técnica Baseada em Vibrações”, Abril de 2012.
- 3- Exploração de petróleo. Disponível em: <http://www.platform-decommissioning.com/pipeline-subsea-wells-pa> Acesso em 28 de Junho de 2015.
- 4- *Fiber Bragg Gratings*; Coordenação de Manfred Rothhardt; Desenvolvido pelo Departamento de Módulos de Fibra Óptica, Divisão de Fibra Óptica e Aplicações de Fibras Ópticas; Instituto de Tecnologias Fotônicas (IPHT), Jena, Alemanha; Disponível em: <http://www.ipht-jena.de/en/optical-fibers-and-fiber-applications/departments/optical-fiber-modules/fiber-bragg-gratings.html>; Acesso em 31 de Maio de 2015.
- 5- FPSO. Disponível em: <http://www.offshoreenergytoday.com/sbm-secures-usd-1-billion-loan-to-finance-fpso-cidade-de-ilhabela/>. Acesso em 28 de Junho de 2015.
- 6 - Gere, James M. e Goodno, Barry J., - “Mecânica dos Materiais”, Ed. Cengage Learning, 2010.
- 7 – Pré-Sal, Petrobrás. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/> Acesso em 30 de Maio de 2015.

8 - Raman Kashyap e J. M. López-Higuera, Fiber grating technology: theory, photosensitivity, fabrication and characterization, In: López-Higuera, José Miguel (Editor), Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2002.

9- *Riser* flexível. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2013/Yuri+FelipeB/relat1/Relatorio.htm>. Acesso em 28 de Junho de 2015.

10- ROV. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ve%C3%ADculo_submarino_operado_remotamente>. Acesso em 28 de Junho de 2015.

11 - Sol-gel Laboratory, Institute of Materials Science and Applied Mechanics, Polônia, Disponível em: <http://www.immt.pwr.wroc.pl/~gasior/Researches/Optical_sensors/optical_sensors.htm>; Acesso em 31 de Maio de 2015.

12 - Técnicas de monitoramento, PUC-Rio. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18538/18538_3.PDF>. Acesso em 30 de Maio de 2015.