

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Avaliação de entalhes no fluoreto de polivinilideno (PVDF) aplicado em linhas flexíveis

AUTORES:

Ingrid Cristina Soares Pereira
Celio Albano da Costa Neto
José Renato Mende de Sousa

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Rio de Janeiro -UFRJ

AVALIAÇÃO DE ENTALHES NO FLUORETO DE POLIVINILIDENO (PVDF) APLICADO EM LINHAS FLEXÍVEIS

Resumo

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento do Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) na presença de entalhes de formato-U em dois PVDF(s) comerciais aplicados como barreira de pressão em linhas flexíveis. Primeiramente, ensaios de tração combinados com a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) foram realizados para avaliar as amostras sem e com entalhes de ambos os PVDF(s), a fim de buscar entender a influência do entalhe no comportamento mecânico deste polímero. Além disso, um modelo numérico foi desenvolvido usando o método de elementos finitos (MEF) para simular o comportamento das amostras na presença do defeito. Os resultados dos ensaios demonstraram que o PVDF apresentou sensibilidade aos entalhes ao comparar os dados de carga-deslocamento e mapas de deformação com as amostras sem defeito. Ademais, a simulação realizada conseguiu boa convergência com os dados experimentais. Deste modo, através de ambos os métodos empregados foi possível avaliar o efeito do entalhe nos dois PVDF(s) comerciais.

Palavras-chave: Fluoreto de Polivinilideno, Barreira de Pressão, CID, Simulação.

Abstract

The aim of this study is evaluating the mechanical behavior using shape U notch into two grades of Polyvinylidene fluoride (PVDF) applied as pressure sheath in flexible line. Firstly, tensile tests using Digital Image Correlate (DIC) were performed in specimens with and without notch to get assessed to notch effect in the PVDF(s). Finally, a numerical model based on the element finite method was implemented to simulate mechanical behavior of notches samples. The results showed that both PVDF(s) had significant notch sensitivity as seen in load-displacement curves and strain-maps. Moreover, the simulation tests performed obtained good correlation with experimental data. Thus, the results allowed us to see that notch as a stress concentration and the numerical model got well simulates this influence on both PVDF mechanical behavior.

Keywords: Polyvinylidene fluoride, Pressure sheath, DIC, Simulation

Introdução

A constante demanda energética crescente por recursos de óleo e gás fez a indústria petrolífera expandir suas operações para águas profundas (300 a 1500 m) e ultraprofundas (acima de 1500 m). Devido a este cenário, as linhas flexíveis desempenham uma função estratégica por serem empregadas em profundidades de até 3000 m [1].

As linhas flexíveis multicamadas são amplamente aplicadas em operações dinâmicas na área de operações *offshore* na indústria de petróleo, cuja função é transportar o fluido/gás das instalações submersas para as plataformas ou navios. A principal característica mecânica dessas linhas é a combinação da baixa rigidez a flexão com a alta rigidez axial, advindo da configuração alternada entre

as camadas metálicas e poliméricas que possuem específicas funções. Entre essas camadas, a barreira de pressão polimérica possui um importante papel em promover a estanqueidade interna de fluidos e gases, além de promover a transferência dos esforços internos oriundos da pressão do fluido para as camadas externas[1,2]. Assim, para garantir a boa performance da linha flexível, é essencial garantir a integridade da barreira para evitar vazamento de fluidos para o meio externo.

No panorama brasileiro, a barreira de pressão é requerida em operações sob condições de águas profundas e ultraprofundas, consequentemente limitando a seleção de polímeros adequados. O guia de recomendações da API RP 17B[3] define o critério para a seleção desses materiais poliméricos. Estes critérios são principalmente baseados na faixa de temperatura e de pressão que as linhas flexíveis serão submetidas, além de considerar as características dos hidrocarbonetos transportados e os esforços mecânicos. Três polímeros genéricos são tipicamente usados para a manufaturas das barreias, os quais são o Polietileno (PE), Poliamidas (PA) e o fluoreto de polivinilideno (PVDF). Entre eles, o PVDF tem sido aplicado em condições extremas de temperatura por apresentar uma faixa de temperatura de operação de -20°C a 130°C, enquanto outros polímeros apresentam faixas de temperatura inferiores, como, polietileno de alta densidade (HDPE) que opera até 60°C, e a PA-11 e PE reticulado (PEX) suportam temperaturas de até 90°C[3].

O PVDF é um polímero termoplástico semicristalino com excelentes propriedades térmicas, químicas e mecânicas, o qual justifica a sua aplicação como barreira de pressão em linhas flexíveis multicamadas empregadas em operações dinâmicas. Entretanto, o PVDF tem demonstrado ser suscetível a propagação de trincas na presença de defeitos (concentradores de tensão)[4,5]. Estes concentradores podem influenciar no comportamento mecânico da barreira pressão sob carregamento. A API SP 17J[6] recomenda que os fabricantes das linhas deveriam avaliar a sensibilidade a defeitos dos materiais aplicados como barreira de pressão, por causa que esses defeitos influenciam no nível de deformação que a barreira pode suportar sob carregamento. De fato, a deformação admissível é um crítico parâmetro de projeto na manufatura dessas barreias, que no caso da barreira de PVDF as deformações máximas admitidas são 3,5% e 7,0% para as operações dinâmicas e estáticas, respectivamente.

Portando, a fim de buscar compreender o comportamento mecânico do PVDF sob efeito de concentradores de tensão, o presente trabalho avaliou dois PVDF(s) comerciais na presença de entalhes aplicando ensaios de tração com a técnica de correção de imagens digitais (CID) e simulação numérica.

Metodologia

Neste trabalho foi avaliado o comportamento mecânico de dois PVDF(s) comerciais aplicados como barreira de pressão, os quais serão definidos como PVDF A e PVDF B. O PVDF A é um homopolímero com 3% de plastificante, enquanto o PVDF B é um copolímero com esferas de polietileno. O comportamento mecânico de ambos os polímeros foi avaliado através de duas metodologias que são divididas em experimental e simulação numérica.

i. Metodologia Experimental

O objetivo da etapa experimental foi implementar ensaios mecânicos de tração combinados com a técnica CID, a fim de adquirir curvas de carga-deslocamento por meio de ensaios de tração e pela técnica óptica CID obter os mapas de deformação. Corpos de prova do Tipo 5A (ISO 572-2) com espessura (e) e largura (L) de 6 mm foram confeccionados a partir de dois PVDF(s) comerciais empregados como barreira de pressão. Para cada PVDF comercial foi proposta duas condições de ensaio, aplicando amostras homogêneas sem defeito, e amostras com entalhe (n) no formato-U (entalhe U) de

1,5 mm ($u/L=25\%$) introduzido na região central da secção útil. Nesses ensaios de tração com CID aplicou-se 5 réplicas para cada condição, as superfícies dessas amostras foram pintadas com spray preto para gerar pontos pretos aleatórios criando um contraste. Subsequente, as amostras foram tracionadas monotonicamente sob uma taxa constante de travessão de 5 mm/min com carga de 10kN a 23°C na INSTRON 5567, conforme ilustrado na Figura 1. As imagens foram adquiridas pelo software *eCorr* v4.0 a 5 Hz a partir do sistema de CID durante o ensaio, e para o pós-processamento dos resultados foi utilizado o *software* livre *Ncorr* v1.2.; a fim de mensurar os mapas de deformação na superfície das amostras.

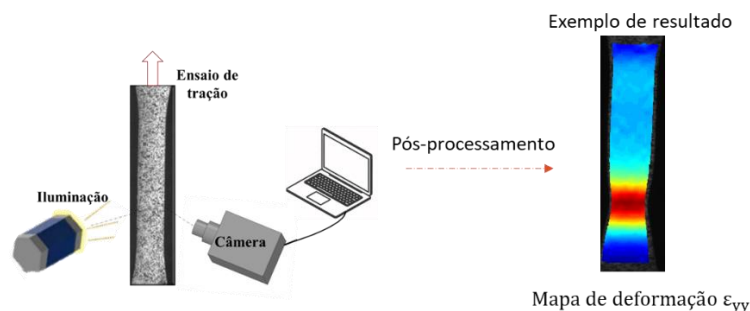


Figura 1. Esquema da configuração do ensaio de tração com a técnica CID, seguido da etapa de pós-processamento para a obtenção dos mapas de deformação.

ii. Etapa de simulação numérica

A simulação pretendeu aplicar o método dos elementos finitos (MEF) através do *software* *Ansys Student*, para simular o comportamento sob tração dos PVDF(s) na presença do entalhe formato-U. Nesse modelo foram inseridas as propriedades elásticas e as curvas tensão-deformação verdadeira de ambos os PVDF(s), de acordo com a Tabela 1 e a Figura 2. Além de ser imputado o modelo geométrico bidimensional (2D) com uma malha com elementos quadráticas com 8 nós de dimensão de 0,09 mm.

Tabela 1. Propriedade dos dois PVDF(s) comerciais.

Propriedade	PVDF A	PVDF B
Densidade (Kg/m^3)	$1,78 \times 10^5$	$1,79 \times 10^5$
Coeficiente de Poisson	0,43	0,49
Módulo elástico (MPa)	1280,15	1487,26

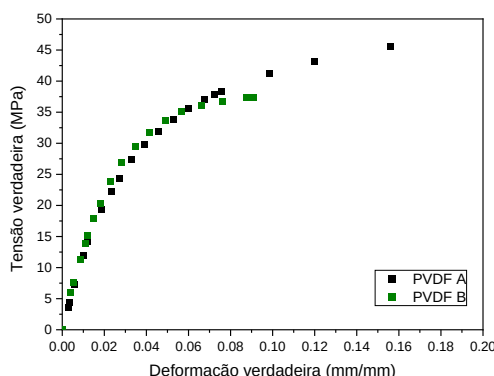


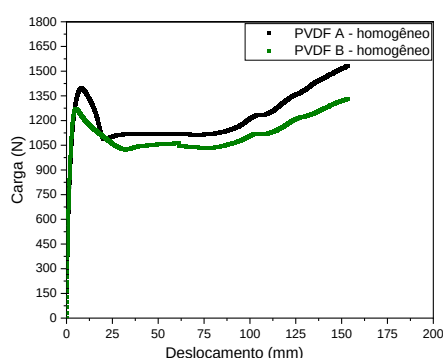
Figura 2. Curvas de tensão-deformação verdadeira dos dois PVDF(s) comerciais.

Resultados e Discussão

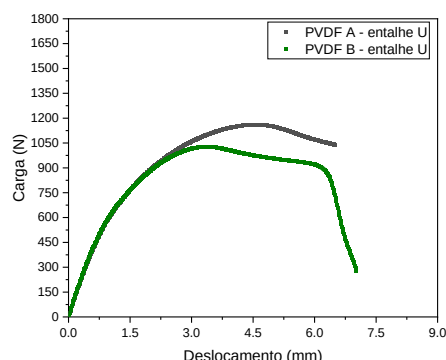
A carga e o deslocamento no ponto máximo das curvas de tração das amostras sem e com entalhe são apresentadas na Tabela 2, como pode ser visto as amostras apresentaram uma satisfatória repetibilidade com coeficiente variação inferior a 5,0%. Comparando com as amostras homogêneas, a carga e o deslocamento das amostras com entalhe foram menores como esperado. A representação do perfil das curvas carga-deslocamento é mostrada na Figura 3, as amostras homogêneas de ambos os PVDF(s) (Figura 3 (a)) apresentaram um aparente comportamento elástico linear até o ponto de escoamento, seguido por uma nucleação e propagação do pescoço até a ruptura. Em contrapartida, as amostras com entalhe (Figura 3 (b)) não apresentaram essa formação de pescoço acompanhadas de uma drástica redução do deslocamento até a fratura devido a presença do defeito, resultado da constrição da deformação plástica que é restringida a região do defeito como visto em outras pesquisas [7,8]. Outro interessante aspecto visto, é a diferença de comportamento mecânico dos PVDF(s) ensaiados, o que pode ser associada a composição química, morfológica e de processamentos desses PVDF(s).

Tabela 2. Média e desvio da carga e do deslocamento no ponto máximo das condições propostas para os dois grades comerciais de PVDF.

Polímero	Condições	Carga[N]	Deslocamento [mm]
PVDF A	homogêneo	1393,0 ± 31,4	8,0 ± 0,20
	entalhe U	1184,1 ± 21,5	4,68 ± 0,20
PVDF B	homogêneo	1257,9 ± 26,2	4,82 ± 0,30
	entalhe U	1060,3 ± 11,1	3,56 ± 0,18



(a)



(b)

Figura 3. Curvas de carga-deslocamento dos PVDF(s) comerciais: (a) amostras sem defeito e (b) com entalhe formato-U.

Os mapas de deformação das amostras homogêneas dos dois PVDF(s) são mostrados na Figura 4, cujos mapas são associados a específicas cargas. Os valores de carga são correspondentes aos seguintes pontos: (A) região elástica, (B) região de 3,5% de deformação (limite de deformação operando em aplicações dinâmicas), (C) região de 7,0% de deformação (limite de deformação operando em condições estáticas), e o (D) associado a deformação do ponto de escoamento dos PVDF(s) (PVDF A com 16,2% e PVDF B com 9,4%). Com o aumento da carga, o PVDF A (Figura 4.(a)) apresentou deformação homogênea ao longo da superfície com exceção da região superior, que observou concentração da deformação que é consequência da nucleação do pescoço. Ao analisar os mapas do

PVDF B (Figura 4.(b)) observou-se também deformação uniforme, mas não foi possível identificar a região de nucleação do pescoço.

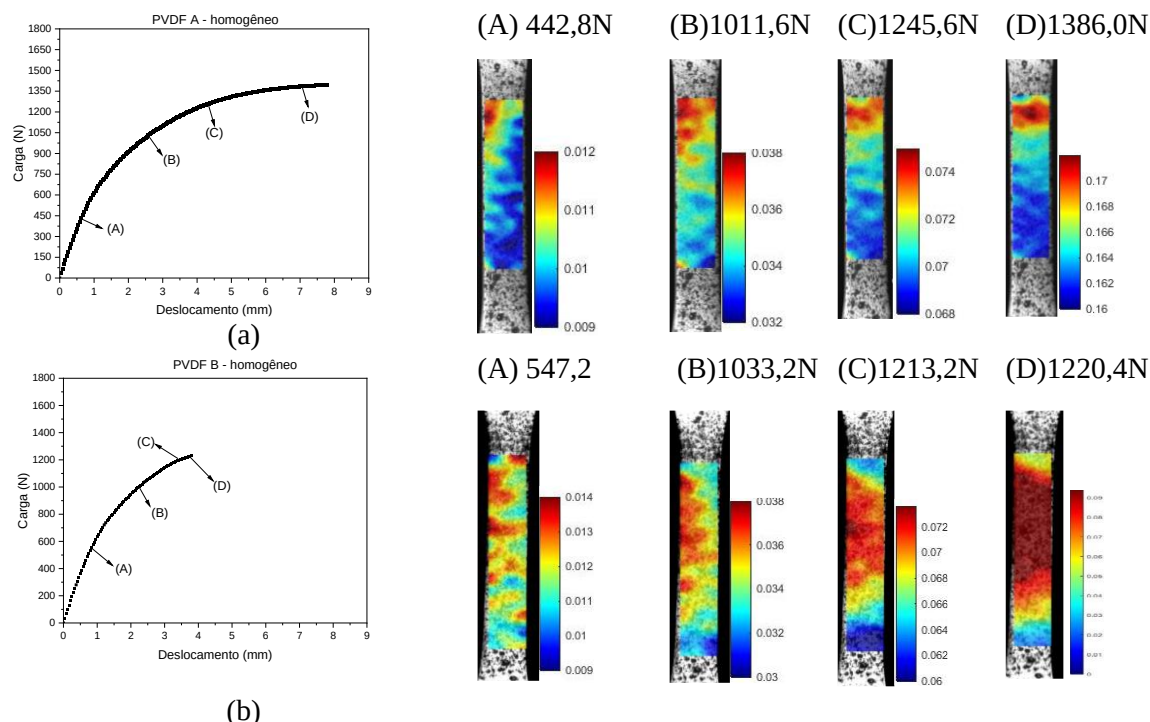


Figura 4. Mapas de deformação associados as curvas de carga-deslocamento dos PVDF(s) comerciais sem defeito: (a) PVDF A e (b) PVDF B.

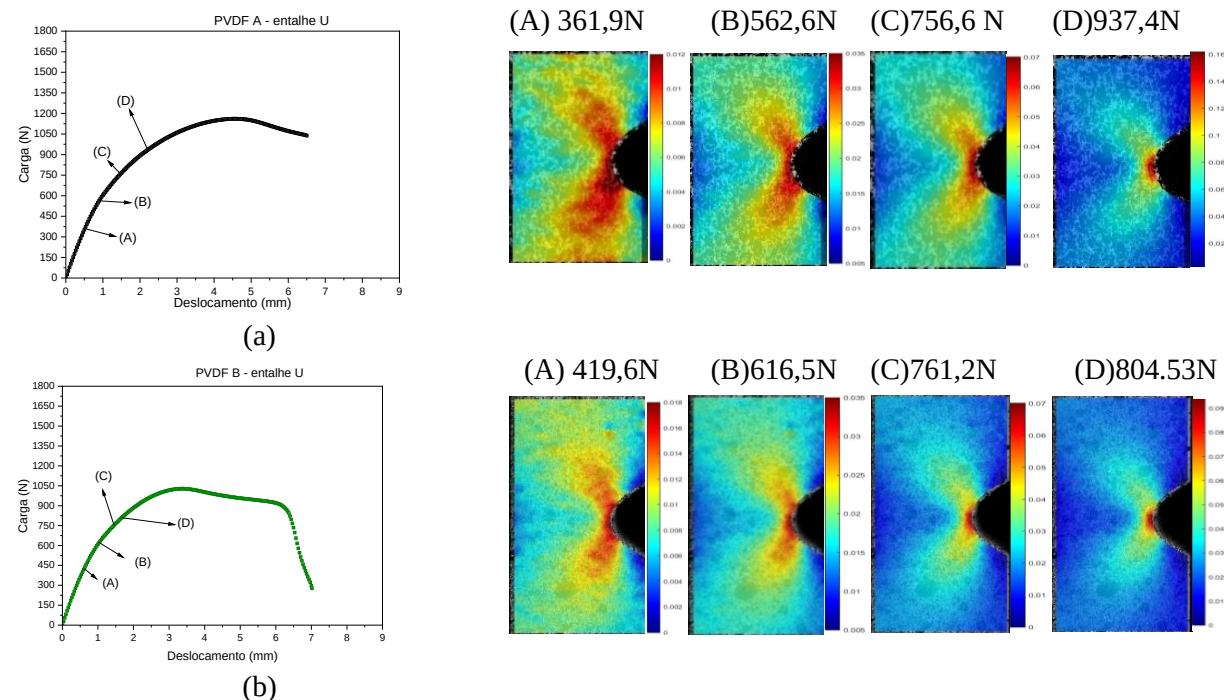


Figura 5. Mapas de deformação associados as curvas de carga-deslocamento dos PVDF(s) comerciais com entalhe formato-U: (a) PVDF A e (b) PVDF B.

Para os entalhes de formato-U, os mapas de deformação são apresentados na Figura 5, os pontos de carga são associados a específicos mapas como feito para as amostras homogêneas. A técnica DIC foi capaz de gerar excelentes mapas de deformação na região do defeito, permitindo a visualização da intensificação da concentração de deformação na região do defeito, à medida que aumenta a carga da região elástica (ponto (A)) para o ponto (D). Com isso, foi viável mensurar valores de deformação estratégicos na região do entalhe, como, a máxima deformação permitida de 3,5% (ponto (B)) e 7,0% (ponto (C)), que são pertinentes as operações dinâmica e estáticas da barreira respectivamente [6]. Ademais, no ponto (D) constatou-se que ambos os PVDF(s) alcançaram a deformação de escoamento próximo ao entalhe, enquanto longe dessa região mensurou-se deformações inferiores a 5%. No geral, a partir dos mapas pode-se observar uma severa constrição imposta pela parte elástica sobre a deformação plástica na área do defeito para os dois grades comerciais, de acordo reportado por Pereira e colaboradores [4].

Na Figura 6 é apresentada a comparação entre as curvas simuladas e experimentais dos entalhes de ambos os PVDF(s), cujo desvio médio observado entre as curvas foi inferior a 10%. Isto indica uma razoável correspondência entre os dados simulados e experimentais com a sobreposição na região elástica. Isto é corroborado pelos valores de carga máxima (Tabela 3) onde a divergência foi inferior a 7%, sugerindo que o modelo performado por ANSYS conseguiu representar o comportamento do PVDF com o entalhe U.

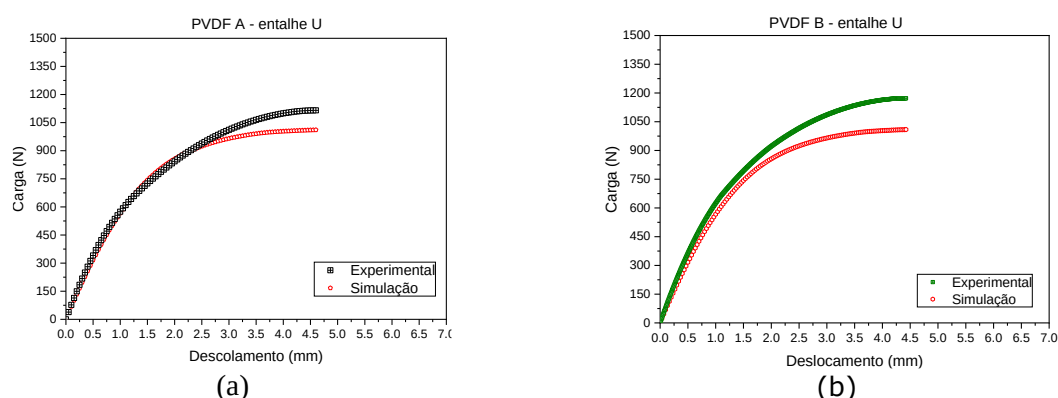


Figura 6. Comparação das curvas de carga-deslocamento simuladas e experimentais dos PVDF(s) comerciais: (a) amostras sem defeito e (b) com entalhe formato-U.

Tabela 3. Comparação dos valores de carga máxima experimentais e simulados mostrados na Figura 6.

Polímero	Carga máxima (N)		
	Simulação	Experimental	Diferença (%)
PVDF A	1098,9	1028,8(±38,4)	14,8
PVDF B	542,6	513,6(±20,4)	6,5

Conclusões

O principal objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de entalhe em dois PVDF(s) comerciais. Conforme, a parte experimental verificou-se a influência do entalhe no comportamento mecânico em ambos o PVDF(s), no qual constatou-se uma redução da carga e do deslocamento em comparação com as amostras sem defeito no ponto máximo e no deslocamento até a fratura. De fato, a técnica CID

permitiu perceber a influência do entalhe na concentração da deformação, onde próximo ao entalhe a deformação apresentou valores elevados em comparação as amostras sem defeito. Ademais, o modelo numérico performado apresentou boa correspondência com os resultados experimentais em relação ao comportamento de ambos os PVDF(s) na presença do defeito. Portanto, as duas metodologias permitiram avaliar de forma colaborativa e complementar ambos os PVDF(s) na presença do entalhe.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES).

Referências Bibliográficas

- [1] **Glossário**. Disponível em: <<https://www.comunicabaciadesantos.com.br/glossario>>. Acesso em: 8 agosto. 2022.
- [2] ESAKLUL, K. A.; MASON, J. Nonmetallics applications in oil and gas production (pipes, liners, rehabilitations). Em: **Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission**. Elsevier Ltd, 2017. p. 627–660.
- [3] API RP 17B. **Recommended Practice for Flexible Pipe, API RP 17B**. American Petroleum Institute, 2014.
- [4] PEREIRA, I. C. S. **Crack and notch sensitivity of polyvinylidene fluoride (PVDF) experimentally evaluated by DIC and compared to FEM**. [s.l.] UFRJ, 2021.
- [5] DAVIDSON, M. et al. **Assessment of the Integrity of the PVDF Barrier in Unbonded Flexible Pipes**. OMAE2014. **Anais...**San Francisco, Califórnia, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [6] API SP 17 J. **Specification for unbonded flexible pipe, API 17J**. American Petroleum Institute, 2014.
- [7] LAIARINANDRASANA, L.; HOCHSTETTER, G.; LAFARGE, M. Fracture Mechanics on PVDF Polymeric Material : Specimen Geometry Effects. **Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures**, v. 1143–1144, n. September, 2006.