



## ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO STRESS CRACKING EM PVC FLEXÍVEL

Daniel S. Fernandes<sup>1</sup>, Vinícius P. Bacurau<sup>2\*</sup>, Anderson Z. Fan<sup>2</sup>, Ana Larissa Soares Cruz<sup>2</sup>,  
Nicolas Moreira de Carvalho Gomes<sup>2</sup>, Edvânia T. Teófilo<sup>1</sup>

*1-Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Cariri (UFCA). R. Ten. Raimundo Rocha, 1639 - Cidade Universitária, Juazeiro do Norte - CE, 63048-080*

*2 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.*

*viniciusbacurau@gmail.com*

### RESUMO

*O policloreto de vinila (PVC) é um polímero que se destaca por ter uma vasta gama de aplicações no mercado, que vão desde aplicações de alto valor agregado, como equipamentos para a medicina, até produtos de uso geral, como embalagens. Sua versatilidade decorre do fato de que embora seja naturalmente tenaz e rígido, pode ser obtido na forma flexível mediante utilização de plastificantes em sua composição. Mesmo possuindo ótimas propriedades e benefícios o PVC, seja rígido ou flexível, pode apresentar limitações durante o uso por estar sujeito a diferentes formas de intemperismo e solicitações que podem iniciar processos degradativos e/ou de falha prematura. Um desses processos pode ser o Environmental Stress Cracking (ESC), que é caracterizado por provocar o fissuramento e a fragilização do polímero a partir da associação de fatores de natureza mecânica junto à ação de fluidos no material. É defendido que o fenômeno de stress cracking envolve plastificação localizada pelo fluido agressivo que juntamente com a tensão mecânica facilitam a formação de trincas. Nisto, se torna pertinente a investigação da resistência ao ESC no PVC flexível, de forma a analisar se a ação do fluido de ESC em um polímero com considerável teor de plastificantes tende a ser minimizada ou maximizada. Para viabilizar a pesquisa, fez-se uso de um perfil tubular comercial de PVC flexível para confeccionar corpos de prova que foram testados sob tração na ausência e na presença de soluções aquosas de hidróxido de sódio (NaOH) com concentrações de 1M e 5M. Foi possível determinar visualmente a presença de microtrincas, porém sem notável fragilização das amostras, sugerindo que a presença de plastificantes no PVC interfere no mecanismo de falha por ESC.*

**Palavras-chave:** *PVC, Stress Cracking, NaOH*

### INTRODUÇÃO

É certo que em pouco tempo os polímeros alcançaram grandes variedades de usos no mercado, que vão desde aplicações na área de saúde e industrial até setores como a agricultura. Dentre eles, um polímero que possui grande destaque é o policloreto de vinila (PVC) que por suas propriedades, vantagens técnicas e econômicas é um dos polímeros mais consumidos do mundo<sup>(1,2)</sup>.

De fato, o PVC tem uma gama de utilidades no mercado, sobretudo na indústria de construção civil onde ele é aplicado em tubulações devido à sua boa resistência mecânica, durabilidade, resistência à corrosão, alto poder de vedação, baixa necessidade de manutenção, se comparada às tubulações metálicas, e além disso, o PVC é reciclável e não é tóxico ao meio ambiente<sup>(2)</sup>.

Apesar de todos os benefícios que os polímeros têm a oferecer, estes materiais possuem limitações que vão desde a obtenção até a produção e uso do produto final. Nessas etapas, o material polimérico é sujeito a vários tipos de solicitações que potencialmente podem iniciar processos degradativos e/ou de falha prematura<sup>(2)</sup>. Um bom exemplo de falha prematura é *Environmental stress cracking* (ESC), que resulta exclusivamente da associação de fatores de natureza mecânica junto à ação de fluidos no material, onde o fluido não atua como agente de ataque químico, mas como um fator de natureza física<sup>(2)</sup>. A ocorrência desse fenômeno, pode ser atribuída a diversos fatores como: compatibilidade química entre o polímero e o agente químico, comportamento viscoelástico do polímero, taxa de difusão líquida e formação/crescimento de fissuras em várias partes do polímero<sup>(4)</sup>.

O fenômeno de ESC tem sido reportado como responsável pela maioria dos casos de falha prematura em produtos plásticos, ocorrendo desde ocorrências de fissuras superficiais à fratura frágil do produto, mesmo em polímeros considerados dúcteis<sup>(7)</sup>. Estima-se que 25% dos casos seja por ESC<sup>(6)</sup> e mesmo tendo esse grande impacto na economia esse fenômeno ainda não foi completamente elucidado, havendo controvérsias até mesmo em sua definição. Dentre os produtos plásticos que podem ser afetados estão os produtos de PVC, visto que muitas das tubulações utilizadas nas indústrias são feitas desse material e durante o seu uso sofrem de solicitações mecânicas de naturezas diversas que podem potencializar a falha por ESC ao entrarem em contato com fluidos que desencadeiam o fenômeno.

É um grande desafio estudar o ESC, devido à complexidade que paira sobre esse fenômeno. Trata-se de um assunto pouco investigado pela literatura científica, com poucas publicações lançadas a cada ano<sup>(7)</sup>. Em estudo recente constatou-se que o país que mais publica sobre o assunto gera em média apenas um artigo a cada ano<sup>(8)</sup>. Nesse contexto, o presente estudo pretende contribuir com a literatura avaliando o comportamento de ESC em amostras de PVC flexível, de forma a analisar se a ação do fluido de ESC em um polímero com considerável teor de plastificantes, como é o caso do PVC flexível, tende a ser minimizada ou maximizada.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Para produção dos corpos de provas foi utilizado como material um perfil tubular flexível de PVC transparente, de uso geral, fabricado pela Plasnor Industrial de Plásticos Ltda. Como agente de ESC utilizou-se soluções aquosas de hidróxido de sódio (NaOH) em concentrações de 1 Molar e 5 Molar. Os corpos de prova (cp's), foram preparados em tamanhos de 80 mm de comprimento e 10 mm de largura, com o auxílio de uma lâmina metálica lisa. Com o intuito de garantir boa precisão nas dimensões, um paquímetro digital foi utilizado para a medição dos cp's. O comprimento da área útil foi de 50 mm, respeitando assim, a norma ISO R377, em que o cp deve possuir o comprimento cinco vezes maior do que a largura para os ensaios<sup>(9)</sup>. Os 30 mm restantes foram divididos nas extremidades, sendo 15 mm em cada uma delas, as quais foram utilizadas para prender o cp às garras do equipamento de tração. A delimitação da área útil foi feita por linhas com auxílio de um pincel, de forma a

facilitar o encaixe dos cp's às garras da máquina. Na Figura 1 pode-se observar um corpo de prova e a ilustração de suas dimensões.

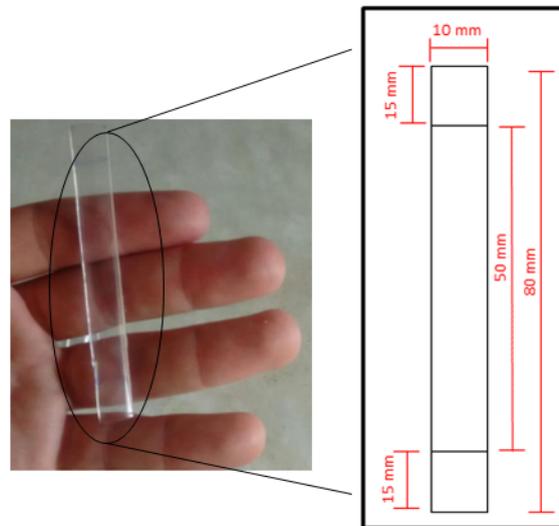


Figura 1: Corpo de prova e suas dimensões.

Para o preparo das soluções de teste, utilizou-se 0,4 g de NaOH em 100 ml de água destilada e 2,0 g de NaOH em 100 ml de água destilada para as soluções de concentração 1Molar e 5 Molar, respectivamente. Os testes de resistência ao ESC foram feitos sob tração em máquina TIRAtest 2425, utilizando célula de carga universal e taxa de deslocamento de 5 mm/min, sendo esta velocidade padronizada para todos os cp's. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada condição estudada: sem ação de agente de ESC, com ação de NaOH 1 Molar e 5 Molar. Para a aplicação das soluções nos cp's, foram utilizadas hastes de polipropileno com algodão. Os ensaios foram conduzidos até o rompimento dos corpos de prova e a aplicação das soluções se deu durante o tensionamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Enquanto ocorriam os ensaios de resistência ao ESC, foi possível notar que os corpos de prova não expostos ao agente de ESC, à medida que ia sendo tracionado, tornava-se opaco de maneira praticamente uniforme, conforme ilustrado na Figura 2a. Isso possivelmente é causado por um fenômeno conhecido como cristalização sob tração. Esse efeito causa o alinhamento das cadeias na direção da força aplicada, quando o material está sob um esforço mecânico, resultando no aumento do empacotamento e do grau de ordenamento das cadeias poliméricas, o que causa essa característica opaca ao material<sup>(3)</sup>. No caso dos cp's que foram colocados em contato com o agente de ESC, é possível observar duas regiões distintas, uma translúcida e outra opaca, conforme pode ser visualizado na Figura 2b para um cp em contato com NaOH 5M. O mesmo fenômeno é visualizado quando estão em contato com solução de 1M. Dessa forma, pode-se supor que com a presença da solução o fenômeno de cristalização sob tensão foi retardado, causado provavelmente devido ao fato de agentes do ESC ocasionarem plastificação, gerando um aumento da mobilidade das cadeias poliméricas.

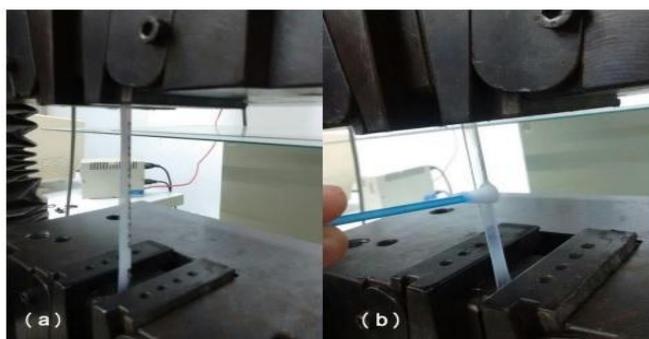


Figura 2: Aspecto visual dos corpos de prova durante o ensaio de tração: (a) na ausência da solução de NaOH e (b) na presença de solução de NaOH 5M.

A representação gráfica dos dados obtidos no ensaio de tração pode ser visualizada na Figura 3. Observa-se na Figura 3a, que a tensão média diminuiu com o aumento da concentração da solução de NaOH. Para a deformação média, os resultados foram análogos à tensão média, havendo também a diminuição dos valores com o aumento da concentração da solução, a Figura 3b representa esse decaimento.. É possível perceber a partir dos desvios padrões, que os valores não variaram muito para tensão e deformação, ou seja, a queda das propriedades do material em relação a resistência mecânica não ocorreu de forma brusca, como é comum nos casos de agentes de ESC agressivos, sugerindo que a ação do agente de ESC é minimizada pela presença dos plastificantes inerentes ao PVC flexível, uma vez já se tem certa mobilidade das cadeias o efeito de plastificação localizada ocasionada pelo agente de ESC não é tão notória. Porém, é ainda notório que a presença das soluções de ESC causa alteração no comportamento mecânico do PVC flexível.

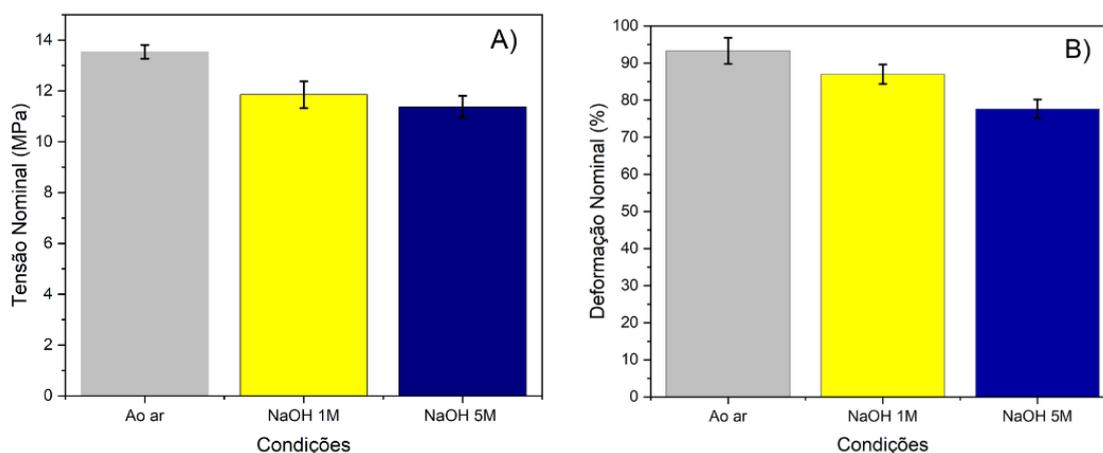


Figura 3: Representação gráfica dos dados obtidos pelo ensaio de tração: a) tensão nominal média e b) deformação nominal média, para os corpos de prova expostos a diferentes condições ao ar, sob ação da solução NaOH 1M e da solução NaOH 5M.

O aspecto visual dos cp's também apresentaram distinções. Os corpos de prova testados na ausência da solução não apresentaram microfissuras. Enquanto os que foram submetidos a soluções de NaOH, além da diminuição das tensões de deformações médias, ainda apresentaram a formação de pequenas fissuras características do fenômeno. Essa ocorrência está coerente com o mecanismo de falha proposto por Jansen<sup>(6)</sup>, pois as trincas formadas passam a agir como concentrador de tensão, favorecendo a plastificação e fratura, que pode ser acelerado com a presença de uma maior quantidade de solução. Essas microfissuras foram destacadas na Figura 4, que representa o corpo de prova exposto ao

agente agressivo com a concentração de 5 Molar. Os corpos de prova expostos a solução de 1 Molar também apresentaram essas microfissuras, só que em menor quantidade.



Figura 4: Corpo de prova ensaiados sob tração, em contato com a solução de hidróxido de sódio com concentração de 5M.

Bishop et al<sup>(1)</sup>, concluíram em seus experimentos que soluções altamente alcalinas de hidróxido de sódio alteram de forma significativa a estabilidade do PVC sob efeitos de tensões trativas, mesmo não havendo alteração química do polímero. A solução alcalina é absorvida pelo material causando um efeito de plastificação localizada, o que resulta na alteração do comportamento mecânico sob tração. Esta conclusão corrobora com os resultados obtidos desta pesquisa, com o aumento da concentração da solução de NaOH houve uma diminuição da resistência mecânica do material a tensões trativas, podendo provocar um rompimento prematuro.

## CONCLUSÕES

Os corpos de prova ensaiados em contato com as soluções apresentaram discreta diminuição na resistência mecânica sugerindo que a presença de plastificantes no PVC interfere no mecanismo de falha por ESC. Embora a diminuição nas propriedades mecânicas tenha sido discreta, foi possível observar que o dano aumentou com a alcalinidade da solução ocasionando uma formação mais significativa de microtrincas perpendiculares à direção do esforço, o que corrobora a ocorrência de stress cracking no PVC flexível nas condições estudadas.

## REFERÊNCIAS

1. BISHOP, S. et al. Environmental stress cracking of poly(vinyl chloride) in alkaline solutions. *Polymer Degradation and Stability*, v. 70, n. 3, p. 477–484, 2000
2. DE PAOLI, M-A., *Degradação e Estabilização de Polímeros*. São Paulo: Artliber Editora, 2009.
3. CANEVAROLO, JR, S. V., *Ciência dos Polímeros: Um Texto Básico para Tecnólogos e Engenheiros*, 2a Ed. – São Paulo, 2006.
4. ARNOLD, J. C. The influence of liquid uptake on environmental stress cracking of glassy polymers. *Materials Science and Engineering A*, 1995, v. 197, p. 119-124
5. JUNIOR, F. C. ZARRAR.; HOLANDA, M. G., O PVC: Características Técnicas, vantagens e Relação com o meio Ambiente, In: II Semana Nacional de Ciência e Tecnologia do IFPE Campus Caruaru, Caruaru, 2011. p 1-10.

6. JANSEN, J. A. Environmental stress cracking - the plastic killer. *Adv. Mat. & Processing*, June, p. 50-53, 2004.
7. TEÓFILO, E. T. et al. Falha por stress cracking em híbridos PET/argila. *Polímeros*, v. 24, n. 6, p. 694–702, dez. 2014.
8. BACURAU, V. P. et al. Stress-Cracking: Um estudo bibliométrico dos últimos 21 anos de publicações científicas. In: *Coleção desafios das engenharias: Engenharia de materiais e metalúrgica 2*. [s.l.] Atena Editora, 2021. p. 1–17.
9. FERNANDES, Daniel dos Santos. Uso de Soluções Aquosas de Hidróxido de Sódio como Agente Agressivo para Análise da Resistência ao Stress Cracking do PVC Flexível. 2017. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, 2017.

## ANALYSIS OF STRESS CRACKING RESISTANCE IN FLEXIBLE PVC

### ABSTRACT

*Polyvinyl chloride (PVC) is a polymer that stands out for having a wide range of applications on the market, ranging from high added value applications such as medical equipment to general use products such as packaging. Its versatility stems from the fact that although it is naturally tenacious and rigid, it can be obtained in flexible form through the use of plasticizers in its composition. Even with excellent properties and benefits, PVC, whether rigid or flexible, may present limitations during use as it is subject to different forms of weathering and stresses that can initiate degrading processes and/or premature failure. One of these processes can be Environmental Stress Cracking (ESC), which is characterized by causing cracking and weakening of the polymer from the association of factors of a mechanical nature together with the action of fluids on the material. It is argued that the stress cracking phenomenon involves localized plasticization by the aggressive fluid which, together with mechanical stress, facilitates the formation of cracks. Therefore, it becomes relevant to investigate the resistance to ESC in flexible PVC, in order to analyze whether the action of the ESC fluid in a polymer with considerable plasticizer content tends to be minimized or maximized. To make the research viable, a commercial flexible PVC tubular profile was used to make specimens that were tested under tension in the absence and presence of aqueous solutions of sodium hydroxide (NaOH) with concentrations of 1M and 5M. It was possible to visually determine the presence of microcracks, but without noticeable fragilization of the samples, suggesting that the presence of plasticizers in PVC interferes with the failure mechanism by ESC.*

**Keywords:** *PVC, Stress Cracking, NaOH*