

***Stress Cracking* do Policarbonato na Presença de Etanol**

C. J. F. Braz¹, R. M. R. Wellen², M. S. Rabello^{1*}

¹Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPG-CEMat), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Aprígio Veloso 882 - Bodocongó - CEP: 58429-900 - Campina Grande - PB

²Departamento de Engenharia de Materiais (DEMat), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Cidade Universitária - Castelo Branco - CEP: 58051-900 - João Pessoa – PB

(Recebido em 10/07/2017; revisado em 01/08/2017; aceito em 03/08/2017)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O *Environmental Stress Cracking* (ESC) é uma das maiores causas de deterioração de polímeros, principalmente, os vítreos. O policarbonato (PC) é um dos principais polímeros de engenharia afetado por esse fenômeno, que ocorre quando existe uma combinação de tensão mecânica com um agente químico agressivo. O presente trabalho busca estudar o ESC no policarbonato (PC), na presença de etanol, através de dois ensaios mecânicos: (1) tração convencional e (2) tração à tensão constante. Os ensaios de tração simples ocorreram em três velocidades de deformação, 10, 1 e 0,1 mm/min, e os de tensão constante em três cargas, 1800, 1200 e 600N. O efeito do etanol no PC foi previamente analisado por ensaio de absorção e as fissuras foram analisadas visualmente e por microscopia ótica. Os resultados indicaram que o etanol foi absorvido pelo PC, reduzindo significativamente as propriedades mecânicas e conduzindo à sua ruptura prematura. Conclui-se que a densidade e a localização das microfissuras formadas pela presença do etanol foram dependentes da velocidade e da carga aplicada em cada ensaio realizado.

Palavras-chave: *Stress cracking*; policarbonato; etanol.

Abstract:

Environmental Stress Cracking (ESC) is one of the major causes of polymer deterioration, especially with glassy polymers. Polycarbonate is one of the main engineering polymer affected by this phenomenon, which occurs when a combination of mechanical stress and aggressive chemical agent is present. This work aims to study the ESC of polycarbonate (PC) in ethanol under two mechanical conditions: (1) tensile test and (2) tensile test at constant load. Different loading conditions were applied. The interaction effect of ethanol on PC was investigated by absorption experiments. The cracks and crazes were analyzed visually and by optical microscopy. The results indicated that ethanol was absorbed by the PC, significantly reducing the mechanical properties and leading to premature rupture. It was concluded that the density and location of the crazes were dependent on the speed and the load applied in each test performed in ethanol presence.

Palavras-chave: Stress cracking; polycarbonate; ethanol.

1. Introdução

O policarbonato (PC) é amplamente utilizado como plástico de engenharia devido à combinação de transparência, tenacidade, baixa absorção de umidade, boa estabilidade térmica, boas propriedades mecânicas e baixa densidade [1-4]. No entanto, dentre as suas principais desvantagens encontra-se sua baixa resistência ao *stress cracking*.

O *Environmental Stress Cracking* (ESC) é um fenômeno em que um material polimérico, sob tensão, é deteriorado por um agente químico agressivo [5], uma vez que o ESC é definido como um processo essencialmente físico, que não envolve degradação química do polímero [1]. É um modo de

falha induzida por um fluido, na qual os efeitos deletérios do agente químico e tensões mecânicas resultam em fissuras e trincas [6]. Este fenômeno compromete e limita a aplicação dos materiais poliméricos [7], pois pode reduzir drasticamente o tempo de vida útil dos materiais [8]. O ESC pode ocorrer em diversas situações práticas como em contato do produto com agentes de limpeza, óleos lubrificantes, fluidos de refrigeração, vapores ambientais etc.

O ESC é um problema frequente dos polímeros vítreos, podendo ocorrer também nos semicristalinos, nos quais fluidos específicos podem resultar em fissuras na região tensionada [9]. A complexidade desse fenômeno deve-se aos muitos aspectos envolvidos, tais como a compatibilidade química entre o polímero e o fluido, a taxa de difusão do

* E-mail: cristiano.farias@gmail.com (C. F. Braz)

agente no polímero, o comportamento viscoelástico do polímero, a formação e o crescimento de fissuras [5, 10], a temperatura, a massa molar e o nível de tensão [11]. Estima-se que 25% das falhas de materiais poliméricos estejam relacionadas com o ESC [6], que pode ocorrer catastróficamente em uma escala de tempo que varia de segundos a vários anos de exposição [12].

Inúmeras pesquisas sobre ESC em polímeros vítreos já foram realizadas, tais como, no poliestireno (PS) [11], poli(metacrilato de metileno) (PMMA) [7, 9, 13] e PC [1, 3, 8, 14-17]. A resistência do PC ao ESC na presença de vários agentes químicos foi estudada por Li [18], que verificou que o benzeno, o tolueno e o xileno, por apresentarem alta densidade de energia coesiva de interação dispersiva, são propícios a causarem ESC no PC. Timóteo e colaboradores [14] observaram que a fotodegradação combinada com o contato de etanol intensificava a ação do *stress cracking* no PC. Lin e Schlarb [15] sugeriram que as nanocargas como SiO₂ podem induzir a formação de micro-deformações localizadas na matriz de PC, que resultam na dissipação de energia e melhoram a resistência ao ESC desse material. Recentemente, Silva et al. [8], ao estudarem a difusão de metanol e propanol no PC esterilizado por radiação gama, verificaram que o metanol se difundiu mais rapidamente que o propanol. Entretanto, ao analisarem o efeito destes agentes químicos no ESC do PC, eles observaram que o propanol apresentou-se tão agressivo quanto o metanol. Yan e colaboradores [3] exploram o efeito do uso de revestimento superficial, com silicone ou sílica, para melhorar a resistência ao ESC de peças transparentes de PC na presença de etanol. Através de ensaio de flexão de três pontos eles observaram que o silicone melhorou a dureza e o módulo elástico, enquanto a sílica fragilizou o PC; foi sugerido que o revestimento de silicone apresenta um efeito favorável no fornecimento de proteção contínua para PC sob a ação combinada de etanol e tensão.

Muito embora o ESC seja conhecido há muitos anos e seja uma causa majoritária de falha prematura de produtos poliméricos em serviço, o fenômeno ainda não é plenamente compreendido no meio científico. Considerando que vários fenômenos estão relacionados com o ESC em polímeros, até que todos os aspectos estejam compreendidos, a capacidade de prever e evitar as falhas causadas por ESC ainda ficará pendente para a ciência dos polímeros [10]. Por exemplo, os efeitos consequentes da ação de diversos tipos de tensões mecânicas ainda carecem de dados quantitativos. Visando contribuir com informações ao banco de dados da literatura, este estudo analisa o *stress cracking* no PC na presença de etanol via ensaios mecânicos de tração.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

O PC utilizado foi o Lexan 102L, doado pela Sabic Innovative Plastics (Bergen op Zoom/Holanda), na forma de grânulos na cor natural transparente vítrea. Possui densidade de 1,20g/cm³ e índice de fluidez de 7,2g/10min (300°C/1,2kg).

O etanol, escolhido como agente de ESC, foi utilizado como recebido e fornecido pela Synth (Diadema/SP). Densidade igual a 0,800g/cm³ a 20°C e ponto de ebulição de 78°C.

2.2. Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova de tração tipo I (ASTM D 638) [19] foram produzidos em uma Injetora Hidráulica Allrounder da Arburg operando com temperatura do barril de injeção ajustada entre 290 e 310°C, a pressão de injeção foi de 1300 bar e a temperatura do molde mantida em 60°C. Antes da injeção, os grânulos foram secos em uma estufa a vácuo a 120°C por 6h.

2.3. Absorção de Etanol

Amostras com dimensões 30 x 13 x 3 mm³ foram cortadas a partir dos corpos de prova injetados. Medidas da variação de massa das amostras de PC, em função do tempo de submersão, durante sete dias, foram realizadas em duplicata utilizando-se uma balança analítica Adventurer OHAUS, modelo AR2140, com precisão de 0,1 mg.

2.4. Ensaios de Stress Cracking

Para a análise da resistência ao *stress cracking* (ESCR), dois testes mecânicos foram realizados: (1) teste de tração convencional, e (2) teste de tração à tensão constante. Estas análises foram conduzidas em uma máquina universal DL da EMIC, com célula de carga de 2000 kgf. Todas as amostras foram, previamente, acondicionadas na sala de teste, em ambiente climatizado a uma temperatura de 23°C, por no mínimo 24h, para equilíbrio de temperatura com o ambiente. Os testes de tração foram realizados em três velocidades de deformação, 10, 1 e 0,1 mm/min, e para os testes à tensão constante foram selecionadas três cargas, 1800, 1200 e 600N, relacionadas respectivamente a 75, 50 e 25% da carga máxima suportada pelo material, baseado na ISO-22088-2 [20]. Esses testes foram realizados na ausência e na presença de etanol. Para os testes realizados na presença de etanol, o mesmo foi aplicado em toda superfície do corpo de prova por meio de um chumaço de algodão umedecido, desde o início do ensaio até a ruptura das amostras. Nos testes à tensão constante, a aplicação do etanol se deu após atingir a carga estipulada, em uma permanência máxima de 20 min.

2.5. Aspectos Visuais e Microscopia Ótica

A fim de analisar o fissuramento das amostras, após dos ensaios de ESCR, fotografias digitais foram feitas com uma câmera DSLR Canon EOS Rebel T5 e lente 18-55 mm e imagens de microscopia ótica (MO) capturadas através de um microscópio Leica DM 750, com aumento de 4x.

3. Resultados e Discussão

3.1. Absorção de etanol

A absorção de um solvente é um indicativo de sua interação com o polímero [13], sendo considerado um parâmetro importante para prever a ação ESC [1]. Um baixo grau de absorção pode levar a um amolecimento extremo, a plastificação e, às vezes, ao *stress cracking* do polímero [21]. Os mecanismos sugeridos sobre fissuras consequentes do ESC são dependentes da combinação entre o polímero e o fluido [7], uma vez que os parâmetros de solubilidade dos solventes e polímeros, absorção de líquidos orgânicos e ligações de hidrogênio são comumente aplicados para descrever o mecanismo de ESC [23].

O ganho de massa do PC devido à absorção de etanol está mostrado na Figura 1, onde se observa que o etanol tem uma ação difusiva no PC [1, 8], o que contribui para intensificação do comportamento de ESC no PC, conforme resultados mostrados subsequentemente.

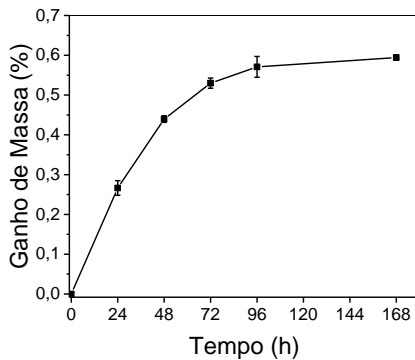


Figura 1. Curva de ganho de massa do PC pela absorção de etanol.

3.2. Stress Cracking Sob Tração Convencional

As curvas tensão-deformação do ensaio de ESC sob tração convencional estão representadas na Figura 2 e os

tempos de deformação e ruptura estão na Figura 3. As propriedades mecânicas e o tempo de ruptura do PC na ausência (SE) e na presença (CE) de etanol nas diferentes velocidades estão listados na Tabela 1.

Para as amostras testadas na ausência de etanol (Figura 2-a), verificou-se que a tensão máxima aumentou com a velocidade de deformação aplicada, em decorrência do efeito da viscoelasticidade, em que ocorre relaxação de tensão durante o ensaio devido à movimentos localizados dos segmentos moleculares do PC [24]. Na Figura 2-b, observou-se que a atuação do etanol afetou as propriedades mecânicas do PC, rompendo prematuramente todas as amostras, e reduzindo a tensão máxima em 27% para velocidade de 0,1mm/min e 18% para 1 mm/min em relação ao teste sem etanol. Quando a taxa de deformação utilizada foi de 10 mm/min não se observou efeito significativo na resistência, provavelmente porque nessa taxa o tempo de contato do fluido até a ruptura do polímero foi muito pequeno. Este comportamento poderia comprovar que é necessário haver condições favoráveis à difusão do álcool no polímero, para que haja a nucleação, posterior propagação de trincas e ruptura do material. Segundo Arnold [10], uma plastificação superficial mais intensa pode levar ao início e ao desenvolvimento de fissuras facilmente no polímero.

A presença do etanol afetou drasticamente a elongação do PC, inibindo a estirção e causando fragilidade neste material que é intrinsecamente dúctil. Essa é uma das principais consequências do stress cracking, o que confirma a atuação do etanol como agente de aceleração à deterioração do PC [10].

Quanto aos tempos de rupturas (Tabela 1), verificou-se que, a presença do etanol, durante o ensaio de tração, conduziu as fraturas em 69, 534 e 3255 segundos, respectivamente, para as velocidades 10, 1 e 0,1 mm/min, conforme verificado na Figura 3. Presume-se que o aumento do tempo de ensaio, potencializou o efeito ESC no PC. Uma vez que nesta condição se proporcionou um maior tempo de contato entre o polímero e o etanol, possibilitando uma maior difusão do fluido, plastificando o polímero e fragilizando-o prematuramente.

Tabela 1. Propriedades mecânicas e tempo de ruptura do PC na ausência (SE) e na presença (CE) de etanol nas diferentes velocidades após ensaio de tração.

Taxa de Deformação (mm/min)	Sem Etanol (SE)		Com Etanol (CE)		
	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Tempo de Ruptura (s)
0,1	53,83 ± 0,29	-	38,75 ± 0,87	4,71 ± 0,06	3255 ± 41
1	55,61 ± 0,73	-	46,21 ± 0,70	8,30 ± 0,70	534 ± 18
10	57,58 ± 0,66	-	57,73 ± 0,93	9,99 ± 0,98	69 ± 7

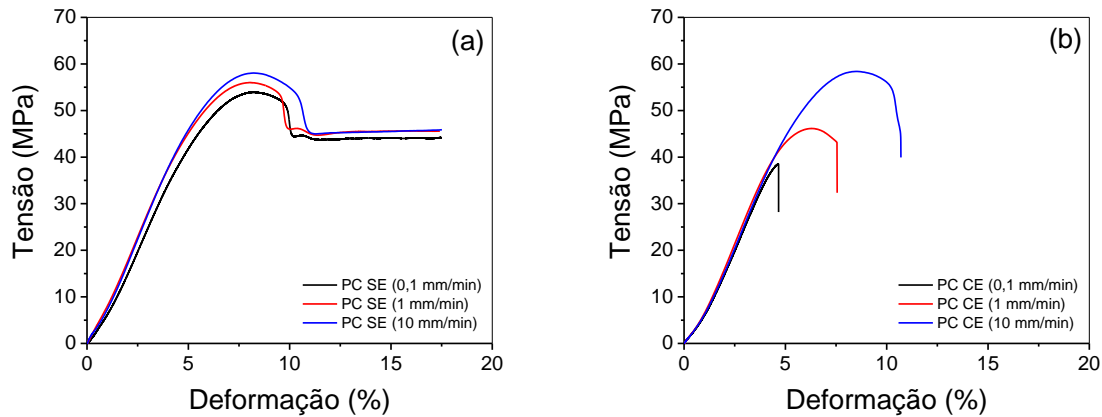


Figura 2. Curvas tensão-deformação na ausência (SE) (a) e na presença (CE) (b) de etanol.

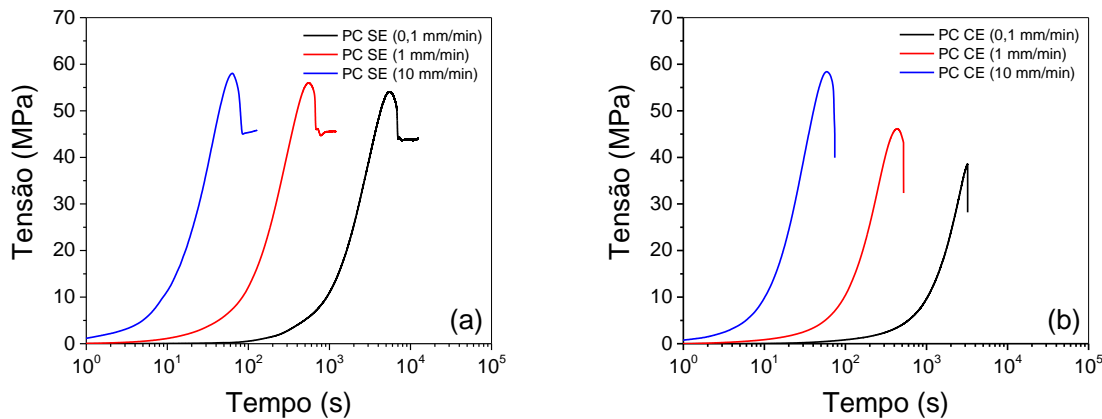


Figura 3. Curvas dos tempos de deformação e ruptura na ausência (SE) (a) e na presença (CE) (b) de etanol nos testes de tração.

3.3. Stress Cracking Sob Tensão Constante

A tensão total aplicada a um material polimérico pode ser dividida em componentes "elásticos" e "inelásticos". O componente "elástico", a curto prazo, pode ser visto como a tensão devido às respostas mais rápidas, que não envolvem o movimento da cadeia principal e seu valor pode ser obtido a partir da deformação elástica, correspondente à alteração dos ângulos de equilíbrio na cadeia principal. O componente "inelástico" corresponde às relaxações da cadeia principal que ocorrem em função do tempo e devido à natureza viscoelástica do polímero. Em uma situação em que haja um carregamento à tensão constante, a fissura ocorrerá quando a tensão inelástica ou a densidade de energia de deformação inelástica crítica atinge um determinado valor [25].

As curvas de força e de deformação *versus* tempo estão plotadas respectivamente nas Figuras 4 e 5. Observa-se que para todas as amostras analisadas na ausência de etanol, não houve ruptura nem variação significativa da carga em função do tempo (Figura 4-a). Além disso, o aumento de deformação nessa condição foi também muito pequeno (Figura 5-a). Isso foi resultado de certa imobilidade dos segmentos moleculares

do policarbonato, já que os ensaios foram realizados em temperatura bem abaixo de sua transição vítrea.

Nos corpos de prova testados na presença de etanol (Figura 4-b), observou-se que os resultados variaram significativamente em função da magnitude da carga aplicada. Com a força de 600N, a tensão aplicada manteve-se constante e a deformação praticamente não aumentou, tendo atingido uma alteração de apenas 1,89% após 20 minutos de ensaio (Figura 5-b). Entretanto, para as amostras testadas a 1200N, houve uma pequena variação na deformação, na ordem de 3%, após os 20 min de aplicação do etanol. Ou seja, nessa condição a ação do etanol provocou alguma plastificação localizada no PC que resultou em maior capacidade de deformação, mas não ocorreu a ruptura das amostras, após os 20 minutos de análise. Acredita-se que, em tempos mais prolongados, poderia haver a propagação das fissuras e a consequente falha catastrófica. Uma situação bastante diferente ocorreu para as amostras testadas a 1800N. Nessa situação, o nível de plastificação deve ter sido bastante elevado, resultando em uma deformação de 14% e a ruptura das amostras em 350s após início da aplicação do agente ESC. Isso confirma a forte ação de *stress cracking* do etanol em

tensões mais elevadas. Notou-se que, nesta condição, o equipamento de ensaios não consegue manter a tensão totalmente constante (Figura 4-b), uma vez que a ação do etanol torna-se muito intensa causando forte relaxação de tensão no corpo de prova.

Comparativamente, observa-se que a carga de 1800N, na presença de etanol, reduziu a tensão crítica inelástica, para proporcionar a ruptura do material, mais fortemente que as demais cargas.

Damasceno [27] obteve um comportamento semelhante do ESC do PC, na presença de metanol e isopropanol, verificando que a fratura ocorreu mais rapidamente na presença de metanol do que na presença de isopropanol. Indicando que a densidade de energia de deformação inelástica crítica, para ruptura do PC, foi menor na presença do metanol do que na presença do propanol.

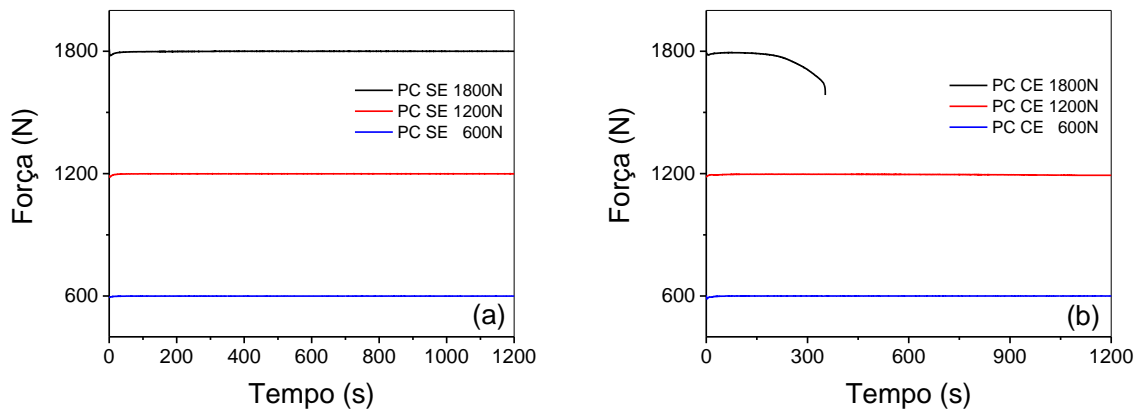


Figura 4. Curvas força x tempo do PC na ausência (SE) (a) e na presença (CE) (b) de etanol durante teste de tração à tensão constante.

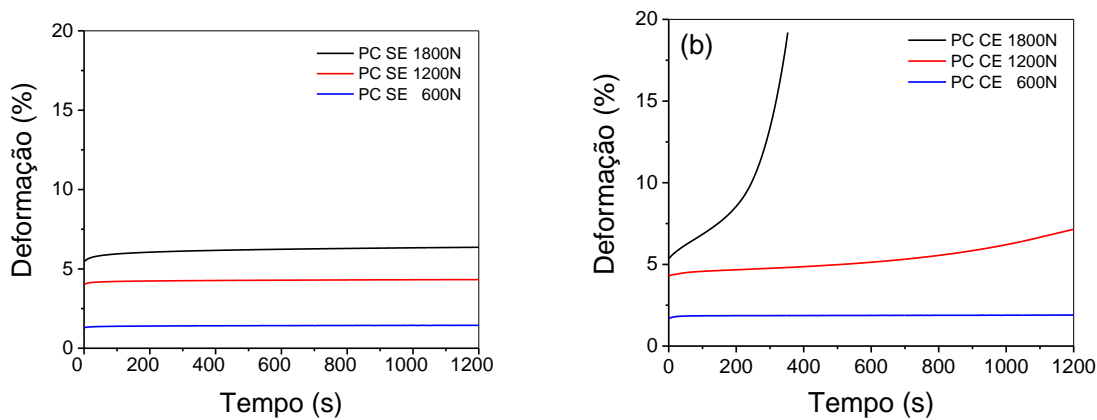


Figura 5. Curvas deformação x tempo do PC na ausência (SE) (a) e na presença (CE) (b) de etanol durante teste de tração à tensão constante.

3.4. Aspectos Visuais

As análises visuais das amostras de PC, antes e após, os testes de ESC sob tração estão apresentadas na Figura 6. Observa-se que as amostras apresentaram-se transparentes e não fissuradas para os experimentos na ausência de etanol (Figura 6-a). Na presença de etanol, poucas fissuras foram formadas nas amostras testadas a 0,1 mm/min (Figura 6-b), porém, estas foram mais profundas àquelas presentes nas amostras ensaiadas a 10 mm/min, as quais se localizaram superficialmente ao longo das arestas das amostras (Figura 6-d). Acredita-se que, a uma menor velocidade, as fissuras sejam formadas devido à difusão localizada do etanol em posições instáveis, conseqüentes à nucleação das fissuras [28].

Verificou-se que as amostras submetidas a 1 mm/min (Figura 6-c) foram visualmente as mais afetadas pela presença da tensão e do etanol.

Macroscopicamente, as microfissuras se apresentam na forma de riscos finos e se propagam em um plano perpendicular ao da tensão aplicada, como observado em estudos anteriores [13, 14, 26]. O mecanismo de deformação por microfibrilamento, em polímeros vítreos, não contribui para tenacificar suficientemente estes materiais, uma vez que uma concentração de tensões, na região dos microfibrilamentos, provoca a ruptura das fibrilas e, conseqüentemente, a formação rápida de trincas, que fragiliza o produto [29].

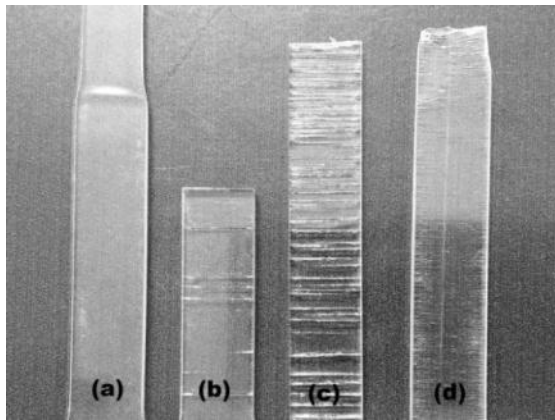


Figura 6. Fotografias das amostras de PC após ensaio de tração nas diferentes velocidades: sem etanol a (a) 0,1 mm/min, com etanol a (b) 0,1 mm/min, (c) 1 mm/min e (d) 10 mm/min.

Pode-se observar, na Figura 6, que as fissuras surgiram sobre todas as áreas tensionadas e foram perpendiculares à direção do esforço. Segundo Teófilo et al. [30], a agressividade do líquido tende a produzir uma trinca, que se propaga rapidamente, sem a formação de microfibrilamentos, devido à alta instabilidade da trinca existente, conforme observado para a amostra testada a 0,1 mm/min (Figura 6-b), na qual verificou-se a formação de um número menor de fissuras.

Uma observação importante refere-se à localização das trincas, elas tendem a se formar nas arestas do corpo de prova, que se apresentam como um concentrador de tensão, proporcionando sua rápida propagação. Quando o fissuramento é mais intenso e localizado no caminho de aderência do agente de ESC com o polímero, indicando que houve uma interação entre o polímero e o fluido, resulta-se na nucleação de mais trincas [21], como verificado para a amostra testada a 10 mm/min (Figura 6-d).

A inspeção visual das amostras testadas no ensaio ESC à tensão constante está presente na Figura 7. Coerentemente, amostras transparentes foram observadas quando analisadas na ausência de etanol. Quando aplicado simultaneamente o álcool selecionado e a carga de tração, as amostras ensaiadas a 600N (Figura 7-a) não apresentaram indicativos do fenômeno, caracterizando que este conjunto não foi suficiente para formação de microfissuras. Entretanto, as amostras analisadas a 1200 (Figura 7-b) e 1800N (Figura 7-c) foram perceptivelmente afetadas pelo conjunto fluido ativo e carga. Havendo fratura apenas para as amostras testadas a 1800N, as quais apresentaram uma grande concentração de microfissuras. O embranquecimento das amostras (Figura 7-c) foi devido à difração da luz, que pode gerar opacidade do material [29].

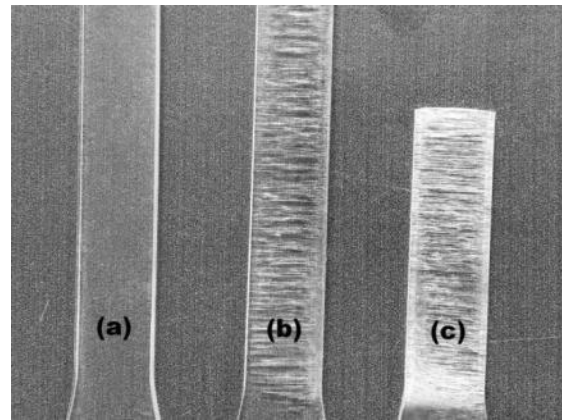


Figura 7. Fotografias das amostras de PC após ensaio a tensão constante nas diferentes cargas: (a) 600N, (b) 1200N e (c) 1800N.

3.5. Microscopia Ótica (MO)

Na Figura 8, encontra-se uma representação esquemática das regiões analisadas na microscopia ótica das amostras de PC, após os testes de ESC na presença de etanol, sob tração (Figura 9) e sob tensão constante (Figura 10). Verifica-se que a velocidade de 1 mm/min proporcionou microfissuras mais espessas (55 μm), possivelmente, devido à penetração intensificada do etanol para esta velocidade, enquanto que 0,1 mm/min gerou poucas microfissuras com espessura levemente inferiores (35 μm), porém estando presente ao longo de toda a largura da amostra, por fim, a 10 mm/min, observou-se que as microfissuras foram formadas ao longo de toda a borda das amostras, tendo apresentado espessuras menores (10 μm), que sugerem que o agente ESC escolhido não se difundiu bem para essa velocidade de deformação [1].

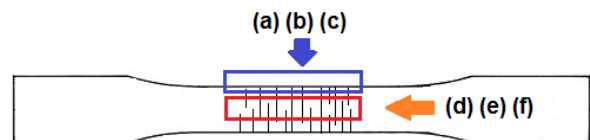


Figura 8. Esquema representativo dos locais da análise de microscopia ótica nas amostras.

A análise microscópica das amostras para o ensaio de tração à tensão constante indicou que a densidade das microfissuras foi proporcional à carga aplicada [21], de modo que as amostras submetidas à carga de 1800N apresentaram um maior número de microfissuras com espessuras variando de 15 a 112 μm , devido provavelmente à maior difusão do etanol no PC [1], estando de acordo ao observado na Figura 7.

Para a carga de 1200N, houve formação de microfissuras mais finas e separadas em relação à carga superior. Microfissuras com 12 μ m de espessura e distando entre si 200 μ m foram verificadas. Por fim, para a carga de 600N, não houve a formação de microfissuras, indicando que as condições não favoreceram a formação das mesmas.

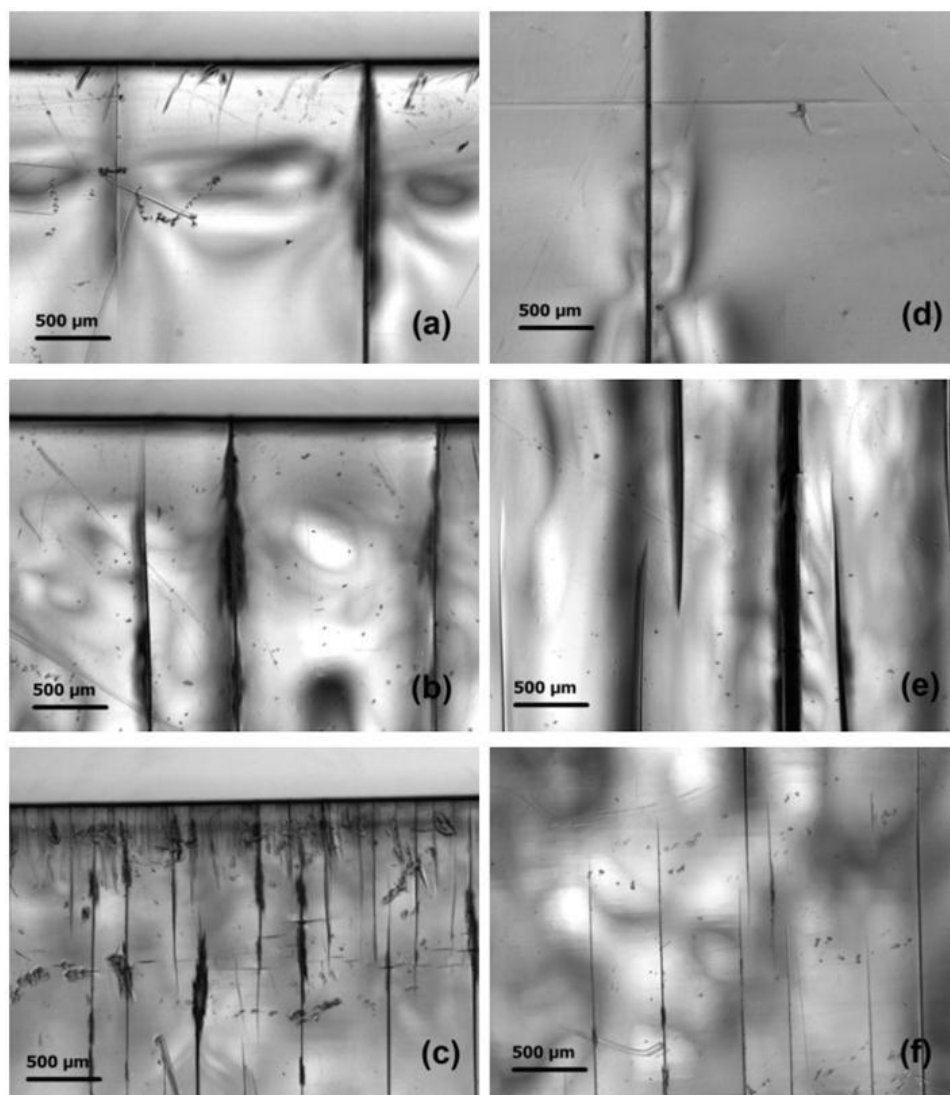


Figura 9. Micrografias do PC após ensaio de ESC sob tração com etanol nas diferentes velocidades: (a) e (d) 0,1 mm/min, (b) e (e) 1 mm/min, (c) e (f) 10 mm/min.

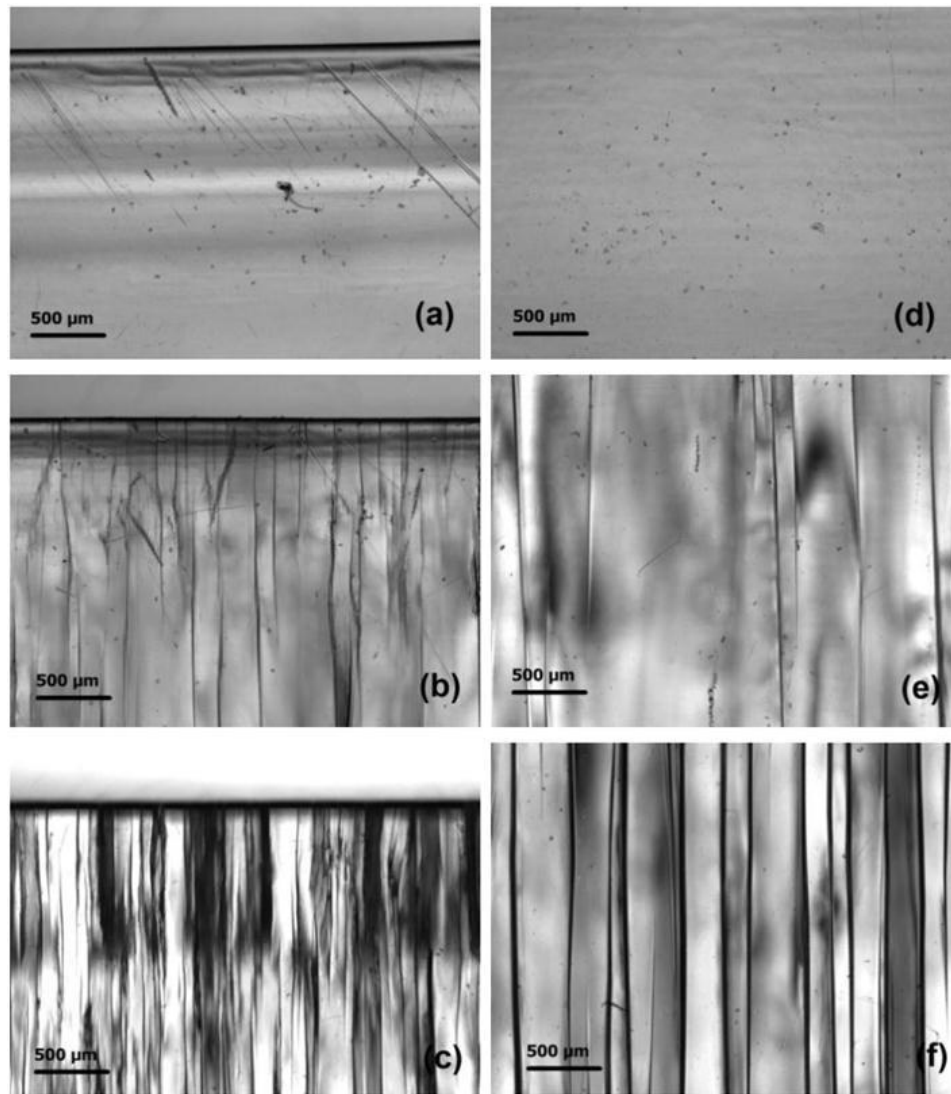


Figura 10. Micrografias do PC após ensaio de ESC sob tensão constante na presença de etanol nas diferentes cargas: (a) e (d) 600N, (b) e (e) 1200N e (c) e (f) 1800N.

Conclusões

Ensaio mecânicos foram realizados a fim de analisar o comportamento ESC do PC na presença de etanol. Verificou-se que o etanol afetou significativamente as propriedades mecânicas analisadas conduzindo à ruptura prematura do material tanto no ensaio mecânico convencional quanto nos testes realizados a tensão constante. Observou-se também que a densidade e a localização das microfissuras geradas pela presença do etanol foram dependentes da velocidade e da carga aplicada em cada experimento realizado.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Sabic, pela doação do policarbonato, e à CAPES, pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] Al-Saidi, L. F., Mortensen, K., Almdal, K. Environmental stress cracking resistance. Behaviour of polycarbonate in different chemicals by determination of the time-dependence of stress at constant strains. *Polymer Degradation and Stability*, 82, 451-61, 2003.
- [2] Nielsen, T. B., Hansen, C. M. Surface wetting and the prediction of environmental stress cracking (ESC) in polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 89, 513-6, 2005.
- [3] Yan, C., Zhang, J., Han, J., Wang, X., Guan, Z., Zhang, L., Liu, C., Shen, C. Improvement of environmental stress cracking resistance of polycarbonate by silicone coating. *Polymer Testing*, 60, 6-11, 2017.

- [4] Rosenberg, Z., Kositski, R. Deep indentation and terminal ballistics of polycarbonate. *International Journal of Impact Engineering*, 103, 225-30, 2017.
- [5] Altstädt, V. The Influence of Molecular Variables on Fatigue Resistance in Stress Cracking Environments. In: Altstädt V, Baietto-Dubourg MC, Chan CM, Chateauminois A, Estevez R, Van der Giessen E, et al., editors. *Intrinsic Molecular Mobility and Toughness of Polymers II*. Berlin: Springer Science & Business Media.; 2005. p. 105-52.
- [6] Jansen, J. Environmental Stress Cracking - The Plastic Killer. *Advanced Materials & Processes*, 162, 2004.
- [7] Neogi, P., Zahedi, G. Environmental Stress Cracking of Glassy Polymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 672-7, 2014.
- [8] Silva, P. P. J. C. d. O., Araújo, P. L. B., da Silveira, L. B. B., Araújo, E. S. Environmental stress cracking in gamma-irradiated polycarbonate – A diffusion approach. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 123-32, 2017.
- [9] Robeson, L. M. Environmental stress cracking: A review. *Polymer Engineering & Science*, 53, 453-67, 2013.
- [10] Arnold, J. C. The influence of liquid uptake on environmental stress cracking of glassy polymers. *Materials Science and Engineering A*, 197, 119-24, 1995.
- [11] Sousa, A. R., Amorim, K. L. E., Medeiros, E. S., Mélo, T. J. A., Rabello, M. S. The combined effect of photodegradation and stress cracking in polystyrene. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1504-12, 2006.
- [12] Hansen, C. M. Aspects of solubility, surfaces and diffusion in polymers. *Progress in Organic Coatings*, 51, 55-66, 2004.
- [13] Sousa, A. R., Araújo, E. S., Carvalho, A. L., Rabello, M. S., White, J. R. The stress cracking behaviour of poly(methyl methacrylate) after exposure to gamma radiation. *Polymer Degradation and Stability*, 92, 1465-75, 2007.
- [14] Timóteo, G. A. V., Fachine, G. J. M., Rabello, M. S. Stress cracking and photodegradation behavior of polycarbonate. The combination of two major causes of polymer failure. *Polymer Engineering & Science*, 48, 2003-10, 2008.
- [15] Lin, L., Schlarb, A. K. A study on environmental stress cracking in nano-SiO₂-filled polycarbonate. *Journal of Materials Science*, 47, 6614-20, 2012.
- [16] Lewis, P. R. Environmental stress cracking of polycarbonate catheter connectors. *Engineering Failure Analysis*, 16, 1816-24, 2009.
- [17] Kjellander, C. K., Nielsen, T. B., Ghanbari-Siahkali, A., Kingshott, P., Hansen, C. M., Almdal, K. ESC resistance of commercial grade polycarbonates during exposure to butter and related chemicals. *Polymer Degradation and Stability*, 93, 1486-95, 2008.
- [18] Li, X. Environmental stress cracking resistance of a new copolymer of bisphenol-A. *Polymer Degradation and Stability*, 90, 44-52, 2005.
- [19] ASTM, D. 638. Standard test method for tensile properties of plastics, 2002.
- [20] ISO - 22088 Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) - Part 2: Constant tensile load method. Switzerland, 2006.
- [21] Teófilo, E. T., Rabello, M. S. Stress cracking e ataque químico do poli (tereftalato de etileno) em soluções alcalinas-influência da forma de aplicação da solução. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 8, 2013.
- [22] Hansen, C. M. On predicting environmental stress cracking in polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 77, 43-53, 2002.
- [23] Wang, H. T., Pan, B. R., Du, Q. G., Li, Y. Q. Test Method the strain in the test environmental stress cracking of plastics. *Polymer Testing*. 22, 125-128, 2003.
- [24] Osswald, T. A., Georg, M. *Materials Science of Polymers for Engineers*. 3 ed. Munich: Hanser; 2012.
- [25] Arnold, J. C. Craze initiation during the environmental stress cracking of polymers. *Journal Of Materials Science*, 30, 655-60, 1995.
- [26] Ayer, R., Hiltner, A., Baer, E. Effect of an environmental stress cracking agent on the mechanism of fatigue and creep in polyethylene. *Journal of Materials Science*, 43, 6238-53, 2008.
- [27] Damasceno, L. G. Resistência do policarbonato ao environmental stress cracking (ESC) sob a influência de concentradores de tensão em contato com o álcool isopropílico e metanol [Dissertação]. Salvador, BA: Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec; 2010.
- [28] Teófilo, E. T., Melo, R. N., Silva, S. M. L.; Rabello, M. S. Stress cracking e ataque químico do PET em diferentes agentes químicos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 19, 202-211, 2009.
- [29] Rabello, M. *Aditivação de Polímeros*. São Paulo: Artliber; 2000.
- [30] Teófilo, E. T., Melo, R. N., Silva, S. M. L., Rabello, M. S. Stress cracking e ataque químico do PET em diferentes agentes químicos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 19, 202-11, 2009.