

## PROPRIEDADES MECÂNICAS E MECANISMOS DE FRATURA DE SISTEMAS EPÓXI/PPG-PEG-PPG<sup>1</sup>

Rafaela Fatima Cossul<sup>2</sup>, Marcia Bär Schuster<sup>3</sup>, Lohana Vieira Bataglini<sup>4</sup>, Maria Luiza Paganini Maia<sup>4</sup>,  
Marlene Bampi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Vinculado ao projeto “Sistema termorrígidos multicomponentes”

<sup>2</sup> Acadêmico (a) do Curso de Engenharia Química – CEO – Bolsista PROIP/UDESC

<sup>3</sup> Orientador, Docente do Departamento de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química – CEO –  
[marcia.schuster@udesc.br](mailto:marcia.schuster@udesc.br)

<sup>4</sup> Acadêmico (a) do Curso de Engenharia Química – CEO

<sup>5</sup> Docente do Departamento de Engenharia de Alimentos e Engenharia Química

O epóxi é um polímero termorrígido que possui propriedades mecânicas relevantes em relação aos outros polímeros, no entanto o mesmo possui comportamento frágil quando submetidos a fraturas. Desta forma, com o objetivo de aumentar a tenacidade, adiciona-se fases macias, como copolímeros triblocos, ao sistema. Neste estudo, foi avaliado o desempenho sob tração e a superfície de fratura das amostras com diferentes porcentagens de copolímero tribloco – 10 % (m/m) (PEP10) e 20 % (m/m) (PEP20) – em matriz epóxi.

Os materiais são fornecidos pela Sigma Aldrich, sendo a resina epóxi diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA-D3415), endurecedor 4,4diaminodifenilmetano (DDM-32950), copolímero tribloco poli(propilenoglicol)/bloco/poli(etileno glicol)/bloco/poli(propilenoglicol) (PPG-b-PEG-b-PPG) com Mn ~3300 g/mol, com 10% de PEG em seus blocos. O processamento foi por polimerização in situ com mistura do epóxi e copolímero sob agitação magnética por 10 min, a 75 ( $\pm$  5) °C, na sequência foi adicionado o endurecedor por mais 7 min, nas mesmas condições. A moldagem foi realizada em moldes de silicone com o processo de cura a 100 °C por 24 h e pós cura a 140 °C por 1 h. Adicionou-se 28,5 % (m/m) de endurecedor em relação a massa da resina.

Os valores obtidos para tensão ( $\sigma$ ) e deformação ( $\epsilon$ ) máxima e módulo de Young (E), estão representados na tabela 1. O sistema (PEP10) aumentou sua rigidez (E) em 32%, mas em contrapartida houve uma diminuição na sua tensão e deformação em relação a matriz pura. Como é o bloco PEG que tem afinidade com o epóxi, e este é o bloco central do copolímero tribloco, provavelmente o desempenho mecânico de resistência e deformação foram prejudicados pela diminuição da interação com o epóxi. Desta forma, provavelmente o PPG nas extremidades influenciou na estrutura final com microfases autorranjadas do copolímero tribloco, conforme pode ser verificado na Figura 1(b), sem interação há tendência a mais pontos de concentração de tensão e fratura precoce. O sistema PEP-20 também apresentou redução na tensão máxima ao comparar com a matriz pura, ou seja, a quantidade maior de copolímero provavelmente saturou o sistema fazendo com que não haja interação do bloco PPG com PEG/Matriz.

Na Figura 1(a) é observada a transparência/cor das amostras. As composições com a presença do copolímero apresentam opacidade e coloração branca/amarelada ao comparar com a amostra da resina pura, indicada pela letra R na mesma figura 1(a), que é transparente. Este comportamento é um indicativo de ter ocorrido separação de fase nas composições com o copolímero tribloco, ou seja, ocorreu a formação de uma blenda imiscível ou parcialmente miscível. A miscibilidade é a capacidade de dois ou mais componentes se misturarem em nível

molecular, resultando numa mistura homogênea com uma ou mais fases, desta forma na figura 1(b), por meios dos buracos se observa a presença de uma possível segunda fase.

Os mecanismos que atuam na fratura são importantes para entender as causas da mesma, de acordo com esses mecanismos é possível avaliar a ação de cada material na fratura e sua influência no desempenho mecânico do material. A variação das propriedades em relação a resistência e a tenacidade à fratura são interligadas a análise dos mecanismos de fraturas atuantes.

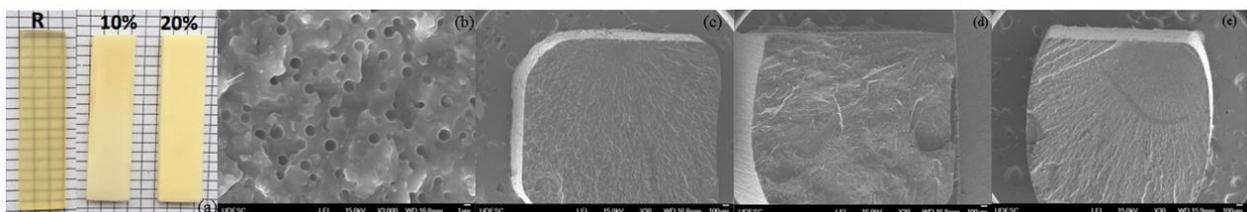
Na Figura 1(c, d e e) estão ilustradas as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fratura. A resina pura, Figura 1(b), possui superfície de aspecto liso, característico de fratura frágil. Todas as amostras ilustram claramente a região de transição de início de fratura, região mais lisa, para região de fratura rápida, região mais rugosa. Pode ser verificado que ao aumentar a adição de 10 % (m/m) para 20 % (m/m) de copolímero tribloco, Figura 1(d) e (e) respectivamente, as superfícies de fratura aparentam ser menos lisas, com uma maior rugosidade.

Associado a essa rugosidade, temos a formação de escarpas, que é um indicativo do mecanismo de fratura chamada de deflexão da trinca. As escarpas são relacionadas com as propagações de trincas em planos ligeiramente diferentes. Outro mecanismo que atuou na fratura foi a cavitação do copolímero tribloco autoarranjado em forma esférica, observado na figura 1(b), confirmando a separação de fase, as formações desses vazios ativam o processo de escoamentos/deformação plástica da matriz, aumentando a tenacidade do material. No entanto, nas imagens os buracos onde ocorreu a cavitação não aparentam que tenha ocorrido essa deformação plástica local, o que indica que teve pouca interação entre o epóxi/copolímero. O sistema PEP0-10 apresentou separação de fase com domínios esféricos de  $1,70 (\pm 0,03) \mu\text{m}$  e  $0,77 (\pm 0,03) \mu\text{m}$  para o sistema PEP- 20, sendo que este apresentou uma maior quantidade de micelas autorranjadas de formato circulares em comparação com o PEP-10.

A partir destes resultados temos que o desempenho mecânico diminuiu com a incorporação de copolímero tribloco (PPG-b-PEG-b-PPG). No entanto, a separação de fases do copolímero autorranjado em formato circular levou ocorrência de mais mecanismos de fratura, o que pode ter beneficiado a tenacidade do material.

**Tabela 1.** *Propriedades mecânicas dos sistemas*

	Resina	PEP -10	PEP - 20
$\sigma$ (Mpa)	$73,51 \pm 2,630$	$46,07 \pm 6,40$	$53,54 \pm 5,37$
$\epsilon$ (mm/mm)	$0,19 \pm 0,02$	$0,08 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,02$
E (GPa)	$3,35 \pm 0,29$	$4,45 \pm 0,53$	$2,99 \pm 0,38$



**Figura 1.** (a) *Comparação visual das transparências das amostras; superfície de fratura por MEV-FEG (b) morfologia do sistema PEP-10, (c) resina pura, (d) epóxi/10 % (m/m) de copolímero em bloco, e (e) epóxi/20 % (m/m) de copolímero em bloco.*

**Palavras-chave:** Epóxi. Copolímero. PPG-b-PEG-b-PPG.