

**Determinação das curvas de carga do polipropileno deformado via técnica de prensagem em canais equiangulares****Determination of polypropylene load curves by equal channel angular pressing technique**

DOI:10.34117/bjdv6n3-173

Recebimento dos originais: 13/02/2020

Aceitação para publicação: 13 /03/2020

**Ramaiane Eufrasio dos Santos**

Mestre em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal Fluminense (Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda)

Endereço: Avenida dos Trabalhadores, 420 - Vila Santa Cecília, Volta Redonda – RJ, CEP: 27.255-125, Brasil

E-mail: ramaiane.eufrasio@gmail.com

**Neil de Medeiros**

Doutor em Engenharia Metalúrgica

Instituição: Universidade Federal Fluminense (Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda)

Endereço: Avenida dos Trabalhadores, 420 - Vila Santa Cecília, Volta Redonda – RJ, CEP: 27.255-125, Brasil

E-mail: neil@metal.eeimvr.uff.br

**RESUMO**

O objetivo deste estudo é determinar as curvas de carga do polímero termoplástico polipropileno deformado a partir da técnica de prensagem em canais equiangulares, PCEA, através de diferentes rotas de processamento e temperaturas de ensaio. Foram realizados quatro passes de deformação considerando-se as rotas A e B, que são determinadas de acordo com o sentido de rotação da amostra entre os passes de prensagem durante os ensaios, sendo que na rota A as amostras não sofrem rotação e na rota B, a partir de  $B_A$  e  $B_C$ , há rotações de  $90^\circ$  alternadas para  $B_A$  e no mesmo sentido para  $B_C$ . Ainda, as temperaturas de  $25^\circ\text{C}$  e  $90^\circ\text{C}$ , sendo esta última correspondente a 50% da temperatura de fusão do polipropileno, foram consideradas para os testes via PCEA. Os resultados mostraram que as deformações aplicadas sofreram influência da temperatura de processamento e a rota A obteve os maiores valores de carga máxima em relação às rotas  $B_A$  e  $B_C$  a  $25^\circ\text{C}$  apresentando amostras com maiores distorções.

**Palavras-chave:** Prensagem em canais equiangulares, Rotas de processamento, Polímeros, Polipropileno

**ABSTRACT**

The objective of this study is performing ECAP tests (equal channel angular pressing) about the polypropylene thermoplastic polymer in order to determinate their load curves through different processing routes and temperatures. Four passes were performed the deformation which considerate A and B routes which are determined according to the direction of sample rotation during tests. On route A the samples don't rotate but on route B, from B<sub>A</sub> and B<sub>C</sub>, there are 90° rotations alternating for B<sub>A</sub> and in the same direction for B<sub>C</sub> route. Also, temperatures of 25 °C and 90 °C, which the last one is the half of melting polypropylene temperature, were considered for the ECAP tests. The results showed that the applied deformations were influenced by the processing temperature and the route A obtained the highest values of maximum load in relation to the others routes B<sub>A</sub> and B<sub>C</sub> at 25 °C and presented samples with higher distortions.

**Keywords:** Equal channel angular pressing, Processing routes, Polymers, Polypropylene.

**1 INTRODUÇÃO**

Materiais poliméricos são materiais orgânicos ou inorgânicos, bastante utilizados em aplicações de engenharia e um dos materiais poliméricos que se destaca é o polímero polipropileno (PP), um termoplástico formado a partir do propileno, que possui alta resistência mecânica, rigidez e dureza (CALLISTER JR, 2008).

Algumas propriedades, no entanto, podem ser melhoradas através de tratamentos térmicos e processos de conformação mecânica. Nesse sentido, vem-se destacando a técnica de prensagem por canais equiangulares (PCEA) desenvolvida por Segal et al. (1981) para refinar a microestrutura do material e em seguida, alterar suas propriedades mecânicas. Consiste em uma técnica inovadora inicialmente utilizada em metais, também podendo ser aplicada em polímeros, tanto do ponto de vista experimental quanto de modelagem (ZAIŘI et al., 2006).

Este processo de conformação é um importante método para a melhoria das propriedades dos materiais, como a resistência mecânica e a resistência à corrosão, pelas altas deformações geradas no material sem alteração significativa de sua seção transversal (SEGAL et al., 1981 apud AOUR et al., 2006).

Nesta técnica um grande refino microestrutural é obtido, proporcionado pela deformação plástica severa (DPS) aplicada ao material durante sua passagem por uma matriz com canais equiangulares projetada a fim de promover o ganho das propriedades mecânicas desejadas no material (SEGAL et al., 1981 apud AOUR et al., 2006).

O objetivo deste estudo é determinar as curvas de carga e tensão *versus* deformação verdadeiras a partir dos ensaios PCEA a 25 ° e a 90 °C considerando as rotas de processamento A, B<sub>A</sub> e B<sub>C</sub>.

O polímero polipropileno, por ser bastante utilizado e possuir alta relevância comercial e industrial, foi o material escolhido para a aplicação desta técnica e, apesar de haver diferentes métodos de conformação já consolidados no mercado e utilizados em grande escala de forma competitiva, a técnica PCEA pode se tornar um diferencial para determinadas peças que requeiram geometria complexa e propriedades específicas não obtidas através dos métodos tradicionais de conformação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

A maior parte dos materiais poliméricos é composta por cadeias moleculares muito extensas, com grupos laterais compostos por vários átomos ou grupos orgânicos. Essas macromoléculas são compostas por entidades estruturais, chamadas de unidades repetidas ou meros, que se repetem ao longo da cadeia (CALLISTER JR, 2008).

A reação ou conjunto de reações em que os monômeros, que se referem à pequena molécula a partir da qual um polímero é sintetizado, reagem entre si dando origem a uma macromolécula polimérica de alta massa molar é denominada polimerização. Durante a polimerização, algumas variáveis possuem maior ou menor importância de acordo com sua influência na qualidade do polímero formado (CANEVAROLO JR, 2006).

Existem diversas classificações para os polímeros como quanto ao número de monômeros, à natureza, ao método de obtenção, ao comportamento mecânico, entre outras. Em relação ao comportamento mecânico os polímeros podem ser fibras, elastômeros ou borrachas e plásticos, sendo esses classificados como termoplásticos e termofixos quanto à fusibilidade. Os termoplásticos apresentam a capacidade de fundirem-se e solidificarem-se inúmeras vezes desde que reaquecidos e são parcialmente cristalinos ou totalmente amorfos. Alguns exemplos de termoplásticos incluem polietileno, poliestireno, polipropileno, e cloreto de polivinila. Os termofixos, ou termorrígidos, são polímeros em rede, insolúveis e infusíveis, completamente amorfos e mais resistentes ao calor do que os termoplásticos. Assim, apresentam produto final duro que não amolece com o aumento da temperatura (CALLISTER JR, 2008).

O polipropileno (PP) consiste em um polímero termoplástico semicristalino do grupo das poliolefinas, ou seja, contém apenas hidrogênio e carbono na composição de suas macromoléculas (CHEN et al., 2018), sendo um dos polímeros mais utilizados na indústria de um modo geral e possui grande diversidade de aplicações, desde embalagens rígidas e flexíveis até produtos injetados para os mais variados tipos de utilização (NASCIMENTO et al., 2013).

O PP possui alta cristalinidade, em torno de 60% a 70%, conforme a Tabela 1, em que estão relacionadas algumas propriedades, o que lhe confere elevada resistência mecânica, rigidez e dureza, capazes de se manterem constantes a temperaturas relativamente elevadas e ainda baixa temperatura de transição vítrea, em torno de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o que o torna flexível e dúctil, podendo ser conformado facilmente em temperatura ambiente (CALLISTER JR, 2008).

**Tabela 1-** Propriedades do Polipropileno (PP).

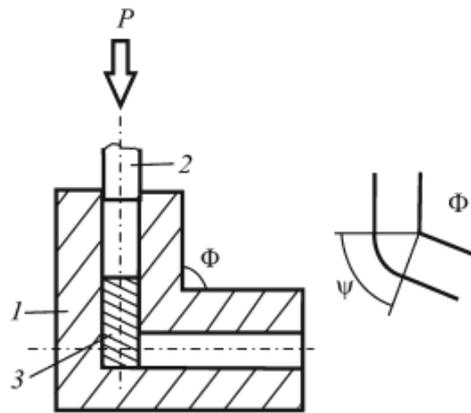
Massa Molar	Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Índice de Refração	Temperatura de Transição Vítrea - $T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura de Fusão $T_f$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Cristalinidade de $X_c$ (%)	Limite de Escoamento (MPa)
80.000	0,90	1,45	$(-10) - (-18)$	$\sim 175$	60 - 70	31 - 37,2
500.000	0,91					

Fonte: Callister Jr (2008).

## 2.2 PRENSAGEM EM CANAIS EQUIANGULARES

A técnica PCEA consiste em um método de deformação plástica severa (DPS) no qual um tarugo previamente lubrificado é forçado a escoar, pela ação de um punção e com velocidade e temperatura pré-determinadas, através de uma matriz constituída por dois canais idênticos que se interceptam a um ângulo ( $\Phi$ ) podendo possuir ou não ângulos de adoçamento ( $\Psi$ ) conforme a Figura 1 (VALIEV; LANGDON, 2006).

Figura 1- ECAP: 1 – matriz, 2 – punção, 3 – tarugo.



Fonte: Beloshenko et al. (2013).

Processamentos por DPS podem ser considerados como métodos de conformação nos quais um sólido é submetido à alta deformação sem que ocorra nenhuma modificação significativa em suas dimensões, produzindo um considerável refinamento de grãos (VALIEV; LANGDON, 2006). Dessa forma esses métodos de conformação permitem o aumento das propriedades mecânicas dos metais e ligas através da quebra dos grãos micrométricos em grãos ultrafinos ou nanométricos (CAMPANHONI, 2012 apud SILVA, 2017).

A natureza da subestrutura obtida por PCEA basicamente independe do tamanho inicial da amostra e após o processo de deformação, a peça terá praticamente o mesmo tamanho e forma iniciais, independente da introdução de tensões elevadas, além da melhoria das propriedades mecânicas e físicas (HORITA et al., 2001).

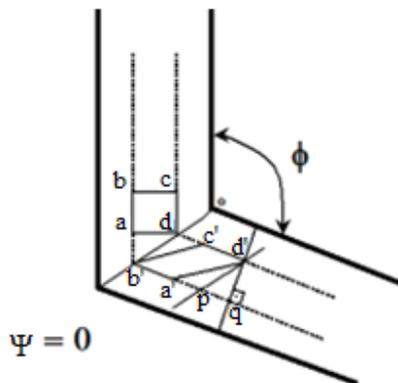
A principal vantagem desta técnica é que as amostras podem ser deformadas repetidamente, o que define seu caráter de continuidade. Assim, níveis cada vez maiores de deformações permanentes são impostos ao material fazendo com que haja um aumento significativo de suas propriedades mecânicas (SRINIVASAN, 2001 apud MEDEIROS, 2008).

A seção transversal do canal da matriz fornece ainda a possibilidade de processar materiais por diversas rotas de processamento, através de variadas combinações geradas pela rotação da amostra em torno do seu próprio eixo. Existem quatro rotas clássicas de processamento utilizadas na deformação via PCEA, que são classificadas como rotas A, B<sub>A</sub>, B<sub>C</sub> e C (SEGAL, 2004).

Na rota A, a posição da amostra é mantida a cada passe, sem que haja rotação entre os passes e como resultado ocorre o aumento contínuo da distorção do material após cada passe. Na rota B<sub>A</sub> a amostra é girada em 90° entre cada passe em direções alternadas iniciando pelo sentido anti-horário e em seguida no sentido horário, e assim sucessivamente. Ao final do passe são observadas microestruturas com a forma de fibras e o material apresenta textura axial. Na rota B<sub>C</sub> a amostra é girada em 90°, sempre na mesma direção, no sentido horário entre cada passe, acarretando no aparecimento de deformações plásticas redundantes que são responsáveis pelo retorno à microestrutura original. Na rota C após cada passe ocorre o giro de 180° e também surgem deformações plásticas redundantes (MEDEIROS, 2008).

A Figura 2 mostra um tarugo na forma de um quadrado abcd, sendo deformado por cisalhamento simples via PCEA, com um ângulo ( $\Phi$ ) qualquer e sem ângulo de adoçamento ( $\Psi$ ), transformando-se na configuração a'b'c'd'.

Figura 2- Tarugo deformado via PCEA com  $\Psi = 0^\circ$ .



Fonte: adaptado de Iwahashi et al. (1996).

A deformação plástica cisalhante ( $\gamma$ ) é dada através da Equação (1) (BERNARDI, 2009):

$$\gamma = \frac{a'q}{qd'}$$

(1)

$$\text{Mas } qd' = ad \text{ e } ab' = dc' = a'p = pq = ad \cotg \left( \frac{\Phi}{2} \right).$$

Para  $\Psi = 0^\circ$ , a deformação plástica cisalhante ( $\gamma$ ) será dada pela Equação (2):

$$\gamma = 2 \cotg \left( \frac{\Phi}{2} \right)$$

(2)

Para múltiplos passes,  $N$ , a deformação plástica cisalhante ( $\gamma$ ) é dada pela Equação (3):

$$\gamma = 2N \cotg \left( \frac{\Phi}{2} \right)$$

(3)

A relação entre a deformação plástica cisalhante ( $\gamma$ ) e a deformação plástica equivalente ( $\varepsilon_{VM}$ ), no sentido do critério de plasticidade isotrópico de von Mises, é dada então pela Equação (4):

$$\varepsilon_{VM} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}}$$

(4)

Assim, substituindo a Equação (4) na Equação (3), obtém-se a relação da deformação plástica equivalente decorrente do processo de prensagem via PCEA no sentido do critério de plasticidade isotrópico de von Mises ( $\varepsilon$ ), após  $N$  passes, em função do número de passes conforme Equação (5):

$$\varepsilon = \frac{2N}{\sqrt{3}} \cotg \left( \frac{\Phi}{2} \right)$$

(5)

Para os casos em que  $\Psi = (180^\circ - \Phi)$ , a Equação (5) pode ser reescrita conforme a Equação (6):

$$\varepsilon = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cotg \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right]$$

(6)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios PCEA foram realizados no Laboratório de Mecânica Aplicada da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, da Universidade Federal Fluminense – EEIMVR/ UFF.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para os ensaios foram o silicone de uso industrial Silipaste® e amostras de polipropileno, com seção quadrada de aproximadamente 10,0 mm de espessura e altura de 50,0 mm obtidas a partir de três placas de polipropileno natural fornecidas pelo Grupo Macedo Plásticos Comércio de Acrílicos e Plásticos de Engenharia LTDA.

Ainda foram utilizados uma máquina de tração universal EMIC com capacidade de 600 kN, uma matriz bipartida composta por dois blocos de aço tipo ferramenta com seção transversal de 10,0 mm x 10,0 mm, que se interceptam em um ângulo  $\Phi = 90^\circ$  sem raios de adoçamento inferior ou superior com reforços laterais e um punção de seção transversal idêntica a dos corpos de prova, um sistema de aquecimento com resistências elétricas para o conjunto ferramental-amostra e uma manta térmica para proteção do equipamento.

### 3.2 MÉTODOS

O corpo de prova previamente lubrificado, assim como a matriz, de seção quadrada aproximada de 100 mm<sup>2</sup> e altura de 50 mm, foi prensado pela ação do punção e sofreu deformação contínua em condições próximas ao cisalhamento simples a partir da região de interseção dos blocos, utilizando-se a máquina universal EMIC, com velocidade constante e igual a 1,0 mm/min.

Para o controle das temperaturas foi utilizado um sistema composto por um controlador térmico ligado a duas resistências tubulares e dois contadores. Foram realizados quatro passes de prensagem, apenas nas rotas A e B, considerando as variações  $B_A$  e  $B_C$ , em temperaturas de 25 °C e 90 °C.

Considerando ensaios já realizados em temperaturas distintas por Bertuci (2016) e uma vez que temperaturas próximas à temperatura de fusão comprometeram a integridade das amostras durante os ensaios, a temperatura de 90 °C, correspondente a 50% da temperatura de fusão do polipropileno, foi escolhida para a realização do presente estudo.

Para a temperatura de 90 °C, inicialmente os corpos de prova partiram da temperatura ambiente e sofreram aumentos gradativos de temperatura, a cada 10 °C, permanecendo nas respectivas faixas de temperatura por 5 minutos, até atingir o valor final de 90 °C, no qual os corpos de prova permaneceram sendo aquecidos por 10 minutos e só então o ensaio PCEA foi iniciado. Tais procedimentos são necessários para que não ocorram aumentos bruscos da temperatura de ensaio dos corpos de prova.

### 4 RESULTADOS

Foram utilizados cerca de 24 corpos de prova para os ensaios em temperatura ambiente e 16 corpos de prova para os ensaios a quente. Do total, 20 corpos de prova foram descartados por falharem durante o ensaio. Porém, para cada temperatura foram necessários efetivamente 10 corpos de prova, totalizando 56 ensaios válidos, sendo 20 ensaios para o

passo 1, 18 para o passo 2, 12 para o passo 3 e 6 para o passo 4 nas 3 rotas de processamento em 2 temperaturas.

Os corpos de prova ensaiados na temperatura de 25 °C na rota A sofreram pequena curvatura em relação ao formato original e deformação em uma de suas extremidades na região inferior conforme a Figura 3.

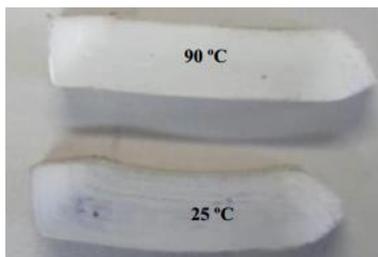
**Figura 3-** Corpo de prova após 2 passes de prensagem a 25 °C na rota A.



A curvatura deve-se a heterogeneidade da deformação plástica durante o processamento, uma vez que o mecanismo de deformação da região inferior ocorre preferencialmente por flexão, em detrimento do cisalhamento (AOUR, 2016). Quanto a deformação na região inferior, posteriormente constatou-se que tal acontecimento deve-se ao fato de que o material sofreu dobramento na extremidade devido à tensão aplicada e uma tendência em curvar-se a partir do deslocamento do punção durante o ensaio, o que não representa alteração em sua microestrutura, mas apenas uma mudança em sua geometria.

Os corpos de prova ensaiados a 90 °C não apresentaram essas alterações de forma significativa, uma vez que o aumento da temperatura fez com que o material sofresse seguidas recristalizações à medida que foi deformado pelo avanço do punção. O aumento da temperatura eleva a energia térmica de suas cadeias facilitando o movimento relativo entre as mesmas, o que é responsável pela deformação plástica. Esse comportamento é característico de polímeros termoplásticos, ao contrário dos polímeros termorrígidos que não sofrem amolecimento seguido de fusão mesmo com o aumento de temperatura (CALLISTER JR, 2008). Na Figura 4 pode-se observar a diferença em relação à curvatura entre os corpos de prova deformados em 25 °C e em 90 °C após o primeiro passo.

**Figura 4-** Corpos de prova após o primeiro passe a 25 °C e a 90 °C.



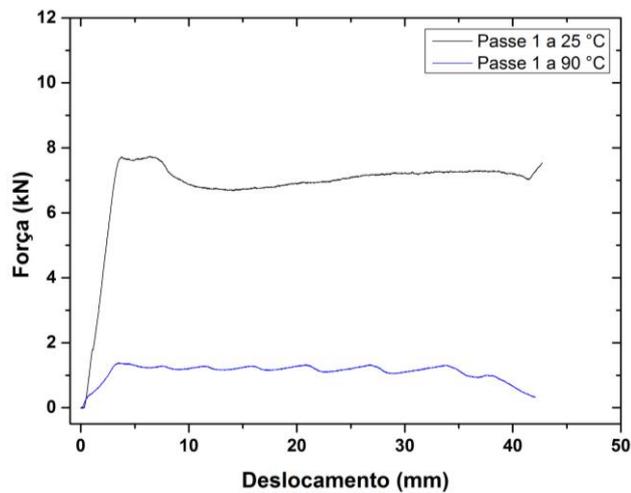
Na rota B<sub>A</sub>, diferente da rota A, em que o corpo de prova permanece constante a cada passe, houve uma rotação no segundo passe em relação ao primeiro passe de 90° no sentido anti-horário e em seguida no sentido horário, e assim sucessivamente. Ao final do passe espera-se que as microestruturas apresentem a forma de fibras e o material, textura axial (MEDEIROS, 2008).

Houve distorções nos corpos de prova e estes também foram submetidos a ajustes dimensionais para os próximos passes, porém em menor grau comparado à rota A a partir do segundo passe de prensagem, pois não houve o dobramento na extremidade do corpo de prova, mas uma leve rotação lateral em sua face frontal.

Para a rota B<sub>C</sub>, após cada passe, foi realizada uma rotação para o passe seguinte de 90°, sempre no sentido horário, esperando-se como resultado o aparecimento de deformações plásticas redundantes que são responsáveis pelo retorno à microestrutura original. Dessa forma, o deslizamento ocorrido no primeiro passe é anulado durante o terceiro ciclo de prensagem (MEDEIROS, 2008).

Os resultados dos ensaios PCEA são dados em formato de curvas, dispostas pelos gráficos de força (em kN) *versus* deslocamento (em mm) do punção. O resultado após o primeiro passe nas duas temperaturas de ensaio é indicado na Figura 5.

Figura 5- Curva de força *versus* deslocamento para o PP após o passe 1.



Os valores iniciais de pico correspondem ao primeiro ponto de resistência do corpo de prova no interior da matriz, em que irá realizar a curvatura de 90° e continuar escoando através do canal equiangular a partir do avanço do punção.

Após a realização dos quatro passes de prensagem via técnica PCEA nas rotas de processamento A, B<sub>A</sub> e B<sub>C</sub> puderam-se agrupar os resultados obtidos a partir das curvas de carga para 25 °C e 90 °C e estão indicados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Figura 6- Cargas máximas a 25 °C para as rotas A, B<sub>A</sub> e B<sub>C</sub>.

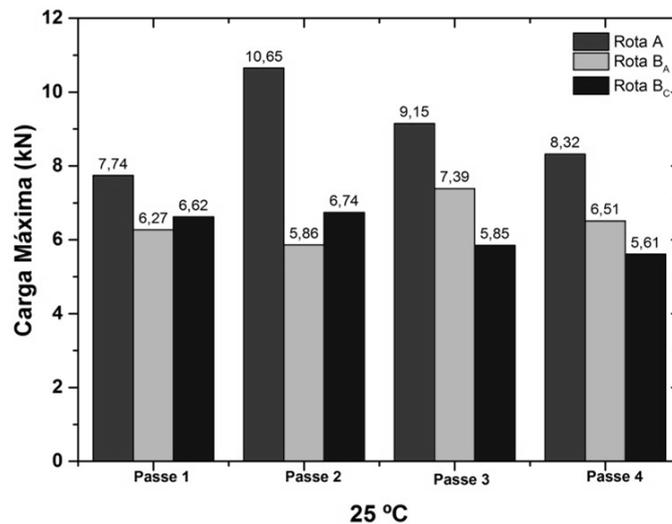
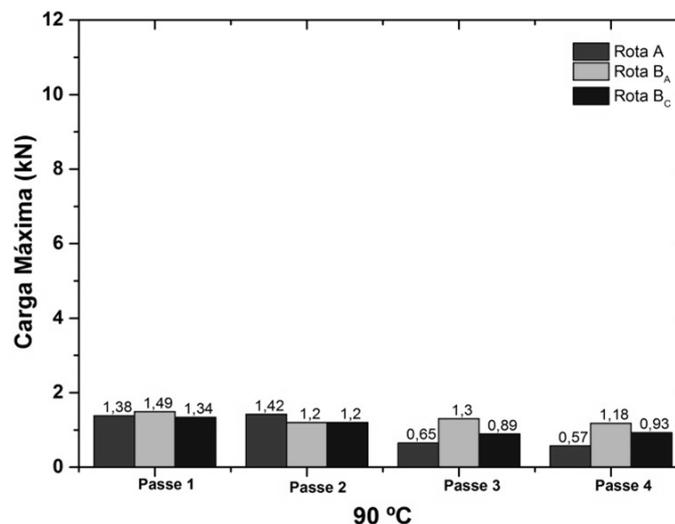


Figura 7- Cargas máximas a 90 °C para as rotas A, B<sub>A</sub> e B<sub>C</sub>.

## 5 CONCLUSÕES

Os ensaios de prensagem do polipropileno por canal equiangular via técnica PCEA foram realizados e foi possível determinar a carga máxima das amostras para cada passe de prensagem a partir das curvas de carga.

Para a temperatura de 25 °C, a rota A apresentou os maiores valores de carga máxima, enquanto as rotas B<sub>A</sub> e B<sub>C</sub> apresentaram valores menores, mais próximos e certa similaridade entre as curvas ao longo do ensaio.

Nos corpos de prova ensaiados a 90 °C pode-se observar que para as três rotas de processamento os valores de carga máxima foram bem próximos e elas apresentaram comportamento similar. As maiores diferenças de carga ocorreram entre os passes 3 e 4.

Uma das maiores dificuldades na realização dos ensaios PCEA foi o ajuste das dimensões dos corpos de prova entre os passes de prensagem uma vez que eles sofreram flexão durante os ensaios. Os corpos de prova mais prejudicados foram os que realizaram PCEA em temperatura ambiente, pois sofreram maior grau de flexão que aqueles ensaiados a 90 °C, sendo mais difícil manter a uniformidade de sua área de seção transversal.

Assim, faz-se necessário um estudo com maior número de amostras a partir do terceiro passe de prensagem a fim de ratificar os resultados obtidos no presente estudo, que poderá auxiliar a avaliação da influência da temperatura e das rotas de processamento nas características do polipropileno em trabalhos futuros.

**REFERÊNCIAS**

AOUR, B., MITSAK, A. (2016), “*Analysis of Plastic Deformation of Semi-Crystalline Polymers During ECAE Process Using 135° Die*”, Journal o Theoretical and Applied Mechanics.

AOUR, B., ZAÏRI, F., GLOAGUEN, J. M., NAÏT-ABDELAZIZ, M.; LEFEBVRE, J. M. (2006), “*Numerical investigation on equal channel angular extrusion process of polymers*”, Computational Materials Science, vol 37, 491–506.

BELOSHENKO, V. A., VOZNYAK, Y. V., RESHIDOVA, I. Y., NAÏT-ABDELAZIZ, M., ZAÏRI, F. (2013), “*Equal-channel angular extrusion of polymers*”, Journal of Polymer Research.

BERNARDI, H. H. (2009), “*Processamento e caracterização microestrutura de nióbio deformado plasticamente por extrusão em canal angular*”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Lorena.

BERTUCI, P. J. F. (2016), “*Caracterização mecânica e termoanalítica do polietileno de alta densidade e polipropileno*”, Estudo dirigido I do curso de Doutorado em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.

CALLISTER JR, W. D. (2008), “*Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*”, 7 ed., Rio de Janeiro: LTC.

CAMPANHONI, M. V. P. (2012), “*Produção e caracterização de zircônio nanocristalino e suas ligas processados por deformação plástica severa e aplicação como biomaterial*”, Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

CANEVAROLO JR, S. V. (2006), “*Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*”, 2. ed., São Paulo: Artliber.

CHEN, Y., YIN, Q., ZHANG, X., XUE, X., JIA, H. (2018), “*The crystallization behaviors and rheological properties of polypropylene/ graphene nanocomposites: The role of surface structure of reduced graphene oxide*”. *Thermochimica Acta*, vol 661, 124-136.

HORITA, Z., FUJINAMI, T., LANGDON, T. G. (2001), “*The potential for scaling ECAP: effect of sample size on grain refinement and mechanical properties*”. *Materials Science and Engineering A*, vol 318, 34-41.

IWAHASHI, Y., WANG, J., HORITA, Z. NEMOTO, M., LANGDON, T. G. (1996), “*Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials*”, *Scripta Materialia*, vol 35, 143-146.

MEDEIROS, N. (2008) “*Análises teórica e numérica do processo de prensagem em canais equiangulares*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.

NASCIMENTO, U. A., TIMÓTEO, G. A., RABELLO, M. S. (2013), “Efeito de plastificante à base de Poliisobutenos nas propriedades físicas e mecânicas do Polipropileno”, in *Polímeros*, São Carlos, vol 23, 257-261.

SEGAL, V. M. (2004), “*Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE)*”. *Materials Science and Engineering A*, vol 386, 269-276.

SEGAL, V. M., REZNIKOV, V. I., DROBYSHEVSKIY, A. E., KOPYLOV, V. I. (1981), “*Plastic working of metals by simple shear*”, *Russ. Metall*, vol 1, 99-105.

SILVA, D. C. (2017), “*Caracterização microestrutural e avaliação do comportamento mecânico da liga Al 7075 após prensagem em canais equiangulares*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda.

SRINIVASAN, R. (2001), “*Computer simulation of the equichannel angular extrusion (ECAE) process*”, *Scripta Materialia*, vol 44, 91-96.

## **Brazilian Journal of Development**

VALIEV, R. Z., LANGDON, T. G. (2006), "*Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement*", Progress in Materials Science, vol 51, 881-981.

ZAIÏRI, F., AOUR, B., GLOAGUEN, J. M., NAÏT-ABDELAZIZ, M., LEFEBVRE, J. M. (2006), "*Numerical modelling of elastic-viscoplastic equal channel angular extrusion process of a polymer*", Computational Materials Science, vol 38, 202-216.