



Isolamento térmico de refrigeradores: relação entre o percentual do gás expensor e a densidade livre da espuma de poliuretano

Thermal insulation of refrigerators: relation between the percentage of the expander gas and the free density of the polyurethane foam

Resumo: *Esse artigo tem como objetivo determinar a densidade livre da espuma de poliuretano em diferentes percentuais do gás expensor ciclopentano. Tendo como base seus objetivos, este estudo apresenta caráter exploratório e explicativo, em que, respectivamente, apresenta um referencial teórico sobre a temática e, posteriormente, a parte experimental. No processo de isolamento térmico de refrigeradores é importante controlar as propriedades e os parâmetros do processo de injeção da espuma. Após a solidificação da espuma, a densidade livre é um importante parâmetro de processo, pois é possível ter uma ideia da fluidez do material, e determinar a sua capacidade de preencher todo o gabinete do refrigerador, assim, quanto menor a densidade livre da espuma, maior a fluidez do sistema de PU. Os resultados mostram que quanto maior o percentual de ciclopentano, menor a densidade livre. Com densidades mais baixas, menor o tamanho de célula e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas e térmicas.*

Palavras-chave: Poliuretano; Densidade livre; Ciclopentano.

Abstract: *This article aims to determine the free density of the polyurethane foam in different percentages of the cyclopentane expander gas. Based on its objectives, this study presents an exploratory and explanatory character, in which, respectively, it presents a theoretical reference on the subject and, later, the experimental part. In the process of thermal insulation of refrigerators it is important to control the properties and parameters of the foam injection process. After solidification of the foam, free density is an important process parameter, as it is possible to have an idea of the fluidity of the material, and determine its ability to fill the entire cabinet of the refrigerator, thus, the lower the free density of the foam, the greater the fluidity of the PU system. The results show that the higher the percentage of cyclopentane, the lower the free density. With lower densities, the cell size is smaller and therefore better mechanical and thermal properties.*

Keywords: Polyurethane; Free density; Cyclopentane.

1. Introdução

As espumas rígidas de poliuretano (PUR) são obtidas, basicamente, através da reação de polimerização entre o isocianato e o polioliol com demais aditivos (como catalisadores, surfactantes), acompanhadas pela reação de expansão química entre a água residual existente no polioliol e o isocianato que produz CO₂, expandindo a espuma e também, pela expansão



física proporcionada pelo agente de expansão auxiliar (AEA), que garante uma expansão mais controlada, melhores propriedades isolantes, permitindo a formação de um produto com células fechadas. O sucesso das espumas de PUR tem ocorrido pelas excelentes características de isolamento térmico, elevada resistência mecânica, boa estabilidade dimensional e pela sua relativa facilidade de produção. As propriedades das PUR podem variar conforme as necessidades de uso com variações nos parâmetros do processo e/ou matérias-primas (ALIMENA, 2009; MIELKE, 2012).

Os sistemas de espumas rígidas de PU são utilizados, entre muitas outras aplicações, no isolamento térmico de refrigeradores. Nesta aplicação, a condutividade térmica das espumas rígidas utilizadas é influenciada pelo tipo e concentração do agente de expansão utilizado. Existem, atualmente, algumas alternativas de agente de expansão auxiliares, entre eles, o ciclopentano, que fica retido nas células fechadas das espumas rígidas de PU e são responsáveis pelas excelentes propriedades isolantes do material (VILAR, 2018). O ciclopentano, além de não apresentar desvantagens com relação ao meio ambiente, apresenta boa processabilidade e propriedades de desempenho competitivas.

No processo de isolamento térmico de refrigeradores é importante controlar as propriedades e os parâmetros do processo de injeção da espuma. Após a solidificação da espuma, a densidade livre é um importante parâmetro de processo, pois é possível ter uma ideia da fluidez do material, e determinar a sua capacidade de preencher todo o gabinete do refrigerador, assim, quanto menor a densidade livre da espuma, maior a fluidez do sistema de PU. Nesse contexto, sua determinação é fundamental e justifica a elaboração deste estudo, uma vez que a densidade da espuma expandida livremente (20-25 kg/m³) depende da concentração do agente de expansão auxiliar utilizado; com densidades mais baixas, menor o tamanho de célula e, conseqüentemente melhores propriedades mecânicas e térmicas (VILAR, 2018). Assim, dentro deste contexto, esse artigo tem como objetivo determinar a densidade livre da espuma de poliuretano em diferentes percentuais do gás expensor ciclopentano.



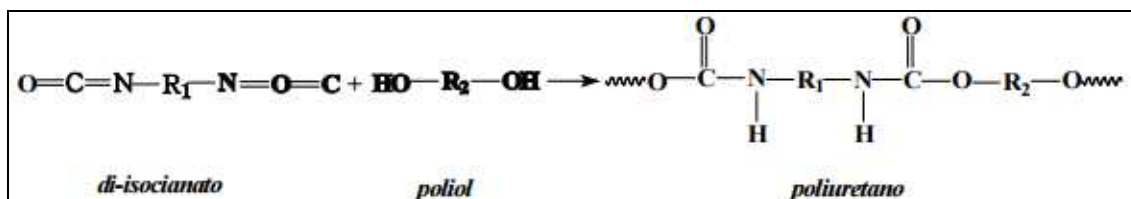
2. O Poliuretano

De acordo com Cangemi, Santos e Claro Neto (2009, p. 159), “o poliuretano (PU), patentado em 1937 pela atual companhia Bayer AG de Leverkusen (Alemanha), é considerado um dos principais polímeros das últimas décadas”. Para os autores supracitados, o estudo do material PU é uma oportunidade de combinar vários assuntos e várias disciplinas, já que trata de assuntos diversos como o papel dos plásticos na sociedade moderna, meio ambiente, custos de produção, saúde dos trabalhadores na indústria e novidades na área médica com os biomateriais.

Em relação aos aspectos químicos da síntese do poliuretano, Soares (2012), descreve que o poliuretano é um polímero que não apresenta unidades repetitivas (uretano) de forma regular, não possuindo assim, uma fórmula empírica representativa da macromolécula. Usualmente, representa-se o poliuretano por suas unidades monoméricas principais, o diisocianato e o polioliol, não sendo representados todos os tipos de ligação que efetivamente podem fazer parte da estrutura do polímero formado.

As principais reações de síntese dos PU's envolvem a reação de adição entre um isocianato e um material que possui hidrogênio ativo, normalmente um polioliol, conforme esquema da Fig. 1 (SOARES, 2012).

Figura 1 – Esquema da síntese convencional de um poliuretano



Fonte: Soares (2012, p. 19)

Os compostos que contém hidroxilas podem variar quanto ao peso molecular, natureza química e funcionalidade. Os isocianatos podem ser aromáticos, alifáticos, ciclo-alifáticos ou policíclicos. Os polióis podem ser poliéteres, poliésteres, ou ainda ter uma estrutura hidrocarbônica. A funcionalidade dos reagentes, assim como a natureza química pode ser escolhida de acordo com as propriedades aspiradas. Esta diversidade de reagentes proporciona a obtenção de uma gama de poliuretanos com diferentes propriedades físicas e químicas, que



permite aos poliuretanos ocuparem uma posição marcante no mercado mundial de polímeros sintéticos de alto desempenho. Inúmeras variações de produtos são obtidas pela combinação de diferentes tipos de polióis, isocianatos e aditivos, tais como: extensores de cadeia, catalisadores, agentes de expansão e surfactantes. Assim, este versátil polímero pode se apresentar de várias formas: espumas flexíveis, espumas rígidas, elastômeros, adesivos, selantes, tintas e revestimentos (GRIJÓ, 2004).

Dentre as mais variadas aplicações, dar-se-á ênfase às espumas rígidas, mais especificamente às utilizadas nas indústrias de refrigeração, as quais são objeto deste estudo.

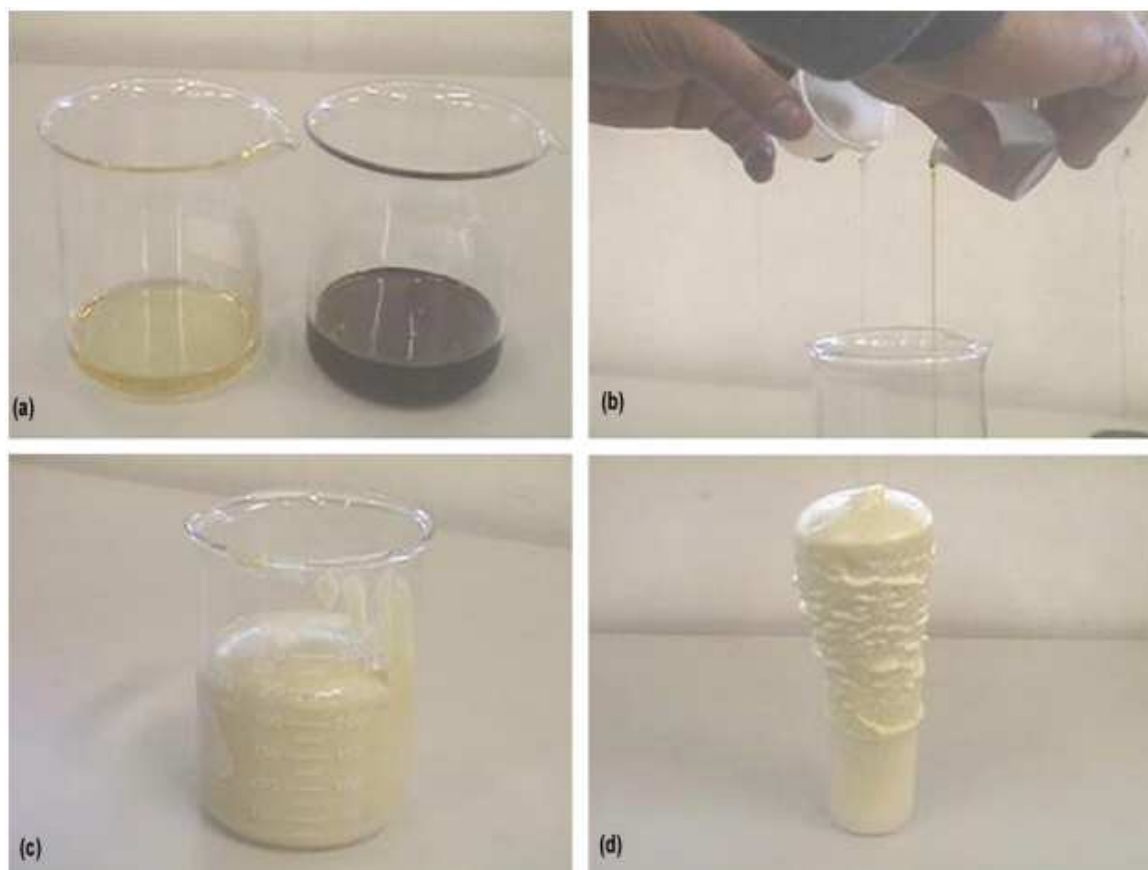
2.1 Generalidades da espuma rígida de poliuretano (PUR): propriedades e aplicação

As espumas rígidas de PU (PUR) representam o segundo maior mercado para PU's, após as espumas flexíveis (VILAR, 2018). As espumas rígidas possuem estrutura rígida altamente reticulada e com células fechadas, responsável pelas suas propriedades mecânicas. Além disso, a condutividade térmica do gás retido nestas células fechadas é o fator preponderante nas propriedades isolantes da espuma. As espumas rígidas de PU podem ser formuladas de modo que fluem facilmente durante a expansão possibilitando o preenchimento de cavidades complicadas (KIPPER; CROSSETTI; BECKER, 2008).

O processo de fabricação das espumas rígidas de poliuretano é baseado na reação entre um isocianato e um polioliol. Cerca de 90% dos polióis utilizados na indústria do poliuretano são poliéteres hidroxilados. Os polióis de cadeia curta, (com baixo peso molecular $250 < PM < 1000$) e alta funcionalidade (3 a 12) produzem cadeias rígidas com alto teor de ligações cruzadas. Além destes dois reagentes básicos (isocianato e polioliol) são também usados aditivos (catalisadores, surfactante) e agente de expansão. As espumas rígidas possuem um alto grau de ligações cruzada, o que as diferencia de uma espuma flexível (CASTIGLI, 2003). A espuma de PU pode ser obtida mediante a mistura de dois componentes: o polioliol e o isocianato, que em espumas rígidas, o mais usado é o difenil metano diisocianato (MDI). A sequência é mostrada na Figura 2.



Figura 2 – Etapas para a formação da espuma de PUR: (a) polioli (esquerda) e isocianato; (b) durante a mistura; (c) início da formação da espuma; (d) espuma depois de pronta



Fonte: Cangemi, Santos e Claro Neto (2009)

As propriedades térmicas, resistência mecânica, boa adesão, e leveza das estruturas sanduíche das PUR, as torna adequadas a diferentes aplicações (VILAR, 2018). Kossaka (2004) descreve outras propriedades da espuma rígida de poliuretano, entre as quais destacam-se a possibilidade de enchimento de cavidades complexas, a baixa condutividade térmica, a resistência à compressão e ao envelhecimento, a estabilidade dimensional e térmica (no intervalo de -200°C a $+ 100^{\circ}\text{C}$), a menor massa devido à baixa densidade, a alta resistência à umidade e a resistência a óleos e solventes. As propriedades mecânicas das espumas rígidas de PU são dependentes da densidade, da estrutura celular e do processo fabril. O esqueleto polimérico deve ser forte para resistir às tensões. A aplicação de esforços externos deforma a estrutura celular, podendo gerar um colapso das células. A resistência à compressão das espumas rígidas é importante na maioria das aplicações. Uma amostra



uniforme de dimensões padronizadas é comprimida a uma taxa de 10% e a tensão máxima suportada é determinada. Se a tensão máxima de compressão é alcançada antes de 10% de deformação, este será o valor considerado. Usualmente é empregado o valor a 10% deformação, porque a experiência mostra que este valor é bem próximo do valor máximo de resistência à compressão (GRIJÓ, 2004).

Os sistemas de espumas rígidas de PU são utilizados, entre muitas outras aplicações, no isolamento térmico de refrigeradores, na fabricação de painéis divisórios, pisos e telhas; pranchas de surfe; materiais para embalagens; estruturas flutuantes a prova de furos para barcos e equipamentos de flutuação; e diversos componentes de transporte (VILAR, 2018). De acordo com Vilar (2018), as espumas rígidas podem ser fabricadas por derramamento, injeção, "spray", sistemas pressurizados, ou outras técnicas. As espumas rígidas possuem uma estrutura polimérica altamente reticulada com células fechadas, podendo ter densidades tão baixas quanto 10 kg/m^3 até quase sólidos com 1.100 kg/m^3 . Todavia, o maior consumo é em espumas, de baixa densidade (28 a 50 kg/m^3), usadas em isolamento térmico.

2.2 O isolamento térmico de refrigeradores

Até a década de 80, a indústria de refrigeração utilizava a lã de vidro como material isolante na fabricação de portas e gabinetes de refrigeradores e "freezers" comerciais. Devido a necessidade de melhorar a condutividade térmica do material isolante, iniciou-se a aplicação da espuma rígida de poliuretano (PUR) como agente isolante e também como componente estrutural em refrigeradores e "freezers" (LUCKMANN, 2005). Neste setor, de acordo com Vilar (2018), as vantagens da utilização das PUR são:

- a sua baixa condutividade térmica que permite o emprego de painéis de isolamento mais finos do que quando é utilizada lã mineral ou lã de vidro, resultando em aumento do espaço interno em até 30%;
- menor custo de mão-de-obra nas linhas de produção;
- excelente adesão entre a espuma e a carcaça do aparelho;
- estrutura sanduíche estável e resistente ao impacto, permitindo o uso de folhas metálicas mais finas;



- estrutura celular contínua e sem falhas, que diferentemente da lã de vidro e similares, não é afetada pelas vibrações do compressor.

Além disso, câmaras construídas com painés de poliuretano deixam passar, em média, 25% a menos de calor que painés de Poliestireno ou isopor (EPS), e uma relação ainda maior, quando comparado com os demais materiais (IBEX, 2019). De acordo com Kossaka (2004), a espuma rígida de poliuretano é um produto celular termoestabilizado, com células fechadas, de baixa densidade e altamente interligada, o que possibilitou a redução da espessura de parede do refrigerador e aumento da relação entre o volume interno e externo do refrigerador. Algumas dessas vantagens podem ser visualizadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades Térmicas de Materiais Isolantes

| MATERIAL | Densidade (kg/m ³) | Condutividade Térmica a 24°C (W/mK) | Espessura necessária (mm) | Temperatura máxima de serviço (°C) |
|---|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Espuma rígida de PU (Expandida com CFC) | 32 | 0,017 | 20 | 104-121 |
| Poliestireno expandido | 16 | 0,035 | 44 | 74 |
| Lã-de-vidro | 65-160 | 0,037 | 49 | 343 |
| Lã-de-rocha | 100-300 | 0,046 | 46-51 | 649-1037 |
| Cortiça | 220 | 0,049 | 61 | - |
| Madeira (pinho branco) | 350-500 | 0,112 | >140 | - |

Fonte: IBEX (2019)

O isolamento térmico da espuma é diretamente relacionado com a condutividade térmica do gás usado como agente de expansão. Estes são os responsáveis pela expansão das espumas, podendo ser introduzidos na mistura líquida em forma de gás que se dispersa expandindo para a formação de células no material, em forma de líquido, que se evapora a uma determinada temperatura ou, ainda, sólido que decompõe liberando gás (VERONESE, 2009). Os fatores que influenciam o desempenho do isolamento térmico são condutividade térmica (Fator-K), emissividade de superfície, espessura de isolamento, densidade e capacidade calorífica específica. A condutividade térmica mede a taxa de tempo do fluxo de calor contínuo por uma unidade de área de um material homogêneo induzido por um gradiente de temperatura. Para espumas de célula fechada é válida a equação: $K_{\text{espuma}} = K_{\text{gás}} + K_{\text{sólido}} + K_{\text{radiação}}$ (ARANTES; OLIVEIRA, 2015). A parcela referente ao gás é relacionada aos gases presos dentro da espuma. Já o sólido refere-se ao polímero e, a parcela



de radiação, está ligada ao processo de radiação térmica que depende do diâmetro das células da espuma. Dessas parcelas, 50% do valor total da condutividade térmica é proveniente da condutividade térmica dos gases e os outros 50% são do polímero e do processo de radiação (STOVALL, 2012 apud ARANTES; OLIVEIRA, 2015).

Nesse contexto, a condutividade térmica das espumas rígidas utilizadas em isolamento térmico é influenciada pelo tipo e concentração do agente de expansão utilizado. Algumas das alternativas estudadas na fabricação de espumas rígidas de PU são a utilização da água como único agente de expansão, que resulta em perda das propriedades isolantes; e o uso dos agentes de expansão auxiliares (AEAs), entre eles, o ciclopentano, utilizado neste estudo, que fica retido nas células fechadas das espumas rígidas de PU e são responsáveis pelas excelentes propriedades isolantes do material (VILAR, 2018). Alguns dos os agentes expansores são HCFC-141b, HCFC-22, HFC-365mfc, HFC-227ea, ciclopentano, pentano ou HFC-245fa, entre outros. Recentemente, foram desenvolvidas hidrofluorolefinas (HFO's) como agentes expansores de espuma de poliuretano. Atualmente são uma alternativa aos atuais agentes expansores, pois não agredem o meio ambiente e com a vantagem de não serem inflamáveis, como o pentano e o ciclo pentano. Os HCFC's e HFC's apresentam desvantagens por serem prejudiciais ao meio ambiente e contribuem para a degradação da camada de ozônio, bem como para o fenômeno do efeito estufa (VILAR, 2018; CASSENS, 2018). O Quadro 2 apresenta propriedades de alguns dos agentes de expansão utilizados em refrigeradores.

Quadro 2 – Propriedades de alguns dos agentes de expansão utilizados em refrigeradores

| AGENTE DE EXPANSÃO | CFC 11 | Água | HCFC-141b | HFC-134a | HFC-365/227 | c-pentano |
|---|--------|--------|-----------|----------|-------------|-----------|
| Teor (%) | 13 | 1,6 | 9 | 7 | 8-10 | 4 |
| Densidade livre (kg/m ³) | 20,6 | 26,7 | 21,1 | 24,6 | n.a. | 24,6 |
| Densidade mínima moldada (kg/m ³) | 28,3 | 33,1 | 28,8 | 34,4 | 28 | 37,9 |
| Densidade com 10% de superenchimento (kg/m ³) | 31,0 | 36,5 | 31,8 | 34,4 | 31 | 37,9 |
| Resistência à compressão (kPa) | 117,9 | 170,3 | 122,7 | 142 | 180 | 151,7 |
| Valor lambda (W/mK) | 0,0172 | 0,0235 | 0,0185 | 0,0195 | 0,0195 | 0,0195 |
| Variação do valor lambda vs CFC (%) | - | +37 | +7,6 | +13 | +13 | +13 |

Fonte: Vilar (2018)



Os pentanos, como o ciclopentano, possuem potencial de esgotamento do ozônio igual a zero, baixa condutividade térmica, e são mais baratos, representando uma alternativa atraente para o mercado. Além de suas características ambientais, o ciclopentano apresenta boa processabilidade e propriedades de desempenho competitivas. Seu ponto de ebulição é um pouco mais alto que o de outros agentes de expansão, como por exemplo do CFC-11 ou HCFC-141b, o que causa um efeito mínimo no perfil de crescimento da espuma, porém junto com a sua solubilidade relativamente boa nos polióis, reduz as perdas do agente de expansão durante o processo. Estudos de envelhecimento mostraram que permanece retido nas células fechadas da espuma rígida (VILAR, 2018). Por outro lado, são líquidos inflamáveis, o que requer cuidados especiais em seu manuseio e armazenamento, exigindo altos investimentos para adequações de segurança para sua manipulação, inviabilizando o seu uso dependendo da estrutura e capacidade de algumas indústrias (SINGH, 2001; RAABE, 2016 apud CASSENS, 2018).

Nos refrigeradores, o consumo de energia é medido pela eletricidade consumida pelo compressor, operando em estado estacionário, em condições padrões, definidas por normas estabelecidas. Este consumo é influenciado por parâmetros como a condutividade térmica da espuma, que depende, entre outros, da escolha do agente de expansão auxiliar (AEA) e da densidade. Assim, no processo de isolamento térmico de refrigeradores é importante controlar as propriedades e os parâmetros do processo de injeção da espuma. A fluidez e a produtividade são influenciadas pelo tempo de creme, que deve ser maior do que o de injeção, e pelo tempo de gel, pois a espuma deve expandir e preencher o gabinete num tempo aproximadamente igual. A diferença entre o tempo de gel e o de creme determina a velocidade de expansão da espuma na cavidade. Após o tempo de gel, quando as células atingem aproximadamente 85% do volume final, elas continuam expandindo devido à pressão interna dos gases, o que resulta em anisotropia da espuma. Normalmente, os gabinetes são supercheios em cerca de 15%, para melhorar o preenchimento e otimizar propriedades, como a estabilidade térmica dimensional e a resistência à compressão (VILAR, 2018).

Nesse contexto, após a solidificação da espuma, a densidade livre é um importante parâmetro de processo, pois é possível ter uma ideia da fluidez do material, e determinar a sua



capacidade de preencher todo o gabinete do refrigerador, assim, quanto menor a densidade livre da espuma, maior a fluidez do sistema de PU. A densidade da espuma expandida livremente ($20\text{-}25\text{ kg/m}^3$) depende da concentração do agente de expansão auxiliar utilizado; com densidades mais baixas, menor o tamanho de célula e, conseqüentemente melhores propriedades mecânicas e térmicas (VILAR, 2018).

3. Procedimentos metodológicos

Tendo como base seus objetivos, este estudo apresenta caráter exploratório e explicativo. Exploratório porque proporciona, por meio do levantamento bibliográfico, uma visão geral sobre a temática. Explicativo, pois, para determinar a densidade livre da espuma de poliuretano em diferentes percentuais do gás expensor ciclopentano, utilizou-se o método experimental. Neste item são apresentados os materiais e métodos que foram utilizados na pesquisa. Os ensaios de densidade foram realizados no laboratório de uma indústria de refrigeração localizada na cidade de Curitiba – PR, que também forneceu os materiais utilizados. Ressalta-se que, por uma questão de ética, a empresa não será nominada, pois foi solicitado sigilo, e será representada por empresa X.

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento da espuma com diferentes percentuais do agente de expansão ciclopentano foram utilizados, o agente de expansão ciclopentano (Haltermann products), o Isocianato (difênil metano diisocianato, MDI) da empresa Yantai Wanhua Polyurethanes Co., Ltda., e Polioliol a base de glicerina de funcionalidade 5 (Dow Brasil Sudeste Industrial Ltda.).

3.2 Métodos da pesquisa experimental

3.2.1 Formação da espuma de poliuretano e confecção dos corpos de prova

As misturas para formação da espuma foram realizadas em um molde padrão de volume $0,008\text{m}^3$, conforme Fig. 3.



Figura 3 – Molde padrão para realização das misturas



Fonte: Bruning (2008)

Para a formulação do PU, inicialmente, foi adicionado em copo plástico de PP de 1000mL, quantidade determinada de polioli a base de glicerina de funcionalidade 5, com 2,4% de água já incorporado. Os aditivos que compõe o polioli também estão incorporados no mesmo, porém, não se sabe a quantidade, pois trata-se de segredo industrial. Para a expansão da espuma foram incorporados diferentes percentuais do agente de expansão ciclopentano (Quadro 3), misturando manualmente até obtenção de fase homogênea.

Quadro 3 – Composição dos blocos de PU

| Bloco | Poliol (g) | Isocianato (g) | Gás (%) |
|-------|------------|----------------|---------|
| 01 | 100 | 140 | 12 |
| 02 | 100 | 140 | 13 |
| 03 | 100 | 140 | 14 |
| 04 | 100 | 140 | 15 |

Fonte: O autor (2018)

Os percentuais do agente de expansão ciclopentano incorporados, são os valores que obtém melhor relação entre a estrutura de espuma e condutividade térmica. Industrialmente, dependendo da altitude e relação com o nível do mar, são utilizados percentuais entre 12,5% e 14%. Após esse processo, misturou-se isocianato, difenil metano diisocianato (MDI), por meio de misturador de alta rotação (2500rpm), até o início de crescimento da espuma. Após esse crescimento inicial, a mistura foi colocada dentro do molde, onde terminou a reação dando origem aos corpos de prova para análise.



Após a realização das misturas, o bloco permaneceu fechado por um período de 6 a 7 minutos. Esse tempo foi necessário para a total polimerização da espuma. Posteriormente ao tempo de polimerização, o molde foi aberto (Fig. 4).

Figura 4 – Abertura do molde após tempo de polimerização



Fonte: Bruning (2008)

Para a realização dos testes comparativos, foi produzido um bloco de cada composição, cada bloco deu origem a três corpos de prova de 70 x 25 x 200mm, sendo possível uma melhor comparação entre os resultados obtidos.

3.2.2 Ensaio da densidade livre

Após a obtenção dos blocos, foram realizados os ensaios de densidade livre para avaliar o preenchimento do produto e verificar se a massa calculada está de acordo com a necessidade estrutural do produto. Para o ensaio da densidade livre utilizou-se o procedimento interno da empresa X, não havendo norma de referência. Assim, a partir dos corpos de prova, calculou-se, primeiramente a densidade do cubo, Figura 5, sendo que o volume foi calculado pelas suas três dimensões subtraindo o diâmetro do furo central.



Figura 5 – Cubo utilizado na determinação da densidade livre



Fonte: O autor (2018)

Desta forma, o cubo de massa 211,44 gramas e de dimensões 30 x 30 x 30 mm e diâmetro central vazado de 1mm, possui um volume aproximado de 26,9cm³, e densidade calculada conforme fórmula 1.

$$d_{cubo} = \frac{m_{cubo}}{volume_{cubo}} \quad (1)$$

$$d_{cubo} = \frac{211,44}{26,9} = 7,86 \text{ g/cm}^3$$

Após calcular a densidade do cubo, determinou-se a densidade da água, segundo a fórmula 2.

$$d_{cubo} = \frac{m_{cubo} \times d_{\text{água}}}{M_{ac}}$$

$$d_{\text{água}} = \frac{d_{cubo} \times M_{ac}}{m_{cubo}} \quad (2)$$

$$d_{\text{água}} = \frac{7,86 \times M_{ac}}{211,44}$$

Sendo,

d_{cubo} = densidade do cubo

$d_{\text{água}}$ = densidade da água

m_{cubo} = massa do cubo

M_{ac} = peso do cubo mergulhado na água.



Assim, a densidade livre da espuma do PU foi calculada a partir da fórmula 3.

$$d_{livre} = \frac{m_{PU} \times d_{\text{água}} \times 1000}{M_{ac}} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (3)$$

4. Resultados e análises

A partir dos ensaios e da realização dos cálculos foram obtidos os resultados da densidade livre em diferentes percentuais do gás expensor ciclopentano, conforme descritos no Quadro 4.

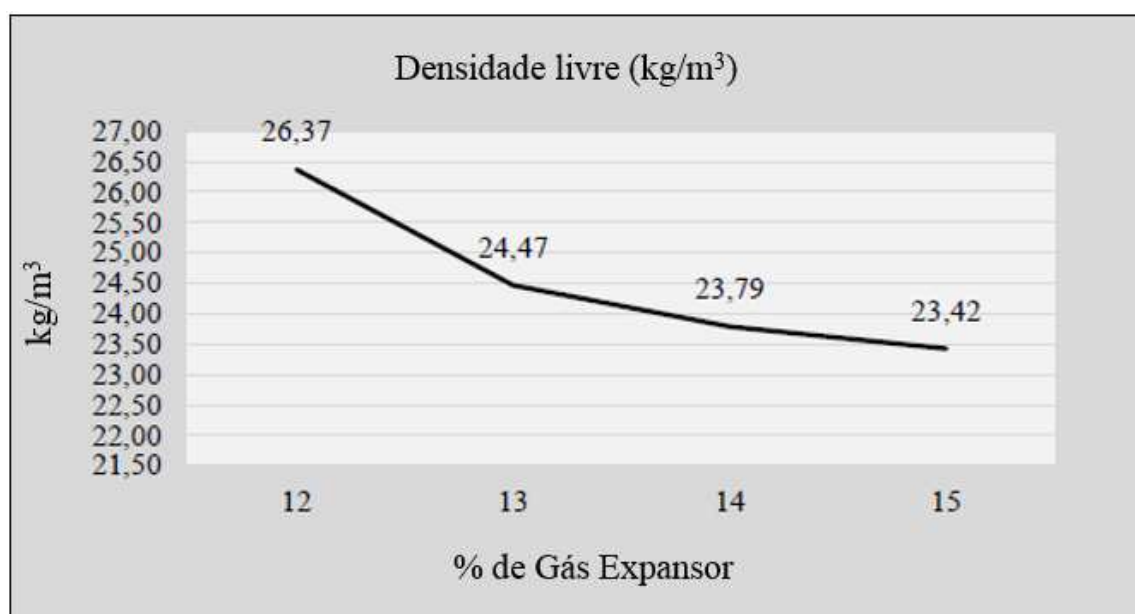
Quadro 4 – Resultados da densidade livre em diferentes concentrações de ciclopentano e as respectivas médias

| Quantidade de Gás (%) | Densidade livre (kg/m ³) | | | |
|-----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| | CP1 | CP2 | CP3 | Média |
| 12 | 26,30 | 26,42 | 26,38 | 26,37 |
| 13 | 24,46 | 24,50 | 24,44 | 24,47 |
| 14 | 23,75 | 23,80 | 23,81 | 23,79 |
| 15 | 23,44 | 23,41 | 23,42 | 23,42 |

Fonte: O autor (2018)

A Figura 6 apresenta a representação gráfica dos resultados da densidade livre em diferentes percentuais do gás expensor ciclopentano.

Figura 6 – Resultados da densidade livre em diferentes percentuais do gás expensor ciclopentano



Fonte: O autor (2018)



Observa-se na Figura 6 que quanto maior o percentual de ciclopentano, menor a densidade livre. Com 15% de gás expensor, a média da densidade livre ficou em $23,42 \text{ kg/m}^3$, valor que está dentro da faixa especificada por Vilar (2018), que descreve que a densidade da espuma expandida livremente deve estar entre $20\text{-}25 \text{ kg/m}^3$. De acordo com o autor, dentro desta faixa, densidades mais baixas, obtém-se menores tamanhos de célula e, conseqüentemente melhores propriedades mecânicas e térmicas.

Poucos são os trabalhos encontrados na literatura que relatam o percentual de ciclopentano utilizado na formação de espuma rígida de poliuretano, Pérez (2006), utilizou um percentual de 7,5% de ciclopentano, onde a média da densidade da espuma expandida livremente ficou em $36,5 \text{ kg/m}^3$, valor que está acima daqueles sugeridos por Vilar (2018) Ainda, de acordo com os procedimentos da empresa X, acima de 15% de ciclopentano, existe o risco de o gás atacar as partes plásticas do componente, como caixa interna, cabos elétricos, entre outros.

5. Considerações Finais

Após a solidificação da espuma, a densidade livre é um importante parâmetro de processo, pois é possível ter uma ideia da fluidez do material, e determinar a sua capacidade de preencher todo o gabinete do refrigerador, assim, quanto menor a densidade livre da espuma, maior a fluidez do sistema de PU. Com densidades mais baixas, menor o tamanho de célula e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas e térmicas, assim, o bloco 04, com 15% de gás expensor apresentou o melhor resultado.

Referências

- ALIMENA, Luiz Alberto. **Estudo comparativo do coeficiente de condutividade térmica de espuma rígida de poliuretano obtida por reciclagem mecânica e química**. 2009. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e tecnologia de materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia e tecnologia de materiais, Porto Alegre. 2009.
- ARANTES, Gustavo Mendonça; OLIVEIRA, Thales Henrique de. **Estudo comparativo dos agentes de expansão HFC e HFO para determinar a viabilidade de seus usos na produção de espumas de poliuretano**. 2015. 50 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo; Escola de Engenharia de Lorena, EEL-USP, Lorena. 2015.
- BRUNING, Ivan Augusto. **Reciclagem de espuma rígida de poliuretano com uso de solvente**. 2008. 33 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. 2008.



CANGEMI, José Marcelo; SANTOS, Antonia Marli dos; CLARO NETO, Salvador. Poliuretano: De Travesseiros a Preservativos, um Polímero Versátil. **Química nova na escola**. v. 31, n° 3, agosto, 2009.

CASSENS, Beatriz. **Modelagem do processo de formação de poliuretano rígido com hidrofluorolefinas como agente expander**. 2018. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química, São Paulo. 2018.

CASTIGLI, Wallace Couto. **O efeito da água como agente de expansão em algumas propriedades mecânicas de espumas rígidas de poliuretano**. 2003. 25 f. TCC (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Curso de Química, Florianópolis. 2003.

GRIJÓ, Paulo Eduardo Antunes. **Alternativas de recuperação dos resíduos sólidos gerados na produção de pranchas de surfe**. 2004. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis. 2004.

IBEX Químicos e compositos Ltda. **Poliuretano**. Disponível em: <<http://www.ibexquimica.com.br/portal/images/literatura/ApostPoliuretano.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2019.

KIPPER, Liane Máhlmann; CROSSETTI, Geraldo Lopes; BECKER, Roberto Cristiano. **Estudo do aproveitamento do resíduo de espuma rígida de poliuretano no isolamento térmico de produtos de refrigeração** - na busca da manufatura sustentável. In: XXVIII Encontro nacional de engenharia de produção. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13-16 outubro, 2008.

KOSSAKA, Júlio. **Método de reciclagem de espuma rígida de poliuretano de refrigeradores e congeladores de uso doméstico**. 2004. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

LUCKMANN, Luciano. **Reciclagem de resíduos de espuma rígida de poliuretano através da incorporação em polímeros termoplásticos, ABS, PS e PS**. 2005. 152f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC, Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, CCT/UDESC. 2005.

MIELKE, Solange. **Estudo do efeito de sucessivas despolimerizações sobre as propriedades térmicas e mecânicas da espuma rígida de poliuretano**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

PÉREZ, Osman Danilo Vargas. **Análisis para el uso del ciclopentano como agente expansivo de la espuma de poliuretano en sustitución del refrigerante HCFC 141-b en la industria de refrigeración comercial como protección al medio ambiente**. 2006. 77f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Química) – Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala. 2006.

SOARES, Márcio Steinmetz. **Síntese e caracterização de espumas de poliuretano para imobilização de células íntegras e aplicação na síntese de biodiesel**. 2012. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Lorena. 2012.

VERONESE, Vinícius Bassanesi. **Relação estrutura propriedade de espumas rígidas de poliuretano à base de óleos vegetais**. 2009. 121f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

VILAR, Walter. **Química e Tecnologia dos poliuretanos**. Disponível em: <<https://www.poliuretanos.com.br/>>. Acesso em: 15 jun. 2018.