



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CARLOS EDUARDO PINHEIRO PONTES

INTERFERÊNCIA DO POLIOL COPOLÍMERO DE DIFERENTES FORNECEDORES
NAS CARACTERÍSTICAS DA ESPUMA DE POLIURETANO

FORTALEZA
2023

CARLOS EDUARDO PINHEIRO PONTES

INTERFERÊNCIA DO POLIOL COPOLÍMERO DE DIFERENTES FORNECEDORES
NAS CARACTERÍSTICAS DA ESPUMA DE POLIURETANO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia Química do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P858i Pontes, Carlos Eduardo Pinheiro.
Interferência do poliálcool copolímero de diferentes fornecedores nas características da espuma de poliuretano / Carlos Eduardo Pinheiro Pontes. – 2023.
57 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. João José Hiluy Filho.
1. Copolímeros. 2. Espumas. 3. Densidade. 4. Dureza. 5. Viscosidade. I. Título.

CDD 660

CARLOS EDUARDO PINHEIRO PONTES

INTERFERÊNCIA DO POLIOL COPOLÍMERO DE DIFERENTES FORNECEDORES
NAS CARACTERÍSTICAS DA ESPUMA DE POLIURETANO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Engenharia Química do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Química.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João José Hiluy Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Vasconcelos Gonçalves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Guilherme Moura Nunes
Engenheiro Químico

“Agradeço a Deus que me deu forças para
concluir este projeto de forma satisfatória”

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir estar vivo, por me manter erguido nos momentos mais difíceis e por me ajudar nas batalhas diárias ao longo do curso.

Aos meus familiares, em especial meu avô, Nagibe, meu pai, Rafael, minha mãe, Valdelúzia, e meu irmão Ítalo pela paciência e pelo apoio durante essa trajetória na Universidade, por estarem presentes nos momentos tristes e felizes dessa caminhada.

Aos integrantes da banca examinadora, pelo tempo dedicado para permitir que esse trabalho seja avaliado e concluído.

Aos companheiros que encontrei na Universidade, em especial Jarbas Santos, Anderson da Silva, Francisco D'lima, Francisco Thierry, Antônio Carlos, Maria Cibelly, Maria Dayane, Poliana Borges, Yuri Moreira, Cícero Oberlando, Harison Nogueira, Guilherme Moura, Matheus Sales e Víctor Vasconcelos. Na companhia de vocês todos os momentos difíceis se tornavam simples e juntos conseguíamos superar. Sem vocês essa jornada com certeza seria mais árdua e monótona.

Aos colegas de iniciação científica do Laboratório de Combustão e Energias Renováveis, em especial ao Prof. Dr. William Barcellos e ao Thiago Dantas pela oportunidade e pelos ensinamentos compartilhados.

Aos meus colegas de trabalho, em especial Carlos Alexandre, Guilherme Moura, Cícero Oberlando e Leandro Brasil, pelas experiências compartilhadas, pelos ensinamentos repassados e pela ajuda na realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. João José Hiluy, pela disponibilidade, pelo valioso tempo investido em me auxiliar nesse desafio e por ser um professor que contribui grandiosamente para a formação de excelentes profissionais.

Por fim, aos professores, que, apesar de todas as dificuldades presentes no ensino brasileiro, se dedicam diariamente para moldar novos profissionais.

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas, na intensidade com que acontecem. Por isso, existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis.”

Fernando Pessoa

RESUMO

Os copolímeros são compostos por duas ou mais unidades monoméricas diferentes, que são ligadas em uma cadeia polimérica. Essas unidades monoméricas podem ser diferentes em termos de sua estrutura química, tamanho ou propriedades físicas e químicas. Existem dois tipos principais de copolímeros: copolímeros aleatórios e copolímeros em bloco. Onde, os copolímeros aleatórios são compostos por unidades monoméricas que são alternadas aleatoriamente na cadeia polimérica. Já os copolímeros em bloco são compostos por blocos distintos de unidades monoméricas que se alternam na cadeia. Sabe-se que este composto tem propriedades físicas e químicas únicas que são diferentes dos homopolímeros, que são polímeros compostos por uma única unidade monomérica que dependem da composição das unidades monoméricas e da sequência em que estão ligadas na cadeia polimérica. Após estas contestações surgiu o objetivo da pesquisa que será analisar o impacto no bloco de espuma mediante a utilização do copolímero de fornecedores diferentes. A metodologia empregada será uma de natureza qualitativa, comparativa e descritiva, onde será feito testes laboratoriais, que ocorreram numa indústria de bojos no município de Maracanaú, Ceará, Brasil. O período dessa pesquisa foi no terceiro trimestre do ano de 2023. Para execução dos testes foram adotados os seguintes procedimentos: será confeccionado três blocos de espuma, no qual cada bloco terá a mesma quantidade de todos os materiais. Mas, o que os diferencia será os fornecedores de polioli copolímero. Durante os testes será analisado a viscosidade dos três copolímeros e a densidade, dureza e resiliência dos três blocos de espumas testes. Ao final dos testes teve um arcabouço para relacionar a viscosidade com as alterações nas características das espumas devido a utilização de copolímeros de fornecedores diferentes. Em relação a custo benefício é analisado a viabilidade de cada fornecer considerando as características da espuma proporcionadas em cada teste.

Palavras-chave: *copolímeros; espumas; densidade; dureza; especificidades; viscosidade.*

ABSTRACT

Copolymers are composed of two or more different monomeric units, which are linked together in a polymer chain. These monomeric units can be different in terms of their chemical structure, size, or physical and chemical properties. There are two main types of copolymers: random copolymers and block copolymers. The random copolymers are composed of monomeric units that are randomly alternated in the polymer chain. While block copolymers are composed of distinct blocks of monomeric units that alternate in the chain. It is known that this compound has unique physical and chemical properties that are different from homopolymers, which are polymers composed of a single monomeric unit that depend on the composition of the monomeric units and the sequence in which they are linked in the polymer chain. After these objections, the objective of the research emerged, which will be to analyze the impact on the foam block when using copolymer from different suppliers. The methodology used will be qualitative, comparative and descriptive, where laboratory tests will be carried out, which took place in a bulge industry in the municipality of Maracanaú, Ceará, Brazil. The period of this research was in the third quarter of 2023. The following procedures were adopted to carry out the tests: three foam blocks will be made, each block will have the same quantity of all materials. But what sets them apart will be the suppliers of copolymer polyol. During the tests, the viscosity of the three copolymers and the density, hardness and resilience of the three foam blocks tested will be analyzed. At the end of the tests, there was a framework to relate viscosity to changes in foam characteristics due to the use of copolymers from different suppliers. In relation to cost-benefit, the feasibility of each supply is analyzed considering the characteristics of the foam provided in each test.

Keywords: *copolymers; foams; density; toughness; specificities; viscosity.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reação de polimerização do poliuretano	20
Figura 2 – Diisocianatos comumente utilizados na síntese de PU	21
Figura 3 – Estrutura de surfactante de silicone.....	27
Figura 4 – Reação do isocianato com a água.....	31
Figura 5 – Dimensões dos blocos de teste.....	37
Figura 6 – Partes do bloco de espuma	38
Figura 7 – Profundidade de indentação é uma medida para a dureza	42

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 – Máquina de teste para bloco de espuma	34
Imagem 2 – Os 3 blocos de teste sendo laminados	37
Imagem 3 – Balança de Precisão	39
Imagem 4 – Durômetro Shore F usado para analisar a dureza das amostras de espuma	41
Imagem 5 – Durômetro Shore 00 usado para analisar a dureza das amostras de espuma.....	43
Imagem 6 – Resiliômetro usado para coletar a resiliência das amostras de espuma.....	45
Imagem 7 – O viscosímetro rotacional usado na análise da viscosidade	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Densidade dos blocos de espuma em Kg/m ³	48
Gráfico 2 – Resultado dos Testes de Dureza Shore F	49
Gráfico 3 – Resultado dos Testes de Dureza Shore 00	50
Gráfico 4 - Resiliência da espuma em %.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Norma ABNT NBR 13579-1:2011: Bloco de Espuma flexível de poliuretano.....	23
Tabela 2 – Planilha de formulação	33
Tabela 3 – Dimensões das amostras de espuma	38
Tabela 4 – Resultado dos testes de densidade da espuma	48
Tabela 5 – Resultado dos testes Shore F de dureza da espuma	49
Tabela 6 – Resultado dos testes Shore 00 de dureza da espuma	50
Tabela 7 – Resultado dos testes de resiliência da espuma	51
Tabela 8 – Resultado dos testes de viscosidade.....	52
Tabela 9 – Faixa de teor de sólidos.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
cP	Centipoise
g	Gramma
Kcal	Quilocalorias
Kg	Quilograma
m	Metro
mc	Massa do componente na fórmula
mm	Milímetro
ε	Alongamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa do Estudo	18
1.2 Objetivos.....	18
<i>1.2.1 Objetivo Geral</i>	<i>18</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>19</i>
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Poliuretano Termoplástico	19
<i>2.1.1 A estrutura química do poliuretano</i>	<i>20</i>
<i>2.1.1.1 Diisocianato</i>	<i>21</i>
<i>2.1.1.2 O poliol.....</i>	<i>22</i>
2.2 As propriedades dos blocos de espuma de poliuretano	23
<i>2.2.1 Resistência mecânica.....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.2 Flexibilidade.....</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3 Isolamento térmico</i>	<i>25</i>
<i>2.2.4 Adesão</i>	<i>26</i>
<i>2.2.5 Resistência a produtos químicos</i>	<i>26</i>
<i>2.2.6 Baixa inflamabilidade.....</i>	<i>27</i>
2.3 Os surfactantes.....	27
2.4 Os catalisadores	28
<i>2.4.1 Catalisadores de amina</i>	<i>29</i>
<i>2.4.2 Catalisadores de estanho.....</i>	<i>29</i>
2.5 Os agentes de expansão	30
2.6 A água	32

3 METODOLOGIA.....	32
3.1 Tipo do estudo	32
3.2 Local do estudo	32
3.3 Formulação da espuma	33
3.4 Produção da espuma	34
3.5 Caracterização da espuma.....	36
<i>3.5.1 Determinação de Densidade aparente</i>	<i>38</i>
<i>3.5.2 Determinação de Dureza.....</i>	<i>40</i>
<i>3.5.2.1 Determinação de Dureza (Shore F).....</i>	<i>41</i>
<i>3.5.3 Determinação de Resiliência.....</i>	<i>44</i>
3.6 Medida da viscosidade dos polióis copolímeros	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Utilização de diferentes fornecedores de polióis copolímeros.....	47
4.2 Análise da densidade	47
4.3 Análise da Dureza	49
4.4 Análise da Resiliência	51
4.5 Análise da viscosidade	52
5 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

Os copolímeros são polímeros formados por mais de um tipo de monômero, que são unidades químicas que se repetem na cadeia polimérica. A história dos copolímeros remonta aos anos 1930, quando o químico alemão Hermann Staudinger propôs a existência dos polímeros como uma classe de substâncias químicas.

Os primeiros copolímeros foram sintetizados na década de 1930 por químicos como Walter Reppe e Karl Ziegler, que desenvolveram métodos para a polimerização de monômeros diferentes. No entanto, não foram amplamente estudados até a década de 1950, pois foi no momento que a indústria petroquímica começou a produzir polímeros em grande escala.

A partir de então, os copolímeros se tornaram um campo de pesquisa importante na química de polímeros, com o desenvolvimento de novos métodos de síntese e a descoberta de novas propriedades e aplicações. Alguns exemplos de copolímeros são o poliestireno-butadieno (SBR), um copolímero utilizado na produção de pneus, e o politetrafluoretileno-co-propileno (FEP), um copolímero utilizado em revestimentos resistentes a altas temperaturas.

E este composto têm diversas propriedades que os tornam úteis em uma ampla variedade de aplicações, como a flexibilidade, a resistência mecânica, a resistência química e a capacidade de absorver e liberar água. Além disso, a sua combinação com diferentes monômeros pode levar a propriedades que não são encontradas em polímeros homopoliméricos, o que amplia ainda mais as possibilidades de aplicação e utilização desses materiais (PAOLI, 2008).

Quando observa esse composto do ponto de vista da economia mundial, tem-se a sua utilização em uma ampla escala de em diversas indústrias. Um dos principais motivos para a importância dos copolímeros é a sua versatilidade. Como são formados por mais de um tipo de monômero, é possível ajustar suas propriedades para atender às necessidades específicas de cada aplicação. Isso faz com que os copolímeros sejam amplamente utilizados em uma grande variedade de produtos, desde embalagens de alimentos até peças automotivas.

Segundo uma pesquisa realizada pela Maximize Market Research (MMR), no ano de 2022 o mercado global de espumas de poliuretano foi avaliado em 46,80 bilhões de dólares com previsão para atingir a marca de 78,16 bilhões de dólares em 2029. Além disso, é um composto para produção de materiais de baixo custo e alta performance, o que contribui para a sua ampla utilização em diversas indústrias. Como resultado, a indústria de copolímeros é uma das mais importantes dentro do setor de polímeros e materiais plásticos.

Estes polímeros são formados pela combinação de dois ou mais monômeros diferentes em uma única cadeia polimérica. Eles são classificados em três tipos principais: copolímeros aleatórios, copolímeros em bloco e copolímeros de enxerto.

Contudo, esta pesquisa se aterá aos copolímeros de enxerto, compostos formados por uma reação de polimerização, onde uma estrutura principal formada por uma cadeia polimérica de um monômero, formando uma espécie de espinha dorsal, é copolimerizada com outras cadeias poliméricas diferentes criando algumas ramificações. Essas ramificações podem ser feitas utilizando um ou mais espécies de monômeros para atender diferentes finalidades.

Além disso, é importante enfatizar a grandiosa contribuição dos copolímeros na produção das espumas de poliuretano. Antes da aplicação dos copolímeros nas formulações das espumas PU não era possível produzir espumas de altas densidades, pois a estrutura das espumas não suportava a grande quantidade de massa e ocorria o colapso. Apenas após a implementação desse material no processo produtivo, foi possível a produção de espumas com altas densidades.

A produção de copolímeros também tem um grande impacto na economia global, gerando empregos e movimentando diversos setores. Normalmente, as indústrias de copolímeros incluem empresas de produção de matérias-primas, fabricantes de produtos acabados e empresas de pesquisa e desenvolvimento. Além disso, os copolímeros são frequentemente utilizados em produtos de exportação, o que contribui para o comércio internacional e geram empregos em todo o mundo.

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos principais, de acordo com o descrito a seguir.

Na “Introdução” faz-se uma pequena contextualização sobre as espumas de poliuretano, um enquadramento sobre a empresa na qual se desenvolveu o trabalho de doutoramento aqui formalizado e há ainda referência aos objetivos que se pretendeu atingir com o trabalho.

No capítulo 2 “Fundamentação Teórica” faz-se uma revisão sobre o conhecimento atual acerca dos fenômenos de envelhecimento por ação da temperatura e/ou da humidade e dos fenômenos envolvidos na degradação da matriz polimérica durante o processo de laminação à chama.

No capítulo 3 “Metodologia” são explicados os vários métodos utilizados desde a explicação dos ensaios, esclarecimento de como foram maquinados os provetes, aos trabalhos experimentais desenvolvidos para a obtenção de resultados que fossem de encontro com os objetivos pretendidos com este mesmo projeto.

No capítulo 4 “Resultado e Discussão” dos resultados obtidos através dos estudos sobre “durabilidade No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes aos testes executados durante este projeto de uma forma individual.

Por fim, no capítulo das “Conclusões”, são compiladas as várias lições retiradas dos resultados obtidos e da literatura consultada, assim como a enumeração de alguns pontos considerados interessantes para estudo posterior.

1.1 Justificativa do Estudo

Os copolímeros são frequentemente utilizados na produção de blocos de espumas devido às suas propriedades únicas, que tornam esses materiais ideais para essa aplicação. Exemplos comuns de copolímeros utilizado em blocos de espumas é o polioliol copolímero a base de estireno acrilonitrila e o poliuretano termoplástico (TPU), que é um copolímero de poliéster e poliuretano. O TPU é amplamente utilizado na produção de espumas devido à sua alta flexibilidade, resistência mecânica e durabilidade.

Além disso, os copolímeros podem ser facilmente processados em uma variedade de tipos de espumas, incluindo espumas de célula fechada e aberta. Os copolímeros também podem ser utilizados para ajustar as propriedades das espumas, como a densidade, a resistência ao rasgo e a capacidade de absorção de choque (MARIANO, 2011).

Outra vantagem dos copolímeros em relação a outros materiais utilizados em espumas é a sua resistência a produtos químicos e à abrasão. Isso faz com que as espumas produzidas com copolímeros sejam ideais para aplicações em ambientes agressivos, como na indústria de construção civil, automotiva e de equipamentos esportivos.

O polioliol copolímero é amplamente utilizados na produção de blocos de espumas devido às suas propriedades únicas, que tornam esses materiais ideais para essa aplicação. A alta flexibilidade, resistência mecânica, durabilidade e resistência a abrasão e produtos químicos dos copolímeros fazem com que as espumas produzidas com esses materiais sejam ideais para diversas aplicações em diferentes indústrias.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo que norteia a pesquisa será analisar as características com foco na dureza do bloco de espuma, mediante a utilização do polioliol copolímero de diferentes fornecedores utilizados na empresa Delfa localizada em Maracanaú, Ceará, Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Mensurar as alterações nas características dos três blocos de teste, com foco na densidade, dureza e resiliência;
- Avaliar a influência da modificação do copolímero na performance da espuma;
- Fazer uma comparação entre os fornecedores analisando o custo benefício.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será abordada a definição estrutural e química da espuma de poliuretano. Será apresentada uma cronologia de acontecimentos dos vários temas que irão ser abordados no presente trabalho e uma contextualização para melhor se entender a importância deste tema.

2.1 Poliuretano Termoplástico

A descoberta das espumas de poliuretano pode ser creditada a Otto Bayer, químico alemão que trabalhava na empresa de produtos químicos IG Farben, na década de 1930. Bayer estava tentando encontrar um uso para o diisocianato de tolueno, um subproduto do processo de fabricação de TNT, quando descobriu que podia ser usado para produzir um novo tipo de polímero, o poliuretano.

Em 1937, Bayer e sua equipe descobriram que, ao misturar o diisocianato de tolueno com poliois, obtinham um material sólido e rígido que podia ser usado como um substituto para a madeira e o marfim. No entanto, em 1940, outro pesquisador da IG Farben, Fritz Hartmann, descobriu que adicionando um surfactante à mistura de diisocianato e poliois, poderia ser criada uma espuma de poliuretano (MALCOLM, 1999).

Essa descoberta abriu caminho para o desenvolvimento das espumas de poliuretano, que foram inicialmente usadas em aplicações militares, como isolamento térmico para tanques e aviões. Com o tempo, as espumas de poliuretano começaram a ser utilizadas em uma ampla variedade de produtos, incluindo móveis, colchões, isolamento térmico e acústico para construções, entre outros. As espumas de poliuretano se tornaram um material popular devido à sua leveza, alta resistência mecânica e propriedades isolantes (GAMA et al., 2018).

O poliuretano é um tipo de polímero que é produzido pela reação química entre um diisocianato e um polioliol em presença de um catalisador e outros aditivos. Os poliuretanos

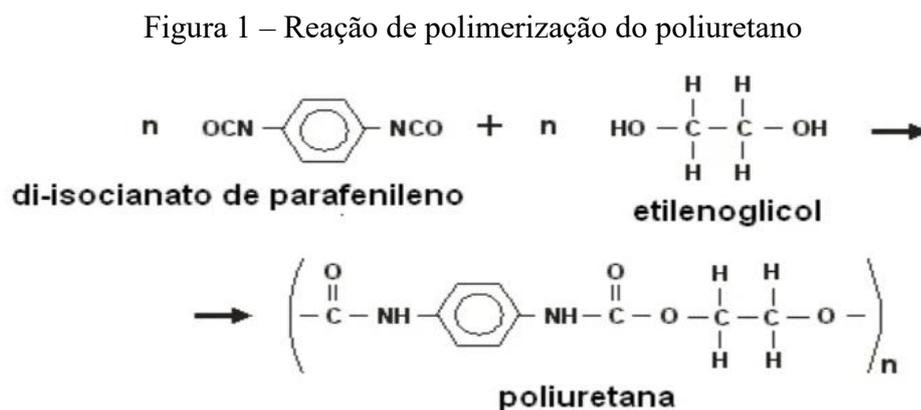
podem ser produzidos em diferentes formas, como espumas, elastômeros, adesivos, selantes, revestimentos, entre outras.

Os poliuretanos são conhecidos por suas excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência ao desgaste, tração, compressão e impacto, além de apresentarem boa resistência química e térmica. Além disso, podem ser formulados para apresentarem diferentes graus de rigidez, flexibilidade e elasticidade, dependendo do tipo e quantidade de monômeros e aditivos utilizados na sua produção (GAMA et al., 2018).

Devido às suas propriedades únicas, os poliuretanos são amplamente utilizados em diversas aplicações, como na indústria automotiva, construção civil, calçados, mobiliário, isolamento térmico e acústico, entre outras. Também são utilizados em aplicações médicas, como em dispositivos médicos e próteses, devido à sua biocompatibilidade e capacidade de serem formulados com propriedades específicas para diferentes aplicações.

2.1.1 A estrutura química do poliuretano

A estrutura química do poliuretano na Figura 1 é composta por uma cadeia principal de unidades de uretano (-NH-CO-O-), que são formadas pela reação de um diisocianato (ou poliisocianato) e um poliol (ou poliol polimérico) em presença de um agente de extensão, catalisador e outros aditivos (SZYCHER, 2012).



Reação de polimerização do poliuretano.

Fonte: (VILAR, 1999).

O diisocianato reage com o poliol para formar um poliuretano pré-polímero, que contém grupos funcionais de isocianato (-NCO) e hidroxila (-OH). O agente de extensão, que pode ser um diol ou uma diamina, é adicionado para reagir com os grupos funcionais

remanescentes de isocianato e hidroxila, formando assim a estrutura final do poliuretano (FAZENDA, 1995).

Callister (2002), define que poliuretano termoplástico é um elastômero termoplástico combinando a processabilidade de um termoplástico com o comportamento mecânico de um elastômero. Esta classe de PU pode ser melhorada pela adição de um extensor de cadeia, que são sinalizadores disfuncionais com baixa massa molar ou pré-polímeros controladores de reação com os grupos isocianatos ou hidroxilas terminais da cadeia de PU.

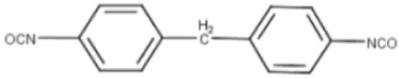
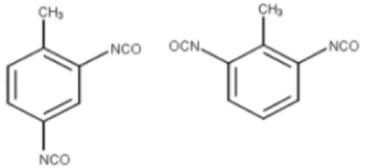
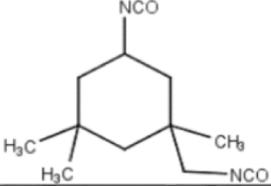
A estrutura química do poliuretano é altamente flexível e pode ser modificada para alterar suas propriedades físicas e químicas, como sua rigidez, densidade, elasticidade, resistência à abrasão e resistência à temperatura. Essa versatilidade torna os poliuretanos amplamente utilizados em diversos setores industriais (SOARES, 2012).

2.1.1.1 Diisocianato

O diisocianato é um composto químico que contém dois grupos funcionais de isocianato (-NCO) em sua estrutura. O termo diisocianato é geralmente usado para se referir a um diisocianato simples, mas também pode se referir a um poliisocianato que contém mais de dois grupos funcionais de isocianato (LIMA, 2007).

Os diisocianatos são amplamente utilizados na produção de polímeros, principalmente em poliuretanos, que são produzidos pela reação do diisocianato com um poliálcool em presença de um catalisador e outros aditivos. Exemplos de diisocianatos comuns incluem o diisocianato de tolueno (TDI), o diisocianato de difenilmetano (MDI), o diisocianato de hexametileno (HDI), o diisocianato de isoforona (IPDI), representados na Figura 2. O 4,4'-difenilmetanodiisocianato (MDI) e o 2,4-Toluenometildiisocianato (TDI) são os melhores quando se trata da confecção de espumas de PU (BRESOLIN, 2014)

Figura 2 – Diisocianatos comumente utilizados na síntese de PU

Diisocianato	Nomenclatura	Estrutura molecular
MDI	4,4'-difenilmetano diisocianato	
2,4-TDI e 2,6 TDI	2,4-Toluenometil diisocianato e 2,6-Toluenometil diisocianato	
IPDI	Diisocianato de isoforona	

Fonte: (GURGEL, 2019)

Segundo Lima (2007), Os isocianatos são compostos onde o átomo de carbono apresenta-se como um centro deficitário de elétrons, o que torna estes compostos altamente reativos e suscetíveis a reações nucleofílicas. Os isocianatos reagem com compostos que apresentam na cadeia átomos de hidrogênio ativos, como grupos hidroxila de álcoois primários ou secundários e amins primárias ou secundárias, formando respectivamente ligações uretana e uréia.

Os diisocianatos têm propriedades reativas e tóxicas, podendo causar irritação na pele, nos olhos e no trato respiratório (LIMA, 2007). Portanto, é necessário tomar precauções adequadas ao manusear esses compostos, como usar equipamentos de proteção individual e seguir as instruções de segurança recomendadas.

2.1.1.2 O poliol

O poliol é um composto orgânico que contém dois ou mais grupos hidroxilas (-OH) em sua estrutura molecular. É um componente de síntese nos poliuretanos, que são polímeros formados pelas reações dos polis e diisocianatos.

Os polióis estão disponíveis em uma vasta gama de tipos e propriedades, para poder desfrutar das diversas opções de aplicações de poliuretano. Por exemplo, os polióis podem ser de origem natural ou sintética, e podem conter grupos funcionais diversos (por exemplo, hidroxilas primárias, secundárias, aromáticos, alifáticos, etc.). Essas variações na estrutura

molecular podem influenciar as propriedades dos produtos de poliuretano, como dureza, flexibilidade, resistência à abrasão, resistência química e estabilidade térmica.

O polioliol tem aplicações industriais, como na indústria automobilística (para a produção de almofadas e revestimento), na construção civil (para a produção de isolamento térmico e acústico), na indústria têxtil (para a produção de tecidos e vestuário) e em muitos outros setores

2.2 As propriedades dos blocos de espuma de poliuretano

As propriedades dos blocos de espuma apresentadas na Tabela 1 podem variar significativamente dependendo da composição e da estrutura do copolímero em questão, bem como das condições de processamento e uso. Em geral, os copolímeros possuem propriedades intermediárias entre os homopolímeros dos monômeros que os compõem.

Tabela 1 – Norma ABNT NBR 13579-1:2011: Bloco de Espuma flexível de poliuretano

Propriedades	D18 ^c	D20	D23	D26	D28	D33	D40	D45
Força de indentação (F.I.) Dureza a 40%, N (min)	80	95	110	130	145	165	185	200
Fator de conforto ^b (min)	2,0		2,1		2,2			
Fadiga dinâmica Perda de espessura, % (max)	8	6	5			4		
Fadiga dinâmica Perda de F.I. a 40%, % (max)	32	27				23		
Deformação permanente à compressão de 90%, % (max)	12	10	10		8		8	
Resiliência, % (min)	30		35				40	
Teor de cinzas, % (max)	1							
^a A força de indentação pode ser expressa por F.I., referindo-se a espuma não fadigada								
^b A força de conforto pode ser expresso por F.C.								
^c Densidade utilizada somente para colchões de uso infantil (berço)								

Fonte: (Norma ABNT NBR 13579-1:2011)

As propriedades específicas dos copolímeros podem ser avaliadas por meio de testes específicos de laboratório, levando em consideração as condições de uso pretendidas e as normas ABNT NBR 8537-1:2015 (densidade); NBR 8619:2015 (resiliência); NBR 8797:2015 (deformação permanente à compressão (ROSTAMI; TAPEH; ESMAEIL et al., 2021).

2.2.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica de um bloco de espuma depende da sua densidade, composição química, tamanho, distribuição e forma das células, bem como da direção em que as forças são aplicadas.

A espuma é um material constituído por células de ar ou gás, separadas por paredes sólidas. A densidade da espuma é determinada pela quantidade de material sólido presente em relação ao volume total da espuma. Quanto menor a densidade, maior a quantidade de ar ou gás presente no material, o que pode levar a uma redução na sua resistência mecânica.

A composição química do material utilizado na produção da espuma também afeta sua resistência mecânica. Existem diferentes tipos de espuma, como a espuma de poliuretano, espuma de poliestireno expansível (EPS) e espuma de polietileno (PE), que apresentam diferentes propriedades mecânicas.

O tamanho, distribuição e forma das células presentes na espuma também influenciam sua resistência mecânica. Por exemplo, células maiores e mais irregulares podem levar a uma redução na resistência mecânica da espuma, enquanto células menores e mais regulares podem aumentá-la (ROSTAMI; TAPEH; ESMAEIL et al., 2021).

Além disso, a resistência mecânica do bloco de espuma varia dependendo da direção em que as forças são aplicadas. Por exemplo, a espuma pode ter uma alta resistência à compressão, mas baixa resistência à tração ou cisalhamento.

Em geral, a resistência mecânica de um bloco de espuma é determinada por uma combinação desses fatores, e é importante levar em consideração todas essas características na escolha do tipo de espuma a ser utilizado em uma aplicação específica.

2.2.2 Flexibilidade

A flexibilidade de um bloco de espuma pode ser afetada por vários fatores, como a densidade, a composição química, a estrutura celular, a forma e o tamanho das células.

A densidade da espuma pode influenciar na sua flexibilidade. Geralmente, espumas com menor densidade são mais flexíveis do que espumas com maior densidade, pois apresentam maior quantidade de ar ou gás em sua estrutura.

A composição química da espuma também pode afetar a sua flexibilidade. Diferentes tipos de espumas possuem diferentes propriedades mecânicas e características, o que pode influenciar na sua flexibilidade (VILAR, 2002).

A estrutura celular da espuma é outro fator importante na sua flexibilidade. A forma e o tamanho das células podem afetar a capacidade da espuma de se deformar e recuperar sua forma original. Células pequenas e uniformes tendem a proporcionar maior flexibilidade do que células grandes e irregulares.

Além disso, a adição de agentes modificadores, como agentes espumantes e plastificantes, pode afetar a flexibilidade do bloco de espuma. Esses agentes podem melhorar a capacidade da espuma de se deformar e recuperar sua forma original.

Por fim, o processo de fabricação da espuma também pode afetar a sua flexibilidade. O tipo de processo utilizado na fabricação pode influenciar na estrutura celular da espuma e, conseqüentemente, na sua flexibilidade.

A flexibilidade de um bloco de espuma é influenciada por vários fatores, incluindo densidade, composição química, estrutura celular, forma e tamanho das células, adição de agentes modificadores e processo de fabricação.

2.2.3 Isolamento térmico

O isolamento térmico em um bloco de espuma é proporcionado pela presença de ar ou gás em sua estrutura celular, o que dificulta a transferência de calor através do material. Além disso, a escolha do tipo de espuma pode influenciar na eficiência do isolamento térmico.

A presença de ar ou gás nas células da espuma reduz a condutividade térmica do material. Quando o calor é transferido por condução através de um material, ele se move de molécula para molécula. No caso da espuma, o ar ou o gás presente em suas células dificulta o movimento das moléculas, reduzindo a capacidade de condução térmica do material (VILAR, 2002).

. Isso significa que a espuma pode atuar como uma barreira para a transferência de calor, proporcionando um bom isolamento térmico.

Além disso, a escolha do tipo de espuma pode influenciar na eficiência do isolamento térmico. Por exemplo, espumas de poliestireno expandido (EPS) e espumas de poliuretano são frequentemente utilizadas como materiais de isolamento térmico devido à sua baixa condutividade térmica e alta resistência à transferência de calor.

Outro fator que pode afetar o isolamento térmico de um bloco de espuma é a densidade do material. Espumas com densidades mais baixas geralmente proporcionam um

melhor isolamento térmico, pois apresentam uma maior quantidade de ar ou gás em sua estrutura celular.

2.2.4 Adesão

A adesão no bloco de espuma refere-se à capacidade de duas superfícies de espuma se unirem de forma permanente ou temporária. A adesão pode ser necessária para unir duas peças de espuma durante a fabricação de um produto ou para unir a espuma a outra superfície, como tecido, metal ou plástico.

Existem diferentes métodos de adesão para espuma, incluindo adesivos químicos, fitas adesivas e processos de fusão térmica (VILAR, 2002). A escolha do método de adesão depende do tipo de espuma e do material de superfície que está sendo unido.

Para aderir duas superfícies de espuma, é importante que as superfícies estejam limpas, secas e livres de poeira, graxa ou outros contaminantes. Além disso, a adesão deve ser aplicada uniformemente em toda a superfície para garantir uma união forte e duradoura.

A adesão no bloco de espuma é um aspecto crítico do processo de fabricação de muitos produtos, incluindo móveis, colchões, equipamentos esportivos, isolamento acústico e térmico, entre outros. Uma adesão adequada garante que o produto final tenha a qualidade, durabilidade e desempenho desejados.

2.2.5 Resistência a produtos químicos

A resistência a produtos químicos dos blocos de espuma pode variar dependendo do tipo de espuma utilizada. Alguns tipos de espuma, como a espuma de poliuretano ou a espuma de borracha de nitrilo, têm uma boa resistência a produtos químicos e são frequentemente usados na fabricação de produtos que precisam resistir a exposição a substâncias químicas.

No entanto, outros tipos de espuma, como a espuma de poliestireno expandido (EPS), podem ter uma resistência limitada a produtos químicos. O EPS é frequentemente utilizado na fabricação de embalagens e produtos descartáveis, mas pode se degradar ou dissolver em contato com alguns produtos químicos (VILAR, 2002).

Ao escolher um bloco de espuma para um determinado aplicativo, é importante considerar a resistência da espuma aos produtos químicos a que estará exposta. É importante verificar as especificações do fabricante da espuma para obter informações sobre sua resistência a produtos químicos específicos.

Além disso, se a espuma precisar ser exposta a produtos químicos, pode ser necessário considerar a utilização de um revestimento protetor ou de um aditivo para melhorar a resistência da espuma a esses produtos químicos.

2.2.6 Baixa inflamabilidade

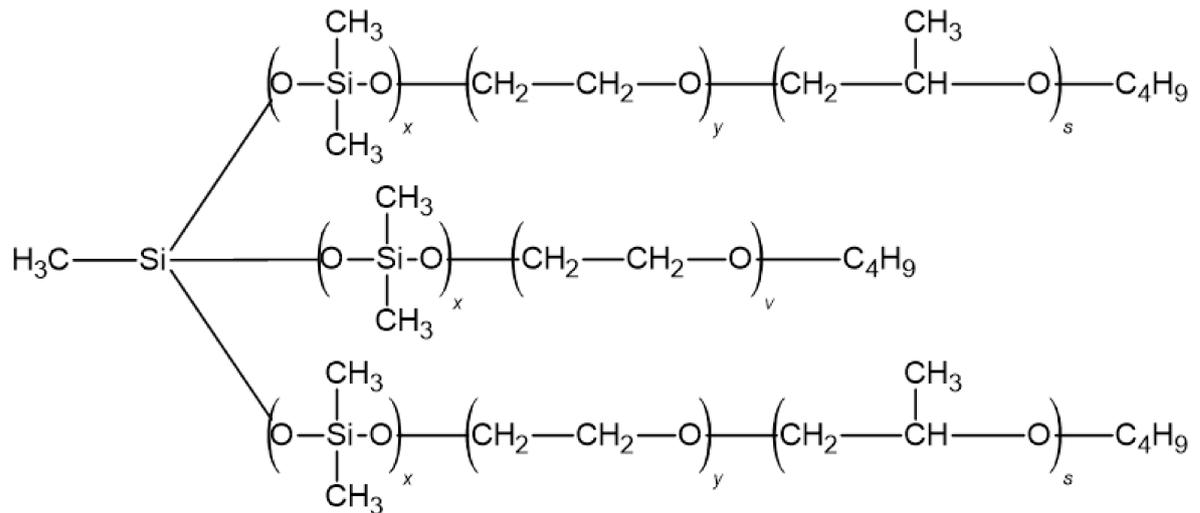
A inflamabilidade dos blocos de espuma pode variar dependendo do tipo de espuma utilizada. Alguns tipos de espuma, como a espuma de poliuretano, podem ser inflamáveis e liberar gases tóxicos quando queimam. Outros tipos de espuma, como a espuma de borracha de nitrilo, têm uma melhor resistência à chama e são frequentemente usados em aplicações onde a inflamabilidade é uma preocupação (VILAR, 2002).

Existem tratamentos químicos e aditivos que podem melhorar a resistência à chama da espuma. Por exemplo, retardantes de chama podem ser adicionados durante o processo de fabricação para tornar a espuma menos inflamável. No entanto, esses tratamentos podem afetar outras propriedades da espuma, como a densidade e a durabilidade, e devem ser avaliados cuidadosamente em relação às necessidades específicas do aplicativo.

2.3 Os surfactantes

Surfactantes são espécies químicas que em sua estrutura molecular possuem uma parte hidrofílica (atraídas pela água) e uma parte hidrofóbica (repelida pela água), a Figura 3 mostra a estrutura de um surfactante de silicone. Eles são frequentemente utilizados em formulações de espumas, como no caso dos blocos de espuma, para controlar a tensão superficial e permitir a formação das bolhas de ar que compõem a espuma.

Figura 3 – Estrutura de surfactante de silicone



No caso específico dos blocos de espuma, os surfactantes são adicionados à mistura de polímeros e agentes de expansão antes da formação da espuma, de forma a garantir uma distribuição uniforme das bolhas de ar e evitar a formação de grandes espaços vazios ou buracos. Além disso, os surfactantes também podem ser utilizados para controlar a densidade, a estabilidade e a resistência mecânica da espuma, tornando-a mais adequada para diferentes aplicações.

Existem vários tipos de surfactantes que podem ser utilizados em formulações de espuma, dependendo das características desejadas para a espuma final. Alguns exemplos incluem surfactantes aniônicos, catiônicos, não iônicos e anfóteros. Cada tipo de surfactante possui propriedades específicas que podem afetar a qualidade e as características da espuma final (VILAR, 2002). Permitindo a produção de PU's com propriedades específicas, como alta resistência mecânica, flexibilidade e transparência (SILVA, 2000).

2.4 Os catalisadores

Na formação de blocos de espuma, o catalisador é um componente essencial para a reação de polimerização do poliuretano. O catalisador é responsável por acelerar a reação química entre os componentes do sistema de espuma de poliuretano, que geralmente incluem um diisocianato e um polioliol, além de outros aditivos (VILLAR, 2002).

Encarregado de controlar a velocidade da reação química, permitindo que a espuma seja formada de maneira adequada. Se encarrega também em controlar as propriedades da espuma, como densidade, resistência e rigidez.

Existem vários tipos de catalisadores que podem ser usados na formação de blocos de espuma de poliuretano, incluindo aminas, estanho, zircônio, alumínio e outros (SILVA, 2000). A escolha do catalisador depende das características desejadas para a espuma, das condições de processamento e de outros fatores específicos do processo de fabricação.

A escolha do catalisador adequado depende da composição e estrutura desejadas no bloco de espuma, bem como do método de polimerização escolhido. Neste estudo usou catalisadores de amina e estanho para garantir a produção eficiente e controlada da espuma em bloco de alta qualidade.

2.4.1 Catalisadores de amina

A história dos catalisadores de amina remonta ao início do século XX, quando a química orgânica começou a se desenvolver rapidamente. A aminação é uma reação importante na química orgânica, mas muitas vezes é lenta e requer condições específicas para ocorrer. Na década de 1930, o químico alemão Paul Rylander desenvolveu o primeiro catalisador de amina, o trietilamina, que acelerou significativamente a reação de aminação (SILVA, 2000).

Desde então, muitos outros catalisadores de amina foram desenvolvidos, incluindo aminas terciárias e compostos de metais de transição, como paládio e platina. Esses catalisadores são usados em uma ampla variedade de aplicações, incluindo a síntese de produtos farmacêuticos, polímeros e outros compostos orgânicos.

O catalisador de amina é um composto químico frequentemente utilizado na fabricação de espuma de poliuretano para ajudar a acelerar a reação de polimerização que ocorre durante a formação da espuma. Durante o processo de fabricação da espuma de poliuretano, o catalisador de amina é adicionado à mistura de polióis e isocianato, que reagem para formar a espuma.

É uma substância usada para acelerar a reação química entre os polióis e o isocianato, permitindo que a espuma se forme rapidamente. Além disso, o catalisador de amina pode ajudar a controlar a taxa de formação de espuma e a densidade da espuma.

Existem diferentes tipos de catalisadores de amina que podem ser usados na fabricação de espuma de poliuretano, incluindo catalisadores à base de amina primária, secundária ou terciária. Cada tipo de catalisador pode afetar as propriedades da espuma, como a densidade, a resistência e a rigidez.

2.4.2 Catalisadores de estanho

A história dos catalisadores de estanho remonta a meados do século XX, quando foram descobertos os primeiros catalisadores de estanho para a síntese de compostos orgânicos. O cloreto de estanho (II) foi um dos primeiros catalisadores de estanho a serem utilizados na síntese de compostos orgânicos, sendo usado em reações de acoplamento de compostos aromáticos.

Na década de 1960, o químico americano Herbert C. Brown descobriu o uso de compostos organoestânicos, como o tetra-n-butil-estanho, como catalisadores em reações de hidrogenação e polimerização. Esses catalisadores de estanho foram amplamente utilizados na produção de borracha sintética e outros materiais poliméricos (SILVA, 2000).

Desde então, os catalisadores de estanho foram amplamente utilizados em uma variedade de aplicações catalíticas, incluindo reações de acoplamento, hidrogenação, polimerização e outras. Eles são valorizados por sua eficácia, baixo custo e ampla disponibilidade.

No entanto, o uso de compostos de estanho como catalisadores também tem sido associado a preocupações ambientais e de saúde pública, uma vez que o estanho é um metal pesado e pode ser tóxico em altas concentrações. Como resultado, tem havido um esforço crescente para desenvolver alternativas mais seguras e sustentáveis aos catalisadores de estanho, como catalisadores baseados em metais de transição, como paládio e níquel.

Os catalisadores de estanho são compostos que contêm estanho como elemento catalítico e são utilizados em diversas reações químicas. O estanho tem a capacidade de atuar como um agente redutor, um doador de elétrons e um catalisador de transferência de fase, o que o torna útil em muitas aplicações catalíticas (SILVA, 2000).

Silva (2000), afirma que “os catalisadores organometálicos mais usados na produção de espumas flexíveis são os que contêm estanho, como por exemplo, o bis-(2-etilhexanoato) de estanho (II)”. Por serem relativamente baratos e eficazes em muitas aplicações catalíticas, tornando-os uma escolha popular para muitos processos químicos. No entanto, o estanho é um metal pesado e pode ser tóxico em altas concentrações, portanto, é importante tomar medidas de segurança adequadas ao manusear e descartar catalisadores de estanho. O catalisador de estanho é frequentemente utilizado em combinação com os catalisadores de amina, para controlar as propriedades da espuma final.

2.5 Os agentes de expansão

Os agentes de expansão são substâncias que são adicionadas à mistura de polímeros e outros aditivos para formar as bolhas de ar que compõem a espuma. Eles são responsáveis por gerar o gás que é liberado durante o processo de fabricação da espuma, fazendo com que a mistura se expanda e forme as células de ar que compõem a espuma (VILLAR, 2002).

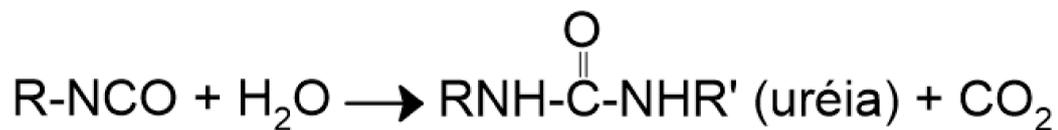
Existem vários tipos de agentes de expansão usados em copolimerização, mas para esses testes observou-se os “agentes químicos e físicos” (SILVA, 2000 p. 40). Os agentes químicos funcionam por decomposição térmica, liberando gases que fazem com que o bloco se expanda. Exemplos de agentes químicos incluem azodicarbonamida, bicarbonato de sódio e hidrocarbonetos clorofluorocarbonetos (CFCs), embora o uso de CFCs tenha sido amplamente descontinuado devido ao seu impacto ambiental negativo (SILVA, 2000).

Alguns exemplos de agentes de expansão químicos incluem o pentano, o butano e o dióxido de carbono. Já os agentes de expansão físicos incluem o ar comprimido, o nitrogênio e o dióxido de carbono líquido.

Os agentes físicos funcionam por difusão de gases no copolímero durante a polimerização, fazendo com que o copolímero se expanda. Exemplos de agentes físicos incluem dióxido de carbono, nitrogênio e vapor de água. Esses agentes são geralmente adicionados em quantidades controladas para produzir a estrutura de célula desejada (MOTTA, 2011).

O agente de expansão comumente utilizado na produção de espumas de poliuretano em blocos é o dióxido de carbono. Durante a reação da água com o isocianato ocorre a produção de uréia e dióxido de carbono, como mostra a Figura 4, nesse momento ocorre a expansão da espuma.

Figura 4 – Reação do isocianato com a água



A escolha do agente de expansão depende das características desejadas para a espuma final, como densidade, resistência mecânica, estabilidade térmica, entre outras propriedades. Além disso, o tipo de agente de expansão também pode afetar o processo de produção da espuma, como o tempo de expansão e a uniformidade da distribuição das células de ar.

2.6 A água

A água pode ser um componente importante na composição do bloco de espuma, pois pode ajudar a controlar a densidade e a qualidade da espuma final. Geralmente, a água é adicionada à mistura de polímeros, agentes de expansão e outros aditivos para umedecer os componentes e facilitar a dispersão dos agentes de expansão.

A quantidade de água adicionada pode variar dependendo do tipo de espuma e das propriedades desejadas para a espuma final. Em geral, o teor de umidade na mistura pode variar de 1 a 8%, sendo que teores mais elevados podem levar a espumas mais densas e resistentes, porém com uma menor estabilidade térmica (SILVA, 2000).

Além disso, a água também pode ser utilizada para controlar a temperatura durante o processo de produção da espuma. A adição de água pode ajudar a reduzir a temperatura da mistura, evitando a decomposição prematura dos agentes de expansão e garantindo uma formação mais uniforme das células de ar (VILLAR, 2002).

No entanto, é importante ressaltar que a presença de umidade na espuma pode afetar a sua estabilidade e durabilidade a longo prazo. A umidade pode favorecer a proliferação de fungos e bactérias na espuma, causando problemas de odor, manchas e deterioração. Por isso, é importante controlar cuidadosamente a quantidade de água adicionada na mistura e garantir um completo processo de secagem e cura da espuma após a sua produção.

3 METODOLOGIA

Nesta seção estão descritas as etapas aplicadas no processo de elaboração das amostras para o estudo. A metodologia é uma abordagem sistemática para a investigação de blocos de espuma, visto que o estudo é uma suma de organização das informações coletadas, com o objetivo de identificar os padrões, as tendências e as relações entre os elementos que compõem os blocos de espuma.

3.1 Tipo do estudo

Esta pesquisa caracteriza por ser uma pesquisa aplicada com uma metodologia de pesquisa científica que tem como objetivo resolver problemas práticos ou aplicar conhecimentos teóricos em situações do mundo real. Segundo Gil et al. (2007) é uma abordagem que busca aliar a teoria e a prática, utilizando os conhecimentos científicos para solucionar problemas concretos e contribuir para o desenvolvimento de soluções inovadoras.

A pesquisa aplicada pode ser realizada em diversos campos, principalmente na engenharia. Pois envolve uma estreita colaboração entre pesquisadores e profissionais das áreas envolvidas, buscando desenvolver soluções que possam ser aplicadas na prática (GIL et al. 2007).

A busca por aplicar os conhecimentos existentes para resolver problemas específicos e práticos, fomentou no estudo dos blocos de espuma objetivos, que incluíram a determinação das propriedades físicas e químicas, a análise das características específicas e a otimização dos processos de produção dos blocos.

3.2 Local do estudo

O local escolhido para o estudo foi o laboratório de uma empresa produtora de bojos, instalada em Maracanaú, Ceará, Brasil. A matéria-prima que foi cedida ao pesquisador para realizar os testes do trabalho. Todos os ensaios foram refeitos duas vezes para se obter uma comprovação mais precisa dos resultados.

3.3 Formulação da espuma

A fabricação de blocos de espuma de copolímeros geralmente envolve a mistura de dois ou mais monômeros que são polimerizados em um processo de espumação. A fórmula exata depende dos monômeros utilizados e das condições do processo de fabricação.

Para produzir blocos de espuma, geralmente são utilizados monômeros de poliálcool básico mais Poliálcool Copolímero, que são polimerizados em presença de um agente expander, como o pentano. O bloco de espuma é produzido a partir da mistura de um poliálcool básico (como o polióxido de propileno ou polióxido de etileno) com um poliálcool de copolímeros (como o polióxido de propileno-óxido de etileno). A mistura é então combinada com um agente de cura, como o isocianato e outros aditivos, como agentes de sopro, surfactantes e estabilizadores (VILAR, 2002).

A proporção exata de cada componente na mistura, destacada na Tabela 2, se enquadram nas características desejadas para a formação do bloco de espuma, com a sua respectiva, densidade, dureza, resiliência. A Tabela 2 é uma parte de uma planilha utilizada por profissionais da área de espumação como uma ferramenta durante os processos de formulações e desenvolvimento de espumas.

Tabela 2 – Planilha de formulação

Componentes	Nº OH	Em Kg	Em Partes
Poliálcool Básico	56	0,634	17,34
Poliálcool Copolímero	30	3,023	82,66
Peso Equiv.			
Água		0,09	2,46
Silicone Surfactante		0,04	1,09
Catalisador de Amina		0,005	0,14
Catalisador de Estanho		0,004	0,1
TDI 80/20 (diisocianato)		1,256	34,35
Análise Técnica			
F. Expansão:	2,46	Índice TDI:	117,7
DT (Kg/m³):	36,9	DM(Kg/m³):	36,9
% p/p teórico de carga mineral presente:			0
Altura do bloco curado:		0,35	Volume (m³)
Diâmetro do bloco:		0,70	0,13
Densidade do bloco bruto:		28,4	Kg/m³

Fonte: Elaborado pelo autor.

A construção da fórmula foi baseada na espuma D46 que é confeccionada na empresa, a qual possui densidade aparente igual a $36,9 \text{ Kg/m}^3$, alguns aditivos utilizados na formulação original não foram adicionados. Para realização dos testes três blocos de espuma foram produzidos com as mesmas proporções de reagentes, onde em cada bloco foi utilizado o polioli copolímero de cada fornecedor disponível na empresa. Conforme os componentes vão sendo misturados temos o processo de produção da espuma que também pode afetar suas propriedades finais. Contudo, outros aditivos podem ser adicionados à formulação para melhorar as propriedades da espuma, como estabilizadores térmicos, retardantes de chama, agentes antiespumantes, entre outros.

O índice de TDI é afetado pela quantidade de polioli e copolímero na fórmula e é ajustado por equivalência, mantido em 117,7. Os valores de índice, densidade e volume do bloco são calculados automaticamente na planilha de formulação de espuma.

3.4 Produção da espuma

A produção da espuma pode ser realizada de forma contínua ou em batelada. Para realização dos testes, foi utilizado o método de batelada em caixote de formato cilíndrico. Para a confecção dos blocos quatro etapas são realizadas: pesagem dos químicos, mistura controlada, etapa reacional e a etapa de cura.

A máquina utilizada é constituída por três componentes principais: O painel de controle, o misturador e o caixote cilíndrico, como mostra Imagem 1.

Imagem 1 – Máquina de teste para bloco de espuma



Fonte: Elaborado pelo autor.

A pesagem dos reagentes foi realizada em quatro recipientes diferentes com o intuito de que as reações não ocorram antes da etapa da mistura. De modo que em um recipiente são colocados os polióis, em outro são pesados a amina, o silicone e a água (ASA), separadamente é pesado o TDI e em uma seringa foi minuciosamente pesado o catalisador de estanho, o qual pode causar um grande impacto negativo na produção da espuma caso ocorra um erro de pesagem.

Para iniciar a etapa da mistura os polióis e a ASA foram adicionados no misturador, inicia-se a mistura com 100 RPM durante um minuto, após esse tempo o catalisador de estanho é adicionado na mistura que ocorre por mais um minuto a 100 RPM. Para finalizar a etapa da mistura o TDI é inserido no batedor e a agitação continua por mais seis segundos, nesse momento as reações já foram iniciadas, então imediatamente a parte de baixo do misturador é aberta para liberar a massa no caixote e um cilindro metálico é colocado no seu eixo radial, nessa etapa ocorrerão as reações de polimerização e liberação de gases para proporcionar o crescimento e a formação da espuma.

Após um período de 5 a 10 minutos, o caixote é aberto e o cilindro metálico é removido para que o bloco de espuma possa ser retirado da caixa. A espuma é levada para um espaço onde permanecerá curando por um período de 24 a 48 horas, após esse tempo a espuma está apta a ser utilizada. O processo foi o mesmo para os três blocos de espuma. Os blocos foram identificados de acordo com o fornecedor de copolímero utilizado, por questões de sigilo industrial foram nomeados de Bloco A, Bloco B e Bloco C.

“Neste processo, normalmente é feita a mistura da massa reagente em um vaso (misturador) dotado de agitação mecânica eficiente. Em seguida, é feita a transferência rápida para um recipiente maior (caixote), antes de ocorrer aumento significativo da viscosidade da mistura. É importante evitar a formação de bolhas de ar, durante o vazamento da mistura, pois poderá acarretar falhas na estrutura da espuma. O crescimento da espuma é normalmente feito em um caixote de madeira ou metal, com superfícies planas laterais articuladas, e coberto por um sistema de tampa móvel. O efeito da tampa móvel e o movimento viscoso, nas paredes do caixote levam à obtenção de espumas com densidades maiores do que as que seriam obtidas pelo processo contínuo. Este fenômeno é contornado pelo ajuste da formulação utilizada.” (VILAR, 2002, p. 316).

Após estas etapas o bloco de espuma é cortado em peças menores de acordo com as especificações do produto final. As peças são então submetidas a um processo de acabamento, que pode incluir a aplicação de aditivos, como retardantes de chama ou agentes antiespumantes, e a conformação da espuma nas formas específicas. Mas no estudo ela seguiu para o processo de laminação.

3.5 Caracterização da espuma

Após a cura de 48 horas seguindo os procedimentos de produção da espuma. O processo de cura do bloco de espuma de copolímeros foi a terceira etapa da produção desse material. É na cura que o processo pelo qual o polímero é solidificado e as propriedades físicas e químicas finais são desenvolvidas. Geralmente, a cura ocorre após a espuma ter sido moldada em blocos e é realizada em um ambiente controlado de temperatura e umidade. Existem dois tipos principais de processos de cura dos blocos de espuma:

➤ A Cura química: Nesse processo, o polímero é curado pela reação química entre os monômeros e os agentes de cura. Geralmente, a cura química é realizada em temperatura ambiente ou em temperaturas moderadas e leva algumas horas para ser concluída. (VILAR, 2002). O tempo de cura pode variar dependendo da fórmula específica do polímero e das condições de cura.

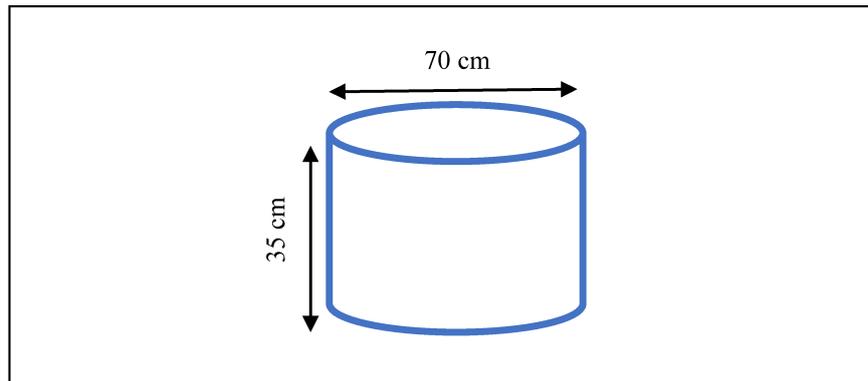
➤ A Cura térmica: Nesse processo, a cura é realizada por meio de aquecimento da espuma de copolímeros. O polímero é exposto a uma temperatura específica por um período de tempo determinado, o que causa a reação química de cura. A cura térmica geralmente é mais rápida do que a cura química e pode ser realizada em temperaturas mais elevadas (VILAR, 2002).

Após a cura, a espuma é resfriada e é possível realizar a etapa de acabamento, na qual os blocos são cortados e moldados em diferentes formas e tamanhos, dependendo da aplicação final. É importante ressaltar que a cura da espuma é um processo delicado que requer controle preciso de temperatura e de umidade para garantir a qualidade e as propriedades desejadas do material.

Os blocos de teste seguiram os parâmetros dimensionais da Figura 5, onde se obteve um bloco cilíndrico de 70 cm de largura e 35 cm de altura.

O bloco, então foi levado a um torno com navalha giratória de acordo com a Imagem 2, onde a casca lateral da peça de poliuretano foi retirada e, em seguida, a espuma foi cortada em lâmina com a espessura de 12 milímetros. Ressaltando que nesta imagem temos o exemplo das três amostras que foi desenvolvida na pesquisa Amostra A, Amostra B e Amostra C.

Figura 5 – Dimensões dos blocos de teste



Fonte: Elaborado pelo autor

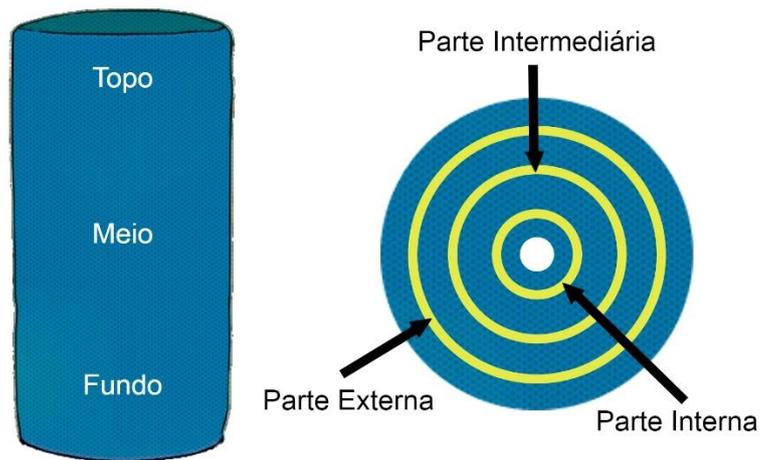
Imagem 2 – Os 3 blocos de teste sendo laminados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa lâmina de espuma são retiradas 3 amostras de espuma da parte externa, da parte intermediária e da parte interna, em cada parte é retirada uma amostra no topo, no meio e no fundo do bloco. A Figura 6 ilustra a visão lateral de um bloco indicando o topo, o meio e o fundo e uma perspectiva no sentido radial indicando as partes do bloco. Na Tabela 3 estão as dimensões das amostras utilizada nos testes.

Figura 6 – Partes do bloco de espuma



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Dimensões das amostras de espuma

Análises das amostras de espuma	
Parte do bloco	Dimensões das amostras
Parte externa	100 mm x 100 mm x 12 mm
Parte intermediária	100 mm x 100 mm x 12 mm
Parte interna	100 mm x 100 mm x 12 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Salientando que essas amostras, em um sentido radial, representam a parte mais externa do bloco, a parte central do anel de espuma e o miolo, respectivamente. Em todas as amostras foi utilizada uma navalha de 10cm x 10cm para cortar a espuma e padronizar as amostras para a realização dos testes. Em cada teste foi feito uma média aritmética com os valores do topo, do meio e do fundo para cada parte do bloco.

3.5.1 Determinação de Densidade aparente

A densidade aparente de um bloco de espuma de poliuretano pode ser determinada por meio de um procedimento experimental simples. Seguindo as etapas descritas a seguir:

➤ Pesou na balança de precisão, de acordo com a Imagem 3, um pedaço de amostra de espuma em uma balança de alta precisão trabalhando sempre com a massa (em gramas).

Imagem 3 – Balança de Precisão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme Mannes (2011), foram mensuradas as dimensões da amostra de espuma, incluindo comprimento, largura e altura, utilizando uma régua e um paquímetro. Seguiu-se os procedimentos da norma brasileira NBR 8537:2003.

Onde foi calculado o volume da amostra multiplicando as três dimensões medidas. Divide a massa do bloco de espuma pelo seu volume para obter a densidade aparente em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3).

Observou que a densidade aparente da espuma de copolímeros pôde variar dependendo da sua composição química, estrutura celular e o processamento. Portanto, seguiu um método padronizado segundo a norma brasileira NBR 9429:2003 e realizar várias medições para obter uma estimativa precisa da densidade.

Seguindo a equação 1:

$$Densidade = \frac{\text{massa da amostra}}{\text{volume da amostra}} \quad (1)$$

Onde, a massa da amostra é a quantidade de material que compõe a amostra e o volume é o espaço ocupado pela amostra coletada.

É importante notar que a densidade é uma medida do material em um estado específico, levando em consideração os espaços vazios e a porosidade. Portanto, pode ser considerada diferente da densidade real do material.

3.5.2 Determinação de Dureza

A dureza de um material pode definir-se de várias maneiras, sendo, no entanto, a definição mais usual de resistência do material à indentação ou penetração. A determinação da dureza tem a finalidade de saber se o material atingiu uma determinada condição metalúrgica e/ou mecânica, podendo servir como aproximação grosseira à determinação do valor da tensão de rotura.

Os principais tipos de ensaios de dureza usados na indústria são: Brinell, Vickers, Rockwell, Shore e microdureza. Mas para os testes da pesquisa serão usados a Dureza Shore, pode-se dizer que esta consiste na resistência à penetração a um indento com uma forma determinada e uma dada carga.

Nesta pesquisa foi adotado o método de ensaio Shore, conforme ISO 48-4 devem ser considerados os seguintes parâmetros na preparação:

Para a determinação da dureza do material foi feita conforme a norma cinco medições para cálculo do valor médio a partir delas.

O tempo de medição é de 15 segundos, em caso de outro tempo de medição este fato deve ser indicado no valor de dureza.

O material a ser testado deve ser acondicionado no mínimo durante 1h à temperatura ambiente de $+23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Onde, a distância mínima das indentações de ensaio conforme a norma deve ser observada. A distância média das indentações entre elas deve ser de $\geq 5\text{mm}$ e da borda da amostra de $\geq 12\text{mm}$.

Para executar estes testes recorreu-se ao Durômetro Shore F Digital Portátil Escala 0-100 Mod. DP-510 e ao Durômetro Digital Shore 00, ambos são aparelhos de medição que indicam a dureza de um dado material em função da penetração que um indento consegue provocar num dado material. Este método permite a medição de valores de indentação imediatos, em períodos de tempos específicos ou em ambos os casos.

Para os cálculos de dureza em espumas de poliuretano é uma propriedade física que determina a resistência do material à deformação permanente quando submetido a uma carga ou pressão. A dureza pode variar dependendo da composição química dos monômeros, da sua estrutura molecular e das condições de processamento, como temperatura e pressão.

3.5.2.1 Determinação de Dureza (Shore F)

Esta dureza foi calculada pela penetração de um indentado com ponta circular, que ao ser pressionada contra a superfície do material permanece parcialmente indentada. A profundidade da penetração da ponta na superfície do material foi medida e convertida em uma escala de dureza Shore. Foi utilizado o Durômetro Shore F Digital Portátil Escala 0-100 Mod. DP-510, demonstrado na Imagem 4.

Imagem 4 – Durômetro Shore F usado para analisar a dureza das amostras de espuma



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a comprovação do estudo seguiu-se todas as etapas descritas a seguir:

- Certificou-se de que a amostra de espuma estava a uma temperatura ambiente estável e que a superfície esteja limpa e plana.
- Colocou-se um medidor de dureza Shore F na superfície da espuma, pressionando firmemente até que a agulha do medidor esteja totalmente estendida.
- Aguardou-se alguns segundos para permitir que a agulha se estabilize e leia o valor de dureza indicado no medidor.
- Repetiu-se os quesitos em cinco pontos diferentes da amostra, a fim de obter uma média dos valores de dureza.

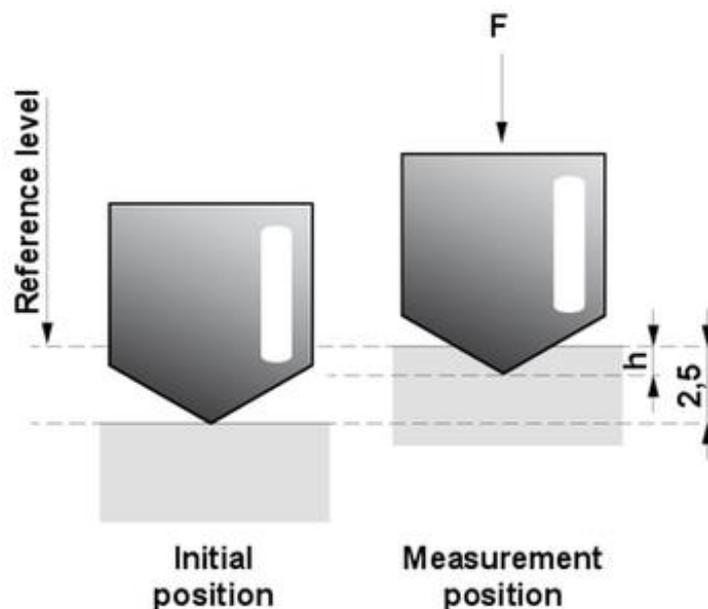
Observou-se que a dureza Shore F é uma medida relativa da resistência de um material e pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a composição química, a estrutura celular e a espessura do material. Portanto, seguiu-se um método padronizado em todas as amostras afim de evitar erros na análise.

A fórmula para calcular a dureza Shore F de um bloco de espuma de copolímeros é dada de acordo com a equação 2:

$$HF = 100 - [(h / H) \times 100] \quad (2)$$

Onde HF é a dureza Shore F, h é a profundidade da penetração do indentado no material e H é a altura inicial da penetração. O método de ensaio normalizado conforme ISO 48-4 descrito na Figura 7.

Figura 7 – Profundidade de indentação é uma medida para a dureza



Fonte: (VILAR, 2002).

A profundidade de indentação na Figura 7 seguiu a medida em uma escala de 0 Shore (2,5 milímetros em profundidade de indentação) até 100 Shore (0 milímetros em profundidade de indentação). Quanto maior o valor de HD, maior é a resistência do material à penetração. É importante notar que a dureza Shore F é apenas uma medida da resistência do material à penetração e não leva em conta outras propriedades mecânicas do material, como resistência à tração ou compressão.

3.5.2.2 Determinação de Dureza (Shore 00)

A escala Shore 00 foi a outra escala de dureza Shore usada na pesquisa. A escala Shore 00 é projetada para medir a dureza de materiais com uma faixa de dureza muito baixa, entre 0 e 100 unidades.

O teste de dureza Shore 00 é baseado na mesma técnica de penetração que o teste Shore F, mas usa uma ponta menos larga que a ponta usada no teste Shore F. Isso permite que a ponta se deforme mais facilmente em materiais muito macios, produzindo leituras de dureza mais precisas.

O Durômetro Shore 00, demonstrado na Imagem 5 é composto por uma ponta de aço, uma mola e um mostrador para leitura da dureza. Para realizar o teste Shore 00, a ponta do Durômetro é pressionada contra a superfície do material a ser testado com uma carga constante e a profundidade da penetração é medida.

Imagem 5 – Durômetro Shore 00 usado para analisar a dureza das amostras de espuma



Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor Shore 00 é um número que indica a profundidade da penetração da agulha na amostra, em milímetros. Quanto menor o número Shore 00, mais macio é o material. A escala Shore 00 varia de 0 (o mais macio) a 100 (o mais duro). O resultado do teste pode ser usado para comparar a dureza relativa de diferentes materiais ou para verificar se um material atende a um determinado padrão de dureza.

3.5.3 Determinação de Resiliência

A resiliência é a capacidade de um material de absorver energia durante a deformação e liberá-la durante a recuperação, ou seja, é uma medida da capacidade de um material de retornar à sua forma original após ser submetido a uma força de deformação. Aqui está um possível método para determinar a resiliência de um bloco de espuma segundo a norma brasileira NBR 8910:2003.

Observe que a resiliência é uma medida relativa da capacidade de um material de retornar à sua forma original após ser submetido a uma deformação e pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a composição química, a estrutura celular e a densidade do material. Portanto, é importante seguir um método padronizado e realizar várias medições para obter uma estimativa precisa da resiliência do bloco de espuma de copolímeros.

A NBR 8619:2015 é uma norma técnica brasileira que estabelece os requisitos para a determinação da resiliência de materiais elastoméricos, incluindo espumas de poliuretano. Seguindo o possível método para calcular a resiliência da espuma de acordo com a NBR 8619:2015.

A resiliência é geralmente expressa como uma porcentagem, sendo que, quanto maior a resiliência, mais eficiente é o material em absorver e dissipar energia. Segundo Abiquim (2011), o teste de resiliência consiste na queda de uma esfera de aço sobre a espuma, com a finalidade de analisar a sua elasticidade e resistência.

O equipamento utilizado para essa análise foi o resiliômetro demonstrado na Imagem 6, que consiste de um tubo transparente com graduação de 0 a 100, uma tampa no seu topo utilizada como suporte para uma esfera metálica a qual é utilizada como corpo de prova. Para realizar a medição da resiliência é colocada a amostra na base do tubo, então a esfera que se encontra na tampa do tubo é liberada, ao fim da queda, o corpo de prova irá colidir com a espuma e o efeito elástico da espuma faz a esfera retornar a uma determinada altura, é observado qual o valor máximo dessa altura através da graduação do tubo e então é utilizado como porcentagem.

Imagem 6 – Resiliômetro usado para coletar a resiliência das amostras de espuma



Fonte: Elaborado pelo autor.

A resiliência do material é calculada como a razão entre a energia recuperada pelo material durante a recuperação e a energia total aplicada durante a deformação. A energia total aplicada é determinada pela área sob a curva de carga versus deflexão, enquanto a energia recuperada é determinada pela área sob a curva de descarga versus deflexão.

Observou que a resiliência é uma medida relativa da capacidade de um material de retornar à sua forma original após ser submetido a uma deformação e pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a composição química, a estrutura celular e a densidade do material. Portanto, é importante seguir um método padronizado e realizar várias medições para obter uma estimativa precisa da resiliência da espuma de copolímeros, de acordo com a NBR 8619:2015.

A resiliência também pode ser medida em unidades de energia por unidade de volume, como joules por metro cúbico (J/m^3). Quanto maior o valor da resiliência, maior é a capacidade do material de absorver e liberar energia durante uma deformação elástica. A resiliência é uma propriedade importante para materiais que estão sujeitos a cargas de choque ou impacto, como os blocos de espuma.

3.6 Medida da viscosidade dos polióis copolímeros

Com o intuito de relacionar os resultados dos testes com algumas características físicas dos copolímeros dos três fornecedores, inicialmente pensou-se em analisar o teor de sólidos nos três copolímeros, porém essa informação não estava disponível nas fichas técnicas de todos os fornecedores.

Portanto, a análise da viscosidade foi proposta como uma alternativa para correlacionar os resultados obtidos com uma das características dos copolímeros utilizados. A viscosidade pode ser descrita como a resistência interna que um fluido oferece ao movimento, então quanto maior a viscosidade menor será a capacidade de escoar.

Para realizar a medição da viscosidade foi utilizado um viscosímetro rotacional, demonstrado na Imagem 7. Esse equipamento consiste em um painel e um eixo rotativo onde é encaixada a haste adequada para realização do teste. O líquido ou o semilíquido a ser analisado é colocado em um recipiente cilíndrico e posicionado abaixo do viscosímetro, com a haste já posicionada o painel é levado em direção ao recipiente de modo que a superfície da amostra atinja a marca determinada na haste. No painel são selecionadas a velocidade da rotação e a haste utilizada, após isso o teste é iniciado.

Imagem 7 – O viscosímetro rotacional usado na análise da viscosidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

O mesmo procedimento foi feito para os copolímeros dos três fornecedores diferentes. Como a viscosidade é afetada pela temperatura, então os três copolímeros foram colocados no mesmo ambiente por algumas horas antes dos testes para não haver divergências nas suas temperaturas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Utilização de diferentes fornecedores de polióis copolímeros

Utilizar fornecedores diferentes de copolímeros pode trazer vantagens em relação à qualidade, ao preço e à disponibilidade do material. A empresa do estudo conta com três diferentes fornecedores de copolímero, onde o preço do polioliol copolímero é vendido por Kg e se apresenta para o consumidor com os seguintes preços: Fornecedor A - R\$ 7,50, Fornecedor B - R\$ 10,10 e Fornecedor C - R\$ 10,50. Estes valores são referentes ao período do mês de maio de 2023. A utilização de três distribuidores pode ser útil para reduzir custos e melhorar a competitividade do produto final.

O grande problema de se ter somente um fornecedor é o risco de interrupções no fornecimento, atrasos na entrega ou problemas de qualidade. Pois ele pode enfrentar problemas de produção ou logística que afetem a disponibilidade do material. Ao utilizar fornecedores diferentes, é possível diversificar esses riscos e garantir uma maior segurança no abastecimento sendo possível garantir uma maior disponibilidade do material em caso de imprevistos.

No entanto, é importante ressaltar que a utilização de fornecedores diferentes requer uma gestão cuidadosa da cadeia de suprimentos, para garantir a qualidade, a consistência e a conformidade dos materiais recebidos. É preciso avaliar cuidadosamente a capacidade e a confiabilidade dos fornecedores, estabelecer critérios claros de seleção e monitorar regularmente o desempenho dos escolhidos.

4.2 Análise da densidade

Analisando a tabela 4, em ambos os testes é possível identificar um gradiente de aumento de densidade na espuma da parte externa até a parte interna de laminação do bloco, possuindo uma densidade mínima dos testes no Bloco B, variando da parte externa de 34,41 kg/m³ para a parte interna de 35,05 kg/m³. Essa variação pode estar relacionada ao fato de que na parte interna há menos formação de bolhas de ar, causando uma maior concentração de materiais nessa região e conseqüentemente o aumento da densidade no interior dos blocos. Visto que uma variação de densidade entre -10% a +10% é aceitável e que de acordo com a formulação utilizada a densidade esperada seria de 36,9 kg/m³, então os testes estão dentro dos padrões de densidade estabelecidos.

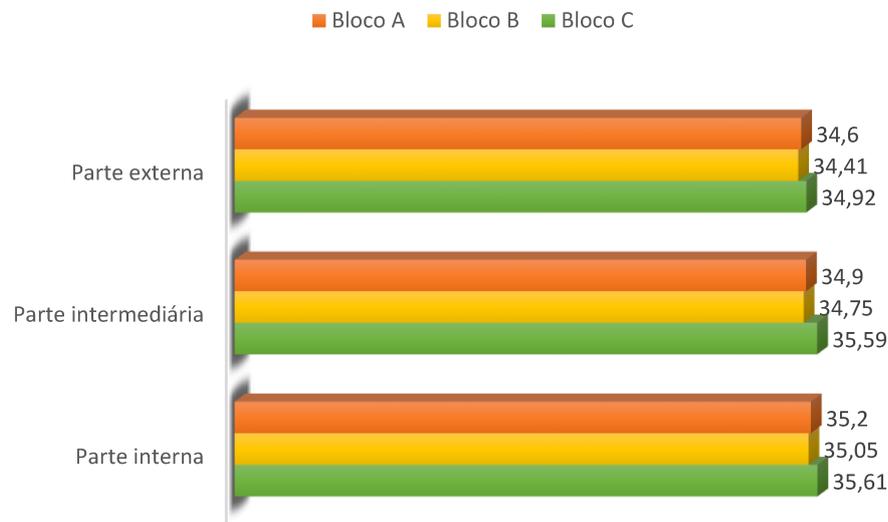
Tabela 4 – Resultado dos testes de densidade da espuma

Densidade das espumas em kg/m³			
	Parte externa	Parte intermediária	Parte interna
Bloco A	34,6	34,9	35,2
Bloco B	34,41	34,75	35,05
Bloco C	34,92	35,59	35,61

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação a máxima densidade apresentada estava no Bloco C, variando da parte externa de 34,92 kg/m³ para a parte interna de 35,61 kg/m³. Isso pode afetar a sua resistência mecânica, sua capacidade de absorção de umidade e outras propriedades físicas

No Gráfico 1, todos os blocos têm densidades próximas e podem ter propriedades muito semelhantes, com apenas pequenas diferenças em suas propriedades físicas. No entanto, essas pequenas diferenças podem ser significativas em certas aplicações.

Gráfico 1 – Densidade dos blocos de espuma em Kg/m³

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressaltando, também não há nenhum agente de expansão além da água e do TDI, que são os mais tradicionais para essa funcionalidade.

4.3 Análise da Dureza

Como forma de reforçar que ocorreram alterações na dureza entre os três blocos de teste, a pesquisa se deteve a fazer testes de dureza utilizando dois durômetros disponíveis: durômetro Shore F (Tabela 5) e durômetro Shore 00 (Tabela 6). Os resultados dos testes em ambos os durômetros demonstraram que a dureza na parte externa do bloco de espuma foi a maior no Bloco C, enquanto os Blocos A e B possuem uma dureza semelhante.

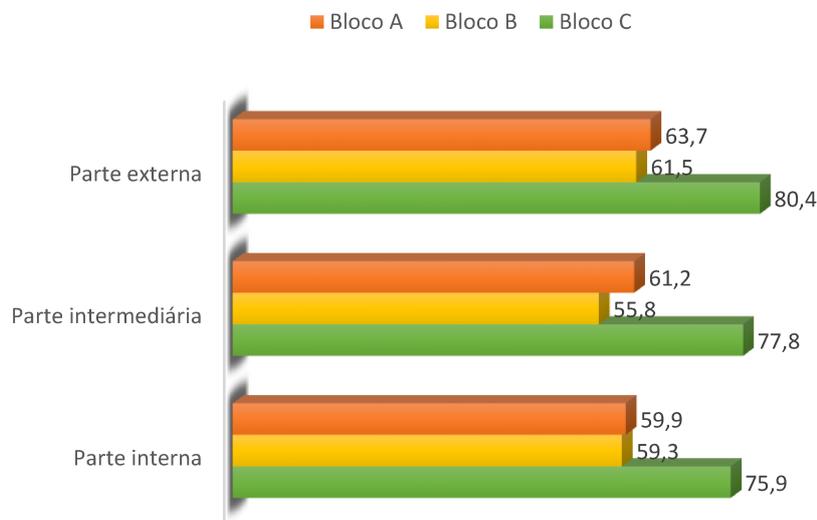
Tabela 5 – Resultado dos testes Shore F de dureza da espuma

Análise da dureza com o durômetro Shore F			
	Parte externa	Parte intermediária	Parte interna
Bloco A	63,7	61,2	59,9
Bloco B	61,5	55,8	59,3
Bloco C	80,4	77,8	75,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na parte intermediária, sendo a amostra retirada na faixa de seis a sete metros de laminação do bloco, foi observado que o Bloco C continua com a maior dureza, porém os Blocos A e B tiveram valores mais distantes, sendo o B com o menor valor de dureza. Os resultados para a parte interna são semelhantes aos da parte externa, onde o Bloco C tem o maior nível de dureza e os Blocos A e B estão com durezas semelhantes entre si.

Gráfico 2 – Resultado dos Testes de Dureza Shore F



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo Gráfico 2 é possível identificar uma pequena diminuição gradativa na dureza da parte externa para a parte interna de ambos os testes, no entanto a parte intermediária do Bloco B não seguiu o mesmo comportamento dos demais.

Nos testes de dureza Shore 00 os resultados seguiram os mesmos padrões dos testes Shore F, onde o Bloco C obteve o maior nível de dureza e os Blocos A e B apresentaram durezas menores e semelhantes entre si.

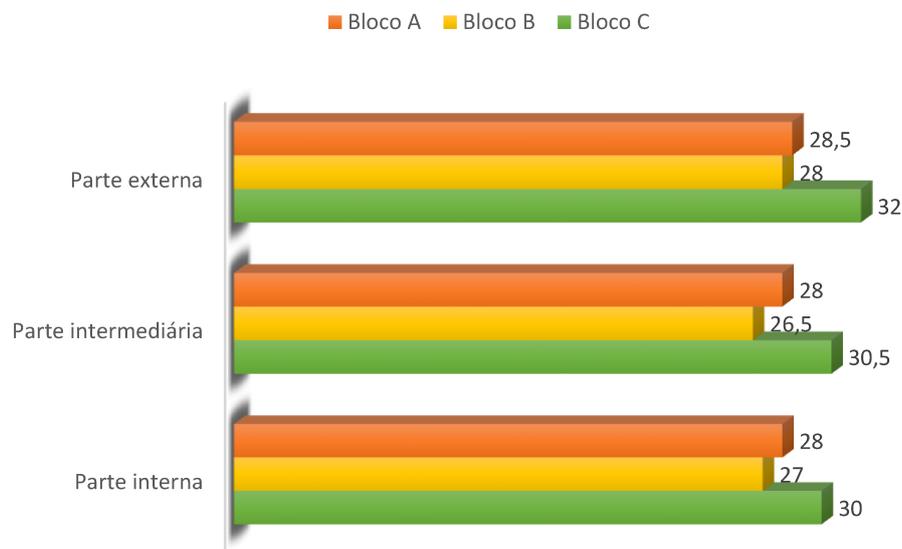
Tabela 6 – Resultado dos testes Shore 00 de dureza da espuma

Análise da dureza com durômetro Shore 00			
	Parte externa	Parte intermediária	Parte interna
Bloco A	28,5	28	28
Bloco B	28	26,5	27
Bloco C	32	30,5	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi observado no Gráfico 3 a existência da mesma diminuição gradativa da parte externa para a interna, que foi identificada nos testes Shore F. A principal diferença entre os testes está nos valores absolutos encontrados, isso se deve ao fato dos equipamentos utilizados, apesar de terem a mesma finalidade, têm mecanismos de funcionamento diferentes.

Gráfico 3 – Resultado dos Testes de Dureza Shore 00



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Análise da Resiliência

O teste de resiliência está apresentado na Tabela 7, os blocos A e B apresentaram resultados muito semelhantes, em contrapartida, o Bloco C apresentou resiliência um pouco menor em comparação com o A e o B.

Tabela 7 – Resultado dos testes de resiliência da espuma

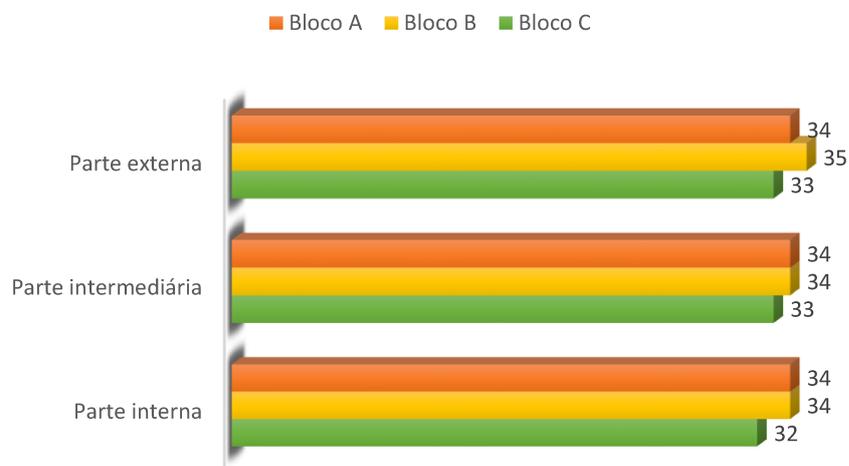
Análise da resiliência das espumas em %			
	Parte externa	Parte intermediária	Parte interna
Bloco A	34	34	34
Bloco B	35	34	34
Bloco C	33	33	32

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do Bloco C foi possível identificar que existe uma relação entre a dureza e a resiliência, por ter mais dureza a sua resiliência é a menor de todas. Pois uma resiliência menor pode indicar que a espuma não possui a capacidade de resistir a impactos ou cargas repetidas sem sofrer deformações permanentes ou danos. Isso pode resultar em uma deterioração prematura da espuma ou em falhas do produto final que utiliza a espuma como componente.

Conforme o gráfico 4 a resiliência da espuma pode variar em diferentes pontos ao longo do bloco dependendo da densidade e distribuição das células na espuma. Em alguns casos, a parte intermediária do bloco de espuma pode ter uma resiliência melhor do que a parte externa.

Gráfico 4 - Resiliência da espuma em %



Fonte: Elaborado pelo autor.

Isso pode ocorrer porque a parte interna do bloco de espuma geralmente é menos exposta ao ambiente externo do que a parte externa, o que pode ajudar a preservar a integridade da estrutura celular da espuma.

No entanto, é importante lembrar que a resiliência da espuma deve ser avaliada em toda a sua extensão, e não apenas em pontos isolados do bloco. Pois é uma propriedade responsável por garantir que a espuma seja capaz de suportar as cargas e impactos esperados, e que possa manter sua forma original ao longo do tempo. Portanto, foi importante realizar testes em vários pontos do bloco para avaliar suas médias de resiliências e garantir que ela seja adequada para a aplicação desejada.

Portanto, diante dos resultados de dureza e resiliência foi possível identificar que os polióis copolímeros de diferentes fornecedores alteraram as características das espumas. Enquanto os blocos A e B apresentaram características semelhantes entre si, o Bloco C não obteve a mesma semelhança.

4.5 Análise da viscosidade

Na Tabela 8 são mostrados os resultados do teste de viscosidade do polioli copolímero dos três fornecedores, a temperatura do fluido no momento do teste, a haste utilizada de acordo com a faixa de viscosidade e a velocidade de rotação da haste aplicada em cada teste.

Tabela 8 – Resultado dos testes de viscosidade

Análise de Viscosidade				
	Haste usada	RPM	Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)
Poliol Copolímero A	R5	60	29,9	3120
Poliol Copolímero B	R5	60	30,4	3040
Poliol Copolímero C	R5	60	30,1	4210

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados demonstraram que os Testes para os Copolímeros A e B apresentaram uma viscosidade muito semelhantes, enquanto o Teste C apresentou uma viscosidade mais elevada em comparação aos outros, podendo haver relação com o nível de teor de sólidos de um copolímero para outro.

A faixa do teor de sólidos foi encontrada apenas na ficha técnica de um dos copolímeros, como mostra a Tabela 9, as fichas técnicas dos demais fornecedores não disponibilizavam essa informação.

Tabela 9 – Faixa de teor de sólidos

Faixa de teor de sólidos (40°C)	
Poliol Copolímero A	-
Poliol Copolímero B	-
Poliol Copolímero C	41,5 a 44,5 wt%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida foi uma das principais formas de adquirir conhecimento na área científica de espumas de poliuretano que é de suma importância em diversos setores industriais. Devido ao fato de ter sido realizada em um ambiente industrial com acesso aos equipamentos laboratoriais foi possível coletar amostras e realizar os testes da mesma maneira como ocorre no cotidiano da empresa, isso proporciona resultados mais próximos aos obtidos em uma produção de larga escala.

Com relação às características das espumas, os resultados apresentados nos gráficos e nas tabelas mostram que as densidades de ambos os testes não sofreram grandes alterações a ponto de poder afirmar ser uma interferência do polioli copolímero, então, apesar das diferenças, a média da densidade manteve-se dentro da faixa aceitável para formula utilizada.

Em geral, os resultados dos testes mostraram pequenas variações entre as partes, externa, intermediária e interna, mas são valores muito próximos e não interferem nos resultados do estudo. Os valores de densidade dentro da faixa aceitável indicam que os blocos se expandiram como esperado e estavam adequados para os testes.

A dureza observada é um ponto importante no estudo, pois foi a característica que sofreu a maior interferência para o polioli copolímero do fornecedor C. Enquanto os Testes A e B apresentaram níveis de dureza semelhantes, no Teste C foi identificada uma dureza Shore F de aproximadamente 26% maior do que os Testes A e B e uma dureza Shore 00 de aproximadamente 10% maior.

Os resultados da resiliência mostraram que os Testes A e B apresentaram valores muito próximos, em contrapartida, o Teste C obteve uma resiliência um pouco menor. Apesar disso, os três testes apresentaram valores consistentes com pequenas variações entre as três partes do bloco. A faixa de resiliência para esse tipo de espuma é entre 27 e 35%, então os testes estão dentro do padrão.

Assim, foi possível identificar que os polióis copolímeros de fornecedores diferentes podem interferir diretamente na dureza das espumas e conseqüentemente ocasionar uma pequena variação na resiliência e resistência à fadiga. Por meio dos testes de viscosidade dos copolímeros, foi compreendido que a viscosidade é uma característica que proporciona essas alterações de dureza.

O Índice de TDI, o teor de sólidos e o teor de água são elementos responsáveis pelo aumento da dureza. Desse modo, o índice de TDI foi o mesmo para os todos os testes e o teor de água informado pelos fornecedores dos copolímeros são iguais.

No entanto, o teste de teor de sólidos não é informado por todos os fornecedores, portanto, essas diferenças de viscosidades podem estar relacionadas com diferentes teores de sólidos de cada fornecedor.

Com relação ao custo benefício, comparando o ganho de dureza e o custo de aquisição, o copolímero A é o mais adequado, visto que o copolímero C tem um custo de aproximadamente 40% maior e proporciona um aumento médio de dureza Shore 00 de apenas 10%. Enquanto o copolímero B apresentou a menor eficiência, mantendo as características semelhantes ao A, porém, sendo o insumo de custo mais elevado de todos.

Possuir diferentes fornecedores é imprescindível para o bom funcionamento industrial, porém é necessário realizar um acompanhamento da qualidade dos insumos adquiridos para garantir que estejam dentro dos padrões utilizados e desse modo seja possível minimizar as interferências nas características do produto final.

Futuros estudos podem elaborar pesquisas baseadas na reprodução dos testes em blocos de grande escala com o objetivo de comprovar os resultados encontrados, além disso, trabalhos com a utilização de copolímeros com diferentes faixas de viscosidades podem contribuir para o aumento de conhecimento técnico e científico, proporcionando mais informações aos profissionais de engenharia química e das indústrias para que possam aplicar melhorias nos processos de espumação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química. **Poliuretano**. Disponível em: <http://www.abiquim.org.br/poliuretanos/aplicacoes.asp>. Acesso em: 04 de maio de 2023.

AZENDA, J. M. R. (org). **Tintas e vernizes: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: ABRAFATI, 1995

VILAR, W. D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2002.

FERNANDES, Viviane Kettermann; MARTENDAL, Caroline Pereira. **Elastômeros termoplásticos**. 2016. Disponível em: <https://engenheirodemateriais.com.br/2016/06/29/elastomeros-termoplasticos/>. Acesso em: 13 de ago. de 2023.

Maximize Market Research. **Polyurethane Foam Market: Global Industry Analysis and Forecast 2023-2029**. Disponível em: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-polyurethane-foam-market/95701>. Acesso em: 20 de ago. de 2023

GURGEL, D. **Desenvolvimento de materiais poliméricos de poliuretano utilizando resíduos industriais e óleo de mamona** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 106 p. 2019.

LIMA V. - **Estudo de Catalisadores Organometálicos na Síntese de Poliuretanos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais – PGETEMA; Porto Alegre, Fevereiro de 2007.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. E. – “**Caracterização de polímeros: Determinação de peso molecular e análise térmica**”, E-papers, Rio de Janeiro (2001).

MALCOLM PS. *Polymer Chemistry An Introduction*. 3rd ed. New York: Oxford University Press; 1999.

MANNES. **Qualidade**. Disponível em: <https://mannes.com.br/pt/empresa/qualid>. Acesso em 18 de maio de 2023.

MOTTA, Bruno César Silva. **Estudo do Efeito do uso de polioli reciclado nas propriedades mecânicas da espuma rígida de poliuretano**. 2011. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PAOLI, Marco-aurelio de; ANDRADE, João Carlos de. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Chemkeys, 2008. 221 p. Disponível em: <http://www.chemkeys.com/blog/wp-content/uploads/2008/09/polimeros.pdf>. Acesso em: 06 de jul. de 2023.

ROSTAMI-TAPEH-ESMAEIL, E., VAHIDIFAR, A., ESMIZADEH, E., & RODRIGUE, D. (2021). *Chemistry, Processing, Properties, and Applications of Rubber Foams. Polymers* 2021, Vol. 13, Page 1565, 13(10), 1565. <https://doi.org/10.3390/POLYM13101565>

SOARES M. S.- **Síntese e caracterização de espumas de poliuretano para imobilização de células integradas e aplicação na síntese de biodiesel.** Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena. Lorena 2012

SZYCHER M. *Szycher's Handbook of Polyurethanes.* 2.a ed. CRC Press; 2012.