

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE QUÍMICA**

**Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional em Tecnologia em  
Química e Bioquímica**

**ROBERTO VAGNER LUIZ**

**Estudo da distribuição do polietileno tereftalato  
micronizado em espumas flexíveis de poliuretano**

Versão original da Dissertação corrigida

São Paulo

Data do Depósito na SPG:  
01/12/2022

ROBERTO VAGNER LUIZ

**Estudo da distribuição do polietileno tereftalato  
micronizado em espumas flexíveis de poliuretano**

*Dissertação apresentada ao Instituto de Química  
da Universidade de São Paulo para obtenção do  
Título de Mestre em Ciências, Área de  
Concentração Tecnologia em Química e  
Bioquímica.*

*Orientador: Prof. Dr. Frank Herbert Quina*

São Paulo

2022

Ficha Catalográfica elaborada eletronicamente pelo autor, utilizando o programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP e adaptado para a Divisão de Biblioteca e Documentação do Conjunto das Químicas da USP

Bibliotecária responsável pela orientação de catalogação da publicação:  
Marlene Aparecida Vieira - CRB - 8/5562

L953e Luiz, Roberto Vagner  
Estudo da distribuição do polietileno tereftalato  
micronizado em espumas flexíveis de poliuretano /  
Roberto Vagner Luiz. - São Paulo, 2022.  
82 p.

Mestrado Profissional - Instituto de Química da  
Universidade de São Paulo. Departamento de Química  
Fundamental.

Orientador: Quina, Frank Herbert

1. Poliuretanos. 2. Espumas flexíveis. 3. PET. 4.  
Fluorescência. 5. ABNT. I. T. II. Quina, Frank  
Herbert, orientador.



Universidade de São Paulo  
**Instituto de Química**

"Estudo da distribuição do polietileno tereftalato micronizado em espumas flexíveis de poliuretano"

**ROBERTO VAGNER LUIZ**

Dissertação de Mestrado submetida ao Instituto de Química da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Programa: Mestrado Profissional em Tecnologia em Química e Bioquímica.

**APROVADO(A) POR:**

---

**Prof. Dr. Frank Herbert Quina**  
(Orientador e Presidente)

---

**Prof. Dr. Roberto Guardani**  
EP - USP

---

**Prof. Dr. Márcio Yee**  
UNIFESP - SANTOS

**SÃO PAULO**  
15 de fevereiro de 2023

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, especialmente aos meus pais por terem me orientado desde muito cedo a seguir pelo caminho do trabalho e dos estudos.

À minha esposa Alessandra por toda cumplicidade, paciência e apoio contínuo incondicional durante toda esta jornada.

De modo muito especial à minha filha Sofia Maria, uma criança maravilhosa que sempre me encantou como fonte inesgotável de energia e inspiração para a realização deste grande sonho. “Sofia, sua energia me move, você foi a principal razão que me fez aceitar este desafio e este trabalho é seu minha querida!”.

Ao Prof. Dr. Alcindo Aparecido dos Santos, pela ótima recepção, calorosas boas-vindas iniciais, apresentação detalhada do curso e excelente suporte, supervisão e acompanhamento durante todo este período.

Ao Prof. Dr. Frank Herbert Quina por todo privilégio e orgulho que tive de sua orientação, pelas várias aulas e ensinamentos, por ter trabalhado sempre ao meu lado com absoluto incansável esforço, extremo entusiasmo e por toda alta autoridade que ele representa na academia. Realmente aprendi muito com seu vasto conhecimento e humildade.

A todo Corpo Docente do Mestrado Profissional do IQ-USP de modo especial e com muito respeito aos Professores Dr. Alexander Henning Ulrich, Dra. Liliana Marzorati, Dr. Koiti Araki, Dra. Denise Siqueira Petri, Dr. Leandro Helgueira de Andrade, Dr. Erick Leite Bastos, Dr. Paulo Roberto Moreno e Dr. Abel Oliveira. Muito obrigado pelo altíssimo nível de todas as aulas que tanto me impressionaram.

Ao caro amigo Dr. Gustavo Thalmer que esteve sempre ao meu lado e ajudou de forma tão habilidosa, amigável e competente nas análises das espumas.

Ao Milton e ao Vanderlei, membros da Secretaria de Pós-graduação, por todo apoio, paciência e alto profissionalismo sempre me ajudando e orientando quanto aos procedimentos e normas – muito obrigado!

Aos caros amigos Celso, Clodoaldo, Agesislau e Marília, técnicos especialistas em poliuretanos da Evonik Brasil, que deram um suporte técnico de altíssimo nível e absolutamente fundamental nos vários ensaios realizados com as espumas.

À Empresa Cristalmaster pelo fornecimento do PET fluorescente e de todas as informações de maneira muito profissional e ao amigo Cleverson da Empresa Lyondell pela etapa de moagem do PET fluorescente, pouco disponível no mercado, porém realizada com muito sucesso.

*“I am among those who think that science has great beauty.  
A scientist in his laboratory is not only a technician: he is also a child placed before natural  
phenomena which impress him like a fairy tale.”*

Marie Curie

## RESUMO

Luiz, R. V. **Estudo da distribuição do polietileno tereftalato micronizado em espumas flexíveis de poliuretano**. 2022. 82p. Dissertação Mestrado Profissional - Programa de Pós-Graduação de Tecnologia em Química e Bioquímica. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo

A produção de espumas flexíveis de poliuretano usa 97% de produtos commodities e 3% de especialidades químicas. Como consequência, os commodities representam mais de 90% do custo das matérias primas. Historicamente a indústria sempre buscou alternativas para substituí-los, ao menos de forma parcial. Durante décadas foram utilizadas cargas minerais diversas em substituição aos commodities, mas estas foram abolidas em 2011 pela normatização dos colchões pela ABNT e INMETRO, que estipulou um teor de cinzas máximo de 1%. O uso de Polietileno Tereftalato (PET) reciclado micronizado como uma carga orgânica alternativa é tecnicamente viável até pelo menos 21,9% PET, o que representaria uma redução de custo de 5 a 10% por bloco de espuma produzido, além do apelo ecológico de oferecer um destino mais nobre para um material reciclado. A marcação fluorescente do PET micronizado permite visualizar a distribuição tridimensional do PET nas espumas de poliuretano e relacioná-la à manutenção das propriedades físicas normatizadas quando do emprego de surfactante especial adequado.

**Palavras-chave:** poliuretanos, espumas flexíveis, PET, fluorescência, ABNT, propriedades físicas.

## ABSTRACT

Luiz, R. V. **Study of the distribution of micronized polyethylene terephthalate in flexible polyurethane foams.** 2022. 82p. Professional Master Dissertation - Graduate Program in Chemistry and Biochemistry Technology. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.

The production of flexible polyurethane foams uses 97% commodity products and 3% specialty chemicals. Therefore, commodities represent more than 90% of the raw material costs. Historically, the industry has always procured alternatives to replace them, at least partially. Therefore, for decades, different mineral fillers were used to replace commodities, but these were prohibited by the 2011 ABNT standardization of mattresses that stipulated an ash content of maximum 1%. The use of micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an organic filler is technically feasible up to at least 21.9%, representing a cost reduction of 5 to 10% per foam block produced, in addition to the ecological appeal of offering a more noble destination for recycled material. The fluorescent marking of micronized PET permits the visualization of the three-dimensional distribution of PET in Polyurethane Foams and relate it to the maintenance of the standard physical properties when an adequate surfactant is employed.

**Keywords:** polyurethanes, flexible foams, PET, fluorescence, ABNT, physical properties.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLD	Compression Load Deflection
EO	Ethylene Oxide
HR	High Resilience
ILD	Indentation Load Deflection
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MDI	Metileno-difenil-diisocianato
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno Tereftalato
PO	Propylene Oxide
PPHP	Parts Per Hundred Parts of Polyol
PU	Poliuretano
SiC	Família de Surfactantes de Silicone com estrutura química Si-C
SiOC	Família de Surfactantes de Silicone com estrutura química Si-O-C
TDI	Tolueno-diisocianato

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – A formação do uretano e a formação de CO <sub>2</sub> , que produz a expansão da espuma .....	14
Figura 2 – Exemplos do emprego de cargas minerais nos diferentes tipos de espumas .....	15
Figura 3 – Influência na densidade da espuma.....	16
Figura 4 – Influência na dureza da espuma.....	16
Figura 5 – Influência na resistência à tração da espuma .....	17
Figura 6 – Influência na resistência ao alongamento da espuma .....	17
Figura 7 – Influência na resiliência da espuma .....	18
Figura 8 – Influência na deformação permanente da espuma .....	18
Figura 9 – ABNT NBR 13579-1:2011: Espuma flexível de poliuretano.....	19
Figura 10 – Consumo de PU mundial.....	27
Figura 11 – Consumo de PU América Latina .....	28
Figura 12 – Consumo de PU Brasil.....	28
Figura 13 – Espumas flexíveis produzidas na empresa Luckspuma .....	30
Figura 14 – Espumas flexíveis produzidas na empresa Luckspuma .....	31
Figura 15 – Cálculo econômico da utilização do PET micronizado em espumas de poliuretano.....	31
Figura 16 – Funções dos surfactantes na produção de espuma flexível de poliuretano.....	33
Figura 17 – Fórmula estrutural típica de um Surfactante de Silicone .....	34
Figura 18 – Fórmulas estruturais típicas de Surfactantes de Silicone SiC e SiOC .....	35
Figura 19 – Resumo das etapas envolvidas na formação da espuma flexível de poliuretano.....	39
Figura 20 – Corpos de prova utilizados nos ensaios físicos.....	40
Figura 21 – Dinamômetro .....	40
Figura 22 – Um bloco de espuma de PU de 25x25x25 cm contendo 10% de PET micronizado fluorescente, ilustrando o fatiamento do bloco de espuma nos sentidos horizontal (H) e vertical (V) para obter os corpos de prova e avaliar a distribuição espacial da fluorescência. ....	42
Figura 23 – Ilustração do seccionamento dos blocos de espumas de 25x25x25 cm em lâminas na horizontal (designado H1-H7 do fundo ao topo) e na vertical (designado V1-V7 de fora para dentro). ....	42
Figura 24 – Cor da fluorescência e estrutura química da fluoresceína.....	43
Figura 25 – Espumas preparadas com pigmento verde.....	52
Figura 26 – Espumas preparadas com pigmento verde: foto ampliada.....	52
Figura 27 – Espumas preparadas com pigmento rosa. ....	53
Figura 28 – Espumas preparadas com pigmento rosa: foto ampliada.....	53
Figura 29 – Lâminas horizontais - Surfactante Convencional. ....	55
Figura 30 – Lâminas horizontais - Surfactante Especial. ....	55
Figura 31 – Lâminas verticais - Surfactante Convencional. ....	56
Figura 32 – Lâminas verticais - Surfactante Especial. ....	56
Figura 33 – Foto ampliada 10H3 – Surfactante Convencional. ....	57
Figura 34 – Foto ampliada 10H3 – Surfactante Especial.....	57
Figura 35 – Foto ampliada 10V1 – Surfactante Convencional. ....	57
Figura 36 – Foto ampliada 10V1 – Surfactante Especial.....	58
Figura 37 – Foto ampliada 15H4 – Surfactante Convencional. ....	58
Figura 38 – Foto ampliada 15H4 – Surfactante Especial.....	58
Figura 39 – Lâminas com Surfactante Convencional. ....	60
Figura 40 – Lâminas com Surfactante Especial. ....	60

Figura 41 – Microscopia ampliada indicando o acúmulo da fluorescência nas bordas de Plateau (indicada no diagrama) nas espumas de PU marcados com PET micronizado fluorescente. ....	61
Figura 42 – Comparação das fotografias de fluorescência de duas diferentes lâminas de espuma D28_10 contendo 10 pphp de PET micronizado fluorescente, uma lâmina horizontal (10H3) de espuma preparada com surfactante SiC com uma lâmina (10V1) de espuma preparada com surfactante SiOC. ....	62
Figura 43 – Ilustração do procedimento de tratamento das imagens para visualização da distribuição espacial do PET micronizado fluorescente nas espumas de poliuretano. (a) cor original da imagem digital da fluorescência sob iluminação de 366 nm da lâmina 10V1 (vide figura 42) da espuma de poliuretano contendo 10 pphp de PET micronizado fluorescente e preparado com surfactante SiOC; (b) imagem correspondente convertida para cor branca com fundo preto após ajustes de nitidez, brilho e saturação para remover a fluorescência de fundo difusa; (c) imagem final com inversão para cor preta com fundo branco.....	64
Figura 44 - Imagens das lâminas (a) horizontal e (b) vertical indicando a distribuição tridimensional da fluorescência no bloco de espuma de poliuretano D28_10 contendo 10 pphp PET micronizado fluorescente produzido com surfactante SiC.....	64
Figura 45 – Imagens das lâminas (a) horizontal e (b) vertical indicando a distribuição tridimensional da fluorescência no bloco de espuma de poliuretano D28_10 contendo 10 pphp PET micronizado fluorescente produzido com surfactante SiOC.....	65
Figura 46 – Microfotografias de fluorescência (excitação 470 nm; emissão >515 nm) de regiões selecionadas das superfícies das lâminas de espumas de poliuretanos contendo 10 pphp (D28_10) ou 21.9 pphp (D28_20) de PET micronizado fluorescente preparadas com surfactante SiOC: (a) lâmina 20H4 ampliada 40X; (b) lâmina 20V5 ampliada 25X; (c) lâmina 10V3 ampliada 25X; ou com surfactante SiC: (d) lâmina 20V5 ampliada 10X. ....	66

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Reagentes utilizados.....	37
Tabela 2 – Resultados das análises das espumas .....	46
Tabela 3 – Resultados das análises das espumas .....	47
Tabela 4 – Desvios % típicos (D23).....	48
Tabela 5 – Desvios % típicos (D28).....	49
Tabela 6 – Desvios % típicos (espumas com PET micronizado comum).....	49
Tabela 7 – Desvios % típicos (espumas com PET micronizado fluorescente) .....	50
Tabela 8 – Comparativo principais desvios .....	50
Tabela 9 – Propriedades mais afetadas pelo uso de PET micronizado (comum e fluorescente) .....	51

# ÍNDICE DE ASSUNTOS

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1. Poliuretanos.....	14
1.2. A mudança nas normas e uma alternativa encontrada pela Indústria de Poliuretano.....	19
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	21
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
3.1. O PET é o plástico número 1 em reciclagem .....	22
3.2. Poliuretanos.....	24
3.3. Produção de Espumas de Poliuretano .....	26
3.4. A utilização do PET micronizado pela Indústria de Poliuretano .....	29
3.5. Economia financeira proporcionada pelo PET reciclado micronizado .....	31
3.6. O importante papel desempenhado pelos Surfactantes e suas principais funções .....	32
3.7. Comparação entre Surfactantes Convencionais (SiC) e Surfactantes Especiais (SiOC).....	33
3.8. Reciclagem de PU.....	35
<b>4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS</b> .....	37
4.1. Reagentes utilizados na produção de poliuretanos.....	37
4.2. Produção das espumas com PET micronizado comum.....	38
4.3. Produção das espumas com PET micronizado fluorescente feito em laboratório.....	41
4.4. Produção das espumas com PET micronizado fluorescente (Cristalmaster) .....	43
4.5. Análises do PU marcado com PET micronizado fluorescente.....	43
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	45
5.1. Produção das espumas com PET micronizado comum.....	45
5.2. Análise das propriedades físicas das espumas com PET micronizado comum.....	45
5.3. Análise das propriedades físicas das espumas com PET micronizado fluorescente .....	47
5.4. Dados estatísticos .....	48
5.5. Análises por marcação com fluoresceína .....	51
5.5.1 Fotografias digitais .....	51
5.5.2 Análises microscópicas .....	59
5.5.3 Medidas macroscópicas de fluorescência.....	62
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	67
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69
<b>APÊNDICE A – FICHA TÉCNICA DO PET COMUM</b> .....	73

APÊNDICE B – FICHA TÉCNICA DO PET FLUORESCENTE.....	74
APÊNDICE C – FICHA TÉCNICA DO ARCOL® HS-100 .....	75
APÊNDICE D – FICHA TÉCNICA DO TEGOSTAB® B 8040.....	76
APÊNDICE E – FICHA TÉCNICA DO TEGOSTAB® B 8115 .....	77
APÊNDICE F – FICHA TÉCNICA DO DABCO® 33 LV.....	78
APÊNDICE G – FICHA TÉCNICA DO KOSMOS® T9 .....	79
APÊNDICE H – FICHA TÉCNICA DO ARCOL® F-3040 .....	80
APÊNDICE I – FICHA TÉCNICA DO DESMODUR® T-80.....	81
APÊNDICE J – CERTIFICADO DE ANÁLISE DE ESPUMA D28 DA LUCKSPUMA .....	82

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Poliuretanos

A indústria de Poliuretano tem nas espumas flexíveis o seu principal segmento de mercado no Brasil. Isto se deve ao poder aquisitivo médio da população, que limita seu acesso a produtos de custo mais baixo como os colchões, principais produtos derivados das espumas flexíveis. Existem mais de 600 fabricantes de colchões em atividade espalhados por todo território nacional.

A produção das espumas flexíveis é feita com o uso de 97% de produtos químicos commodities (polióis e isocianatos são os principais) e com outros 3% de especialidades químicas (surfactantes e catalisadores como principais). Como consequência, os commodities (baixo valor agregado) representam mais de 90% do custo das matérias-primas enquanto as especialidades químicas representam menos que 10% (alto valor agregado).

A produção do poliuretano se dá basicamente através de duas reações químicas principais (Figura 1), ou seja, a reação de polimerização entre um polioli e um isocianato, resultando na formação do poliuretano e a reação de expansão entre o isocianato e a água, formando o gás carbônico, fundamental para expandir o polímero final nas dimensões desejadas. A ocorrência simultânea dessas duas reações produz, então, um polímero expandido ou espuma de poliuretano.

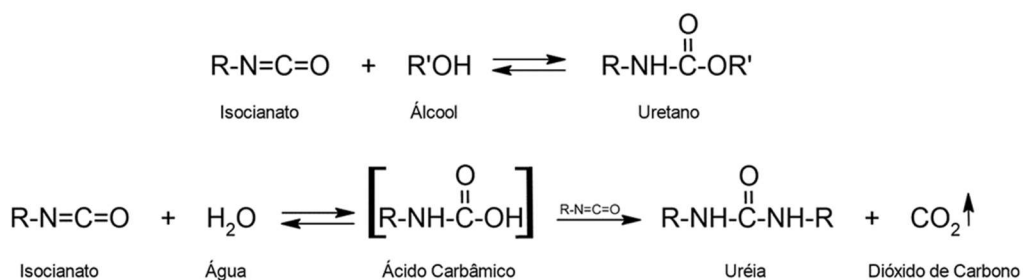


Figura 1 – A formação do uretano e a formação de CO<sub>2</sub>, que produz a expansão da espuma  
 Fonte: Dow Polyurethanes: Flexible Foams. Texas, USA, 1997.

Historicamente a indústria sempre buscou alternativas para substituir as matérias-primas, ao menos de forma parcial. Portanto, durante décadas foram utilizados produtos alternativos como cargas minerais diversas, óleo de mamona, etc., em substituição parcial aos commodities.

Com o objetivo de reduzir os custos de produção das espumas, durante quase 50 anos foram adicionadas cargas minerais de baixo preço, principalmente  $\text{CaCO}_3$  (SANT'ANNA et al., 2008), na formulação das espumas flexíveis de poliuretano. Diferentes cargas minerais foram utilizadas ao longo deste tempo (Figura 2). Entretanto, a redução de custos implicava num certo comprometimento das propriedades físicas, durabilidade, performance e conforto das espumas finais produzidas.

<b>CARGA</b>	<b>Teor %</b>	<b>APLICAÇÃO/COMENTÁRIOS</b>
Carbonato de cálcio	05 - 30	Uso geral, para reduzir custos
Sulfato de bário	05 - 50	Espumas flexíveis e semi-rígidas, para absorção de som
Fibras de vidro	10 - 50	Espumas rígidas e elastômeros (RIM)
Silicas	01 - 10	Selantes, adesivos e elastômeros
Micro esferas de vidro	02 - 30	Espumas rígidas, elastômeros microcelulares
Melamina	05 - 40	Espumas flexíveis, como retardante a chama

Figura 2 – Exemplos do emprego de cargas minerais nos diferentes tipos de espumas  
Fonte: VILAR, WALTER, 2004.

De fato, os efeitos do emprego das cargas minerais nas espumas foram estudados por algumas empresas. Conforme demonstrado pelos gráficos abaixo, a Evonik Industries (Alemanha) fez um estudo sobre os efeitos da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e barita ( $\text{BaSO}_4$ ) nas propriedades das espumas. Demonstrou-se que as cargas minerais, se de um lado traziam o “benefício” do aumento da densidade (Figura 3) e da dureza aparente (Figura 4), de outro lado causavam um empobrecimento nas propriedades físicas das espumas tais como resistência à tração (Figura 5), alongamento à ruptura (Figura 6), resiliência (Figura 7) e deformação permanente (Figura 8).



### Influência na densidade da espuma

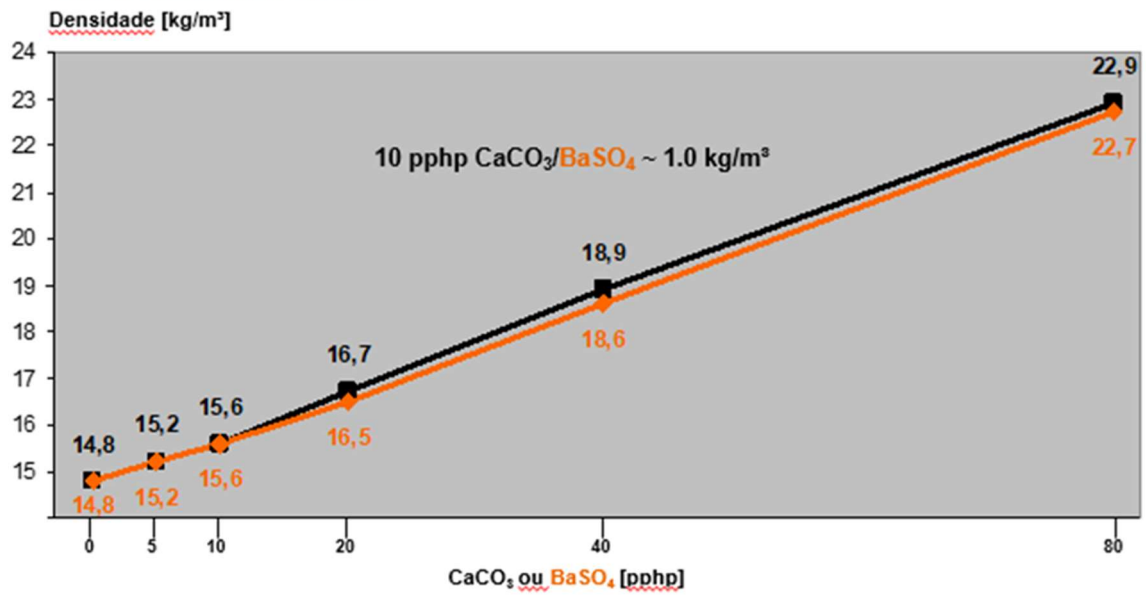


Figura 3 – Influência na densidade da espuma  
Fonte: Laboratórios Evonik Industries AG, 2020.

### Influência na dureza

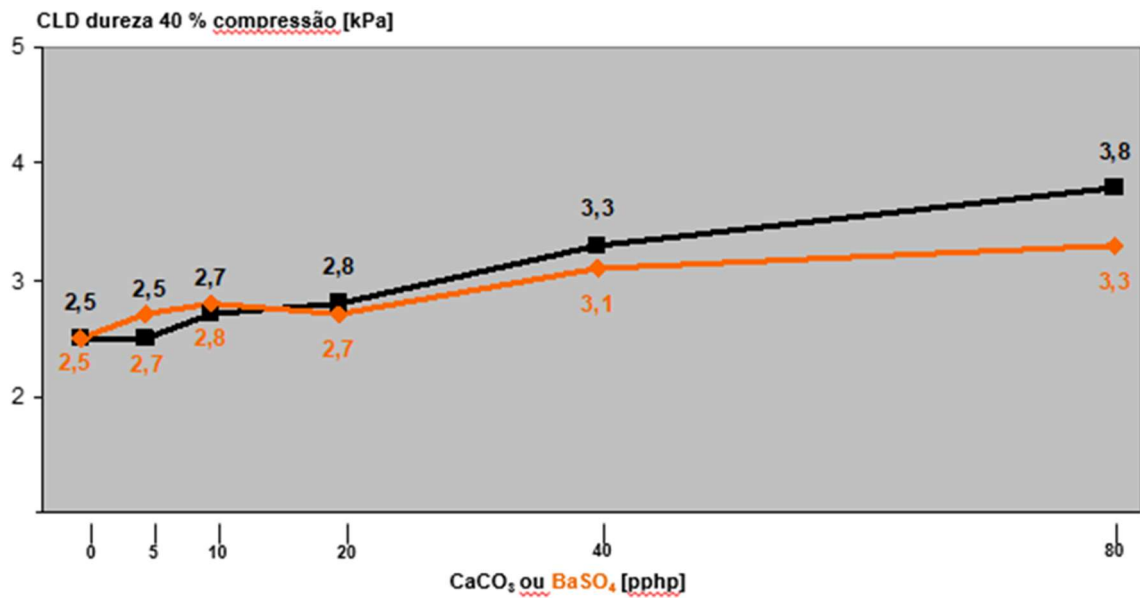


Figura 4 – Influência na dureza da espuma  
Fonte: Laboratórios Evonik Industries AG, 2020.

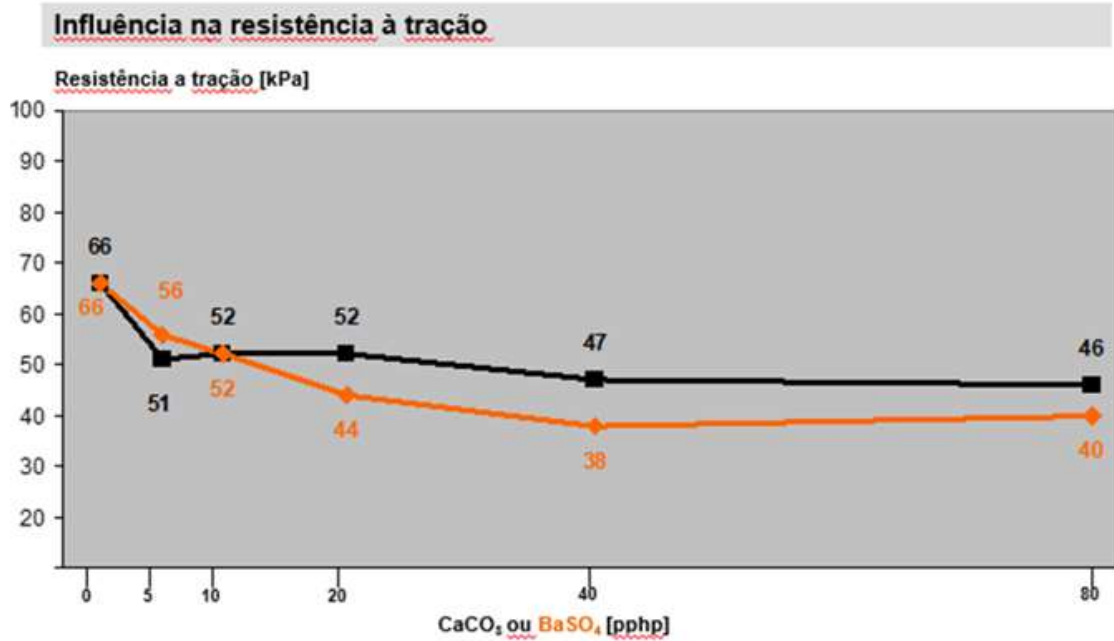


Figura 5 – Influência na resistência à tração da espuma  
 Fonte: Laboratórios Evonik Industries AG, 2020.

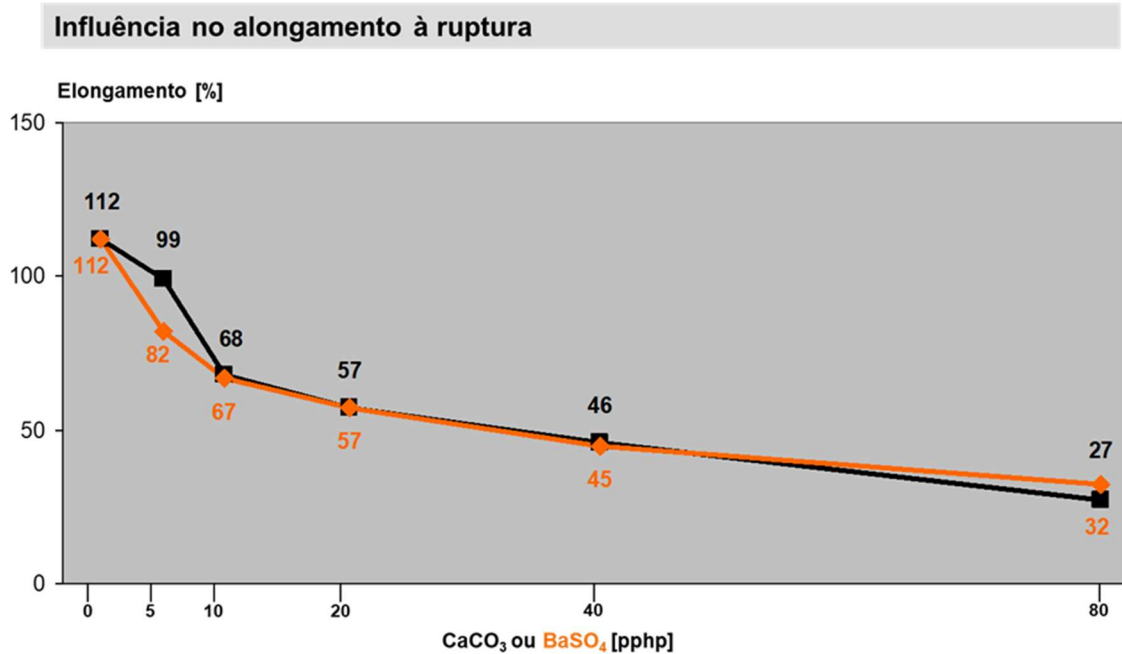


Figura 6 – Influência na resistência ao alongamento da espuma  
 Fonte: Laboratórios Evonik Industries AG, 2020.

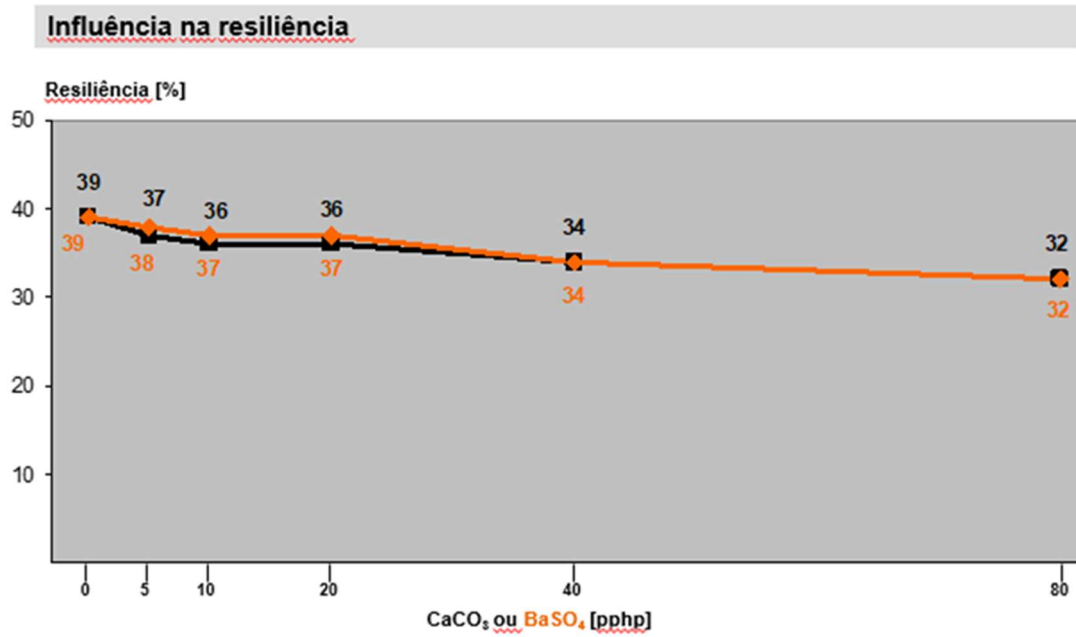


Figura 7 – Influência na resiliência da espuma  
Fonte: Laboratórios Evonik Industries AG, 2020.

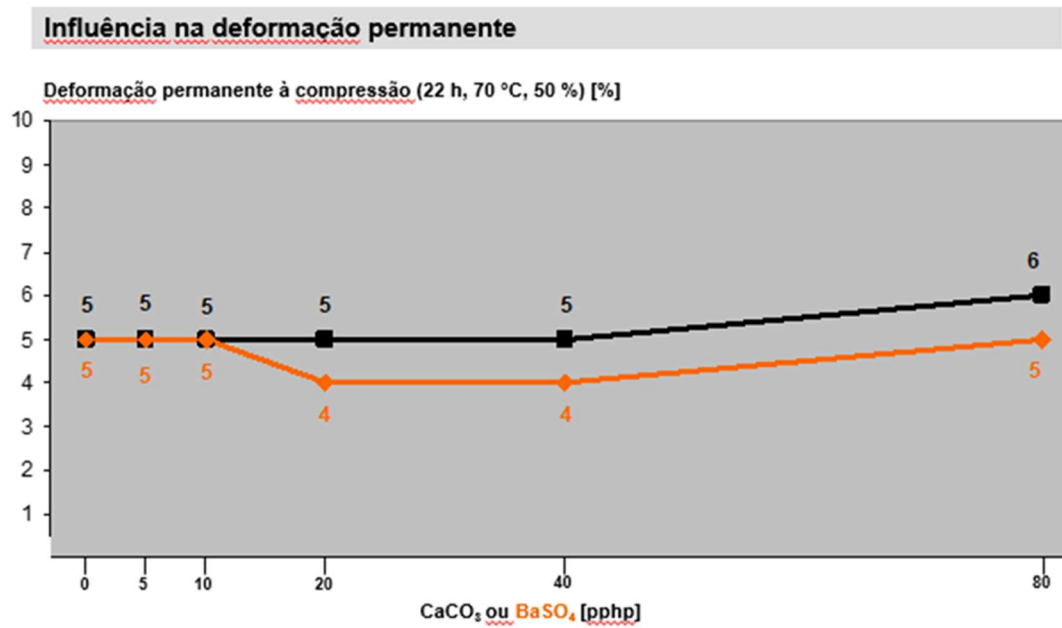


Figura 8 – Influência na deformação permanente da espuma  
Fonte: Laboratórios Evonik Industries AG, 2020.

## 1.2. A mudança nas normas e uma alternativa encontrada pela Indústria de Poliuretano

O uso de cargas minerais passou a ser proibido a partir de 2011 com a normatização das propriedades de colchões pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 13579-1:2011) e INMETRO, que limitou o teor de cinzas das espumas ao máximo de 1%.

As especificações da Norma ABNT NBR 13579-1:2011 são resumidas na Figura 9 para espumas flexíveis de densidades D18 a D45 (em kg/m<sup>3</sup>), que determina a característica do colchão e suas propriedades como dureza, fator de conforto, fadiga dinâmica, resiliência, deformação permanente à compressão e teor de cinzas. Esta faixa de densidades é necessária para atender a todas as idades e pesos dos consumidores. Quanto maior o peso da pessoa tão mais alta a densidade necessária para garantir o suporte de carga e o conforto (a densidade 18 kg/m<sup>3</sup>, por exemplo, é utilizada para berço infantil). As faixas de valores das propriedades variam de acordo com a variação de densidade.

Propriedades	D18 <sup>c</sup>	D20	D23	D26	D28	D33	D40	D45
Força de indentação (F.I.) <sup>a</sup> Dureza a 40%, N (min)	80	95	110	130	145	165	185	200
Fator de conforto <sup>b</sup> (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							
<sup>a</sup> A força de indentação pode ser expressa por F.I., referindo-se a espuma não fadigada								
<sup>b</sup> A força de conforto pode ser expresso por F.C.								
<sup>c</sup> Densidade utilizada somente para colchões de uso infantil (berço)								

Figura 9 – ABNT NBR 13579-1:2011: Espuma flexível de poliuretano  
Fonte: Disponível em: < <https://www.abntcatalogo.com.br>>. Acesso em 01/12/2014.

A ABNT NBR 13579-1:2011 elevou o nível de qualidade dos colchões e proporcionou a oferta de produtos normatizados e confiáveis. Embora a normatização tenha inviabilizado o uso de cargas inorgânicas como  $\text{CaCO}_3$  (SANT'ANNA et al., 2008) ou esteatita (PINTO et al., 2018) é possível utilizar cargas orgânicas nas espumas. Muitos aditivos orgânicos e biomateriais já foram utilizados como aditivos em espumas flexíveis e rígidas de poliuretano: pigmentos (CZLONKA et al., 2019); nano tubos de carbono (STIEBRA et al., 2016), (ZHANG et al., 2011); resíduos espumas rígidas (USMAN et al., 2018); celulose (KASTNER et al., 2011), (CABULIS et al., 2016); borracha (BHADRA, ABHISEK, 2010); fibras naturais (KURANSKA, M.; PROCIAK, A., 2012); noz moscada (CZŁONKA et al., 2020a); fibras de eucalipto (CZLONKA et al., 2020b); óleo de mamona (YEGANEH, H.; SHAMEKHI, M. A. J., 2006); Polietileno Tereftalato (PET) glicosilado (MACIJAUSKAS, G.; JANKAUSKAITĖ, V., 2013), ou PET reciclado micronizado (Mello et al., 2009), (SINHA et al., 2008). Esta última possibilidade é particularmente interessante dada a larga aplicação de PET para embalagens e a natureza não-biodegradável do PET, que contribui significativamente à poluição do planeta por plásticos (GEYER et al., 2016). A indústria encontrou no PET (Polietileno Tereftalato) reciclado micronizado uma alternativa de carga para substituir parte das matérias-primas petroquímicas. O principal fornecedor do mercado atingiu uma gramatura mínima de 40 mesh e o padronizou desta forma. O uso de PET reciclado micronizado se mostrou tecnicamente viável com 2 fortes argumentos: (1) Trazer uma economia financeira de 5 a 10% por bloco de espuma produzido; (2) O aspecto ecológico de representar um destino mais nobre para um material reciclado (fonte: SM Consultoria em Poliuretanos, 2022). No presente estudo foi desenvolvida uma técnica que permite o mapeamento tridimensional da distribuição de PET micronizado em espumas flexíveis de poliuretano de densidade D28 contendo até 21,9% de PET micronizado (em relação à massa do polioliol) que cumprem todas as normas ABNT para espumas flexíveis de poliuretano.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho de pesquisa tem por objetivos:

- Demonstrar o potencial de uso de PET (Polietileno Tereftalato) reciclado micronizado na produção de Espumas Flexíveis de Poliuretano (PU), em substituição parcial às matérias-primas essenciais, mantendo-se as propriedades físicas das espumas dentro das normas técnicas vigentes e obtendo-se uma significativa economia financeira. Contribuir com a sustentabilidade do meio ambiente pela substituição de uma matéria-prima petroquímica por PET reciclado micronizado;
- Utilizar o método de marcação por fluorescência para visualizar a distribuição tridimensional do PET micronizado na espuma de poliuretano em função dos vários parâmetros operacionais do processo de fabricação da espuma, com o intuito de identificar possíveis interdependências entre a distribuição do PET micronizado na espuma e suas propriedades físicas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão apresentados os fundamentos teóricos utilizados neste trabalho de pesquisa.

#### 3.1. O PET é o plástico número 1 em reciclagem

Conforme consulta feita junto a ABIPET, Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET. Disponível em <https://www.abipet.org.br>. Acesso em 01/08/2022), o PET - Poli (Etileno Tereftalato) ou simplesmente PET - é um polímero termoplástico da família dos poliésteres, formado pela reação do ácido tereftálico (PTA) e monoetilenoglicol (MEG). Suas principais características são a transparência e a resistência, tanto mecânica quanto química. Ou seja, como material de embalagem atende inúmeras exigências técnicas e de saudabilidade, protegendo diversos alimentos e bebidas com muita eficiência. Além disso, por ser resistente, permite fabricar uma embalagem com pouco material, o que o torna muito eficaz no transporte. O PET proporciona alta resistência mecânica (impacto e estrutural) e química, suportando o contato com agentes agressivos, além de possuir excelente barreira para gases e odores. Por isso, é capaz de conter os mais diversos produtos com total higiene e segurança - para o produto e para o consumidor. O País conta com capacidade instalada para produção de resina PET virgem, da ordem de 1 milhão de toneladas/ano, suficiente para abastecer não só a demanda brasileira como também a América do Sul.

O PET é o plástico mais reciclado em todo o mundo e o Brasil possui posição de destaque nesse contexto, com desempenho superior aos Estados Unidos e diversos países da União Européia e Ásia. Trata-se de um dos melhores exemplos de economia circular e de atividade baseada nos três aspectos da sustentabilidade: econômico, social e ambiental.

O índice de reciclagem brasileiro atingiu 55% das embalagens de PET descartadas pela população em 2019. O volume equivale a 311 mil toneladas do produto que geraram um faturamento de mais de R\$ 3,6 bilhões, o correspondente a 33% do faturamento total do setor do PET no Brasil.

Os números são do 11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), com a participação de 160 empresas de todo o País, divididas em recicladores (22%); aplicadores, que são empresas que adquirem e utilizam o PET reciclado em seus produtos (70%); e integrados, que fazem a reciclagem e utilizam o material na fabricação de itens que retornam ao mercado (8%).

Esse crescimento é reflexo do fortalecimento da economia circular, composta por uma indústria diversificada, que utiliza o PET reciclado em seus produtos. A criação dessa cadeia, feita ao longo de 20 anos, resulta em uma demanda consistente, que cria valor à reciclagem do PET.

A amplitude no uso do PET reciclado acontece porque o Brasil é um líder mundial em diferentes aplicações para o PET reciclado, o que gera demanda pelo produto, revertido em faturamento e renda para diversos elos da sociedade.

Os principais consumidores/aplicadores de PET reciclado no Brasil são os fabricantes de pré-formas e garrafas, com 23% do total, num processo conhecido como “bottle to bottle”, principalmente em decorrência do aumento da produção de embalagens em grau alimentício (food grade), que nos últimos anos mostrou uma grande evolução tecnológica. Em seguida vêm a indústria têxtil (22%), laminados e termoformados (bandejinhas) (17%), setor químico (15%) e fitas de arquear (13%). Outras aplicações respondem pelo uso dos 10% restantes do PET reciclado.

Em razão dessa diversidade, o PET reciclado é encontrado em peças de vestuário – basicamente o poliéster utilizado na composição dos tecidos, garrafas plásticas e embalagens



utilizadas por grandes fabricantes de refrigerantes e bebidas, produtos de beleza e limpeza, tintas e vernizes, tapetes e carpetes automotivos, entre outros.

A grande dificuldade para a ampliação da reciclagem do PET no Brasil está no sistema de coleta do resíduo sólido urbano. Por isso, as empresas de reciclagem trabalham, em média, com ociosidade superior a 30%. Isso significa que, em razão de investimentos já realizados, a indústria está pronta para absorver um eventual crescimento da reciclagem nos próximos anos.

A ABIPET defende a construção de grandes centros de triagem para separar materiais recicláveis, o aumento da coleta seletiva nos municípios e do número de cooperativas de catadores. Com essas iniciativas, associadas ao descarte correto feito pelos cidadãos, o país será capaz de abastecer as linhas de reciclagem, impedindo que embalagens continuem sendo enterradas em lixões e aterros, resultando em um desperdício de matéria-prima que poderia ser muito útil à sociedade, gerando emprego, renda e preservando o meio ambiente (ABIPET. Disponível em <https://www.abipet.org.br>. Acesso em 01/08/2022).

### **3.2. Poliuretanos**

Os poliuretanos foram desenvolvidos por Otto Bayer, em 1937, tornando-se uma fantástica história de sucesso e um negócio de muitos bilhões de dólares no mundo atual (VILAR, WALTER, 2004). São produzidos pela reação de poliadição de um isocianato com um polioliol e outros reagentes como: agentes de cura ou extensores de cadeia, contendo dois ou mais grupos reativos; catalisadores; agentes de expansão; surfactantes; cargas; pigmentos, retardantes de chama, desmoldantes etc. Os isocianatos podem ser aromáticos ou alifáticos. Os compostos hidroxilados podem variar quanto ao peso molecular, natureza química e funcionalidade. Os polióis podem ser poliéteres ou poliésteres. A natureza química bem como a funcionalidade dos reagentes deve ser escolhida de acordo com as propriedades finais desejadas. Esta flexibilidade possibilita a obtenção de materiais com diferentes propriedades

físicas e químicas, e faz com que os poliuretanos (PU's) ocupem posição importante no mercado mundial de polímeros sintéticos de alto desempenho.

Otto Bayer não pertencia à família que fundou o Grupo Bayer. Ele nasceu em Frankfurt em 04 de novembro de 1902. Concluiu seus estudos com um doutorado em química em 1924 tendo como orientador o famoso químico Julius von Braun, o qual também lhe concedeu seu primeiro emprego industrial na Cassella Farbwerke I.G., após 2 anos na Bayer como assistente de pesquisa. Depois que Bayer registrou suas primeiras realizações de pesquisa no campo de corantes e de enxofre, ele foi inesperadamente nomeado para a gerência do departamento em 1931. Isso foi seguido apenas dois anos depois por outra mudança surpreendente na carreira de grande significado: ele foi transferido para a Bayer em Leverkusen, onde se tornou chefe do Laboratório Científico Central. Embora Otto Bayer tivesse apenas 32 anos na época e fosse o membro mais jovem da equipe, ele logo conseguiu se destacar.

Em Leverkusen, ele foi exposto a campos de pesquisa completamente novos, como química da borracha, pesquisa farmacêutica e proteção de cultivos. A maior conquista de Otto Bayer foi, em última análise, a invenção da química do poliuretano. O princípio da poliadição usando diisocianatos é baseado em sua pesquisa, mas a princípio seus colegas mais próximos estavam muito céticos. Embora a produção de estruturas macromoleculares já fosse uma linha de pesquisa promissora para o futuro, a ideia básica de Otto Bayer de misturar pequenos volumes de substâncias químicas para obter materiais de espuma seca era vista como irreal. Mas após inúmeras dificuldades técnicas, a Bayer finalmente conseguiu sintetizar a espuma de poliuretano.

Foram necessários mais 10 anos de trabalho de desenvolvimento antes que materiais personalizados pudessem ser fabricados com base em sua invenção. Otto Bayer influenciou o desenvolvimento desta versátil família de plásticos por muitos anos até sua morte, aos 80 anos. Graças às conquistas químicas e empresariais do inventor dos poliuretanos, o Grupo Bayer

ainda detém uma grande fatia do mercado mundial desses materiais (OTTO BAYER. Disponível em <<https://www.bayer.com/en/history/otto-bayer>>. Acesso em 01/08/2022).

E o desenvolvimento comercial dos PU's começou na Alemanha no final da década de 1930, inicialmente com a fabricação de espumas rígidas, adesivos e tintas. Os elastômeros tiveram a sua origem na década de 1940, na Alemanha e Inglaterra. Durante a Segunda Guerra Mundial o desenvolvimento dos PU's foi descontinuado, porém desde 1946 o seu mercado tem apresentado um crescimento enorme. A década de 1950 registrou o desenvolvimento comercial dos PU's em espumas flexíveis. Durante os anos 60, o uso dos clorofluorcarbonos (CFCs) como agentes de expansão das espumas rígidas resultou no grande emprego deste material como isolamento térmico. Na década de 1970 as espumas semiflexíveis e semi-rígidas revestidas com materiais termoplásticos foram largamente usadas na indústria automotiva. Nos anos 80, o crescimento da importância comercial foi a moldagem por injeção e reação (RIM), dando ímpeto aos estudos das relações entre estrutura molecular e propriedades dos PU's. Na década de 1990 e neste início de milênio, presenciamos a preocupação com o meio ambiente, com as pesquisas voltadas para a substituição dos CFC's e HFC's considerados danosos à camada de ozônio terrestre, o desenvolvimento de sistemas que não possuam compostos orgânicos voláteis (VOC's), produtos com baixo fogging e os processos de reciclagem dos PU's (VILAR, WALTER, 2004).

### **3.3. Produção de Espumas de Poliuretano**

É possível se obter infinitas variações de espumas de PU pela combinação de diferentes tipos de matérias-primas como polióis, isocianatos e aditivos. Centenas de aplicações foram desenvolvidas para atender diversos segmentos de mercado. Na área de espumas flexíveis os PU's se popularizaram nos segmentos de colchões, estofados e assentos automotivos; os semi-rígidos na indústria automotiva na forma de descansa-braços, painéis, pára-choques etc.; os

microcelulares em calçados; e os rígidos no isolamento térmico de geladeiras, “freezers” e caminhões frigoríficos, na construção civil em painéis divisórios etc. Além destes, existem os PU’s sólidos usados como elastômeros, tintas & revestimentos, adesivos & ligantes, fibras, selantes & impermeabilizantes, encapsulamento elétrico etc. Normalmente as espumas são classificadas em 3 grandes grupos: Espumas Flexíveis (mercados principais colchões e móveis estofados), Espumas Moldadas (mercado principal automobilístico) e Espumas Rígidas (mercados principais isolamento térmico e construção). No Brasil os mercados são estimados com os seguintes tamanhos (IAL Consultants, 2018):

Espumas Flexíveis = 197.750 tons

Espumas Rígidas = 95.550 tons

Espumas Moldadas = 34.420 tons

Os consumos percentuais aproximados nos diferentes segmentos industriais são mostrados abaixo (IAL Consultants, 2018). Verifica-se que o segmento de colchões e estofados representa mundialmente 29% do total (Figura 10), enquanto que na América Latina representa 57% (Figura 11) e no Brasil responde por 55% (Figura 12).

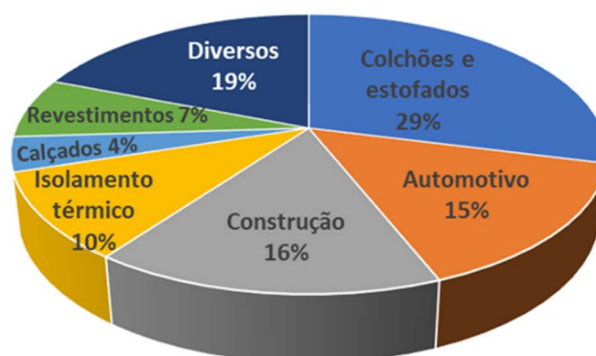


Figura 10 – Consumo de PU mundial  
Fonte: IAL Consultants, 2018.



Figura 11 – Consumo de PU América Latina  
Fonte: IAL Consultants, 2018.

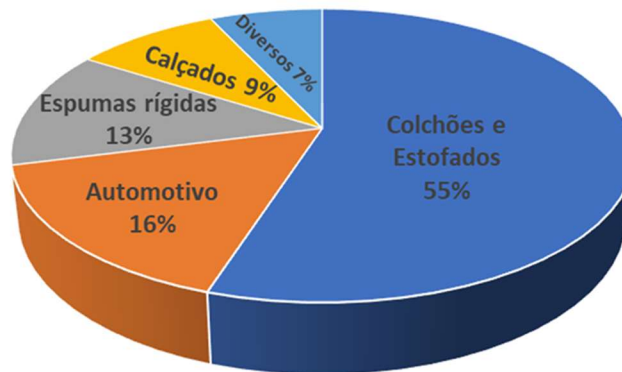


Figura 12 – Consumo de PU Brasil  
Fonte: IAL Consultants, 2018.

As espumas flexíveis de PU possuem células abertas, permeáveis ao ar, são reversíveis à deformação e podem ser produzidas numa grande faixa de propriedades incluindo passagem de ar, dureza e resiliência, oferecendo um conforto aos seres humanos, que nenhum outro único material proporciona (VILAR, WALTER, 2004). As primeiras espumas flexíveis comerciais foram fabricadas em 1951, utilizando polióis poliésteres. As espumas utilizando poliálcool poliéter foram comercializadas em 1958, utilizando formulações com catalisadores à base de estanho, aminas terciárias e silicões especiais como estabilizadores. Em 1964, surgiram as espumas de alta resiliência (HR), curadas a frio, utilizando uma mistura de TDI (Tolueno-diisocianato) e

MDI (Metileno-difenil-diisocianato) polimérico que reagia com polióis poliéteres de alta reatividade terminados com hidroxilas primárias. Nesta mesma época, surgiram as espumas semi-rígidas com propriedades específicas de amortecimento, utilizando MDI polimérico. Na década de 70 foram comercializadas as espumas flexíveis produzidas com ar para aplicação em base de carpetes. Nos anos 80, surgiram as espumas feitas com polióis poliéteres copoliméricos com estireno e acrilonitrila.

As espumas flexíveis têm sido produzidas durante décadas, em uma grande variedade de densidades e suporte de carga, para diferentes usos, como colchões somente de espuma, ortopédicos e de mola, travesseiros, móveis, materiais almofadados para automóveis, embalagens, recreação, vestuário, calçados etc.

No Brasil, a fabricação de blocos de espumas flexíveis de PU começou nos anos 60, com importação das matérias primas, e nos anos 70, iniciou-se a fabricação local de polióis poliéteres e TDI. A produção de blocos de espumas flexíveis pelo processo descontínuo em caixote é a mais utilizada no Brasil, e nos últimos anos os produtores locais têm concentrado seus esforços na qualidade da espuma e automação do processo com aquisição de máquinas contínuas (VILAR, WALTER, 2004).

### **3.4. A utilização do PET micronizado pela Indústria de Poliuretano**

O uso de PET micronizado exige um bom conhecimento técnico em ajustar corretamente as formulações e em usar surfactantes adequados de modo a manter as propriedades físicas das espumas dentro das normas, pois caso contrário não faz sentido. No momento, este conhecimento técnico baseia-se principalmente em experiência prática nas fábricas ao invés de uma firme base de conhecimento científico para guiar eventuais melhorias do processo.

A experiência mostra ser o poliuretano um material bastante técnico que demanda o domínio e controle de inúmeras variáveis para sua produção eficiente e de qualidade. De fato, a demanda técnica desta indústria é suprida pelos principais e maiores fornecedores, empresas multinacionais em sua quase totalidade. Portanto é muito importante ressaltar que se trata de uma indústria muito conservadora e que demanda um intenso suporte técnico de seus fornecedores. A base técnica e o acúmulo de conhecimento ao longo do tempo se constituem nos principais fatores de sucesso dos fabricantes deste polímero.

O Brasil possui mais de 600 produtores de espumas flexíveis distribuídos por todo território nacional sendo que a maioria tem suas unidades de produção dirigidas por práticos e sem laboratórios disponíveis (SM Consultoria em Poliuretanos, 2022).

O número de empresas que estão usando PET micronizado já é significativo e com tendência de alta em função da economia financeira que proporciona (Micropet, 2022). As Figuras 13 e 14 ilustram a escala industrial de produção de espumas de PU na fábrica da Luckspuma (Ferraz de Vasconcelos, SP), que produz diariamente blocos de espumas de diferentes densidades contendo PET micronizado (as diferentes cores dos blocos são usadas somente para diferenciar as densidades; porém, não existe nenhum padrão determinado). As espumas produzidas são de excelente qualidade e atendem plenamente a Norma ABNT NBR 13579-1.



Figura 13 – Espumas flexíveis produzidas na empresa Luckspuma  
Fonte: LUCKSPUMA, 2022.



Figura 14 – Espumas flexíveis produzidas na empresa Luckspuma  
Fonte: LUCKSPUMA, 2022.

### 3.5. Economia financeira proporcionada pelo PET reciclado micronizado

A economia varia entre 5 e 10% no custo do bloco dependendo da densidade de espuma produzida e da quantidade usada de PET micronizado na formulação. Em nosso trabalho de pesquisa trabalhou-se com até 21,9% de PET micronizado, ou seja, 21,9% das matérias-primas convencionais (poliol principalmente) foram substituídas pelo PET micronizado. Calcula-se uma economia financeira média de 10% no custo de cada  $m^3$  produzido de espuma (Figura 15).

Essa economia se torna bastante significativa quando calculada em base mensal ou anual.

Custo produção de espumas D28 para cada 1 m <sup>3</sup>								
Densidade: 28 kgs/m <sup>3</sup>	Sem PET				Com PET			
Componentes	PPHP <sup>(*)</sup>	Massa (kgs)	Custo em US/kg	Custo total US	PPHP <sup>(*)</sup>	Massa (kgs)	Custo em US/kg	Custo total US
Poliol	85,00	16,866	3,30	55,66	63,1	12,521	3,30	41,32
Copolímero	15,00	3,103	3,40	10,55	15,00	3,103	3,40	10,55
TDI	48,00	9,580	3,30	31,61	48,00	9,580	3,30	31,61
Surfactante	1,30	0,260	16,00	4,16	1,30	0,260	16,00	4,16
Octoato de Estanho	0,12	0,046	30,00	1,38	0,12	0,046	30,00	1,38
Amina terciária	0,23	0,024	10,00	0,24	0,23	0,024	10,00	0,24
Água	3,33	0,666	0,01	0,00	3,33	0,666	0,01	0,00
PET	0,00	0,000	0,97	0,00	21,90	4,345	0,97	4,22
<b>Custo total 1 m<sup>3</sup></b>				<b>103,61</b>				<b>93,48</b>
<b>Economia (%)</b>								<b>10%</b>
(1 US = R\$ 5.10)								
(*) Parts per hundred parts of polyol (partes por 100 partes de polioli)								

Figura 15 – Cálculo econômico da utilização do PET micronizado em espumas de poliuretano  
Fonte: SM Consultoria em Poliuretanos, 2022.



### **3.6. O importante papel desempenhado pelos Surfactantes e suas principais funções**

Os surfactantes usados na produção de espumas PU têm como funções principais a emulsificação das matérias-primas, a nucleação e a abertura das células garantindo assim a estabilização do produto.

É essencial utilizar um agente tensoativo para controlar o processo de formação da espuma. Os surfactantes de silicone exercem uma função chave como emulsificantes e estabilizadores da espuma, sendo os poliéteres polisiloxanos os mais usados. A habilidade dos surfactantes de silicone de atuar como emulsificantes dos ingredientes da formulação, auxiliar na nucleação, estabilizar as células da espuma em crescimento e promover a abertura das células depende de sua estrutura química (BROOK, MICHAEL, 2000). As funções dos surfactantes de emulsificação, nucleação e estabilização são desempenhadas e ocorrem de maneira simultânea (Figura 16).

Os surfactantes de silicone baixam a tensão superficial permitindo a introdução na mistura, do ar que irá então formar os núcleos das células da espuma. O aumento da quantidade de surfactante de silicone resulta em diminuição do tamanho das células e no aumento do seu número. Concentrações adequadas de surfactante de silicone promovem a estabilidade tornando mais difícil a coalescência das bolhas. Todavia, o excesso de surfactante de silicone estabiliza demais o sistema e pode dificultar a abertura das células. Na produção da espuma pode ser feita a pré-mistura de água, silicone e amina (ASA).

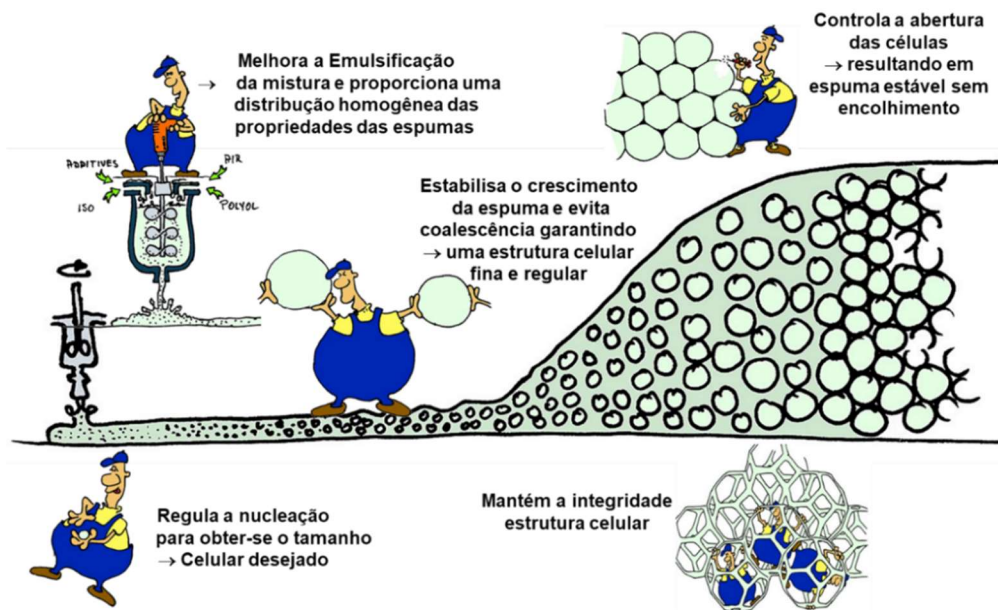


Figura 16 – Funções dos surfactantes na produção de espuma flexível de poliuretano  
Fonte: Evonik Industries AG, 2020.

### 3.7. Comparação entre Surfactantes Convencionais (SiC) e Surfactantes Especiais (SiOC)

Os surfactantes de silicone são à base de polisiloxanos e possuem uma fórmula estrutural típica conhecida (Figura 17). A tecnologia de produção mais comum e difundida é conhecida como SiC; porém, existe uma outra tecnologia denominada SiOC encontrada em escala muito menor no mundo. Estas nomenclaturas SiC e SiOC provém diretamente das fórmulas estruturais destas duas famílias distintas de surfactantes (Figura 18). Comparativamente à linha convencional SiC, os surfactantes SiOC permitem um controle um pouco melhor e mais amplo do processo de produção, proporcionando também a excelência na produção de espumas de altíssima qualidade. A seguir estão descritas as principais diferenças entres estes surfactantes:

- Surfactantes SiC:
  - Devido a maior potência tem uma faixa de trabalho mais estreita que os SiOC;
  - Processamento em geral é mais dificultoso e apresenta menor tolerância;

- Tipicamente mais potentes com relação ao SiOC e requerem dosagens mais baixas;
  - Não hidrolisáveis.
- Surfactantes SiOC:
    - Faixa de trabalho bastante ampla e de fácil processamento com alta tolerância;
    - Estrutura celular aberta, fina e regular;
    - Tipicamente menos potentes com relação ao SiC e requer dosagens mais altas;
    - Hidrolisáveis sob determinadas condições.

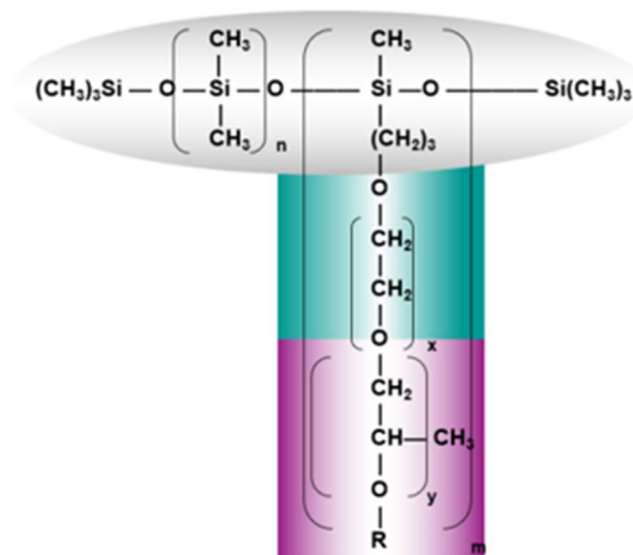


Figura 17 – Fórmula estrutural típica de um Surfactante de Silicone  
 Fonte: Silicones: Chemistry and Technology, Vulkan Verlag, Essen, 1991.

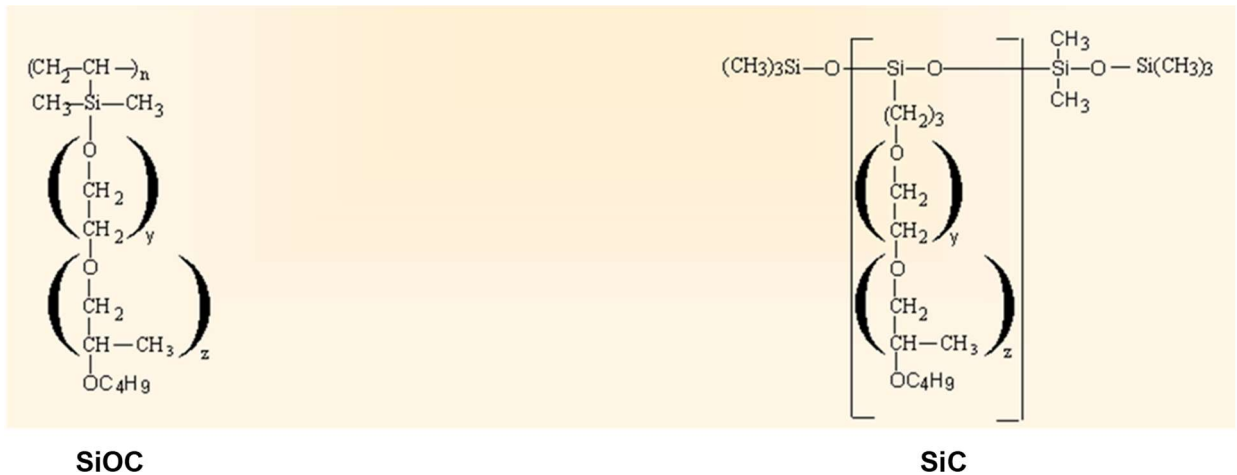


Figura 18 – Fórmulas estruturais típicas de Surfactantes de Silicone SiC e SiOC  
Fonte: Vilar, Walter, 2004.

### 3.8. Reciclagem de PU

Existe um determinado teor de rejeitos em todo o processo de produção, que pode ser tão alto quanto 40% em certos processos de fabricação de blocos de espuma flexível, que são cortados, sobrando pedaços não utilizáveis. Em todos os processos ocorrem perdas, na partida da produção, quando ocorre mudança de produto etc. Atualmente, os rejeitos de processo deixaram de ser questões meramente econômicas para se tornarem questões ambientais, e há consenso de que a hierarquia do desperdício é em ordem decrescente: evitar, reutilizar, reciclar, incinerar ou aterrar. O descarte de poliuretanos na natureza, é um problema ambiental.

A melhor forma de evitar rejeitos é a otimização do processo de fabricação. Para a reutilização e a reciclagem dos PU's os processos mais utilizados são apresentados a seguir: (DATTA, J.; WLOCH, M., 2017).

Reciclagem mecânica: nos processos de fabricação de espumas flexíveis em bloco, as espumas resultantes de perdas podem ser retalhadas e vendidas para enchimento de travesseiros e almofadas; ou misturadas com um adesivo, que normalmente é um prepolímero de polioli

poliéter e TDI, e a seguir prensadas para a obtenção de blocos de espuma regenerada, que retornam ao processo para serem cortados e reutilizados (GRDADOLNIK et al., 2022).

Reciclagem química: rejeitos de espumas flexíveis podem ser digeridos pelo processo de glicólise, onde a ligação uretânica é quebrada por dialquileno glicóis de cadeia curta como (MEG, DEG, 1,4-butanodiol), resultando em polióis reutilizáveis (CUK et al., 2015), (IONESCU, M., 2005), (PHAM et al., 2020). Um exemplo do processo consiste na digestão do material moído com um peso igual de uma mistura 90/10 de um dialquileno glicol e dietanolamina a 210°C por várias horas (NIKJE, M. A., 2016).

#### 4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A seguir serão apresentados os materiais e procedimentos utilizados neste trabalho de pesquisa.

##### 4.1. Reagentes utilizados na produção de poliuretanos

Os reagentes utilizados são produtos comercialmente bem conhecidos, fornecidos geralmente por empresas multinacionais e com plena disponibilidade na indústria do PU.

Na tabela 1 estão referenciados os reagentes utilizados no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Tabela 1 - Reagentes utilizados

Produto	Descrição Química	OH (mg KOH/g)	Teor de Sólidos	Estado Físico	Pureza	Fornecedor
Poliol poliéter	Poliol poliéter de origem petroquímica	56	-	Líquido	Mín. 99,8%	Covestro
Copolímero base SAN (estireno acrilonitrila)	Poliol poliéter copolimérico de origem petroquímica	30	45	Líquido	Mín. 99,8%	Covestro
TDI 80/20 (Toluenodiisocianato)	Isocianato aromático (80% isômero 2,4 e 20% isômero 2,6)	-	-	Líquido	Mín. 99,7%	Covestro
Surfactante base copolímero de poliéter polisiloxano SiC (convencional)	Tensoativo à base de poliéter polisiloxano (TEGOSTAB® B 8115)	-	-	Líquido	Mín. 99%	Evonik
Surfactante base copolímero de poliéter polisiloxano SiOC (especial)	Tensoativo à base de poliéter polisiloxano (TEGOSTAB® B 8040)	-	-	Líquido	Mín. 99%	Evonik
PET micronizado comum	PET 100% reciclado – 40 mesh	-	-	Sólido	-	Micropet
PET micronizado fluorescente	PET micronizado marcado com fluoresceína – 40 mesh	-	-	Sólido	-	Cristalmaster
Catalisador de polimerização	2-Etil-hexanoato de estanho II	-	-	Líquido	Mín. 97%	Evonik
Catalisador de polimerização e de expansão	Amina terciária (33% trietilenodiamina em dipropilenoglicol)	-	-	Líquido	Mín. 99,5%	Evonik
Água	Agente químico de expansão	-	-	Líquido	100%	-

## 4.2. Produção das espumas com PET micronizado comum

A metodologia de produção das espumas segue um padrão universal e consiste nas seguintes etapas: Agitar uma mistura de polioli poliéter, polioli copolimérico, água, catalisador à base de amina terciária (catálise da reação do isocianato com água), surfactante a base de polisiloxano, 2-etil-hexanoato de estanho II (catálise da reação do polioli com o isocianato), e PET reciclado micronizado (40 mesh) a 700 RPM durante 45 segundos. Em seguida, adicionar o tolueno diisocianato (TDI 80/20) e agitar a 1000 RPM por 6 segundos. Despejar a massa total dentro de uma caixa de espumação (box foamer) de laboratório de 25 x 25 x 25 cm e acompanhar os parâmetros da expansão conforme as definições a seguir: tempo de creme (o início da reação ou formação de “fase cremosa”, no box foamer), o tempo de crescimento (alcance da altura máxima pelo bloco de espuma), blow-off (a expulsão dos gases imediatamente após atingir a altura máxima do bloco - um primeiro indicativo de boa qualidade) e relaxamento (em centímetros entre a altura máxima alcançada e a altura final do bloco ainda quente). Vale ressaltar que os tempos (em segundos) e as velocidades de mistura (em RPM) empregados na presente metodologia de produção das espumas são condições consideradas padrão como fruto de muitos anos de pesquisa e experiência desta indústria. Porém algumas variações são aceitáveis e inclusive empregadas de acordo com a qualidade e performance desejadas das espumas (SM Consultoria em Poliuretanos, 2022).

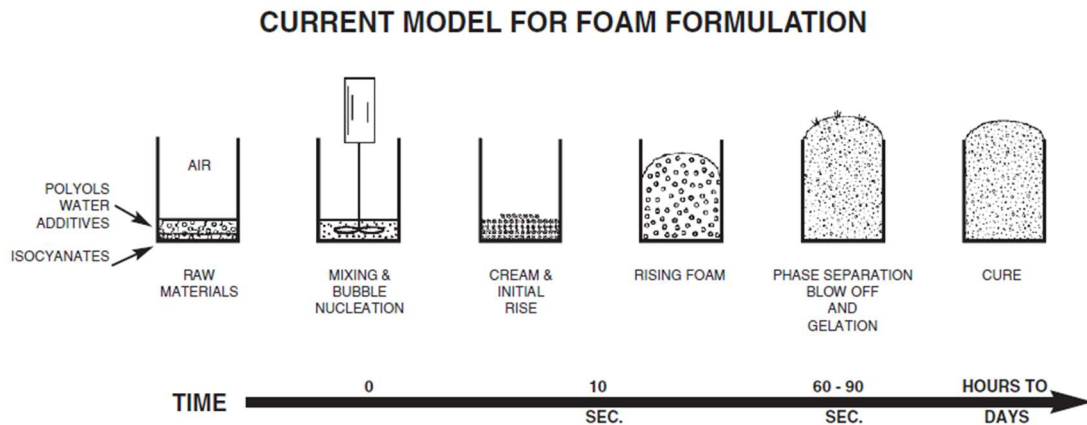


Figura 19 – Resumo das etapas envolvidas na formação da espuma flexível de poliuretano  
Fonte: DOW POLYURETHANES, 1997.

Lembrando que o fenômeno de relaxamento ocorre após o blow-off e indica a expulsão dos gases em excesso com conseqüente perda de altura do bloco de espuma em média de 4 cm aproximadamente. Após a cura (24 h a temperatura ambiente), o bloco de espuma é seccionado usando uma serra metálica de fita para obter os corpos de prova (Figura 20). Os corpos de prova foram analisados de acordo com as normas ABNT correspondentes utilizando-se os seguintes equipamentos:

- Balança semi-analítica (2 dígitos) e régua de inox (mm).
- Dinamômetro marca EMIC (Figura 21): todas as medições são feitas à temperatura de 23 +/- 1 Celsius.
- Fadigômetro marca COFAMA: todas as medições são feitas à temperatura de 23 +/- 1 Celsius
- Resiliômetro: todas as medições são feitas à temperatura de 23 +/- 1 Celsius
- Aparelho de passagem de ar por coluna d' água: todas as medições são feitas à temperatura de 23 +/- 1 Celsius para verificação se a espuma está aberta ou fechada.
- Estufa: a deformação permanente à compressão é feita em estufa a 70 Celsius por 22 horas



- Mufla: teor de cinzas realizado à temperatura de 500 Celsius até queima completa da espuma.



Figura 20 – Corpos de prova utilizados nos ensaios físicos  
Fonte: Laboratório Evonik Brasil, 2022.



Figura 21 – Dinamômetro  
Fonte: Laboratório Evonik Brasil, 2022.

Foram medidas as seguintes propriedades físicas das espumas:

- Densidade: é a relação entre massa e o volume medida em  $\text{kg/m}^3$  (ABNT NBR 8537:2015);
- Passagem de ar: mede a abertura das células através da passagem de ar e medição da pressão por coluna de água em  $\text{mm H}_2\text{O}$ . A abertura celular da espuma é inversamente proporcional ao tamanho da coluna de água;
- Resiliência: mede o rebote da espuma em % de retorno (ABNT NBR 8619:2022);

- Teor de Cinzas: quantidade de cinzas % após calcinação da espuma (ABNT NBR 14961:2019);
- DPC (Deformação Permanente à Compressão): deformação % da espuma após compressão em determinadas condições de tempo e temperatura (ABNT NBR 8797:2017);
- Perda de dureza por fadiga: usualmente descrita como a perda % de suporte de carga em função do tempo de uso (ABNT NBR 9177:2022);
- Perda de espessura por fadiga: usualmente descrita como a perda % de espessura em função do tempo de uso (ABNT NBR 9177:2022);
- Dureza: força de indentação a 40% (ABNT NBR 9176:2016);
- Fator de conforto: grandeza adimensional que relaciona forças de indentação para determinação do conforto das espumas (ABNT NBR 9176:2016).

#### **4.3. Produção das espumas com PET micronizado fluorescente feito em laboratório**

O processo de produção é idêntico ao item anterior 4.2 somente alterando-se para o emprego de PET micronizado fluorescente produzido em laboratório. Houve extrema dificuldade em se encontrar PET fluorescente original, ou seja, produzido pela incorporação física do pigmento fluorescente dentro do PET no processo de produção industrial que denomina o produto de masterbatch de PET. Essa busca levou alguns meses e esta dificuldade nos fez buscar a alternativa de fazer a mistura em laboratório do pigmento com PET reciclado micronizado. Preparou-se 2 tipos de materiais sendo uma quantidade de PET reciclado micronizado misturado com pigmento rosa à base de Rhodamina e outra quantidade de PET reciclado micronizado misturado com pigmento verde à base de fluoresceína.

Os corpos de prova contendo PET micronizado fluorescente foram cortados nos sentidos vertical e horizontal (Figuras 22 e 23) em fatias com espessura de ca. 2 cm para poder visualizar a distribuição do PET micronizado fluorescente através do bloco (JAMESON, D. M., 2014).



Figura 22 – Um bloco de espuma de PU de 25x25x25 cm contendo 10% de PET micronizado fluorescente, ilustrando o fatiamento do bloco de espuma nos sentidos horizontal (H) e vertical (V) para obter os corpos de prova e avaliar a distribuição espacial da fluorescência.

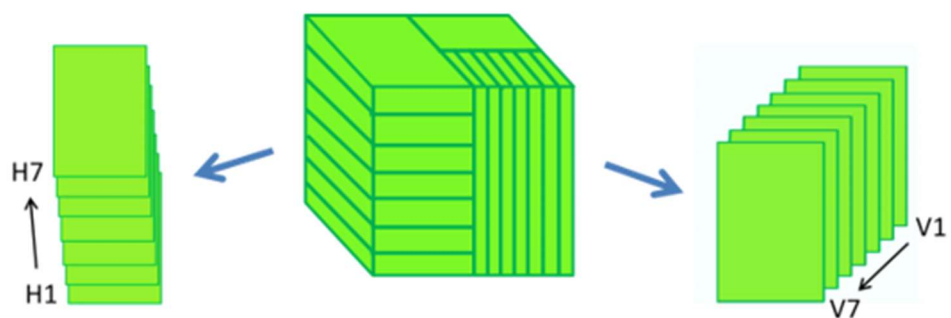


Figura 23 – Ilustração do seccionamento dos blocos de espumas de 25x25x25 cm em lâminas na horizontal (designado H1-H7 do fundo ao topo) e na vertical (designado V1-V7 de fora para dentro).

#### 4.4. Produção das espumas com PET micronizado fluorescente (Cristalmaster)

O processo de produção é idêntico ao item anterior 4.2 somente alterando-se para o emprego de PET fluorescente produzido industrialmente pela Cristalmaster. No final, uma amostra de PET fluorescente marcado com fluoresceína foi gentilmente fornecida pela Cristalmaster de Itupeva/SP e micronizado em partículas de 40 mesh pela Lyondell de Sumaré/SP pela técnica de moagem mecânica. Importante ressaltar que o PET fluorescente se trata de um *masterbatch* de PET na cor verde transparente industrialmente preparado e contendo 5% de pigmento à base de fluoresceína.

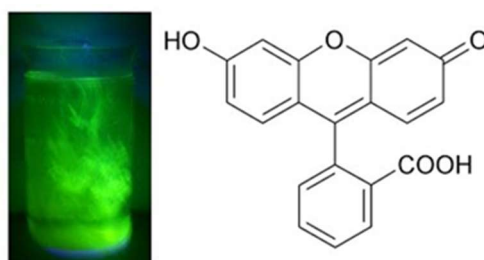


Figura 24 – Cor da fluorescência e estrutura química da fluoresceína  
Fonte: Disponível em: <<https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/fluoresceina>>. Acesso em 12/10/2022.

Os corpos de prova contendo PET micronizado fluorescente foram cortados nos sentidos vertical e horizontal de forma idêntica ao item anterior 4.3.

#### 4.5. Análises do PU marcado com PET micronizado fluorescente

Estas análises foram realizadas nos Laboratórios associados ao NAP-PhotoTech do Instituto de Química da USP. Para determinar a distribuição tridimensional macroscópica do PET micronizado marcado com fluoresceína na espuma de PU, foram usadas as secções ou fatias dos blocos de espuma, com dimensões de aproximadamente 16 x 12 cm e espessura de 2

cm. As imagens de fluorescência foram registradas digital e microscopicamente. As imagens digitais foram obtidas utilizando-se o aparelho Spectroline Model CM-10 fluorescence analysis cabinet (Spectronics Corporation Westbury, New York, U.S.A.) acoplado à uma lâmpada Mineralight Model UVGL-25 UV, UV Products, Inc. San Gabriel, CA, U.S.A. Um comprimento de ondas de 366 nm com baixa intensidade foi considerado apropriado para evitar brilho excessivo na gravação das imagens. As imagens digitais foram coletadas utilizando-se um telefone celular convencional modelo J7 Prime Samsung cell phone. As imagens microscópicas foram obtidas pelo uso do microscópio de fluorescência invertida Zeiss Axiovert 200 equipado com uma objetiva Zeiss 40x ou Zeiss 10x. Uma lâmpada Zeiss HXP 120 V foi usada como fonte de iluminação junto com um filtro convencional Zeiss Filter Set 09 que fornece excitação as amostras a 470 nm ( $\pm 20$  nm) e emissão a partir de 515 nm.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Produção das espumas com PET micronizado comum**

As espumas são geralmente classificadas por suas densidades, ou seja, a indústria usa principalmente esta propriedade para diferenciar seus produtos. Então o primeiro passo experimental é demonstrar que as propriedades físicas se mantêm em sua essência mesmo com o uso de PET micronizado. Para isso, as condições e as formulações devem ser devidamente ajustadas, inclusive com o uso de um surfactante adequado (surfactante especial). Neste mesmo sentido, é importante fazer comparações com espumas obtidas utilizando-se formulações não adequadamente ajustadas para demonstrar que as espumas obtidas apresentam uma perda significativa de uma ou mais propriedades.

Conforme já informado, a produção dos poliuretanos é extremamente técnica e envolve inúmeras variáveis. Portanto, a otimização de formulações exige muito conhecimento técnico e experiência. O controle e domínio das variáveis da formulação com e sem PET micronizado adicionado se faz fundamental para a obtenção de um processo produtivo eficiente e de alta qualidade.

Neste trabalho, elegeu-se estudar espumas com a densidade de  $28 \text{ kg/m}^3$  por ser uma das densidades mais produzidas pela indústria.

### **5.2. Análise das propriedades físicas das espumas com PET micronizado comum**

Foram preparados vários blocos de espumas em laboratório com e sem PET micronizado comum. As variações nas dosagens de PET comum foram de 0%, 10%, 15% e 21,9%.

A metodologia das análises das propriedades físicas das espumas seguiu as Normas ABNT NBR.

Tabela 2 – Resultados das análises das espumas

Formulações em pphp (partes por 100 partes de polioli) - Densidade 28 kgs/m <sup>3</sup>										
	Norma ABNT 13579-1		D28_0	D28_0	D28_10	D28_10	D28_15	D28_15	D28_20	D28_20
Poliol (EO/PO)			84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5
Copolímero			15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
TDI 80/20			43,0	43,0	45,6	45,6	46,8	46,8	48,1	48,1
Surfactante Convencional			1,100		1,150		1,200		1,300	
Surfactante Especial PET				1,100		1,150		1,200		1,300
Amina			0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120
Óxido de Estanho			0,170	0,170	0,190	0,190	0,210	0,210	0,230	0,230
Água adicionada			3,220	3,220	3,450	3,450	3,550	3,550	3,704	3,704
Cloreto de Metileno										
PET					10,0	10,0	15,0	15,0	21,9	21,9
ÍNDICE			109,8	109,8	110,1	110,1	110,5	110,5	109,6	109,6
<b>Propriedades</b>										
Tempo de Creme (segundos)			16	17	18	18	19	18	18	18
Tempo de Crescimento (segundos)			120	120	120	100	125	119	118	110
Relaxamento (cm)			0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3
Altura final (cm)			23,0	21,5	30,0	27,0	32,0	26,0	35,0	27,0
Passagem de ar 1 (mm H <sub>2</sub> O)			15	8	28	22	30	12	20	9
Passagem de ar 2 (mm H <sub>2</sub> O)			22	12	40	31	44	15	23	10
Passagem de ar 3 (mm H <sub>2</sub> O)			30	14	50	40	58	20	28	12
Densidade 1 (kg/m <sup>3</sup> )	25,2	30,8	25,2	26,0	26,5	27,0	26,4	27,9	26,0	25,9
Densidade 2 (kg/m <sup>3</sup> )	25,2	30,8	26,2	26,8	27,4	27,8	28,0	28,8	29,0	27,0
Densidade 3 (kg/m <sup>3</sup> )	25,2	30,8								
Resiliência (%)	35		36	38	35	37	30	40	32	42
ILD 40% (N)	145		148	146	145	155	148	157	147	160
Fator de conforto	2,2		2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,3	2,2	2,3
Estrutura celular										
Deformação Permanente à Compressão (%)		8	5	5	7	6	9	4	10	5
Perda de dureza por fadiga (%)		27	17,0	17,0	19,0	17,0	28,0	20,0	29,0	22,0
Perda de espessura por fadiga (%)		5,0	2,0	2,0	2,5	2,0	3,0	2,0	3,5	2,5
Observações	Mínimo	Máximo	B 8115_0	B 8040_0	B 8115_10	B 8040_10	B 8115_15	B 8040_15	B 8115_20	B 8040_20
	Valores fora da norma									
	Valores conforme a norma									

**Legenda**

medidas 1, 2, 3 - respectivamente topo, meio e fundo do bloco

caixas em cinza - não especificados

Teor de cinzas não medido - com os materiais usados costuma obter-se em torno de 0,2-0,5%

Passagem de ar medido como contra-pressão a um fluxo constante de ar

Surfactante convencional

Surfactante não adequado para uso com PET

Surfactante especial PET

Surfactante ideal para uso com PET

Os resultados mostram que as propriedades reprovadas quando o PET micronizado comum é utilizado sem a presença de um Surfactante Especial são principalmente a resiliência, a DPC (deformação permanente à compressão), a perda de dureza por fadiga e a perda de espessura por fadiga.

### 5.3. Análise das propriedades físicas das espumas com PET micronizado fluorescente

Foram preparados vários blocos de espumas em laboratório com e sem PET micronizado fluorescente. A variações nas dosagens de PET micronizado fluorescente foram de 0%, 10%, 15% e 21,9%.

A metodologia das análises das propriedades físico-químicas das espumas seguiu as Normas ABNT NBR.

Tabela 3 – Resultados das análises das espumas

Formulações em pphp (partes por 100 partes de polioli) - Densidade 28 kgs/m <sup>3</sup>										
	Norma ABNT 13579-1	D28_0	D28_0	D28_10	D28_10	D28_15	D28_15	D28_20	D28_20	
Polióli (EO/PO)		84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5	84,5
Co-Polímero		15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
TDI 80/20		43,0	43,0	45,6	45,6	46,8	46,8	48,1	48,1	48,1
Surfactante convencional		1,100		1,150		1,200		1,300		
Surfactante especial PET			1,100		1,150		1,200		1,300	
Amina		0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120
Octoato de Estanho		0,170	0,170	0,190	0,190	0,210	0,210	0,230	0,230	0,230
Água Adicionada		3,220	3,220	3,450	3,450	3,550	3,550	3,704	3,704	3,704
Cloreto de Metileno										
PET				10,0	10,0	15,0	15,0	21,9	21,9	21,9
ÍNDICE		109,8	109,8	110,1	110,1	110,5	110,5	109,6	109,6	109,6
<b>Propriedades</b>										
Tempo de Creme (segundos)		16	16	18	17	18	17	18	17	17
Tempo de Crescimento (segundos)		119	120	120	82	125	120	118	105	105
Relaxamento (cm)		0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,3	0,3
Altura final (cm)		23	20,5	30	25,5	32	23,5	35	24,5	24,5
Passagem de ar 1 (mm H <sub>2</sub> O)		14	5	30	20	30	5	18	5	5
Passagem de ar 2 (mm H <sub>2</sub> O)		22	10	39	30	47	5	19	5	5
Passagem de ar 3 (mm H <sub>2</sub> O)		30	10	53	50	58	5	26	5	5
Densidade 1 (kg/m <sup>3</sup> )	25,2	30,8	26,0	25,93	26,5	25,9	26,4	26,88	27,2	25,68
Densidade 2 (kg/m <sup>3</sup> )	25,2	30,8	27,5	26,63	27,4	26,2	28,0	27,34	29,4	27,25
Densidade 3 (kg/m <sup>3</sup> )	25,2	30,8								
Resiliência (%)	35		36	40	35	35	30	40	35	40
ILD 40% (N)	145		92	109	140	170	160	169	145	148
Fator de conforto	2,2		2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3
Estrutura celular										
Deformação Permanente à Compressão (%)	8		4	3	8	5	7	4	9	8
Perda de dureza por fadiga (%)	27		17	15	19	17	14	16	28	25
Perda de espessura por fadiga (%)	5,0		1,0	1,0	3,0	3,7	1,7	2,0	2,0	1,0
Observações	Mínimo	Máximo	8 8110_0	8 8040_0	8 8110_10	8 8040_10	8 8110_15	8 8040_15	8 8110_20	8 8040_20
	Valores fora da norma									
	Valores conforme a norma									

#### Legenda

medidas 1, 2, 3 - respectivamente topo, meio e fundo do bloco

caixas em cinza - não especificados

Teor de cinzas não medido - com os materiais usados costuma obter-se em torno de 0,2-0,5%

Resistência ao fluxo de ar medido como contra-pressão a um fluxo constante de ar.

Surfactante convencional

Surfactante não adequado para uso com PET

Surfactante especial PET

Surfactante Ideal para uso com PET

Os resultados mostram que as propriedades reprovadas quando o PET micronizado fluorescente é utilizado sem a presença de um Surfactante Especial são principalmente a resiliência, a DPC (deformação permanente à compressão), a perda de dureza por fadiga e a perda de espessura por fadiga.



#### 5.4. Dados estatísticos

Pelo fato de as medidas das propriedades físicas terem sido feitas no Centro Técnico de Poliuretanos da Evonik, tornou-se importante verificar a confiabilidade destas medidas.

Para esta finalidade, comparou-se dados estatísticos de produção das espumas (Tabelas 4 e 5) para evidenciar que a queda nas propriedades das espumas quando do uso de Surfactante Convencional está muito além do simples desvio-padrão entre as medidas de diferentes lotes produzidos. Observa-se, portanto, uma perda real acima do desvio estatístico nas propriedades de resiliência, DPC (deformação permanente à compressão), perda de dureza por fadiga e na perda de espessura por fadiga.

Tabela 4 – Desvios % típicos (D23)

<b>Estadística de produção espumas em laboratório - D23</b>							
<b>Amostra</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>ILD 40% (N)</b>	<b>Resiliência (%)</b>	<b>Perda de dureza por fadiga (%)</b>	<b>Perda Espessura por fadiga (%)</b>	<b>Deformação permanente à compressão (%)</b>	<b>Passagem de ar (mm H<sub>2</sub>O)</b>
1	22,14	111	39	16,7	3,3	5,8	20
2	23,13	117	39	17,1	3,7	6,6	22
3	22,05	109	37	18,5	3,6	5,8	21
4	23,64	113	40	14,7	2,4	4,3	13
5	23,64	115	39	17,7	2,7	6,6	22
6	23,00	115	40	14,8	3,0	4,2	14
7	22,43	119	40	15,6	3,4	5,3	17
8	21,78	117	36	19,0	3,4	8,0	26
9	22,40	107	41	14,6	2,3	4,9	14
10	21,70	122	41	13,2	2,3	4,8	13
11	21,45	111	40	15,5	3,9	5,5	16
12	23,63	106	40	18,0	2,5	5,7	19
13	21,81	117	35	19,0	2,9	7,9	27
14	22,04	106	39	16,4	3,8	6,9	22
15	22,77	105	41	14,5	2,3	4,3	14
16	21,74	103	37	18,7	2,8	7,8	25
17	21,68	105	39	17,5	3,1	6,4	22
18	23,03	100	36	18,3	4,0	7,9	24
19	22,75	108	38	18,4	3,1	6,7	22
20	22,10	122	38	18,7	3,8	5,7	19
<b>Média</b>	<b>22,45</b>	<b>111</b>	<b>39</b>	<b>16,8</b>	<b>3,1</b>	<b>6,1</b>	<b>19,6</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>0,692</b>	<b>6,3</b>	<b>1,7</b>	<b>1,8</b>	<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>4,3</b>
<b>Desvio %</b>	<b>3,1%</b>	<b>5,6%</b>	<b>4,5%</b>	<b>10,5%</b>	<b>18,1%</b>	<b>20,0%</b>	<b>22,1%</b>

Tabela 5 – Desvios % típicos (D28)

Estatística de produção espumas em laboratório - D28							
Amostra	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	ILD 40% (N)	Resiliência (%)	Perda de dureza por fadiga (%)	Perda Espessura por fadiga (%)	Deformação permanente à compressão (%)	Passagem de ar (mm H <sub>2</sub> O)
1	26,12	145	37	18,8	2,5	4,5	12
2	29,88	148	36	19,5	2,0	7,8	10
3	29,78	149	38	19,2	2,5	6,8	13
4	29,68	144	33	19,7	2,0	7,1	10
5	29,00	147	38	19,8	2,5	8,0	10
6	29,68	144	39	19,8	2,0	8,0	11
7	30,52	143	34	28,0	3,0	7,8	10
8	30,81	145	39	18,9	2,0	8,8	12
9	30,32	143	38	19,8	2,5	7,0	14
10	30,10	152	35	18,7	3,0	6,8	10
11	30,08	150	37	19,5	2,0	6,0	15
12	30,15	152	38	29,0	3,5	8,5	14
13	30,18	153	40	18,9	2,0	6,0	11
14	30,88	155	40	19,6	2,5	7,0	15
15	30,20	148	36	18,9	2,5	6,5	12
16	30,58	155	38	19,5	2,0	5,8	15
17	30,88	150	40	19,5	2,5	4,5	12
18	30,55	158	38	21,0	2,0	6,0	15
19	30,88	149	39	19,9	2,5	5,0	13
20	30,60	155	38	19,8	3,0	5,5	15
<b>Média</b>	<b>30,04</b>	<b>149</b>	<b>38</b>	<b>20,4</b>	<b>2,4</b>	<b>6,7</b>	<b>12,5</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,018</b>	<b>4,4</b>	<b>1,9</b>	<b>2,8</b>	<b>0,4</b>	<b>1,2</b>	<b>1,9</b>
<b>Desvio %</b>	<b>3,4%</b>	<b>2,9%</b>	<b>5,0%</b>	<b>13,5%</b>	<b>17,6%</b>	<b>18,4%</b>	<b>15,3%</b>

Tabela 6 – Desvios % típicos (espumas com PET micronizado comum)

Formulações em pph (partes por 100 partes de polioli) - Densidade 28 kgs/m <sup>3</sup>												
	D28_0	D28_0	Desvio (%)	D28_10	D28_10	Desvio (%)	D28_15	D28_15	Desvio (%)	D28_20	D28_20	Desvio (%)
Poliol (EO/PO)	84,5	84,5		84,5	84,5		84,5	84,5		84,5	84,5	
Copolímero	15,5	15,5		15,5	15,5		15,5	15,5		15,5	15,5	
TDI 80/20	43,0	43,0		45,6	45,6		46,8	46,8		48,1	48,1	
Surfactante Convencional	1,100			1,150			1,200			1,300		
Surfactante Especial PET		1,100			1,150			1,200			1,300	
Amina	0,120	0,120		0,120	0,120		0,120	0,120		0,120	0,120	
Octoato de Estanho	0,170	0,170		0,190	0,190		0,210	0,210		0,230	0,230	
Água adicionada	3,220	3,220		3,450	3,450		3,550	3,550		3,704	3,704	
Cloreto de Metileno												
PET				10,0	10,0		15,0	15,0		21,9	21,9	
ÍNDICE	109,8	109,8		110,1	110,1		110,5	110,5		109,6	109,6	
<b>Propriedades</b>												
Tempo de Creme (segundos)	16	17		18	18		19	18		18	18	
Tempo de Crescimento (segundos)	120	120		120	100		125	119		118	110	
Relaxamento (cm)	0,1	0,3		0,1	0,2		0,1	0,2		0,1	0,3	
Altura final (cm)	23,0	21,5		30,0	27,0		32,0	26,0		35,0	27,0	
Passagem de ar 1 (mm H <sub>2</sub> O)	15	8	-47%	28	22	-21%	30	12	-60%	20	9	-55%
Passagem de ar 2 (mm H <sub>2</sub> O)	22	12	-45%	40	31	-23%	44	15	-66%	23	10	-57%
Passagem de ar 3 (mm H <sub>2</sub> O)	30	14	-53%	50	40	-20%	58	20	-66%	28	12	-57%
Densidade 1 (kg/m <sup>3</sup> )	25,2	26,0	3%	26,5	27,0	2%	26,4	27,9	6%	26,0	25,9	0%
Densidade 2 (kg/m <sup>3</sup> )	26,2	26,8	2%	27,4	27,8	2%	28,0	28,8	3%	29,0	27,0	-7%
Densidade 3 (kg/m <sup>3</sup> )												
Resiliência (%)	36	38	6%	35	37	5%	30	40	33%	32	42	31%
ILD 40% (N)	148	146	-1%	145	155	6%	148	157	6%	147	160	9%
Fator de conforto	2,3	2,3	0%	2,3	2,3	0%	2,2	2,3	5%	2,2	2,3	5%
Estrutura celular												
Deformação Permanente à Compressão (%)	5	5	0%	7	6	-14%	9	4	-56%	10	5	-50%
Perda de dureza por fadiga (%)	17,0	17,0	0%	19,0	17,0	-11%	28,0	20,0	-29%	29,0	22,0	-24%
Perda de espessura por fadiga (%)	2,0	2,0	0%	2,5	2,0	-20%	3,0	2,0	-33%	3,5	2,5	-29%
Observações	B 8115_0	B 8040_0		B 8115_10	B 8040_10		B 8115_15	B 8040_15		B 8115_20	B 8040_20	

Tabela 7 – Desvios % típicos (espumas com PET micronizado fluorescente)

Formulações em pphp (partes por 100 partes de polioli) - Densidade 28 kgs/m <sup>3</sup>												
	D28_0	D28_0	Desvio (%)	D28_10	D28_10	Desvio (%)	D28_15	D28_15	Desvio (%)	D28_20	D28_20	Desvio (%)
Poliol (EO/PO)	84,5	84,5		84,5	84,5		84,5	84,5		84,5	84,5	
Copolímero	15,5	15,5		15,5	15,5		15,5	15,5		15,5	15,5	
TDI 80/20	43,0	43,0		45,6	45,6		46,8	46,8		48,1	48,1	
Surfactante Convencional	1,100			1,150			1,200			1,300		
Surfactante Especial PET		1,100			1,150			1,200			1,300	
Amina	0,120	0,120		0,120	0,120		0,120	0,120		0,120	0,120	
Octoato de Estanho	0,170	0,170		0,190	0,190		0,210	0,210		0,230	0,230	
Água adicionada	3,220	3,220		3,450	3,450		3,550	3,550		3,704	3,704	
Cloreto de Metileno												
PET				10,0	10,0		15,0	15,0		21,9	21,9	
ÍNDICE	109,8	109,8		110,1	110,1		110,5	110,5		109,6	109,6	
<b>Propriedades</b>												
Tempo de Creme (segundos)	16	16		18	17		18	17		18	17	
Tempo de Crescimento (segundos)	119	120		120	82		125	120		118	105	
Relaxamento (cm)	0,1	0,3		0,1	0,2		0,1	0,3		0,1	0,3	
Altura final (cm)	23,0	20,5		30,0	25,5		32,0	23,5		35,0	24,5	
Passagem de ar 1 (mm H <sub>2</sub> O)	14	5	-64%	30	20	-33%	30	5	-83%	18	5	-72%
Passagem de ar 2 (mm H <sub>2</sub> O)	22	10	-55%	39	30	-23%	47	5	-89%	19	5	-74%
Passagem de ar 3 (mm H <sub>2</sub> O)	30	10	-67%	53	50	-6%	58	5	-91%	26	5	-81%
Densidade 1 (kg/m <sup>3</sup> )	26,0	25,93	0%	26,5	25,9	-2%	26,4	26,88	2%	27,2	25,68	-6%
Densidade 2 (kg/m <sup>3</sup> )	27,5	26,63	-3%	27,4	26,2	-4%	28,0	27,34	-2%	29,4	27,25	-7%
Densidade 3 (kg/m <sup>3</sup> )												
Resiliência (%)	36	40	11%	35	35	0%	30	40	33%	35	40	14%
ILD 40% (N)	92	109	18%	140	170	18%	160	169	6%	145	148	2%
Fator de conforto	2,3	2,3	0%	2,2	2,2	0%	2,2	2,3	5%	2,3	2,3	0%
Estrutura celular												
Deformação Permanente à Compressão (%)	4	3	-25%	8	5	-38%	7	4	-43%	9	8	-11%
Perda de dureza por fadiga (%)	17,0	15,0	-12%	19,0	17,0	-11%	14,0	16,0	14%	28,0	25,0	-11%
Perda de espessura por fadiga (%)	1,0	1,0	0%	3,0	3,7	23%	1,7	2,0	18%	2,0	1,0	-50%
Observações	B 8115_0	B 8040_0		B 8115_10	B 8040_10		B 8115_15	B 8040_15		B 8115_20	B 8040_20	

Tabela 8 – Comparativo principais desvios

Principais desvios (%) nas propriedades físicas pelo uso de PET - espuma D 28 kgs/m <sup>3</sup>										
Propriedades	Desvio médio padrão espuma sem PET (estatístico)	PET comum				PET Fluorescente				
		Espuma sem PET	Espuma 10% PET	Espuma 15% PET	Espuma 20% PET	Espuma sem PET	Espuma 10% PET	Espuma 15% PET	Espuma 20% PET	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	3,4	2,5	2,0	4,5	-3,5	-1,5	-3,0	2,0	-6,5	
ILD 40% (N)	2,9	-1,0	6,0	6,0	9,0	18,0	18,0	6,0	2,0	
Resiliência (%)	5,0	6,0	5,0	33,0	31,0	11,0	0,0	33,0	14,0	
Perda de dureza por fadiga (%)	13,5	0,0	-11,0	-29,0	-24,0	-12,0	-11,0	14,0	-11,0	
Perda de espessura por fadiga (%)	17,6	0,0	-20,0	-33,0	-29,0	0,0	23,0	18,0	-50,0	
Deformação permanente à compressão (%)	18,4	0,0	-14,0	-56,0	-50,0	-25,0	-38,0	-43,0	-11,0	
Passagem de ar (mm H <sub>2</sub> O)	15,3	48,0	22,0	-64,0	-56,0	-62,0	-20,0	-88,0	-75,0	
Fator conforto	5,0	0,0	0,0	5,0	5,0	0,0	0,0	5,0	0,0	

Tabela 9 – Propriedades mais afetadas pelo uso de PET micronizado (comum e fluorescente)

<b>Principais propriedades físicas afetadas pelo uso de PET - espuma D 28 kgs/m<sup>3</sup></b>				
	<b>Resiliência (%)</b>	<b>Deformação permanente à compressão (%)</b>	<b>Perda de dureza por fadiga (%)</b>	<b>Perda de espessura por fadiga (%)</b>
Norma ABNT 13579-1	35,0% (min.)	8,0% (max.)	27,0% (max.)	5,0% (max.)
10% PET comum - surfactante convencional	35,0	7,0	19,0	2,5
10% PET comum - surfactante especial	37,0	6,0	17,0	2,0
10% PET fluorescente - surfactante convencional	35,0	8,0	19,0	3,0
10% PET fluorescente - surfactante especial	35,0	5,0	17,0	3,7
15% PET comum - surfactante convencional	30,0	9,0	28,0	3,0
15% PET comum - surfactante especial	40,0	4,0	20,0	2,0
15% PET fluorescente - surfactante convencional	30,0	7,0	14,0	1,7
15% PET fluorescente - surfactante especial	40,0	4,0	16,0	2,0
20% PET comum - surfactante convencional	32,0	10,0	29,0	3,5
20% PET comum - surfactante especial	42,0	5,0	22,0	2,5
20% PET fluorescente - surfactante convencional	35,0	9,0	28,0	2,0
20% PET fluorescente - surfactante especial	40,0	8,0	25,0	1,0

## 5.5. Análises por marcação com fluoresceína

### 5.5.1 Fotografias digitais

Devido a enorme dificuldade inicial em se encontrar PET fluorescente (masterbatch), realizaram-se alguns ensaios iniciais utilizando PET reciclado micronizado comum misturado fisicamente a frio com pigmento. Utilizamos 2 pigmentos nas cores rosa (Rhodamina) e verde (fluoresceína). As dosagens de pigmentos foram de 0,01; 0,1 e 1,0% sobre a massa de PET micronizado. Analisamos então as imagens das espumas produzidas com pigmento verde (Figuras 25 e 26) e com pigmento rosa (Figuras 27 e 28).

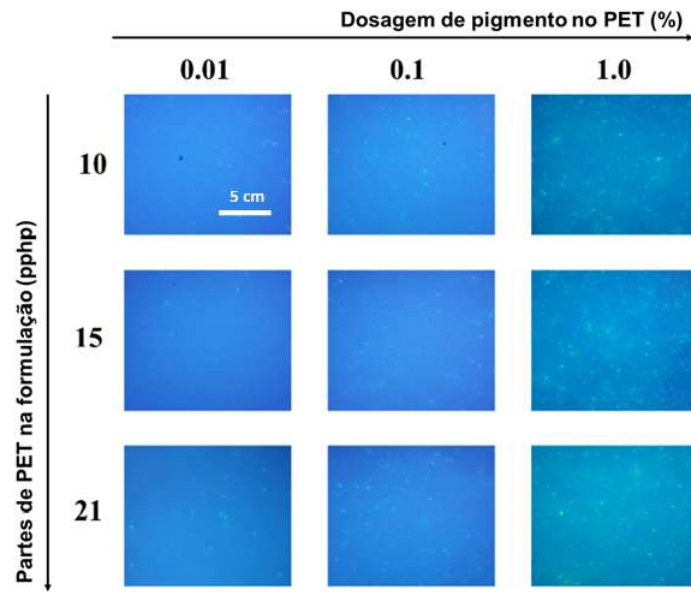


Figura 25 – Espumas preparadas com pigmento verde.

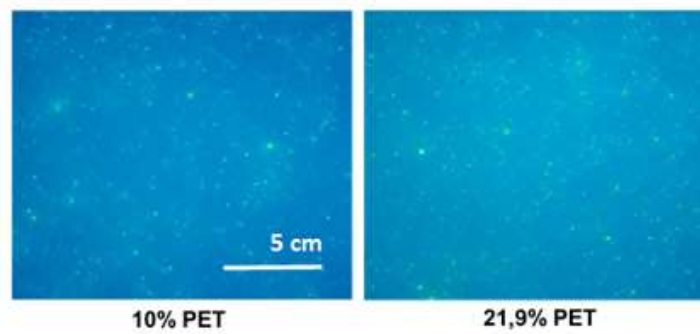


Figura 26 – Espumas preparadas com pigmento verde: foto ampliada.

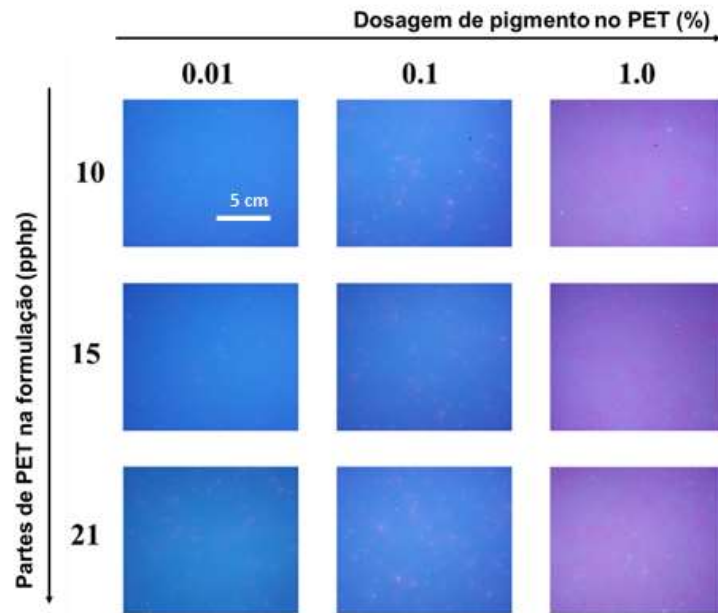


Figura 27 – Espumas preparadas com pigmento rosa.

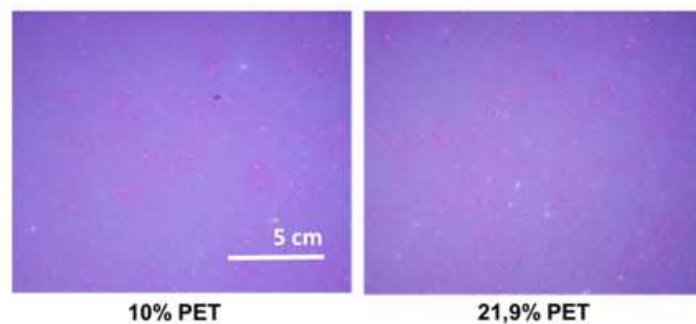


Figura 28 – Espumas preparadas com pigmento rosa: foto ampliada.

Não foi possível a visualização do PET fluorescente, ou seja, usando os pigmentos misturados a frio no PET reciclado micronizado não foi possível fazer marcação da fluorescência na estrutura celular das espumas. Mas estes ensaios foram válidos para comprovar que precisávamos mesmo obter um masterbatch de PET já com o pigmento devidamente incorporado (encapsulado).

Conseguiu-se então obter o masterbatch de PET com pigmento fluoresceína já encapsulado, o qual foi então micronizado a 40 mesh. Foi possível então produzir-se os blocos

de espumas com PET micronizado fluorescente para as devidas análises fotográficas e microscópicas conforme previamente planejado.

Para preparação dos corpos de prova, os blocos de espuma de 25x25x25 cm contendo PET micronizado fluorescente, foram fatiados nos sentidos horizontal (H) e vertical (V) em lâminas de espessura de aproximadamente 2 cm (Figuras 23). Os corpos de prova ficaram com as dimensões médias de 16x12x2 cm.

O sentido vertical (V) foi numerado iniciando-se a contagem pelo número 1 no sentido de fora para dentro do bloco. O sentido horizontal (H) foi numerado iniciando-se a contagem pelo número 1 no sentido de baixo para cima. Portanto a identificação da lâmina é pela dosagem de PET micronizado fluorescente seguido pelo sentido de fatiamento da lâmina com seu respectivo sequenciamento.

Como exemplos:

- 10H1 = lâmina horizontal 1 com 10% de PET (fundo ou parte inferior do bloco)
- 20V7 = lâmina vertical 7 com 20% de PET (centro ou parte interna do bloco)

Fotografou-se então individualmente cada lâmina de espuma, ou seja, todas as lâminas horizontais (Figura 29 e Figura 30) e todas as lâminas verticais (Figura 31 e Figura 32).

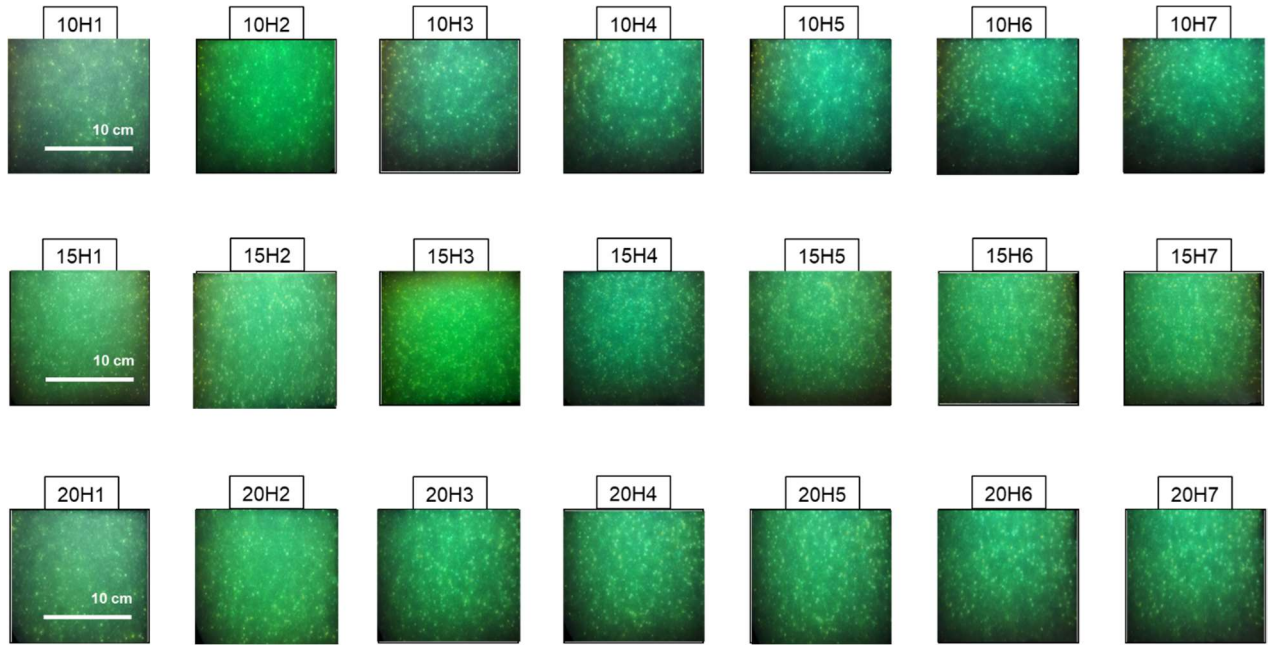


Figura 29 – Lâminas horizontais - Surfactante Convencional.

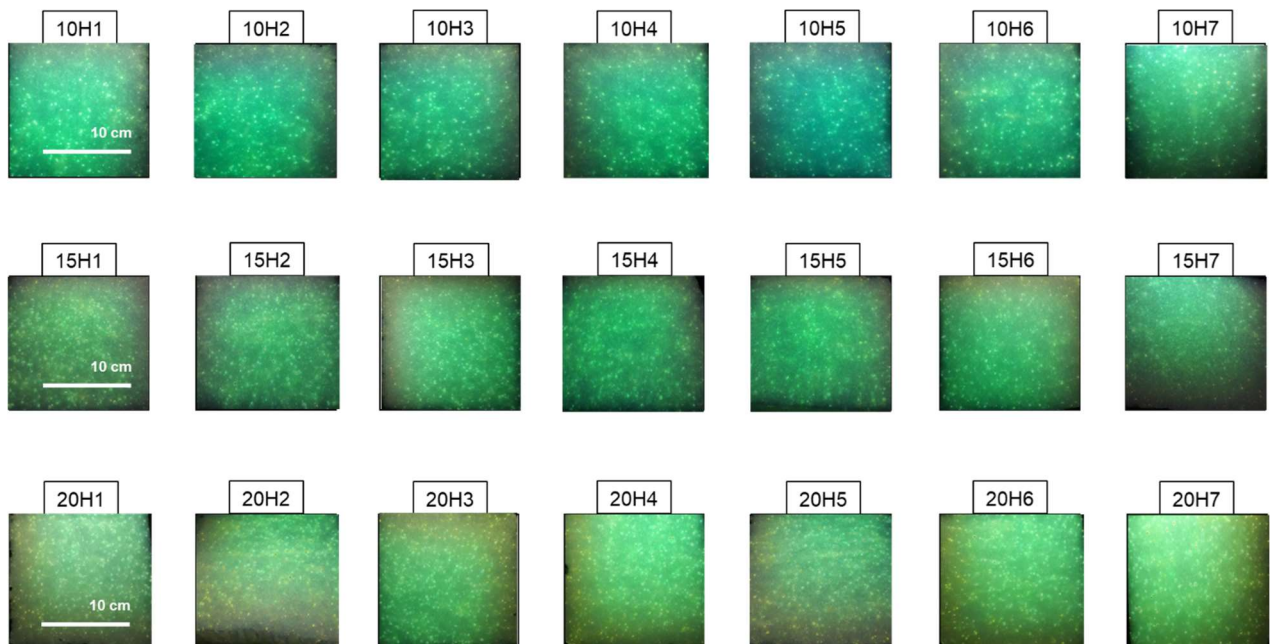


Figura 30 – Lâminas horizontais - Surfactante Especial.



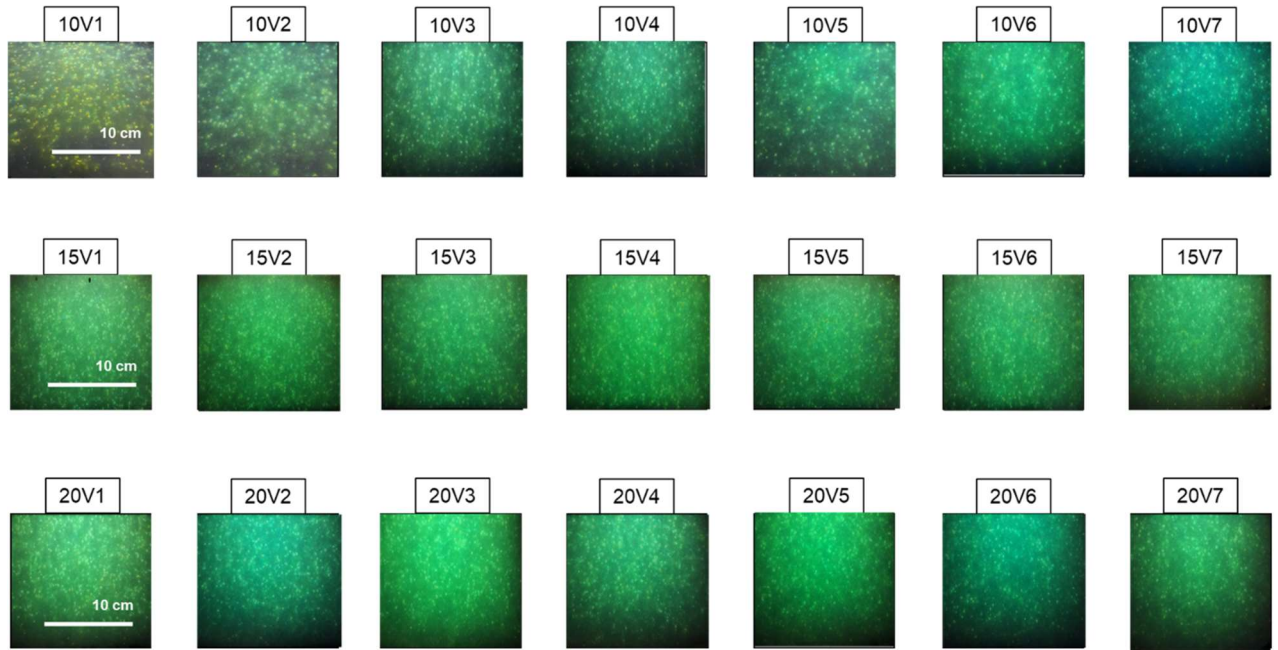


Figura 31 – Lâminas verticais - Surfactante Convencional.

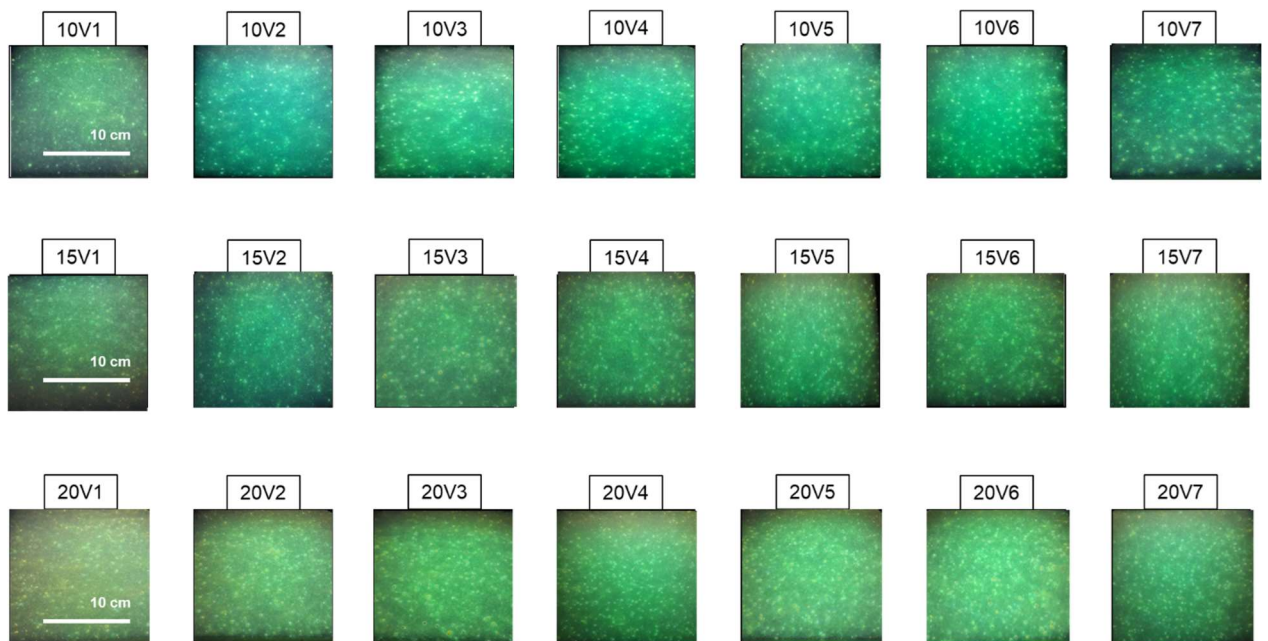


Figura 32 – Lâminas verticais - Surfactante Especial.

Elegeram-se então algumas fotos ampliadas comparativas das mesmas lâminas, variando-se os dois surfactantes diferentes empregados.

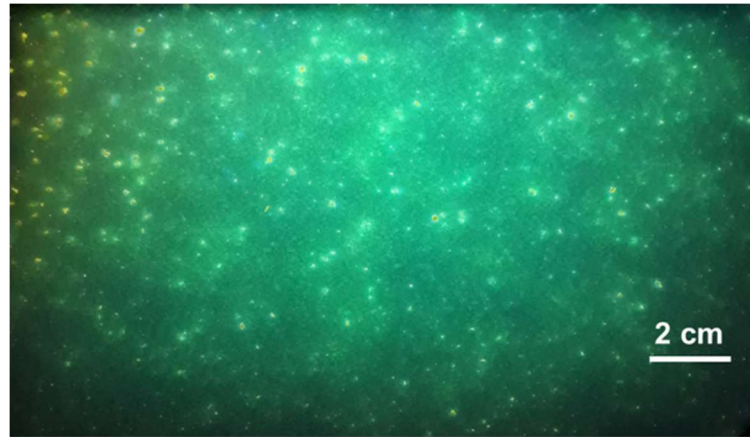


Figura 33 – Foto ampliada 10H3 – Surfactante Convencional.

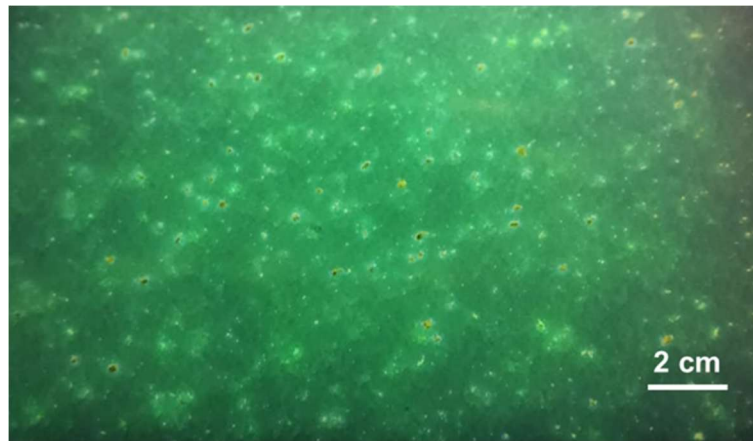


Figura 34 – Foto ampliada 10H3 – Surfactante Especial.

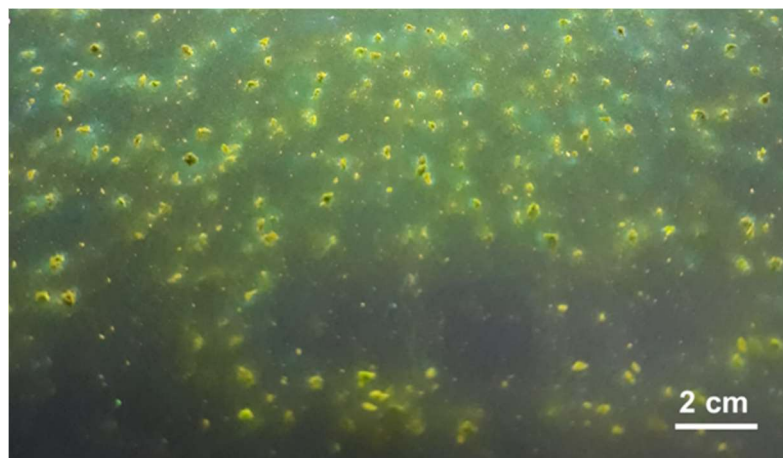


Figura 35 – Foto ampliada 10V1 – Surfactante Convencional.

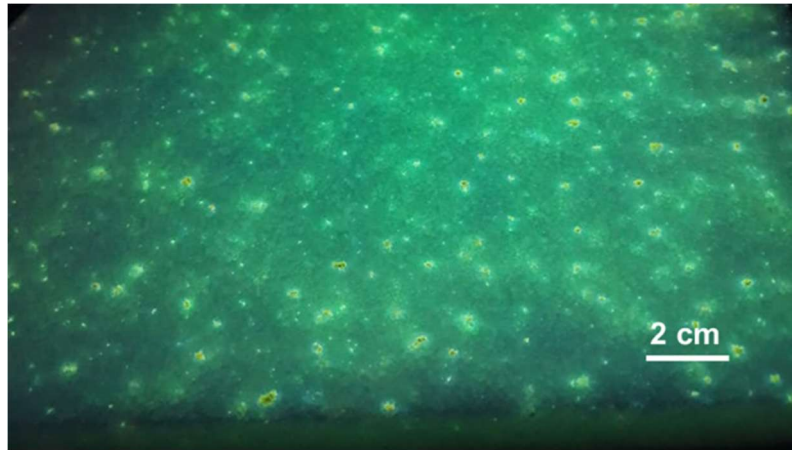


Figura 36 – Foto ampliada 10V1 – Surfactante Especial.

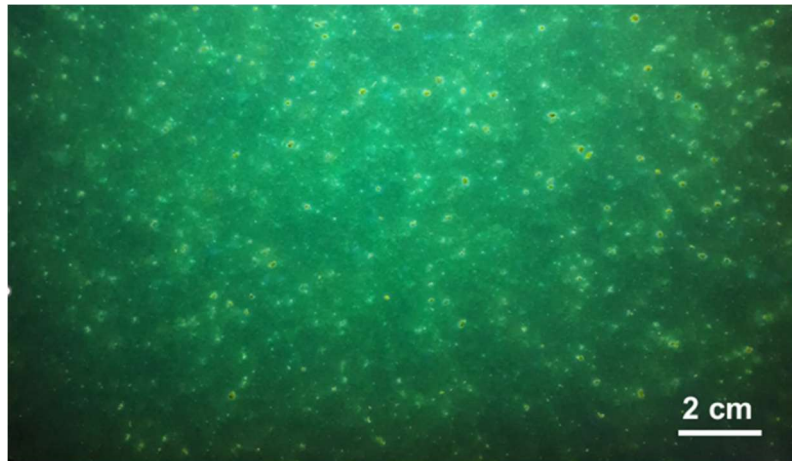


Figura 37 – Foto ampliada 15H4 – Surfactante Convencional.

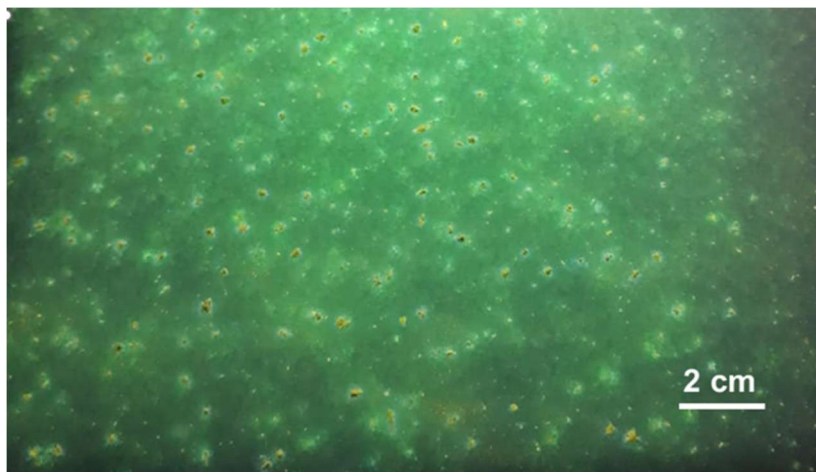


Figura 38 – Foto ampliada 15H4 – Surfactante Especial.

Pela análise visual simples das fotos ampliadas verifica-se que as lâminas produzidas com surfactante especial (Figuras 34, 36 e 38) apresentam uma distribuição de PET micronizado fluorescente mais homogênea que as lâminas produzidas com surfactante convencional (Figuras 33, 35 e 37). Esta maior homogeneidade condiz com a maior uniformidade das propriedades das espumas em benefício do cumprimento das normas ABNT.

### 5.5.2 Análises microscópicas

Análises das espumas, por microscopia óptica e de fluorescência devem permitir conclusões adicionais quanto aos sítios preferenciais de incorporação do PET micronizado marcado com fluoresceína nas bolhas da espuma, bem como de uma eventual influência da incorporação do PET micronizado na distribuição do tamanho das bolhas que constituem a estrutura celular da espuma. (ALMGREN, F.; TAYLOR, J., 1976), (KUBITSCHECK, U., 2017).

Foram feitas várias análises microscópicas variando-se a escala de ampliação. Selecionou-se as principais fotos para estudo e discussões dos resultados. Pôde-se confirmar, conforme registros abaixo, que a fluorescência se concentra sempre nas Bordas de Plateau tetraédricas.



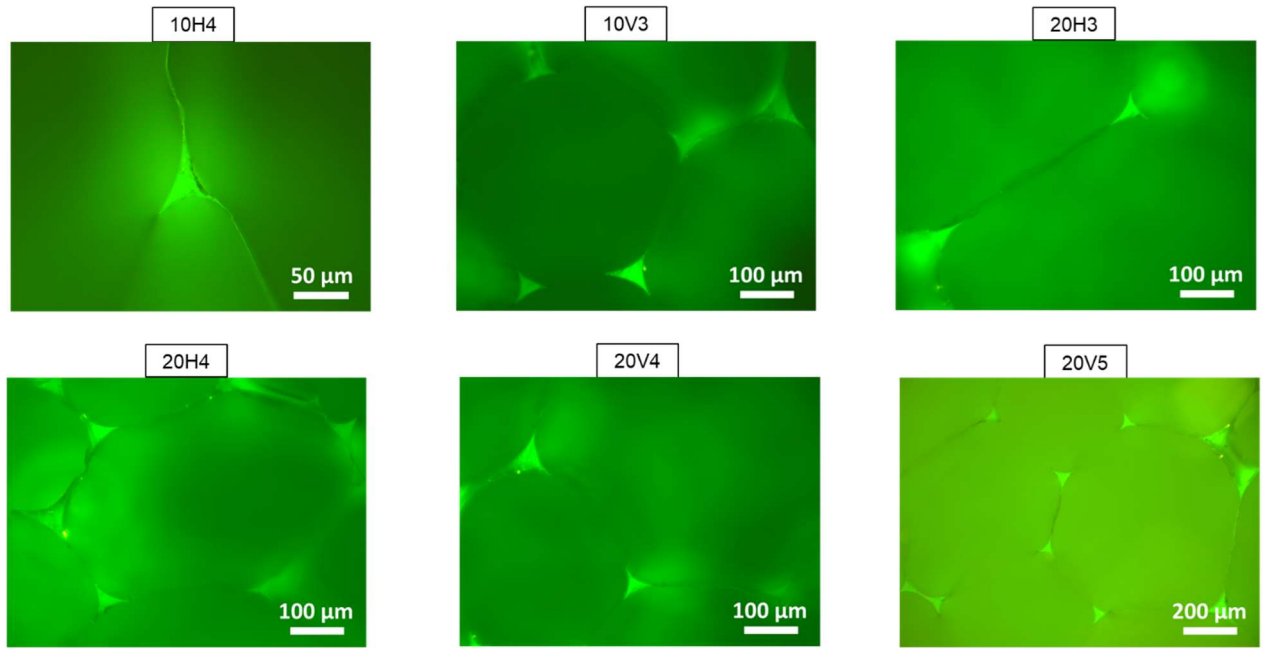


Figura 39 – Lâminas com Surfactante Convencional.

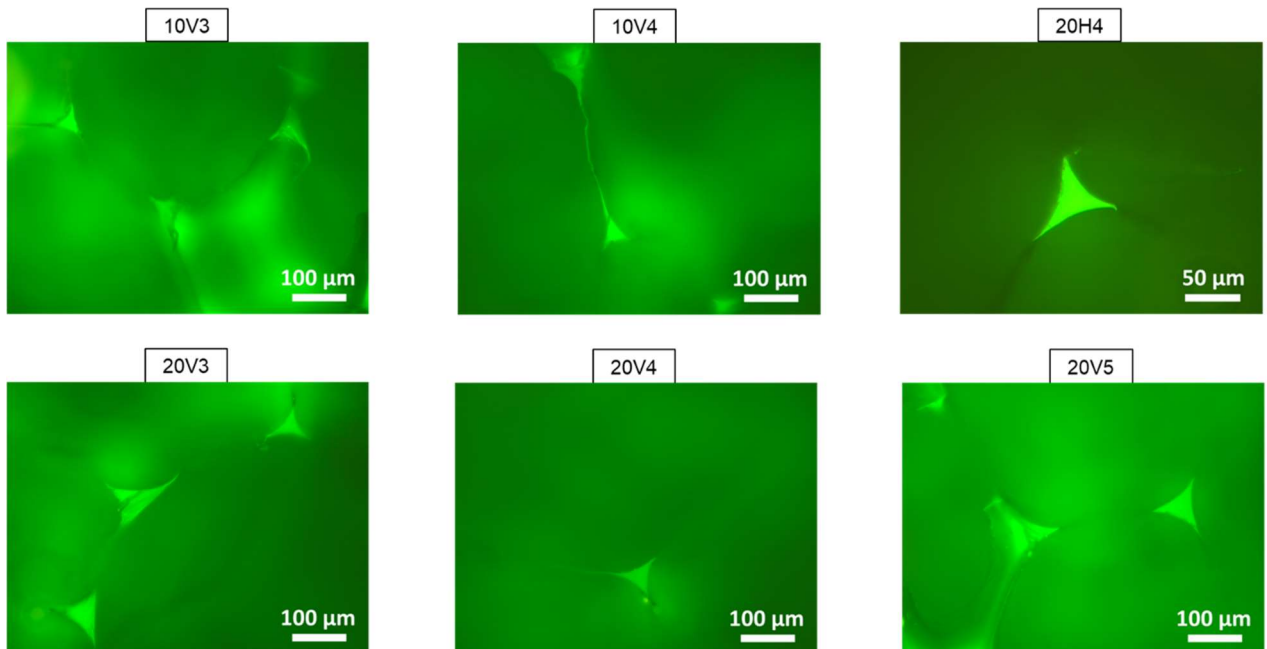


Figura 40 – Lâminas com Surfactante Especial.

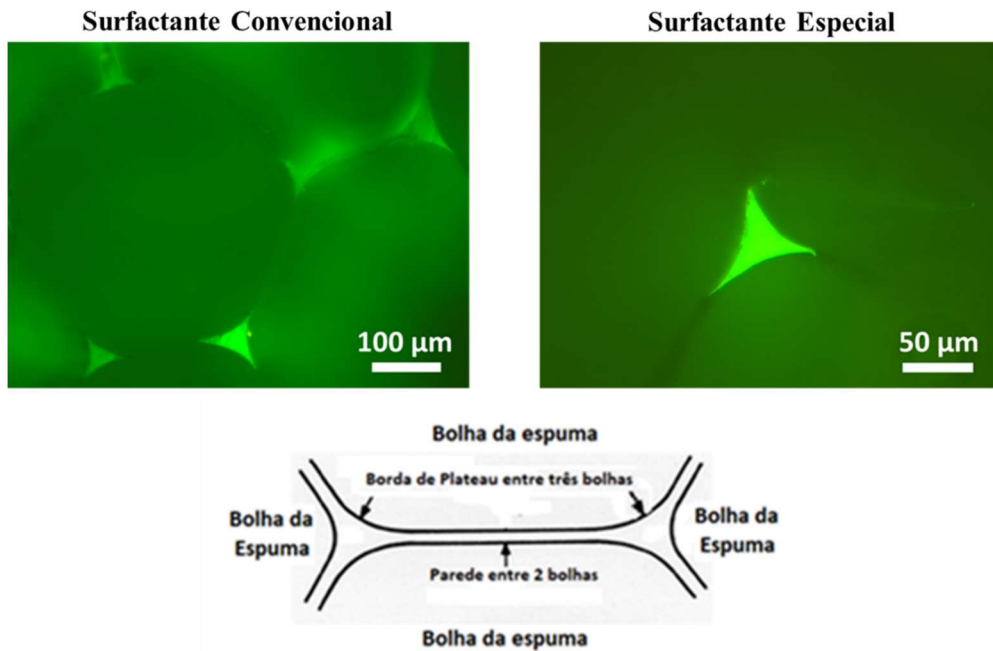


Figura 41 – Microscopia ampliada indicando o acúmulo da fluorescência nas bordas de Plateau (indicada no diagrama) nas espumas de PU marcadas com PET micronizado fluorescente.

O uso de PET micronizado como carga orgânica exige um bom conhecimento técnico e experimental em se ajustar as formulações e em usar surfactantes adequados, de modo a manter as propriedades físicas das espumas dentro das normas. Neste trabalho foram produzidos blocos de espumas com densidade  $28 \text{ kg/m}^3$  (D28) de  $25 \times 25 \times 25$  cm num box foamer de laboratório com uma quantia de PET micronizado (comum e fluorescente) nas formulações variando de 0 a 21,9% em relação ao poliol. Nas formulações, foram utilizados dois tipos de surfactantes, um surfactante de silicone convencional (tecnologia SiC) e um surfactante de silicone especial (tecnologia SiOC) previamente otimizado para uso em formulações contendo PET micronizado. O surfactante especial é desenvolvido para formulações que demandam um maior poder de emulsificação, nucleação e estabilização na presença por exemplo de partículas sólidas, como o PET micronizado, único sólido portanto dentro da mistura reacional líquida. Este surfactante especial desempenha, portanto, as funções fundamentais de emulsificação, nucleação, estabilização e distribuição do PET micronizado dentro da espuma.

Conforme demonstrado com o uso do surfactante especial, todas as espumas contendo PET micronizado tiveram propriedades dentro das normas ABNT (Tabelas 2 e 3), enquanto o emprego do surfactante convencional resultou, em todos os casos, em espumas fora de uma ou mais propriedades da norma, principalmente na dosagem mais alta de PET micronizado (Tabelas 2 e 3).

### 5.5.3 Medidas macroscópicas de fluorescência

As espumas preparadas com PET micronizado marcado com fluoresceína tinham uma cor verde clara que se intensificava com o aumento da quantidade de PET micronizado adicionada. Para visualizar a distribuição do PET micronizado fluorescente no interior dos blocos de espuma, eles foram seccionados em fatias horizontais e verticais conforme indicado na Figura 23. A Figura 42 compara imagens coloridas da fluorescência de uma lâmina horizontal (10H3) do bloco de espuma contendo 10 pphp de PET marcado com fluoresceína preparado com o surfactante SiC e uma lâmina vertical (10V1) do bloco correspondente preparado com o surfactante SiOC. Conforme indicado pela comparação das imagens, a dispersão e incorporação do PET micronizado marcado com fluorescência é claramente superior com o surfactante SiOC do que com o surfactante SiC.

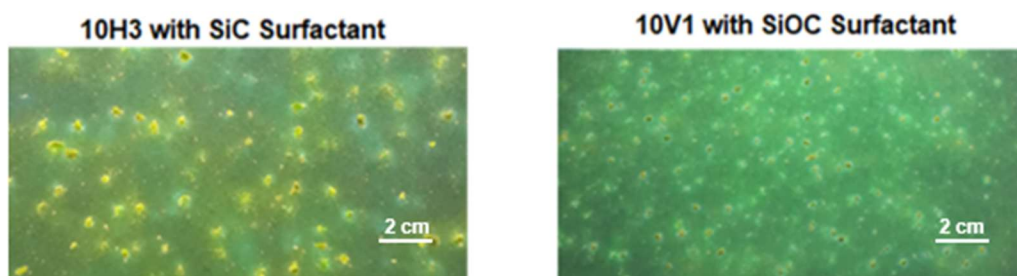


Figura 42 – Comparação das fotografias de fluorescência de duas diferentes lâminas de espuma D28\_10 contendo 10 pphp de PET micronizado fluorescente, uma lâmina horizontal (10H3) de espuma preparada com surfactante SiC com uma lâmina (10V1) de espuma preparada com surfactante SiOC.

Com o objetivo de visualizar de forma mais clara as regiões de concentração da fluorescência nas lâminas de espuma, a cor original das imagens digitais (Figura 43a) foi convertida a cor branca com fundo preto usando-se o programa paint brush; a nitidez, brilho e saturação foram ajustados no sentido de filtrar a fluorescência de fundo difusa do interior da espuma, mantendo uma representação realista das posições e tamanhos relativos dos pontos fluorescentes (Figura 43b). A inversão de cor para preto sobre fundo branco melhorou ainda mais a visualização nas imagens finais (Figura 43c) da distribuição espacial do PET micronizado fluorescente em cada lâmina de espuma. As Figuras 44 e 45 organizam as imagens finais da fluorescência dos cortes na sequência indicada na Figura 23. Elas permitem uma comparação da distribuição tridimensional da emissão de fluorescência de um bloco de espuma de poliuretano contendo 10 pphp de PET micronizado marcado com fluoresceína preparado com o surfactante SiC (Figura 44) com aquela de um bloco análogo preparado com o surfactante SiOC (Figura 45). A dispersão menos uniforme do PET micronizado marcado com fluoresceína pelo surfactante SiC em relação àquela com o surfactante SiOC, indicada na Figura 42 para as lâminas 10H3 (surfactante SiC) e 10V1 (surfactante SiOC), é evidente também na Figura 44 na distribuição da fluorescência pelas lâminas horizontais e verticais. Assim, a Figura 44 aponta para uma maior concentração da fluorescência na metade superior do bloco de espuma de poliuretano, indicando que a carga de PET micronizado é preferencialmente carregada pela espuma em expansão durante a reação de polimerização. Isso contrasta com a distribuição geralmente muito mais uniforme da fluorescência na Figura 45 quando o surfactante SiOC foi empregado sob condições idênticas. Uma maior concentração de PET micronizado na metade superior do bloco com o surfactante SiC não é inconsistente com as propriedades menos desejáveis da espuma como resiliência, deformação permanente e perda de dureza por fadiga, especialmente em dosagens mais altas de PET (Tabela 2).



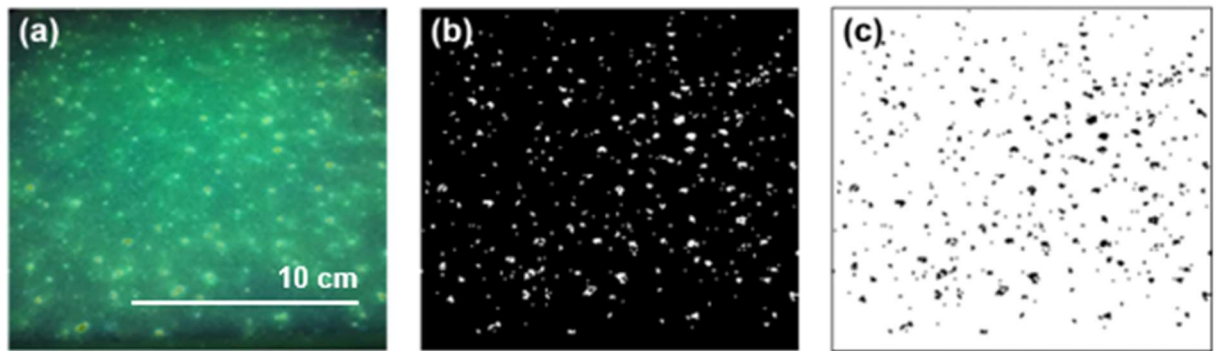


Figura 43 – Ilustração do procedimento de tratamento das imagens para visualização da distribuição espacial do PET micronizado fluorescente nas espumas de poliuretano. (a) cor original da imagem digital da fluorescência sob iluminação de 366 nm da lâmina 10V1 (vide figura 42) da espuma de poliuretano contendo 10 pphp de PET micronizado fluorescente e preparado com surfactante SiOC; (b) imagem correspondente convertida para cor branca com fundo preto após ajustes de nitidez, brilho e saturação para remover a fluorescência de fundo difusa; (c) imagem final com inversão para cor preta com fundo branco.

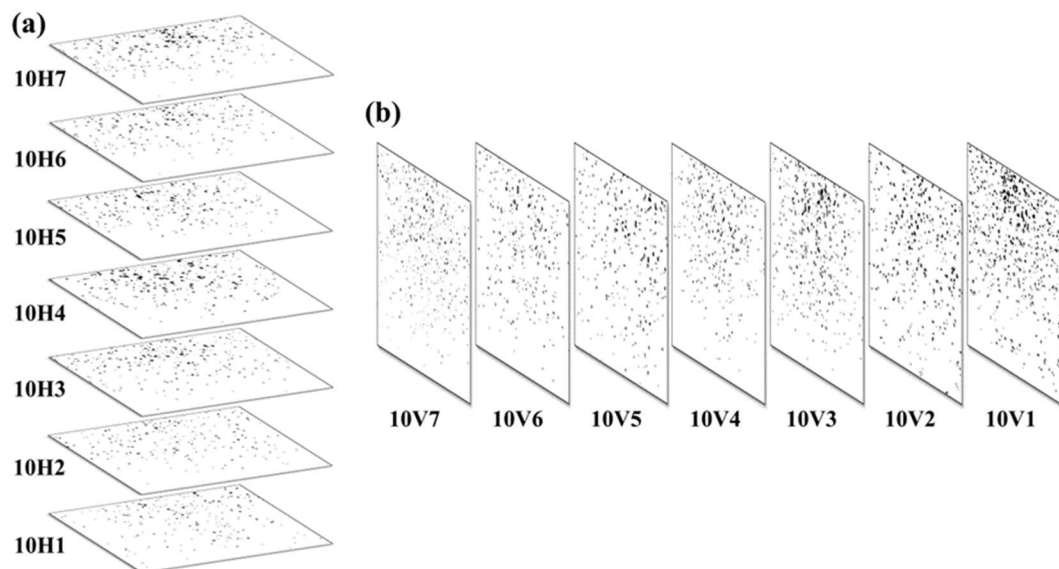


Figura 44 - Imagens das lâminas (a) horizontal e (b) vertical indicando a distribuição tridimensional da fluorescência no bloco de espuma de poliuretano D28\_10 contendo 10 pphp PET micronizado fluorescente produzido com surfactante SiC.

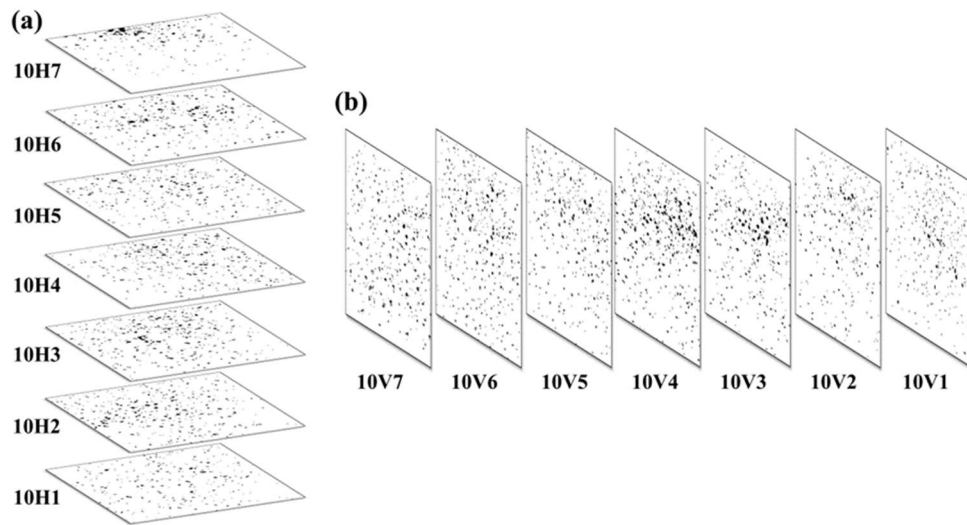


Figura 45 – Imagens das lâminas (a) horizontal e (b) vertical indicando a distribuição tridimensional da fluorescência no bloco de espuma de poliuretano D28\_10 contendo 10 pphp PET micronizado fluorescente produzido com surfactante SiOC.

O motivo para a localização da maior parte da fluorescência em forma de pontos fluorescentes na face das fatias de poliuretano (Figuras 42 e 43) torna-se claro a partir do exame por microscópico de fluorescência das lâminas de espuma. Conforme indicado na Figura 46, o PET micronizado fluorescente concentra-se nas bordas de Plateau nas junções tetraédricas entre as células da espuma, com pouca ou nenhuma fluorescência nos canais de Plateau ou faces entre as células (EMMER, M.; QUARTERONI, A., 2009). Partículas de PET micronizado fluorescente maiores ou aglomerados não dispersos tenderão a ser excluídos das faces das células de espuma à medida que a espuma cresce (expande-se). Ao mesmo tempo, os fluxos capilares e/ou fluxos de Marangoni que ocorrem durante o crescimento (expansão) das espumas (FAMEAU A., SALONEN, A., 2014; DRENCKHAN W., HUTZLER, A., 2015; YUNFEI et al., 2015; GRASSIA et al., 2016) favorecem uma maior concentração de poliuretano e PET micronizado fluorescente nas bordas de Plateau tetraédricas, resultando na localização preferencial da fluorescência observada nesta região da espuma.

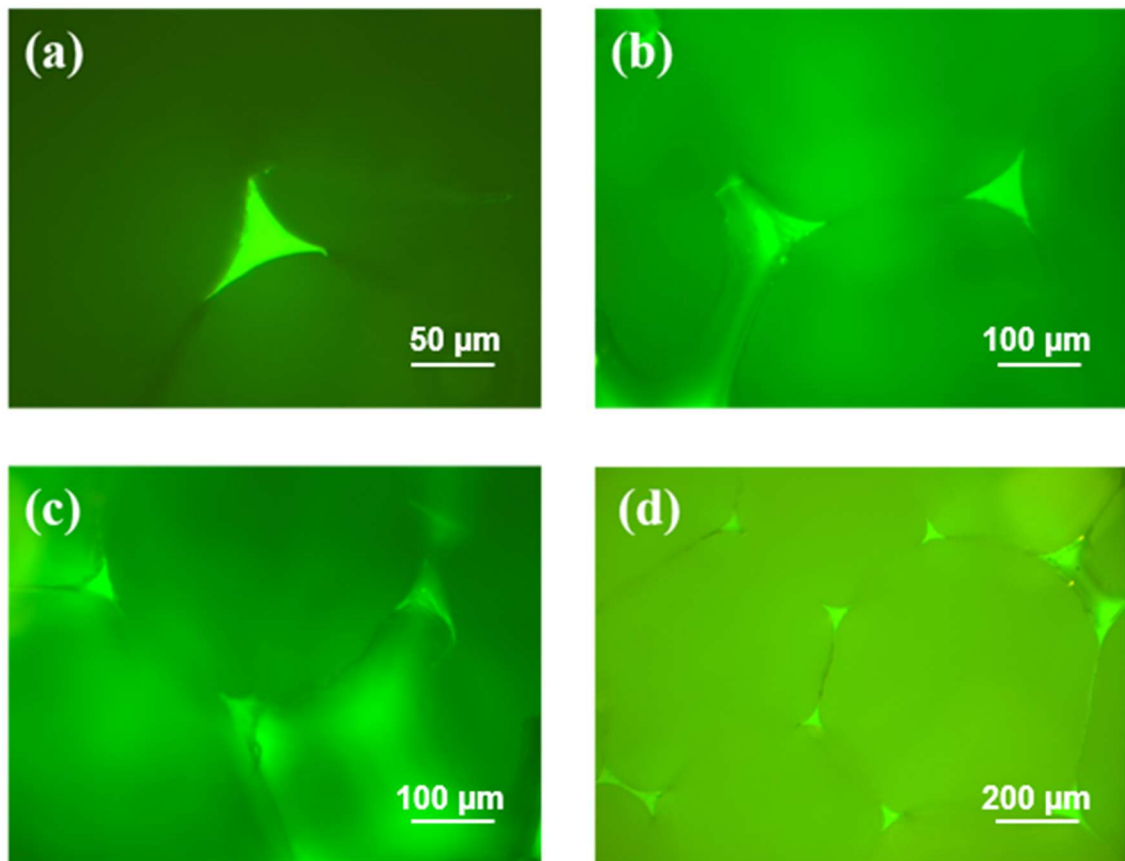


Figura 46 – Microfotografias de fluorescência (excitação 470 nm; emissão >515 nm) de regiões selecionadas das superfícies das lâminas de espumas de poliuretanos contendo 10 pphp (D28\_10) ou 21.9 pphp (D28\_20) de PET micronizado fluorescente preparadas com surfactante SiOC: (a) lâmina 20H4 ampliada 40X; (b) lâmina 20V5 ampliada 25X; (c) lâmina 10V3 ampliada 25X; ou com surfactante SiC: (d) lâmina 20V5 ampliada 10X.

## 6. CONCLUSÃO

O uso de um surfactante SiOC permite a preparação de espumas flexíveis de poliuretano contendo quantidades significativas de PET reciclado micronizado sem comprometer a qualidade e as propriedades físicas relevantes exigidas para a produção dos colchões, tais como densidade, dureza, resiliência, conforto e fadiga. O PET micronizado fluorescente possibilita uma metodologia para a visualização da distribuição tridimensional do PET em todo o bloco de espuma. As espumas produzidas com surfactante SiC apresentam uma distribuição tridimensional menos uniforme do PET marcado com fluorescência em relação às espumas preparadas com surfactante SiOC, condizente com as melhores propriedades físicas das espumas produzidas com este último. O exame microscópico de fluorescência das espumas demonstra que, durante o processo de expansão e polimerização, o PET micronizado fluorescente é incorporado predominantemente nas bordas de Plateau tetraédricas da estrutura celular das espumas resultantes contendo PET. Além da redução do custo financeiro de produção das espumas entre 5 e 10% decorrente da substituição de 21,9% da matéria-prima na formulação da espuma, a utilização de PET reciclado micronizado como carga orgânica em espumas flexíveis representa um destino mais nobre para o polímero reciclado, combinando viabilidade econômica com uma solução sustentável em prol do nosso meio ambiente.

No presente estudo desenvolveu-se uma técnica que permite o mapeamento tridimensional da distribuição de PET em espumas flexíveis de poliuretano com densidade 28 kgs/m<sup>3</sup> e até 21,9% de PET micronizado fluorescente (sobre a massa de polioli) que cumprem com as normas ABNT.

Como projeto futuro há um potencial interessante para formatação de uma metodologia mais detalhada e completa de marcação por fluorescência para visualizar a distribuição tridimensional do PET na espuma de poliuretano em função dos vários parâmetros operacionais

do processo de fabricação, com o intuito de identificar e explorar um pouco mais as possíveis interdependências entre a distribuição do PET na espuma e suas propriedades.

## REFERÊNCIAS

ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. Disponível em <https://www.abipet.org.br>. Acesso em 01/08/2022.

ALMGREN JR., FREDERICK J.; TAYLOR, JEAN E. The Geometry of Soap Films and Soap Bubbles. *Scientific American*, v. **235**, p. 82-93, 1976.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13579-1:2011: Colchão e Colchonete de espuma flexível de poliuretano e bases Parte 1: Requisitos e métodos de ensaio. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8537:2015: Espuma flexível de poliuretano - Determinação da densidade. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8619:2022: Espuma flexível de poliuretano - Determinação da resiliência. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8797:2017: Espuma flexível de poliuretano - Determinação da deformação permanente à compressão. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8910:2016: Espuma flexível de poliuretano - Determinação da resistência à compressão. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9176:2016: Espuma flexível de poliuretano - Determinação da força de indentação. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9177:2022: Espuma flexível de poliuretano - Determinação da fadiga dinâmica. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14961:2019: Espuma flexível de poliuretano - Determinação do teor de cinzas. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329469>>. Acesso em: 13/06/2022.

BHADRA, ABHISEK. An experimental study on the microstructure–mechanical property relationship of crumb rubber–polyurethane foam composites. MS Thesis, Oklahoma State University, 2010. Disponível em: <<https://shareok.org/handle/11244/9896>>. Acesso em 13-06/2022.

BROOK, MICHAEL A.. *Silicon in Organic, Organometallic and Polymer Chemistry*. John Wiley & Sons, USA, p. 256-278, 2000.

CABULIS, U.; KURANSKA, M.; MICHALOWSKI, S.; PROCIAK, A.; KIRPLUKS, M.. Microcellulose as a natural filler in polyurethane foams based on the biopolyol from rapeseed oil. *Polimery*, v.61, p. 625-632, 2016.

ČUK, N.; FABJAN, E.; GRŽELJ, P.; KUNAVER, M.. Water-blown polyurethane/polyisocyanurate foams made from recycled polyethylene terephthalate and liquefied wood-based polyester polyol. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 132, p. 1-7, 2015.

CZLONKA, S.; SIENKIEWICZ, N.; KAIRYTE, A.; VAITKUS S.. Colored polyurethane foams with enhanced mechanical and thermal properties. *Polymer Testing*, v. 78, p. 1-11, 2019.

CZLONKA, S.; STRAKOWSKA, A.; KAIRYTE, A.; KREMENSAS, A.. Nutmeg filler as a natural compound for the production of polyurethane composite foams with antibacterial and anti-aging properties. *Polymer Testing*, v. 86, p. 1-13, 2020a.

CZŁONKA, S.; STRĄKOWSKA, A.; POSPIECH, P.; STRZELEC, K.. Effects of Chemically Treated Eucalyptus Fibers on Mechanical, Thermal and Insulating Properties of Polyurethane Composite Foams. *Materials*, v.13, p. 1-22, 2020b.

DATTA, J.; WLOCH, M.. Recycling of Polyurethanes. *Polyurethane Polymers*, Chapter 14, p. 323-358, 2017.

DRENCKHAN, W.; HUTZLER, S.. Structure and energy of liquid foams. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 224, p. 1-16, 2015.

EMMER, M.; QUARTERONI, A.. Soap films and soap bubbles: from Plateau to the olympic swimming pool in Beijing. *MATHKNOW Mathematics, Applied Sciences and Real Life*, Springer, Italia, v.3, p. 119-129, 2009.

FAMEAU, A.; SALONEN, A.. Effect of particles and aggregated structures on the foam stability and aging. *Comptes Rendus Physique*, v. 15, p. 748-760, 2014.

FLUORESCÊNCIA – COR E ESTRUTURA QUÍMICA

Fonte: Disponível em: <<https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/fluoresceina>>. Acesso em 12/10/2022.

GEYER, B.; LORENZ, G.; KANDELBAUER, A.. Recycling of poly(ethylene terephthalate) A review focusing on chemical methods. *Express Polymer Letters*, v. 10, p. 559–586, 2016.

GRASSIA, P.; SHOKRI, N.; BONSU, K. O.. Fundamental investigation of foam flow in a liquid-filled Hele-Shaw cell. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 462, p. 288-296, 2016.

GRDADOLNIK, M.; DRINČIĆ, A.; OZGUN, O.; ORESKI, A.; UTROŠA, P.; PAHOVNIK, D.; ŽAGAR, E. Insight into Chemical Recycling of Flexible Polyurethane Foams by Acidolysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **v.10**, p. 1323-1332, 2022.

HERRINGTON, R.; HOCK, K.. *DOW POLYURETHANES: Flexible Foams*. The Dow Chemical Company, 2<sup>nd</sup> Edition, USA, p. 2.1-2.35, 1997.

IONESCU, M.. *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes*. Rapra Technology, UK, p. 515-518, 2005.

JAMESON, D. M.. *Introduction to Fluorescence*. CRC Press, USA, p. 163-188, 2014.

KASTNER, J.; KICKINGER, R.; SALABERGER, D.. High-resolution X-ray computed tomography for 3D microstructure characterization of a cellulose particle filled polymer foam. *Journal of Cellular Plastics*, **v. 47**, p. 567-578, 2011.

KOERNER, G.; SCHULZE, M.; WEIS, J.. *Silicones: Chemistry and Technology*. Vulkan Verlag, Germany, p. 111-121, 1991.

KUBITSCHECK, U.. *Fluorescence Microscopy: From Principles to Biological Applications*. Wiley-VCH, Germany, 2<sup>nd</sup> edition, p. 85-164, 2017.

KURANSKA, M.; PROCIAK, A.. Porous polyurethane composites with natural fibres. *Composites Science and Technology*, **v. 72**, p. 299-304, 2012.

MACIJAUSKAS, G.; JANKAUSKAITĖ, V.. Epoxy Resin and Polyurethane Compositions from Glycolized Poly (ethylene terephthalate) Wastes. *Materials Science*, **v. 19**, p. 283-290, 2013.

MELLO, D.; PEZZIN, S. H.; AMICO, S. C. The effect of post-consumer PET particles on the performance of flexible polyurethane foams. *Polymer Testing*, **v. 28**, p. 702-708, 2009.

NIKJE, M. A.. *Recycling of Polyurethane Wastes*. Smithers Rapra Technologies, UK, p. 13-48, 2016.

OTTO BAYER – PERSONALITIES OF BAYER'S HISTORY

Disponível em <<https://www.bayer.com/en/history/otto-bayer>>. Acesso em 01/08/2022).

PHAM, C. T.; NGUYEN, B. T.; KANG, S. J.; KIM, J.; LEE P. C., NGUYEN, H. T. T.; HOANG, D.. Comprehensive Investigation of the Behavior of Polyurethane Foams Based on Conventional Polyol and Oligo-Ester-Ether-Diol from Waste Poly(ethylene terephthalate): Fireproof Performances, Thermal Stabilities, and Physicomechanical Properties. *ACS Publications*, **v.5**, p. 33053 – 33063, 2020

PINTO, P. C. C.; SILVA, V. R.; YOSHIDA, M. I.; OLIVEIRA, M. A, L.. Synthesis of flexible polyurethane foams by the partial substitution of polyol by steatite. *Polímeros*, **v. 28**, p. 323-331, 2018.

POLYURETHANE CHEMICALS AND PRODUCTS IN SOUTH AMERICA – IAL 2018.



Disponível em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/4541560/polyurethane-chemicals-and-products-in-south>>. Acesso em: 13/06/2020.

SANT'ANNA, S. S.; SOUZA, D. A.; ARAUJO, D. M.; CARVALHO, C. F.; YOSHIDA, M. I. Physico-chemical analysis of flexible polyurethane foams containing commercial calcium carbonate. *Materials Research*, v.11, p. 433-438, 2008.

SINHA, V.; PATEL, M. R.; PATEL, J. V.. PET Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 18, p. 8-25, 2008.

STIEBRA, L.; CABULIS, U.; KNITE, M. J.. Polyurethane foams obtained from residues of PET manufacturing and modified with carbon nanotubes. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 709, p. 1-7, 2016.

USMAN; M. A.; AYOOLA, W. A.; EDWARD, K. K. Application of Ground Rigid Polyurethane Waste as Filler in Production of Flexible Polyurethane Foam. *Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, v.1, p. 346-350, 2018.

VILAR, WALTER. *Química e Tecnologia dos Poliuretanos*. Editora Vilar, 3ª. Edição, Brasil, p. 1-125, 2004.

WANG, H.; LI, T. T. ; REN, H.; LIN, J. H.; PENG, H.; HUANG, S.; LIN, Q.; LOU, C.. Expanded Vermiculite-Filled Polyurethane Foam-Core Bionic Composites: Preparation and Thermal, Compression, and Dynamic Cushion Properties. *Polymers*, v.11, p. 1-13, 2019.

YEGANEH, H.; SHAMEKHI, M. A. J.. Novel polyurethane insulating coatings based on polyhydroxyl compounds, derived from glycolysed PET and castor oil. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 99, p. 1222–1233, 2006.

YUNFEI, H.; YAZHGUR, P.; SALONEN, A.; LANGEVIN, D.. Adsorption–desorption kinetics of surfactants at liquid surfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 222, p. 377-384, 2015.

ZHANG, L.; YILMAZ, E. D.; SCHJØDT-THOMSEN, J.; RAUHE, J. C.; PYRZ, R.. MWNT reinforced polyurethane foam: Processing, characterization and modelling of mechanical properties. *Composites Science and Technology*, v. 71, p. 877-884, 2011.

**APÊNDICE A – FICHA TÉCNICA DO PET COMUM**

**Produto:** MP - 05

**Lote:** 185

**Data de Fabricação:** 09/08/2018

Característica	Especificado	Encontrado
Cor	Conforme Padrão	Conforme Padrão
Produto Retido	Até 6% - 297 microns	1,75%
Densidade	0,70 – 0,75 g/cm <sup>3</sup>	Conforme Padrão

Mauá, 09 de Agosto de 2018.

## APÊNDICE B – FICHA TÉCNICA DO PET FLUORESCENTE

		<b>FICHA TÉCNICA</b> FOR026	
<b>31101-RG - MB VERDE TRANSPARENTE</b>			
<b>Descrição do Produto</b>			
Produto concentrado de pigmentos orgânicos, pigmentos inorgânicos e corantes.			
Compatível com poli(tereftalato de etileno)			
Indicação de aplicação Indicado para uso de 2 a 5% podendo ser utilizado em maior ou menor concentração mediante testes.			
<b>Características</b>			
Análise	Liberação	Método	
Tonalidade	Conforme o padrão	CRISTAL - IT 065	
Configuração	Pellet	CRISTAL - PS.751.01	
<b>Propriedades</b>			
Análise	Resultado - Limite	Método	
Solidez a luz - de 1 a 8	4	ISO 4892-2	
Migração - de 1 a 5	5	DIN EN 20105 - A03	
Resistência térmica (°C)	280	DIN EN 12877-2	
<b>Requisitos Regulatórios</b>			
Normas/Legislações		Conformidade	
Isento de Metais Pesados		Sim	
REACH (atualização 12/01/2017)		Em conformidade	
RoHS (2011/65/EC)		Em conformidade	
RDC 52/2010 - GMC 15/2010		Em conformidade	
RDC 326/2019 - GMC 39/19		Em conformidade	
RDC 56/2012 - GMC 02/2012		Em conformidade	
NM 300-3 : 2004 - GMC 23/2004		Em conformidade	
		CAS 107-21-1 LME = LME (T) = 30 mg/kg (expresso como etilenoglicol). CAS 1309-64-4 LME = 0,04 mg/kg (expresso como antimônio). CAS 111-46-6 LME (T) = 30 mg/kg (expresso como etilenoglicol).	
		CAS 100-21-0 LME(T) = 7,5 mg/kg (expresso como ácido tereftálico) (21) CAS 121-91-5 LME = LME(T) = 5 mg/kg (expresso como ácido isoftálico) (17)	

## APÊNDICE C – FICHA TÉCNICA DO ARCOL® HS-100

### ARCOL® HS-100

**Characterization** Arcol HS-100 polyol is a premium high-load polymer polyol with the highest polymer solids content of commercial polyols.

Characteristic data Property	Value	Unit of measurement	Method
Hydroxyl number	26.2 - 30.2	mg KOH/g	
Water content (max)	0.06	Wt. %	

Other data* Property	Value	Unit of measurement	Method
Appearance	White, viscous liquid		
Specific gravity at 25°C	1.05		
Viscosity at 25°C	3,100	cps	
Flash point PMCC	> 215	°C	
Bulk density at 25°C	8.8	lb/gal	

\*These values provide general information and are not part of the product specification.

#### Properties / Applications

Arcol HS-100 polyol is used in the manufacture of high load flexible foams. With Arcol HS-100 polyol, rise time is controlled to give greater process latitude and the potential for improved foam yield and reduced scrap. As with any product, use of Arcol HS-100 polyol in a given application must be tested (including but not limited to field testing) in advance by the user to determine suitability.

#### Storage

Arcol HS-100 polyol is slightly hygroscopic and may absorb water. Containers should be kept tightly closed and protected from contamination with moisture and foreign materials, which can adversely affect product quality.

This polyol can become quite viscous at low temperatures. For ease of handling, storage temperatures between 15°C (59°F) and 60°C (140°F) are recommended.



## APÊNDICE D – FICHA TÉCNICA DO TEGOSTAB® B 8040

### Technical Information

## TEGOSTAB® B 8040

### Description

TEGOSTAB® B 8040 is a polysiloxane polyoxy-alkylene block copolymer which serves as a foam stabilizer in the manufacturing process of flexible polyether polyurethane hot cured foams.

#### Typical properties\*

Viscosity at 25 °C	2 000 mPa·s
Density at 25 °C	1.03 g/cm <sup>3</sup>
Cloud point (4 % hydrous solution)	36 - 41 °C
pH value (4 % hydrous solution)	9.9 - 10.9
Appearance	Yellow-brown liquid

\* For actual ranges, please refer to the Certificate of Analysis / Sales Specification.

### Application

TEGOSTAB® B 8040 can be dosed separately or as an ingredient in a mixture of water and amine. The mixing ratio required for the production of polyurethane foams is such that TEGOSTAB® B 8040 dissolves without any difficulty. Such a masterbatch which is based on water and the customary tertiary amines retains stability at room temperature for five days without losing its activity.

However, neither the masterbatch, nor the foam stabilizer should be mixed with tin catalysts.

Tin catalysts, such as stannous octoate are highly sensitive and they in their turn affect the stabilizer. Especially the decomposition of stannous octoate caused by the amine can proceed very fast, depending on the type of the amine.

### Performance

TEGOSTAB® B 8040 is a medium to highly active foam stabilizer with an additional nucleation supporting effect. Compared to commercially available foam stabilizers with similar stabilizing activity TEGOSTAB® B 8040 has an unusually large processing latitude.

This favourable combination of properties makes TEGOSTAB® B 8040 a material with a very wide range of application. It can be successfully applied in a great variety of formulations and for different manufacturing techniques.

- The high stabilizing activity allows expedient and highly economical use of TEGOSTAB® B 8040 in formulations, which require an increased stabilizing power, as it is the case in formulations for low-density foams. The standard recipe A in the Annex, which ensures a foam density of approx. 15.5 kg/m<sup>3</sup>, gives an example for a recipe of this type.
- The large processing latitude offers great benefits, when TEGOSTAB® B 8040 is used in formulations with a sensitive reaction to over stabilization. For example, the attached recipe B can be stabilized with material quantities from 0.7 to 1.3 parts TEGOSTAB® B 8040 without the resulting foams showing any differences worth mentioning as regards the air permeability. This is a very impressive demonstration of the balancing character of this stabilizer.
- The increased nucleation support is a property which makes TEGOSTAB® B 8040 a particularly reliable stabilizer for all foaming processes which operate with highly compressed, liquefied carbon dioxide as a blowing agent. The extremely rapid expansion of the foam requires additional support for nucleation so that local disturbances of the cell structure and the occurrence of extremely undesirable microscopic holes, the so-called pin holes, are avoided.

## APÊNDICE E – FICHA TÉCNICA DO TEGOSTAB® B 8115

### Technical Information

## TEGOSTAB® B 8115

### Description

TEGOSTAB® B 8115 is a surfactant for the manufacturing of flexible polyether polyurethane foam.

### Key performance benefits

- Medium-high activity combined with a broad processing.
- Safe processing when raw materials are changed frequently or in case of temperature fluctuations.
- Belongs to the group of universal surfactants and is suitable for not demanding flammability tests.
- Is VOC optimized according to the latest state-of-the-art.

### Typical properties\*

Appearance	Clear to slightly yellow liquid
Viscosity at 25 °C	510 mPa·s
Density at 25 °C	1.03 g/cm <sup>3</sup>
Calculated OH number	494 mg KOH/g

\* For actual ranges, please refer to the Certificate of Analysis (CoA) / Sales Specification.

### Application

TEGOSTAB® B 8115 is considered a "universal" silicone surfactant. This term is used to characterize a stabilizer which is well-suited for FR foams that must meet the burn requirements of less demanding flammability tests like MVSS 302 or UL 94. For demanding FR tests like Crib 5, real FR surfactants are recommended.

The medium-high active stabilizing effect of TEGOSTAB® B 8115 permits particularly safe processing, especially when raw materials are changed frequently or in the case of strong temperature fluctuations in the raw materials.

The performance in terms of activity and processing safety provides benefits for the optimization of formulations used in the

production of conventional polyether slabstock foam.

TEGOSTAB® B 8115 fully meets the difficult requirements of conventional foam formulations in terms of processing tolerance and open cell structure. At the same time, cost-effective levels of TEGOSTAB® B 8115 can be used to achieve the necessary stabilizing activity while still maintaining broad control of foam porosity. The use of a foam stabilizer with a broad performance characteristic provides several advantages for the slabstock foam production process. Safe process control and the production of open-cell foam are possible over a wide range of different reactivities.

A very high degree of production flexibility can be achieved, such as:

- Use of different polyol types to optimize formulation cost or to achieve a special combination of foam properties.
- Variation of catalysis to adapt the rise time and cure time to the conditions of the plant.
- Adjustment of formulations to the special conditions of rectangular slab processes. In all cases, TEGOSTAB® B 8115 provides a safe processing.

In slabstock foams, the distribution of the physical foam properties – particularly density and hardness – across slab cross section is of special importance. TEGOSTAB® B 8115 is optimized to ensure good distribution of physical properties across the block. Furthermore, the product reduces the tendency for splits in foam blocks.

TEGOSTAB® B 8115 is suitable for discontinuous as well as continuous foam production.

TEGOSTAB® B 8115 is typically used in a density range from 10 to 30 kg/m<sup>3</sup>. TEGOSTAB® B 8115 is also well suited for the usage of methylene chloride as an auxiliary blowing agent.

Common use levels of TEGOSTAB® B 8115 are in the range of 0.7 and 1.3 parts per 100 parts of polyol. The optimal concentration will depend on specifics of the formulation.



## APÊNDICE F – FICHA TÉCNICA DO DABCO® 33 LV

### Technical Information

## DABCO® 33-LV Catalyst

### Description

DABCO® 33-LV catalyst is a tertiary amine which has a strong influence on promoting the urethane (polyol-isocyanate) reaction in a variety of flexible and rigid foam as well as CASE applications. It is a mixture of 33 % triethylene diamine and 67 % dipropylene glycol.

### Special properties/Highlights

- Multi-purpose amine catalyst
- Gelation catalysis
- Easy handling

### Application

DABCO® 33-LV catalyst is used in the manufacture of all types of polyurethane foam. It can be used as a 3:1 replacement for DABCO® Crystalline catalyst in all foam formulations. For example, 0.3 pphp DABCO® 33-LV catalyst replaces 0.1 pphp DABCO® Crystalline catalyst.

### Typical physical properties

Appearance	colorless to amber liquid
Flash point, °C (PMCC)	110
Viscosity at 25 °C, mPa · s*	125
Specific gravity @ 21 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1.03
Calculated OH number, mg KOH/g	560
Water solubility	soluble

\*1 mPa · s = 1 cP

### Recommended storage conditions

DABCO® 33-LV catalyst has a shelf life of 24 months from the date of manufacture and under the condition, that it is stored in factory-packed containers and protected against extreme weather conditions, particularly against heat and moisture. The optimum storage temperature of DABCO® 33-LV catalyst is in between 10°C and 30°C. Lower and higher storage temperatures are not preferable and should be avoided.

### Information concerning

- classification and labelling according to regulations for transport of chemicals
- protective measures for storage and handling
- measures in case of accidents and fires
- toxicological and ecotoxicological effects

is given in our safety data sheets.

## APÊNDICE G – FICHA TÉCNICA DO KOSMOS® T9

### Technical Information

## KOSMOS® T 9

#### Description

KOSMOS® T 9 (stannous octoate) is a strong metal-based urethane (polyol-isocyanate) catalyst that is primarily used in flexible slabstock polyurethane foams.

#### Key performance benefits

- Uniform activity
- Strong gelling catalyst

#### Typical properties\*

Appearance	Colorless to yellowish liquid
Viscosity at 20 °C	350 mPa·s
Density at 20 °C	1.26 g/cm <sup>3</sup>
Calculated OH number	n.a.**
Tin content	28.5 %
Stannous content	≥ 97 % in relation to the tin content
Solubility	Soluble in polyols and most organic solvents, insoluble in water and alcohols

\* For actual ranges, please refer to the Certificate of Analysis / Sales Specification. | \*\* n.a. = not applicable

#### Application

KOSMOS® T 9 is recommended for use in flexible slabstock polyether foams. It is also used successfully as a catalyst for polyurethane coatings and sealants.

KOSMOS® T 9 can be dosed separately or as a premix with a small amount of polyol, e. g. at a ratio of 1:10. The latter is done in practice for improving the dosing accuracy. Such premixes should, however, be used up quickly, preferably within the same day.

According to the formulation, typical use levels are in the range of 0.17 - 0.40 %.

Tertiary amines which are also necessary for a well-balanced catalysis chemically attack stannous octoate and destroy its catalytic efficiency within a very short time. Therefore, organizational precautions must be taken in order to exclude any cross-contamination.

#### Storage recommendations

- Shelf life from date of delivery: 12 months at least
- Storage conditions: Dry and cool place in factory-packed containers
- Product exposure to oxygen and moisture should be minimized to maintain performance. Storage under nitrogen atmosphere is recommended.
- Storage temperature: Between 10 and 30 °C

#### Safety instructions

Please consult the Safety Data Sheet for summary of product hazards, personal protective measures, and emergency release procedures.



## APÊNDICE H – FICHA TÉCNICA DO ARCOL® F-3040

### Arcol® F-3040

#### Characterization

Arcol F-3040 polyol is a 3,000-molecular-weight triol used in the production of one-shot flexible urethane slabstock foams.

Specification Property	Value	Unit of measurement	Method
Hydroxyl number	54.5 - 57.5	mg KOH/g	
Water, Wt.	max. 0.05	%	
Acid number	max. 0.02	mg KOH/g	
Color, APHA	max. 50		

#### Other data\*

Property	Value	Unit of measurement	Method
Appearance	Clear, viscous liquid		
Specific gravity at 25°C	1.02		
Viscosity at 25°C	580	cps	
Flash point PMCC	> 235	°C	
Bulk density at 25°C	8.6	lb/gal	

\*These values provide general information and are not part of the product specification.

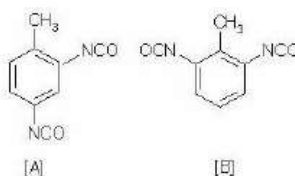
#### Properties / Applications

Arcol F-3040 polyol is a 3,000-molecular-weight triol used in the production of one-shot flexible urethane slabstock foams. The full range of flexible foams from extra soft to extra firm, with varying densities, can be made with Arcol F-3040 polyol. As with any product, use of Arcol F-3040 polyol in a given application must be tested (including but not limited to field testing) in advance by the user to determine suitability.

## APÊNDICE I – FICHA TÉCNICA DO DESMODUR® T-80

### Desmodur® T 80 (According to GB/T 32469-2016)

#### General Properties and Applications



Desmodur® T 80 is a mixture of the two isomeric forms 2,4-toluene diisocyanate [A] and 2,6-toluene diisocyanate [B] in the ratio 80:20. Desmodur® T 80 is used for the production of polyurethanes.

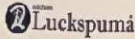
<b>Sampling</b>	The access of moisture in any form must be prevented.
-----------------	---

Specification Property	Value	Unit of measurement	Method
Appearance	Clear, transparent liquid		Visual
Purity	≥ 99.5	%	GB/T 12009.4
2,4-isomer content <sup>[1]</sup>	80.0 ± 1.0	%	GB/T 32471
Total Chlorine <sup>[2]</sup>	≤ 0.05	%	GB/T 32477
Hydrolysable chlorine	≤ 0.010	%	GB/T 12009.2
Acidity	≤ 0.0040	%	GB/T 12009.5
Color	≤ 25	HAZEN	GBT/T 605

<sup>[1]</sup> TDI isomer ratio is 2,4-TDI and 2,6-TDI molar ratio, expressed in 2,4-TDI content.

<sup>[2]</sup> Total chlorine is not required by regular test.

## APÊNDICE J – CERTIFICADO DE ANÁLISE DE ESPUMA D28 DA LUCKSPUMA

	<b>Laudo Técnico de Análise</b>	Código: 14.2-1
		Rev.: 00
		Pág.: 1 de 1

<b>Código da espuma: 728</b>			
<b>Lote:433311</b>			
PROPRIEDADE FÍSICA	ESPECIFICAÇÃO ABNT 13579-1	RESULTADO	MÉTODO
Densidade, Kg/m <sup>3</sup>	28	28,6	NBR8537
Força de Indentação, 25% N (Min)	-	147	NBR9176
Força de Indentação, 40% N (Min)	145	180	NBR9176
Força de Indentação, 55% N (Min)	-	323	NBR9176
Fator de conforto (Min)	2,2	2,2	NBR9176
Resiliência, % (Min)	35	40	NBR8619
Perda de Fadiga a 40, % (máx)	27	10	NBR9177
Perda de espessura, % (máx)	5	1	NBR9177
Deformação Permanente à Compressão de 90%, (máx)	8	6	NBR8910

OBS: É admitida uma tolerância de + ou - 10% na densidade real (Dr) verificada em ensaios, com base na densidade nominal declarada na etiqueta pelo fabricante, segundo a norma da ABNT NBR 13579-1.

Temperatura ambiente (23 ± 2)°C = 23° Umidade ambiente (50 ± 5)% = 52% Equipamento / Processo: Uniblock Retangular	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado <input type="checkbox"/> Reprovado
--	---

Aprovado por: Cristiane	Setor :Laboratório	Data: 22/02/2022
-------------------------	--------------------	------------------