

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

***ELISA MARANGON BERETTA***

**OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DE MICROCÁPSULAS DE EICOSANO EM  
ESPUMAS DE POLIURETANO VISANDO O CONFORTO TÉRMICO EM  
ASSENTOS PARA CADEIRAS DE RODAS**

**PORTO ALEGRE**

**2015**

**ELISA MARANGON BERETTA**

**OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DE MICROCÁPSULAS DE EICOSANO EM  
ESPUMAS DE POLIURETANO VISANDO O CONFORTO TÉRMICO EM  
ASSENTOS PARA CADEIRAS DE RODAS**

*Tese submetida ao Programa de Pós  
Graduação de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, como registro parcial  
à obtenção do título de doutora em  
Engenharia (modalidade Acadêmica).*

**Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior**

**PORTO ALEGRE**

**2015**

**ELISA MARANGON BERETTA**

**OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DE MICROCÁPSULAS DE EICOSANO EM  
ESPUMAS DE POLIURETANO VISANDO O CONFORTO TÉRMICO EM  
ASSENTOS PARA CADEIRAS DE RODAS**

Esta tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de doutor em Engenharia e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Orientador Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior**

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Annelise Kopp Alves (doutora) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul** \_\_\_\_\_

**Profa. Jacinta Sidegum Renner (doutora) – Universidade Feevale**

---

**Profa. Tatiana Louise Avila de Campos (doutora) – Universidade do Vale dos Sinos** \_\_\_\_\_

**Dedico este trabalho ao meu avô, Primo  
Marangon.**



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Ademar Armando Beretta e Jussara Beatriz Marangon, pelo apoio em todos os anos de estudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior, pelo conhecimento e por me fazer crescer como pessoa.

À equipe do Laboratório de Design e Seleção de Materiais, pela estrutura e apoio, em especial ao Wagner Rossi e à Luisa Rocha, pela troca de conhecimentos constantes durante os experimentos realizados.

Ao Igor Escalante Casenote, por acompanhar o trabalho, dar suporte nas dificuldades enfrentadas durante a pesquisa.

À banca avaliadora, pelo tempo dedicado no auxílio da construção desse trabalho desde a qualificação.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela oportunidade de realizar minha pesquisa na área escolhida.

A todas as pessoas que, de alguma maneira, influenciaram e ajudaram nesta pesquisa.

## RESUMO

Espumas de assentos personalizados para cadeiras de rodas se adaptam a anatomia do usuário, no entanto, ao passo que melhoram o posicionamento, podem influenciar negativamente no conforto térmico por aumentar a superfície de contato. O conforto térmico pode ser melhorado com materiais de mudança de fase (PCM), que devem ser aplicados protegidos por um invólucro para impedir seu escape na fase líquida. O invólucro mais comum são as microcápsulas. Assim, o objetivo dessa pesquisa é obter, aplicar e caracterizar microcápsulas com núcleo de material de mudança de fase, mais especificamente o eicosano, em espumas de PU flexível após sua expansão e tecido que recobre o assento, ampliando o efeito termorregulador desse material, reduzindo o tempo de aplicação e desperdício das microcápsulas. Essa é uma pesquisa de natureza aplicada, com técnica de pesquisa de documentação direta através de pesquisa em laboratório, objetivo descritivo e explicativo, com procedimento técnico experimental e abordagem quantitativa. Foram obtidas microcápsulas de eicosano com a variação de diferentes parâmetros e caracterizadas através de MEV, FTIR, granulometria, TGA e DSC. As microcápsulas foram inseridas em amostras de espuma com duas técnicas diferentes (filtração e aerografia) e essas amostras foram analisadas com um termógrafo para verificação do efeito termorregulador gerado. Pode-se concluir que a aerografia proporciona melhor aproveitamento de tempo e de material, ampliando os efeitos térmicos gerados na espuma flexível de PU. Também, o efeito térmico depende não apenas do tipo de microcápsula, mas da quantidade aplicada e sua distribuição pelo material.

Palavras-chave: Microcápsulas. Conforto. Espumas de PU. Cadeira de rodas. Efeito térmico.

## ABSTRACT

Wheelchair custom seats foams can be adapt to the user's anatomy nonetheless, although it can improve positioning, it influences negatively in thermal comfort as it increases the contact surface. Thermal comfort can be improved with phase change materials (PCM) that must be applied in a casing to prevent its escape in the liquid phase. The most common casing is the microcapsules. The main objective of this research is to obtain, apply and characterize PCM microcapsules, more specifically eicosane, into flexible PU foams after expansion and fabric that recovers the seat, enlarging the thermoregulatory effect of this material, reducing application time and microcapsule waste. It is a study of applied nature, research technique of direct documentation through laboratory investigation, descriptive and explanatory objective, and experimental technical procedure generating quantifiable data. Eicosane microcapsules were obtained varying different parameters and characterizes through SEM, FTIR, granulometry, TGA and DSC. The microcapsules were inserted into foam samples with two different techniques (filtration and aerography). These samples were analyzed through a thermographer to verify its thermoregulatory effect. It can be concluded that aerography has better use of time and material, improving the overall thermal effect in PU foam. Additionally, the thermal effect depends not only in the type of microcapsule, but also in quantity applied and distribution through out the material

Keywords: Microcapsules. Comfort. PU foams. Wheelchair. Thermal effect.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Adaptações de um assento para adequação postural .....	23
Figura 2 – Proeminências ósseas da coluna .....	26
Figura 3 – Estágios de formação das úlceras de pressão .....	27
Figura 4 – Funcionamento dos assentos com e sem almofadas .....	28
Figura 5 – Processo de obtenção do assento personalizado .....	29
Figura 6 – Ajustes no assento personalizado .....	30
Figura 7 – Medições da distribuição pressão nos assentos .....	31
Figura 8 – Medição da temperatura realizada no assento .....	31
Figura 9 – Modelo de conforto desenvolvido por De Looze et al. (2003) .....	34
Figura 10 – Mudanças de temperatura e calor durante a mudança na fase .....	41
Figura 11 – Classificação dos Materiais de Mudança de Fase .....	44
Figura 12 – Esquema da estrutura de uma microcápsula .....	51
Figura 13 – Processos possíveis de microencapsulação .....	53
Figura 14 – Morfologia básica das microcápsulas .....	55
Figura 15 – Microcápsulas obtidas no estudo de Hawlader, Uddina e Khin .....	58
Figura 16 – Microcápsulas de eicosano do estudo de Alkan, Sari e Karaipekli ..	59
Figura 17 – Microcápsulas obtidas no estudo de Sánchez et al. (2008) .....	60
Figura 18 – Fatores envolvidos na obtenção de vestuário inteligente .....	62
Figura 19 – Impregnação de microcápsulas de PCM em tecidos .....	66
Figura 20 – Impregnação de microcápsulas de PCM em tecidos .....	68
Figura 21 – Microcápsulas incorporadas em espumas internas de capacetes ...	70
Figura 22 – Aplicação de microcápsulas em espumas de PU pelo método de adição na reação de polimerização .....	71
Figura 23 – Impregnação de materiais porosos com microcápsulas de PCMs ..	73
Figura 24 – Passo a passo do método de impregnação de microcápsulas em espumas de PU desenvolvido por Saha, Kabir e Jeelani .....	74
Figura 25 – Análise termográfica das espumas de PU do estudo de Marcuzzo .	75
Figura 26 - Visão geral do procedimento experimental .....	78
Figura 27 - Esquema para a obtenção das microcápsulas .....	81

Figura 28 – Alterações no processo de obtenção das microcápsulas .....	82
Figura 29 – Esquema para aplicação das microcápsulas com uso de vácuo .....	86
Figura 30 – Esquema para aplicação das microcápsulas por aerografia .....	87
Figura 31 – Sanduiche de espumas e tecido .....	91
Figura 32 – Fatiamento das amostras de espuma para análise no micrótomo grafo .....	93
Figura 33 – Microscopia mostrando as microcápsulas de parafina utilizando 6g de parafina com tween 20 com aumento de 1.000 X potência 15kV .....	95
Figura 34 – Microscopia mostrando as microcápsulas obtidas utilizando tween 20 com aumento de 3000X (A) e 6.000X (B) com potência 15kV .....	96
Figura 35 – Espectros da casca de Tween 20, do eicosano e da microcápsula macerada .....	97
Figura 36 – Granulometria da microcápsula da Rota A .....	97
Figura 37 – Termograma TGA do eicosano, casca e microcápsula .....	98
Figura 38 – Curva DSC para o eicosano .....	99
Figura 39 – Curva DSC para o eicosano, a casca e a microcápsula .....	100
Figura 40 – Microscopia das microcápsulas mostrando o resultado da utilização do tween 80 como surfactante com aumentos de 1.500X (A) e 6.000X (B) potência 15kV .....	103
Figura 41 – Microscopia das microcápsulas mostrando o resultado da utilização do tween 20 como surfactante e agitação mecânica da emulsão com aumentos de 1.000X (A) e 6.000X (B) potência 15kV .....	103
Figura 42 – Granulometria da microcápsula da Rota C .....	104
Figura 43 – Microscopia das microcápsulas mostrando o resultado da utilização do CTAB como surfactante e agitação mecânica da emulsão com aumentos de 2.000X (A) e 4.000X (B) e potência 15kV .....	106
Figura 44 – Granulometria da microcápsula da Rota D .....	107
Figura 45 – Espectros FTIR da casca de CTAB, do eicosano e da microcápsula macerada .....	108
Figura 46 – Termograma TGA para o eicosano, a casca e a microcápsula da Rota D .....	109

Figura 47 – Curva DSC do eicosano, da casca e da microcápsula da Rota D ...	109
Figura 48 – Microscopia da espuma sem a inserção de microcápsulas mostrando sua estrutura com aumento de 40X e potência 15kV .....	111
Figura 49 – Microscopia da espuma com a inserção de 4g de microcápsulas mostrando sua distribuição pela estrutura da espuma com aumento de 180X(B) e 1.200X(C) e potência 15kV .....	113
Figura 50 – Microscopia da espuma com a inserção de 8g de microcápsulas mostrando sua distribuição pela estrutura da espuma com aumento de 500X(A) e 1.000(X) e potência 15kV .....	114
Figura 51 – Microscopia óptica da espuma com a inserção de 4g microcápsulas mostrando a distribuição das microcápsulas pela estrutura da espuma com aumento de 50X (B) e 100X(C) .....	115
Figura 52 – Microscopia óptica da espuma com a inserção de 8g microcápsulas mostrando a distribuição das microcápsulas pela estrutura da espuma com aumento de 50X (B) e 100X(C) .....	116
Figura 53 – Microscopia óptica das espumas com microcápsulas mostrando a distribuição pela estrutura da espuma com o método de aerografia com aumento de 10X (A, B e C) .....	119
Figura 54 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 4g de microcápsulas mostrando a distribuição pela espuma com o método de aerografia com aumento de 50X (B) e 100X (C) .....	120
Figura 55 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas mostrando a distribuição pela espuma com o método de aerografia com aumento de 50X (B) e 100X (C) .....	120
Figura 56 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas aplicadas bilateralmente mostrando a distribuição pela espuma com o método de aerografia com aumento de 50X (B) e 100X (C) .....	121
Figura 57 – Microscopia da espuma com inserção de 4g de microcápsulas mostrando sua distribuição com aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	122
Figura 58 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas mostrando sua distribuição com aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	122

Figura 59 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas aplicadas bilateralmente mostrando a distribuição pela estrutura da espuma com o método de aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	123
Figura 60 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia a aumentos de 50X (B) e 100X (C) .....	125
Figura 61 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia a aumentos de 50X (B) e 100X (C) .....	126
Figura 62 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D aplicadas bilateralmente mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia a aumentos de 50X (B) e 100X (C) .....	126
Figura 63 – Microscopia da espuma com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	127
Figura 64 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	128
Figura 65 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D aplicadas bilateralmente mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	128
Figura 66 – Microscopia óptica e de varredura do tecido mostrando sua estrutura sem a inserção de microcápsulas .....	131
Figura 67 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C) .....	132
Figura 68 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C) .....	132
Figura 69 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	134

Figura 70 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV .....	134
Figura 71 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C) .....	135
Figura 72 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C) .....	135
Figura 73 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) .....	136
Figura 74 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C) .....	137
Figura 75 – Termografias da espuma com microcápsulas obtidas na Rota A aplicadas com o método de filtração .....	140
Figura 76 – Termografias da espuma com microcápsulas obtidas na Rota A aplicadas com o método de aerografia .....	141
Figura 77 – Termografias da espuma com microcápsulas obtidas na Rota A e D aplicadas com o método de aerografia .....	144
Figura 78 – Termografias do tecido com microcápsulas obtidas na Rota A e D aplicadas com o método de aerografia .....	146
Figura 79 – Termografias das combinações de espumas e tecidos com e sem microcápsulas com o método de aerografia .....	148
Figura 80 – Termografias das camadas de espumas com 1 e 3 cm e tecidos com e sem microcápsulas com o método de aerografia .....	150
Figura 81 – Microtomografias das espumas com microcápsulas de material luminescente com o método de filtração .....	152
Figura 82 – Microtomografias das espumas com microcápsulas de material luminescente com o método de aerografia .....	153



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação de PCMs em Tecidos .....	43
Tabela 2 – Propriedades térmicas dos materiais de mudança de fase parafínicos .....	47
Tabela 03 – Especificações das amostras de espuma PU .....	88
Tabela 04 – Especificações das amostras de tecido .....	90
Tabela 05 – Peso das amostras de PU antes e depois da inserção de microcápsulas através de filtração .....	113
Tabela 06 – Peso das amostras de PU antes e depois da inserção de microcápsulas através de aerografia .....	118
Tabela 07 – Peso das amostras de PU antes e depois da inserção de microcápsulas obtidas na Rota D através de aerografia .....	124
Tabela 08 – Peso das amostras de tecidos antes e depois da inserção de microcápsulas obtidas na Rota A e D através de aerografia .....	130
Tabela 09 – Decaimento das temperaturas das amostras de PU com microcápsulas obtidas na Rota A com método de filtração.....	140
Tabela 10 – Decaimento das temperaturas das amostras de PU com microcápsulas obtidas na Rota A com método de aerografia.....	142
Tabela 11 – Decaimento das temperaturas das amostras de PU com microcápsulas obtidas nas Rotas A e D com método de aerografia .....	145
Tabela 12 – Decaimento das temperaturas das amostras de tecidos com microcápsulas obtidas na Rota A e D com método de aerografia .....	147
Tabela 13 – Decaimento das temperaturas das combinações das amostras de tecidos e de espumas com microcápsulas obtidas na Rota D com método de aerografia .....	149
Tabela 14 – Decaimento das temperaturas das amostras dos tecidos com camadas de espumas com e sem microcápsulas .....	151

**LISTA DE SIGLAS**

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (desenho assistido por computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (produção assistida por computador)
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> (calorimetria exploratória diferencial)
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PCM	<i>Phase Change Material</i> (material de mudança de fase)
PET	Politereftalato de etileno
PU	Poliuretano
TA	Tecnologia Assistiva
TGA	<i>Thermogravimetry</i> (termogravimetria)

**LISTA DE SÍMBOLOS**

<b>μm</b>	Micrómetro
<b>°C</b>	Graus Celcius
<b>rpm</b>	Rotações Por Minuto
<b>g</b>	Gramas
<b>mL</b>	Mililitro
<b>psi</b>	<i>Pound force per Square Inch</i> (libra força por polegada quadrada)
<b>bar</b>	Unidade de pressão equivale a exatamente 100.000 Pa
<b>kV</b>	Kilovolt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
2.1	TECNOLOGIA ASSISTIVA E POSTURA SENTADA .....	22
<b>2.1.1</b>	<b>Posição sentada e úlceras de pressão</b> .....	<b>25</b>
2.2	CONFORTO TÉRMICO .....	33
<b>2.1.1</b>	<b>Aspectos fisiológicos e físicos do conforto térmico</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Conforto térmico em superfícies de suporte</b> .....	<b>39</b>
2.3	MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCMs) .....	41
<b>2.3.1</b>	<b>Tipos de Materiais de Mudança de Fase</b> .....	<b>45</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Materiais de Mudança de Fase como termorreguladores</b> .....	<b>48</b>
2.4	MICROCÁPSULAS .....	52
<b>2.4.1</b>	<b>Processos de microencapsulação</b> .....	<b>53</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Obtenção de microcápsulas de PCMs</b> .....	<b>57</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Aplicação microcápsulas em tecidos</b> .....	<b>62</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Aplicação microcápsulas em espumas de PU</b> .....	<b>69</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>78</b>
3.1	OBTENÇÃO DAS MICROCÁPSULAS .....	79
<b>3.1.1</b>	<b>Mudanças dos parâmetros de obtenção</b> .....	<b>83</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Caracterização das microcápsulas</b> .....	<b>84</b>
3.2	INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NAS AMOSTRAS DE PU .....	85
<b>3.2.1</b>	<b>Análises termográficas das amostras de PU</b> .....	<b>89</b>
3.3	INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NOS TECIDOS .....	90
<b>3.3.1</b>	<b>Análises termográficas dos tecidos</b> .....	<b>91</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Análises termográficas das combinações de espumas e tecidos</b> ..	<b>91</b>
3.4	OBTENÇÃO DAS MICROCÁPSULAS DE RODAMINA .....	92
<b>3.4.1</b>	<b>Aplicação nas espumas de PU</b> .....	<b>93</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Microtomografias</b> .....	<b>93</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>95</b>
4.1	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MICROCÁPSULAS .....	95

4.1.1	<b>Rota A</b> .....	95
4.1.2	<b>Rota B</b> .....	102
4.1.3	<b>Rota C</b> .....	103
4.1.4	<b>Rota D</b> .....	106
4.2	<b>INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NAS ESPUMAS DE PU</b> .....	110
4.2.1	<b>Inserção das microcápsulas da Rota A com o método de filtração nas espumas de PU</b> .....	111
4.2.2	<b>Inserção das microcápsulas da Rota A com o método de aerografia nas espumas de PU</b> .....	116
4.2.3	<b>Inserção das microcápsulas da Rota D com o método de aerografia nas espumas de PU</b> .....	123
4.3	<b>INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NOS TECIDOS</b> .....	128
4.4	<b>ANÁLISES TERMOGRÁFICAS</b> .....	137
4.4.1	<b>Termografias das espumas com microcápsulas da Rota A</b> .....	138
4.4.2	<b>Termografias das espumas com microcápsulas da Rota A e D</b> ....	142
4.4.3	<b>Termografias dos tecidos</b> .....	144
4.4.4	<b>Termografias das combinações de espumas e tecidos</b> .....	146
4.5	<b>MICROTOMOGRÁFIAS</b> .....	150
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	154
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	158

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Johnston e Bonetti (2004), deficiência pode ser definida como limitações nas atividades resultando de fatores patológicos ou biomecânicos como inflamação nas juntas, danos cerebrais, idade ou limitações sensoriais. Também pode surgir de diferentes problemas, desde teratogenicidade ou como resultado de acidentes e doenças.

A rotina das pessoas com deficiência inclui o uso de diferentes produtos que podem ajudar no seu desenvolvimento físico e psicossocial, o que afeta diretamente sua qualidade de vida. (JUNG et al., 2015, SAWADA et al., 2014). Um dos equipamentos que recebem bastante atenção para pessoas com mobilidade reduzida é a cadeira de rodas. Segundo Jung et al. (2015), a cadeira de rodas é um dos equipamentos mais importantes que podem prover os meios de ir e vir para essas pessoas, ou seja, sua independência. Hunt et al. (2004) afirmam que as cadeiras de rodas possuem projetos diferentes que visam atender as necessidades específicas de seus usuários, podendo variar em material, forma, peso, durabilidade e custo.

Mesmo com tantos projetos de cadeiras de rodas desenvolvidos, este equipamento ainda é foco de diversos estudos atuais, tais como de Jung et al. (2015), Sawada et al. (2014) e Hollington et al. (2014). Uma das áreas que dá suporte para a pesquisa de produtos e serviços para atender as necessidades das pessoas com deficiência é a Tecnologia Assistiva (TA). Um dos recursos da TA é a adequação postural que é desenvolvida, na maioria das vezes, com o uso equipamentos como superfícies de apoio para cadeira de rodas, as quais podem apresentar-se em diversos modelos utilizando diferentes materiais. (PRESTES, 2010).

Um dos itens da cadeira de rodas que recebe bastante atenção é o sistema de suporte. Segundo Zacharkow (1988), esse sistema compreende a cadeira de rodas, seu assento e o encosto, que normalmente são produzidos com espumas flexíveis de poliuretano (PU). Um dos maiores problemas enfrentados por usuários de cadeiras de rodas, que está diretamente ligado às superfícies de suporte, são as úlceras de pressão. A principal causa da ulceração é a distorção mecânica dos tecidos por forças compressivas e de cisalhamento, resultando na constrição dos vasos sanguíneos com subsequente isquemia e hipóxia. Este fato frequentemente

ocorre em pacientes que ficam na mesma posição em contato com superfícies de suporte como assentos e colchões. (Id.).

Anderson e Kalrsmark (2008) afirmam que a temperatura possui influencia na viabilidade tecidual e, assim, na formação de úlceras, já que o tecido úmido é mecanicamente mais fraco que o tecido seco, levando ao aumento da maceração e escoriação. Para Nicholson et al. (1999), o superaquecimento da pele também aumenta as demandas metabólicas das células com a elevação do consumo de oxigênio, comprometendo ainda mais as áreas isquêmicas. Adicionalmente, a presença de umidade e úlceras podem aumentar a atividade microbiológica e o risco de infecção. (Id.).

Os sistemas de suporte desempenham um papel importante na dissipação do calor e umidade na interface pele/suporte para manter o microclima da pele (FINESTONE et al., 1991), além disso, existem evidências que a temperatura na interface corpo-assento pode representar um papel importante na avaliação do conforto. (CENGIZ; BABALIK, 2007). O regulamento de um microclima fisiológico normal da pele é necessário para manter o equilíbrio térmico entre o calor ganho com os processos metabólicos do corpo e as perdas de calor da pele para o ambiente. Este efeito termorregulador pode ser obtido com a presença de materiais de mudança de fase (SÁNCHEZ et al, 2010), do inglês *Phase Change Materials* (PCM).

Pode-se ver que o uso de materiais de mudança de fase é usual para aprimoramento do efeito termorregulador. (CASTELL; SOLÉ, 2015, SAFAVI; AMANI-TEHRAN; LATIFI, 2015). Esses materiais podem absorver e liberar energia quando passam do estado líquido para o gasoso e vice-versa, melhorando a estabilidade térmica de outros materiais. São conhecidos mais de 500 diferentes PCMs, incluindo a água. (BAETENSA; JELLEA; GUSTAVSEN, 2010). Segundo Sánchez et al. (2010), dentre os mais comumente usados estão aqueles da família das parafinas, como o eicosano.

De acordo com Giro-Paloma, Konuklu e Fernández (2015) e Safavi, Amani-Tehran e Latifi (2015), para evitar que esses materiais sejam desperdiçados durante a fase líquida, a área de microencapsulação se tornou área de interesse. O uso de microcápsulas apareceu há algum tempo em diferentes segmentos e seu uso é acentuado na indústria cosmética, farmacêutica, de design médico e produção de tecidos. (MADENE et al., 2006, MONLLOR; BONET, 2007).

As microcápsulas são divididas em duas partes, o núcleo, que é a parte ativa, e a casca, que protege o material ativo da atmosfera. (MADENE et al., 2006). Muitos métodos de encapsulamento de parafina são usados, como polimerização *in situ*, polimerização interfacial e coacervação complexa. Segundo Jin et al. (2008), dentre estes métodos de encapsulamento, a polimerização *in situ* é mais favorável.

O uso de microcápsulas pode facilitar a incorporação dos PCMs nos materiais dos assentos, tais como espumas de PU. (SAFAVI; AMANI-TEHRAN; LATIFI, 2015). De fato, já há pesquisas focando na incorporação de PCMs microencapsulados em tecidos (JIANG et al. 2008, NEJMAN et al., 2014, SALAÜN; VROMAN; ELMAJID, 2012) e em espumas de PU (BAETENS; JELLEA; GUSTAVSEN, 2010, DA SILVA, 2009, FOK; TAN; SUA, 2011, KUZNIK et al., 2011, MARCUZZO, 2012), tanto para assentos de cadeiras de rodas, quanto para outros fins.

No entanto, grande parte das pesquisas que visam incorporar microcápsulas em espumas de PU colocam as micropartículas na solução poliméricas antes de sua reação e expansão. No caso de assentos personalizados, como os desenvolvidos em estudos no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM), a espuma é cortada após sua expansão seguindo a geometria do usuário.

O estudo inicial sobre a aplicação de microcápsulas de eicosano com a espuma já expandida de Marcuzzo (2012) mostrou a técnica de impregnação, na qual a espuma é imersa em um líquido contendo microcápsulas. Mesmo que esta técnica impregne as microcápsulas, é necessário deixar a espuma nessa mistura por 12h com agitação, o que, em escala industrial, dificulta o processo. Além disso, há muito material desperdiçado, ao passo que nem todas as microcápsulas que estão no líquido são transferidas para a espuma. Todos esses fatores influenciarão no custo final do processo.

Assim, o problema dessa pesquisa reside na questão: é possível obter microcápsulas com material de mudança de fase e incorporá-las após a expansão das espumas flexíveis de PU, ampliando o seu efeito termorregulador e reduzindo o tempo de incorporação e desperdício das microcápsulas?

Nesta tese, trabalha-se com duas hipóteses. A primeira é que, ao estudar processos de obtenção de microcápsulas, seja possível obter micropartículas com núcleo eicosano, material de mudança de fase, que são conhecidos por sua capacidade termorreguladora, e melhorar o efeito de termorregulação das espumas flexíveis de PU. Na segunda, é suposto que ao investigar e testar outros processos



de incorporação das micropartículas nas espumas flexíveis de PU já expandidas, é possível diminuir o tempo de inserção e reduzir o desperdício das microcápsulas, o que refletirá no custo final do produto.

O objetivo geral da pesquisa tem seu enfoque em: obter, aplicar e caracterizar microcápsulas com núcleo de material de mudança de fase, mais especificamente o eicosano, em espumas de PU flexível após sua expansão, ampliando o efeito termorregulador desse material, reduzindo o tempo de aplicação e desperdício das microcápsulas.

Como objetivos específicos, pretendeu-se clarificar o que são equipamentos de Tecnologia Assistiva, com foco na cadeira de rodas e os problemas que podem gerar para as pessoas com deficiência; estudar o que é conforto térmico, quais as variáveis que influenciam no conforto térmico e como isso afeta a vida as pessoas com deficiência; investigar métodos de obtenção de microcápsulas, focando naquelas com núcleo de materiais de mudança de fase, focando mais especificamente na família das parafinas; investigar métodos de aplicação das microcápsulas em materiais diversos, gerando informações que poderão ser transpostas ao problema da pesquisa; testar e verificar quais métodos de obtenção de microcápsulas promovem máximo aproveitamento, sem desperdício de material; analisar processos de inserção das microcápsulas nas espumas flexíveis de PU após a expansão, focando na diminuição do tempo de aplicação e reduzindo o desperdício das microcápsulas; verificar o efeito termorregulador gerado nas espumas flexíveis de PU com a inserção das microcápsulas com núcleo de eicosano.

Dada a justificativa descrita nesse capítulo, essa é uma pesquisa de natureza aplicada, já que objetiva gerar conhecimentos novos úteis para o avanço da ciência, mas que, no futuro, os dados aqui levantados possam ser aplicados na área da Tecnologia Assistiva. Foram obtidas e caracterizadas microcápsulas de eicosano com a variação de diferentes parâmetros; aplicadas em amostras com duas técnicas diferentes e essas amostras foram analisadas para verificação do efeito termorregulador gerado. Dadas as técnicas utilizadas, é uma pesquisa experimental de documentação direta através de pesquisa em laboratório, possuindo objetivo descritivo e explicativo, com procedimento técnico experimental e abordagem quantitativa.

No capítulo que segue, de revisão de literatura, serão abordados temas como TA, superfícies de suporte de cadeiras de rodas, conforto térmico, PCMs, microencapsulação e técnicas de incorporação de microcápsulas em espumas e outros materiais como tecidos. No terceiro capítulo os materiais e métodos utilizados para os experimentais serão detalhados. No quarto capítulo, todos os resultados coletados serão descritos e explicados. Por fim, será realizado o fechamento com o capítulo de conclusão.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda os principais temas envolvidos nesta pesquisa, iniciando por uma breve revisão do conceito de TA, como a cadeira de rodas se insere dentro desse, e alguns aspectos a serem considerados sobre a postura sentada, que afeta diretamente as pessoas com deficiência. Na sessão 2.2, é abordado o conceito de conforto, com foco no conforto térmico. Adiante, serão revisados os materiais de mudança de fase, dando destaque para aqueles que podem auxiliar no microclima humano. Por fim, é apresentada uma revisão sobre microcápsulas, sua obtenção e formas de aplicação em espumas de poliuretano.

### 2.1 TECNOLOGIA ASSISTIVA E POSTURA SENTADA

Para García e Galvão Filho (2012), a TA pode ser entendida como recursos e serviços que ampliam as habilidades funcionais de pessoas com deficiência, promovendo a vida independente e sua inclusão. Cezario e Pagliuca (2007) dizem que, por prover independência, locomoção, educação saúde entre outros aspectos, seus principais objetivos são a acessibilidade, a qualidade de vida e a inclusão.

O termo *Assistive Technology*, foi criado em 1988 como importante elemento jurídico dentro da legislação norte-americana conhecida como *Public Law 100-407* (Lei Pública), que compõe, com outras leis, o ADA - *American with Disabilities Act* (Ato de Deficiências Americano – Estados Unidos). Este conjunto de leis regulamenta os direitos dos cidadãos com deficiência nos Estados Unidos, além de prover a base legal dos fundos públicos para compra dos recursos que estes necessitam. No Brasil, é usado como Tecnologia Assistiva (ROCHA; DELIBERATO, 2012), sendo que o termo “assistiva” foi criado e não existe, ainda, nos dicionários da língua portuguesa, sendo oficial seu uso desde 20 de abril de 2007 pela Secretaria Especial dos Direitos Humanos (SEDH).

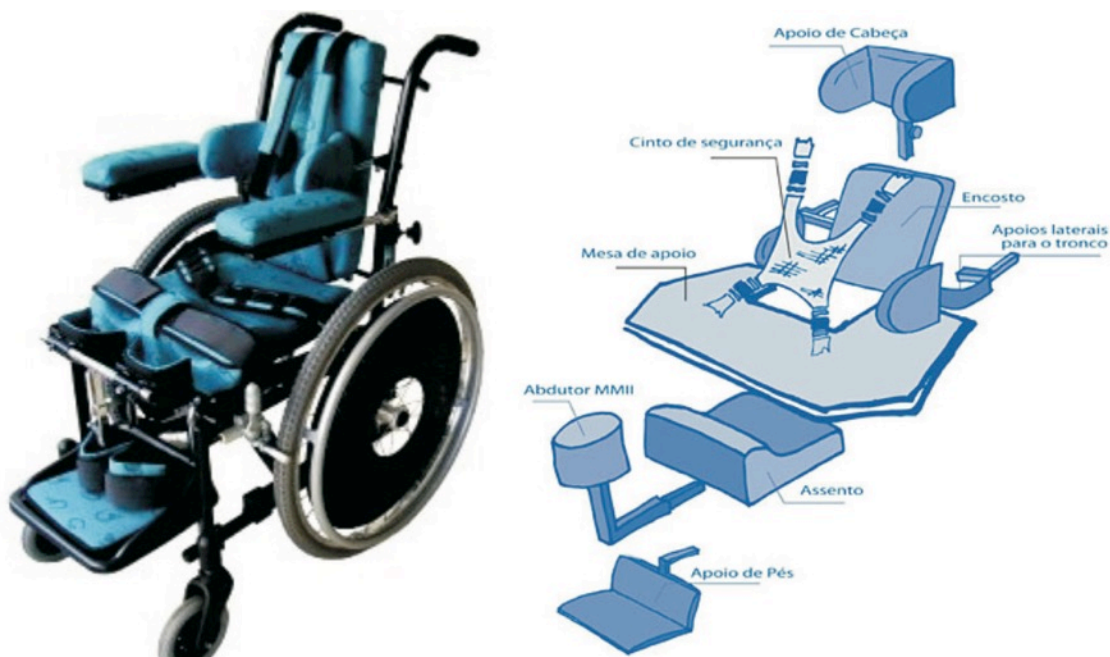
A TA provê produtos e serviços que, para melhor atendimento, são divididos de acordo com os objetivos dos seus recursos para a formação do auxílio, ou como afirma Berch (2008), “são organizados ou classificados de acordo com objetivos funcionais a que se destinam”. Uma das classificações mais utilizadas é a HEART, que foi apresentada em documento da EUSTAT (*Empowering Users Through Assistive Technology*), elaborado por um grupo de pesquisadores de vários países

da União Europeia. Outra classificação sugerida é a do *Assistive Technology Applications Certificate Program* (ATACP - Programa de Certificação em Aplicações da Tecnologia Assistiva), do *College of Extended Learning and Center on Disabilities*, da California State University de Northridge. No Brasil, Berch (2008), adaptou estas classificações para as necessidades dos usuários que residem no país, gerando 11 diferentes recursos: (i) auxílios para a vida diária e vida prática, (ii) comunicação aumentativa e alternativa (CAA), (iii) auxílios para cegos ou para pessoas com visão subnormal, (iv) auxílios para pessoas com surdez ou com déficit auditivo, (v) adaptações em veículos, (vi) recursos de acessibilidade ao computador, (vii) sistemas de controle de ambiente, (viii) projetos arquitetônicos para acessibilidade, (ix) órteses e próteses, (x) adequação postural, e (xi) auxílios de mobilidade.

A cadeira de rodas está inserida nos dois últimos grupos (x e xi) – adequação postural e auxílios de mobilidade. Os auxílios para a mobilidade dizem respeito a todos os equipamentos ou reabilitações que ajudem a pessoa a se locomover com maior facilidade. Incluem, além das cadeiras de rodas, bengalas, muletas, andadores, carrinhos e *scooters*. Já a adequação postural se refere a todos os recursos que possam melhorar as posturas, tanto de pé quanto sentado.

Para prover maior adequação postural, estes equipamentos são constituídos de vários itens, que podem ou não ser inseridos na cadeira, dando opção para o usuário colocar apenas aqueles que irão auxiliar sua deficiência. Os itens mais comuns são apoio de cabeça, utilizados por pessoas que não possuem tônus muscular no pescoço e, logo, necessitam de algo para mantê-la ereta; encosto, provendo apoio para coluna; apoios laterais para o tronco, principalmente para usuários que não conseguem sustentar a parte superior do corpo; assento, distribuindo a pressão do corpo; abdutor, para manter as pernas separadas; apoio para pés, para mantê-los no lugar e protege-los das rodas; cinto de segurança, também para pessoas que não possuem conforto motor e para aquelas que apresentam espasmos, que levam ao usuário cair da cadeira; e mesa de apoio, pois muitas vezes devido ao tamanho da cadeira, não é possível de aproximar de mesas, assim, esta serve para facilitar as atividades diárias. Na figura 1 é possível visualizar uma cadeira de rodas com todas as adaptações assim como estas indicadas em desenho esquemático.

Figura 1 - Adaptações de um assento para adequação postural



Fonte: Mix Car<sup>1</sup>

Um dos itens de grande importância são as almofadas que constituem o assento, comumente chamadas de superfícies de suporte. Sua importância reside no fato que estas, segundo Hollington et al. (2014), podem garantir um cuidado maior com manutenção da integridade tecidual, manejo da função digestiva e respiratória, assim como prevenção de deformidades esqueléticas. Para Carcone e Keir (2007), o papel das superfícies de suporte é atenuar as tensões exercidas sobre a coluna vertebral, relaxando a musculatura, mantendo coluna ereta, a lordose lombar<sup>2</sup> e aumentando o conforto.

A posição sentada já é estudada extensivamente no campo da Ergonomia<sup>3</sup>, focando principalmente na postura de usuários em postos de trabalho, visando melhorar as atividades diárias que normalmente são repetitivas. No entanto, a TA foca a posição sentada no campo da adequação postural, visando diminuir os danos causados por horas nas cadeiras de rodas. O sub-capítulo 2.2 irá tratar de todos os

<sup>1</sup> Disponível em [http://www.mixcar.srv.br/pro\\_cav\\_postura.html](http://www.mixcar.srv.br/pro_cav_postura.html), acesso a 20/04/2013.

<sup>2</sup> A lordose é normal (lordose fisiológica) na região cervical e lombar. É anormal quando se situa em outra parte da coluna vertebral ou quando é muito acentuada, neste caso fala-se em hiperlordose.

<sup>3</sup> “A ergonomia é o estudo da adaptação do trabalho ao homem”. (IIDA, 1993),

aspectos envolvidos na posição sentada e as consequências que esta pode gerar para usuários de cadeiras de rodas.

### **2.1.1 Posição sentada e úlceras de pressão**

A postura sentada é considerada, por Kyung e Nussbaum (2008) como potencialmente prejudicial à saúde, sendo um dos maiores contribuintes para vários problemas nos músculos e no esqueleto, gerando, por exemplo, dor na parte inferior das costas. Pessoas com deficiência, que têm problemas no tônus, e que necessitam de uma cadeira de rodas como seu principal meio de mobilidade e de sentar, acabam sofrendo problemas posturais únicos (TREFLER; SCHMELER, 2001), junto com problemas gerados pela distribuição do peso corpóreo nas superfícies de suporte.

Para as pessoas que não possuem restrições na mobilidade, o alívio do desconforto durante a rotina diária é realizado através de movimentos pequenos e inconscientes do corpo ou ajustes posturais que mantêm desconforto em níveis toleráveis. Para as pessoas com deficiências, o desconforto e a dor gerado por horas sentado na cadeira de rodas durante o dia pode ser um problema crônico. Devido à doenças neuromusculares, são muitas vezes incapazes de ajustar a posição do corpo para atingir a redistribuição adequada de forças de apoio. Além do potencial para a formação de úlceras de decúbito, muitas pessoas desta população passam por períodos intoleráveis de desconforto, o que pode levar a reduzida participação nas atividades diárias, incluindo trabalho, educação e recreação. (HOBSON; CRANE, 2001).

O conforto mecânico está estritamente ligado com o surgimento de úlceras de pressão e os cadeirantes são o maior grupo de risco, assim como afirma Brienza et al. (2010), já que a restrição na mobilidade impede o reposicionamento independente, e este tende a ser o maior fator para o desenvolvimento de úlceras de pressão. As úlceras de pressão são também chamadas de úlceras por pressão, úlceras de decúbito e escaras de decúbito, e “são lesões originadas em partes moles – pele, tecido subcutâneo, tecido adiposo e músculo”. (MORAES, 2009).

A maioria dos autores estão em consenso quanto às causas das úlceras de pressão. Para Wada, Teixeira Neto e Ferreira (2010), elas ocorrem com o acúmulo de pressão sobre tecidos de sustentação de peso. Rosenthal et al (2003) afirma que

as úlceras de pressão se desenvolvem em pacientes sentados ou restritas ao leito, quando, ao longo do tempo, a pressão local sobre os tecidos moles que recobrem proeminências ósseas excede a pressão de enchimento capilar. Já segundo Stockton, Gebhardt e Clark (2009), estas são geradas pela combinação de muitas horas na mesma posição (frequentemente incorreta) com altas cargas sobre pequenas áreas do corpo, aumentando a pressão que induz danos nos tecidos moles. Eles também afirmam que os indivíduos mais propensos a desenvolvê-las são aqueles com mobilidade restrita ou deficiência neurológica.

Nicholson et al. (1999) destaca ainda como causa a distorção mecânica por forças compressivas e de cisalhamento, resultando na constrição dos vasos sanguíneos com a subsequente isquemia e hipóxia. Os autores afirmam que essas duas condições são as que mais causam necrose no desenvolvimento de úlceras de pressão. Brienza et al. (2001) concorda com este fato, ao afirmar que os mecanismos de formação de úlcera de pressão são caracterizados por vários elementos chave, incluindo a amplitude, a orientação e a distribuição de forças sobre a superfície do corpo e as deformações dos tecidos associados com essas forças.

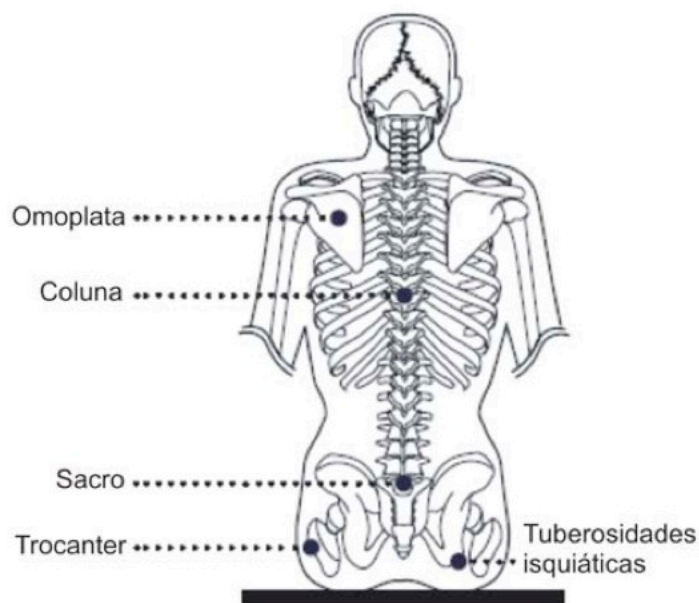
No entanto, apesar de considerar estes fatores como causas, Brienza et al. (2010) destaca que é importante notar que outros fatores influenciam na formação de úlceras de pressão. Uma contabilidade estendida de formação de úlcera de pressão deve incluir não só os fatores mecânicos como um agente causador primário, mas também outros agentes que contribuem como a fricção, calor, umidade, incontinência, desnutrição, e um nível alterado de consciência.

Mesmo com algumas discordâncias, todos os pesquisadores citados (ibid) são unânimes ao afirmar que as úlceras podem ocorrer no paciente quando deitado ou sentado em suportes inadequados, principalmente colchões, cadeiras e assentos. As superfícies de suporte devem dar o apoio suficiente para o corpo, assim como contorná-lo para dar uma melhor distribuição da pressão pela superfície. (HÄNEL; DARTMAN; SHISHOO, 1997).

É também importante ressaltar que o local de origem dos decúbitos não se situa na superfície da pele, mas em planos mais profundos, geralmente no tecido muscular ao redor de proeminências ósseas. (BOUTEN et al., 2003, WADA; TEIXEIRA NETO; FERREIRA, 2010). No caso da posição sentada, estas correspondem às tuberosidades isquiáticas, aos trocânteres femorais e ao sacro (MORAES, 2009), que podem ser visualizados na figura 2. As úlceras adquiridas

pela posição sentada são um problema particularmente importante para usuários de cadeiras de rodas (BRIENZA et al., 2010), pois devido à extensão dessas lesões, seu tratamento é altamente difícil, fazendo com que o paciente fique até meses em uma cama para as curar totalmente.

**Figura 2 – Proeminências ósseas da coluna**



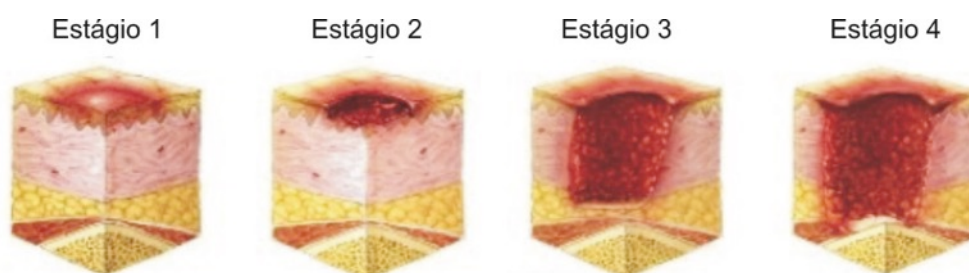
**Fonte: Stockton, Gebhardt e Clark (2009).**

As úlceras de pressão surgem aos poucos e são classificadas em 4 estágios, segundo o *European Pressure Ulcer Advisory Panel*. (DEALEY; LINDHOLM, 2006). O primeiro estágio consiste em uma leve alteração na pele, normalmente uma macha vermelha em pele claras e azulada ou purpúrea em peles escuras. Como a mudança não é brusca, normalmente passa despercebida, mas há outras propriedades que indicam ser uma úlcera por pressão: a temperatura da pele, tanto mais quente quanto mais fria; a consistência da pele, que pode estar endurecida ou amolecida; e para aqueles que possuem sensibilidade na pele, o local apresenta dor ou coceira. No segundo estágio já ocorre perda parcial da espessura da pele (epiderme e/ou derme). A úlcera se apresenta como uma bolha ou pequena ferida na pele, sendo ainda superficial. O terceiro estágio é caracterizado por uma perda significativa de espessura da pele. Apresenta lesão ou necrose do tecido subcutâneo, quase até fáscia. No quarto estágio o tecido está extensamente destruído, apresentando necrose e até lesão muscular e óssea, com ou sem perda de toda a espessura da pele. Caso a úlcera não seja identificada no início, ela pode



evoluir rapidamente para os outros estágios, sendo os últimos os de mais difícil tratamento (Id.). Na figura 3 é apresentada uma ilustração mostrando como as úlceras de pressão ocorrem nos tecidos.

**Figura 3 – Estágios de formação das úlceras de pressão**



**Fonte: Pathology Clicks<sup>4</sup>.**

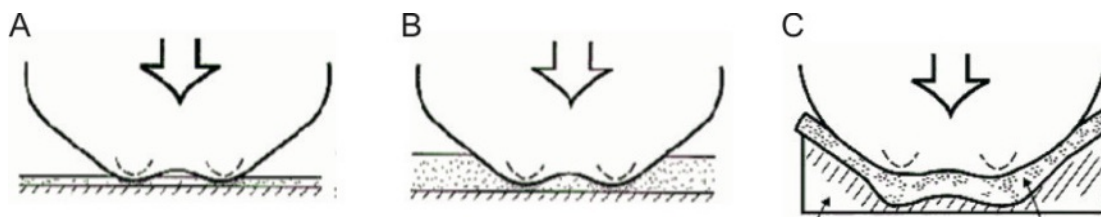
Segundo Moraes (2009), um dos componentes do assento que recebem especial atenção para lidar com esse problema são as almofadas que constituem a base, “visto que elas são responsáveis por sustentar a maior parte do peso do usuário, e as regiões do corpo em contato com ela ficam submetidas a grandes pressões.” Segundo Moraes (2009), “o modo mais direto e intuitivo de diminuir a compressão sobre o assento – dessa forma diminuindo o risco – consiste em fazer com que ela seja distribuída por uma área maior”.

Assim, a integridade do tecido é mantida, reduzindo pressões perto de proeminências ósseas, acomodando deformidades ortopédicas através da imersão, irregularidades envolventes na interface para a redução dos gradientes de alta pressão, e também, calor e umidade. A figura 4A mostra a posição sentada em uma cadeira normal, sem almofada; a figura 4B mostra como uma almofada comum acomoda as proeminências ósseas; e a figura 4C mostra o funcionamento de uma almofada que aumenta o contorno, ampliando o contato entre o usuário e a superfície de suporte.

---

<sup>4</sup> Disponível em: <http://reniafisio102pathologyclicks.blogspot.com.br/2010/08/estagios-da-ulcera-por-pressao-decubito.html>, acessado em 30/05/2013.

**Figura 4 – Funcionamento dos assentos com e sem almofadas**



Fonte: Moraes (2009).

Notas: (A) superfície sem almofada; (B) superfície com almofada e (C) superfície com almofada que aumenta o contorno.

As espumas são o estado da arte como materiais de amortecimento e são os mais utilizados na confecção de assentos. Devido à sua espessura e poros, o que, por vezes, não são ligados uns aos outros, estes materiais fornecem um transporte do suor limitado. (BARTELS, 2003). Essas almofadas podem variar pela densidade da espuma, mas a mais utilizada é a de  $50 \text{ kg/m}^3$ . Elas possuem um formato padrão anatômico, com leves curvas para ajudar no melhor acomodo do usuário. Possuem vantagens como o baixo custo e estabilidade, além de ser fácil posicionar na cadeira de rodas.

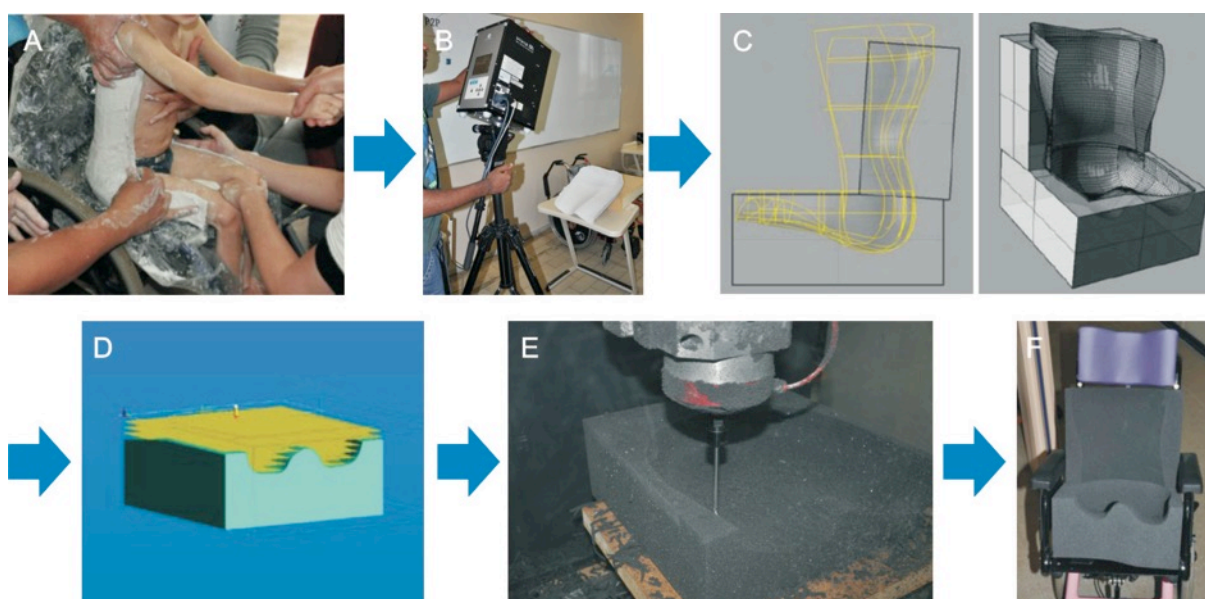
As almofadas anatômicas de PU encontradas no mercado vão contra ao que Moraes (2008) afirma como ideal, que é aumentar a área de contorno. A grande maioria não consegue acomodar as deformidades dos usuários – quando há –, aumentando os picos de pressão nessas áreas. Uma opção que vem sendo desenvolvida são os assentos personalizados (BRIENZA et al., 1992; BROUGHTON; DILABIO; COOPER, 2001; SILVA, 2011), que possuem a exata forma do usuário, aumentando a área de contato, resultando em uma melhor distribuição de pressão e posicionamento.

Os assentos personalizados inicialmente foram pensados para crianças com paralisia cerebral que, segundo Moraes (2009), “podem apresentar alterações de tônus muscular e de reflexos neurológicos, deformidades congênitas da coluna vertebral e dos membros, e limitação ou ausência de controle postural”. Essas superfícies de suporte são elaboradas a partir de moldes construídos sob medida, gerando assim, a exata geometria do usuário, para tentar replicá-la na superfície de suporte escolhida, normalmente uma espuma de PU.

Uma equipe multidisciplinar do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) localizado da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), realizou um estudo sobre assentos personalizados para crianças

da AACD (Associação de Assistência à Criança Deficiente). O estudo consistiu em obter a forma do corpo do usuário através de moldes feitos por profissionais da saúde tanto em gesso e com colchões de vácuo, quanto pela digitalização direta do paciente. Segundo testes realizados por Prestes (2011), a forma de obtenção que gera a forma mais exata do usuário é o molde de gesso, que também apresenta vantagens como o baixo custo e a possibilidade de ser realizado em qualquer estabelecimento que tenha em sua equipe um profissional da saúde que saiba qual a melhor posição colocar o paciente. Os moldes de gesso gerados (figura 5A) são então digitalizados usando um scanner 3D (figura 5B), os dados coletados são transpostos para um programa CAD/CAM (figura 5C) e processados para que a forma fosse adequada para a usinagem CNC (figura 5D). Os assentos são diretamente usinados na espuma (figura 5E), garantindo a precisão das formas. (BERETTA, 2011; SILVA, 2011). Na figura 5F é possível visualizar o assento personalizado produzido, inserido na cadeira de rodas.

**Figura 5 – Processo de obtenção do assento personalizado**



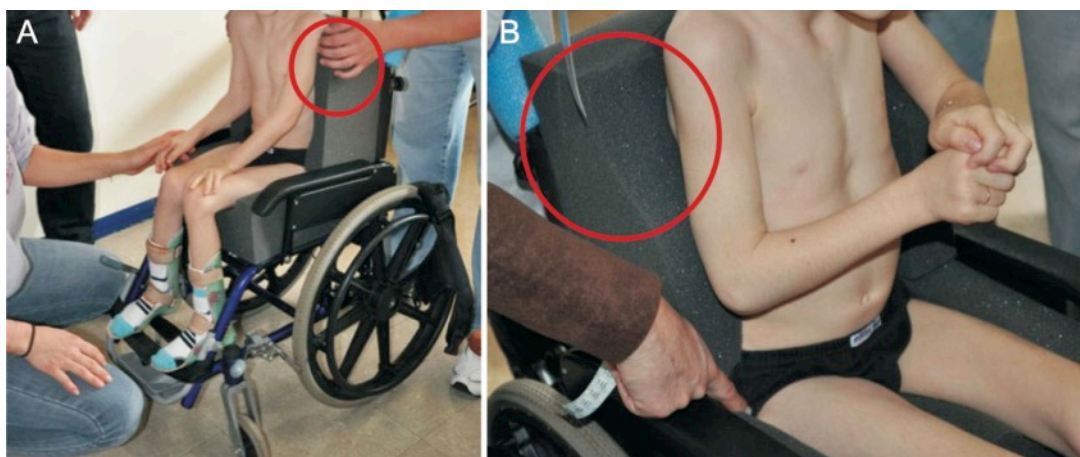
Fonte: Silva (2011).

Notas: (A) Obtenção do molde de gesso; (B) Digitalização 3D do molde de gesso; (C) processamento dos dados; (D) programação de usinagem; (E) usinagem do assento; (F) assento finalizado.

Depois que o assento é finalizado, ainda é necessário realizar uma “prova” com o usuário. Este passo é importante para realizar pequenos ajustes no assento, como uma parede muito alta que possa impedir que o usuário se movimente adequadamente. Na figura 6A é possível visualizar o assento antes de ajuste, e na

figura 6B, depois de ter sido avaliado por profissionais da saúde e ajustado. Normalmente, a altura das laterais é deixada maior, para que assim não seja necessário realizar outro assento, pois uma lateral muito baixa não provê o posicionamento necessário.

**Figura 6 – Ajustes no assento personalizado**



Fonte: Silva (2011).

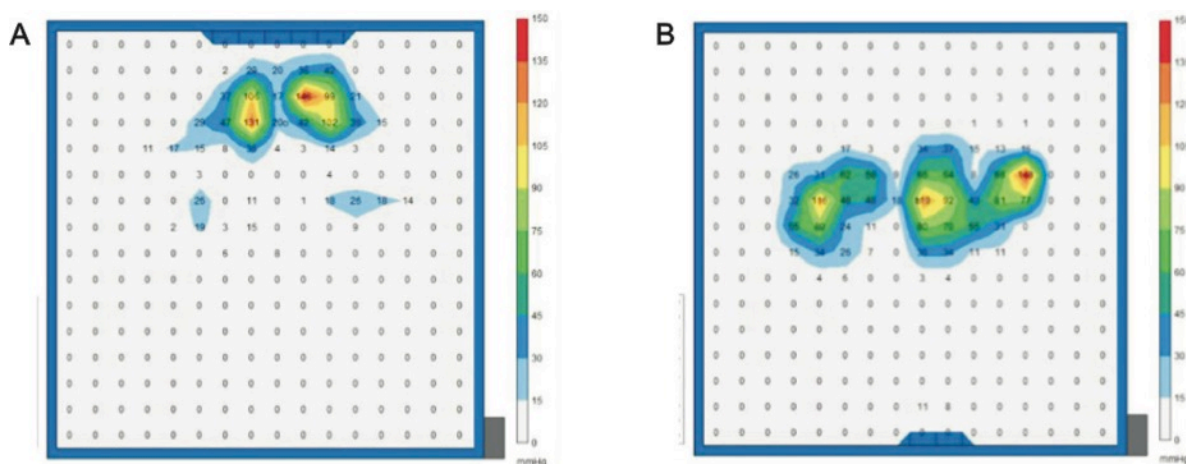
Notas: (A) Assento em o ajuste; (B) Ajuste realizado na lateral.

Para analisar se os assentos estavam provendo maior distribuição de pressão, foi realizado um teste com um tapete com sensores que medem a pressão localizada (tapete flexível do sistema FSA – *Force Sensitive Applications – SoftFlex Seat Sensing Mat*, da marca Vista Medical, com formato quadrado de 400x400mm, com 256 sensores distribuídos em uma matriz de 16x16). O usuário foi colocado em seu assento, sobre o tapete, e foi medido primeiramente o assento que ele já utilizava (normalmente almofada de PU padronizada ou escavada manualmente), e depois foi verificada a pressão do assento personalizado produzido. Todos os assentos realizados na pesquisa apresentaram resultados superiores aos assentos que os usuários usavam, minimizando os picos de pressão. Para exemplo, pode ser visualizado na figura 7 os resultados de um assento. O mapa da figura 7A corresponde ao assento que o usuário utilizava, escavado manualmente, e o mapa da figura 7B ao assento personalizado. O assento aparece em vista superior, tal como ocorreu com os resultados das digitalizações. Observou-se a melhor distribuição de pressão no assento personalizado, ocupando uma maior área e não apresentando picos relevantes de pressão. O usuário apresentava uma assimetria, assim, seu peso está mais distribuído para um lado do assento. O assento escavado



manualmente apresentou uma pressão mais concentrada nas tuberosidades isquiáticas (área menor), que podem ser visualizadas em vermelho na figura 7B.

**Figura 7 – Medições da distribuição pressão nos assentos**

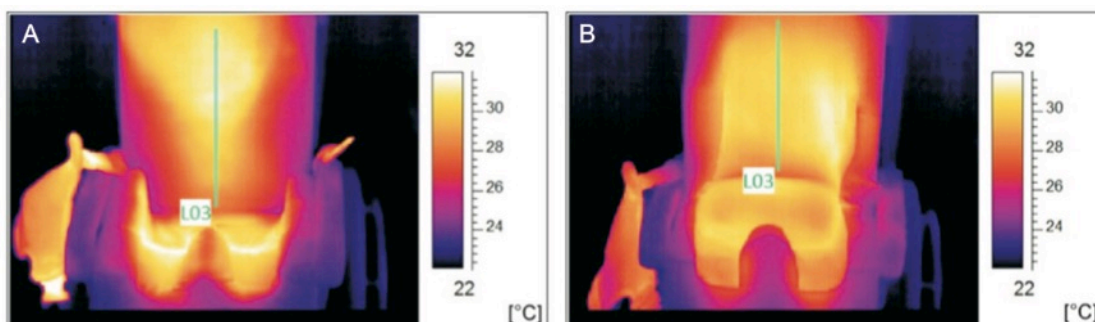


Fonte: Silva (2011).

Notas: (A) Assento escavado manualmente; (B) Assento personalizado.

Também foi feita a validação medindo o calor emanado da superfície do assento, através de um termógrafo. O usuário ficou posicionado no assento por 20min, logo após ser retirado do assento, a superfície foi termografada, gerando um mapa do calor da superfície. A exemplo, é possível ver na figura 8 os resultados da termografia do paciente mencionado anteriormente. As áreas amarelo clara e branca são referentes às maiores temperaturas. Na figura 8A, o assento escavado manualmente é mostrado, e é possível notar que o calor concentra-se no meio do assento, apresentando picos nas pernas. Na figura 8B, mostra que o assento personalizado aumentou a área de contato e assim, conseqüentemente, melhorou a distribuição da temperatura.

**Figura 8 – Medição da temperatura realizada no assento**



Fonte: Silva (2011).

Notas: (A) Assento escavado manualmente; (B) assento personalizado.

Enquanto para a pressão é bom que a área de contato aumente, para a temperatura o resultado é inverso: quanto maior a área de contato, a isolação pode ser maior (dependendo do material de apoio). Isso pode ocasionar o aumento da temperatura na interface usuário/assento. Na figura 7, pode-se ver através da barra lateral, que a temperatura máxima vou de 32°C, sendo que no dia que as medições foram feitas era inverno e a temperatura estava por volta de 12°C. Assim, a tendência é que a temperatura aumente conforme o ambiente, e esse calor em excesso gerado pode causar problemas como sudorese, além do desconforto para o usuário. Para entender a relação do conforto e da temperatura, o próximo capítulo abordará as questões fisiológicas do corpo humano quanto ao conforto térmico, como esse pode ser percebido e avaliado nas superfícies de suporte, além das consequências de uma temperatura inadequada nos assentos de cadeiras de rodas para as pessoas com deficiência.

## 2.2 CONFORTO TÉRMICO

Antes de abordar o conforto térmico, é importante entender brevemente o que é conforto e quais as definições que estão atreladas a esse termo, principalmente porque existem várias discordâncias no significado do termo. Segundo Linden, Guimarães e Tabasnik (2005), “o seu conceito é subjetivo, depende em grande parte da percepção da pessoa que está experienciando a situação, não existindo uma definição universalmente aceita”. Smith, Andrews e Wawrow (2006) também afirmam que o conforto é uma construção subjetiva sendo difícil de interpretar, medir e especificamente definir devido a sua natureza psico-fisiológica. Assim, mesmo que o conforto seja um dos temas mais importantes para as sociedades contemporâneas, relacionando-se com questões de mercado e de saúde, ainda é difícil defini-lo.

O conforto surge a partir da palavra latina *cumfortare*, que é derivada de *cumfortis*, que significa aliviar a dor ou a fadiga. Portanto, desde a origem da palavra, seu conceito está ligado com o desconforto, que se torna o foco de suas definições. Como o conceito de Hertzberg (1958), um dos primeiros a conceituar o conforto, que afirma que é este a ausência do desconforto. Shen e Parsons (1996) também relacionam o conceito de conforto com o desconforto, considerando-o como uma

sensação genérica e subjetiva que surge quando a homeostase fisiológica humana, o bem-estar psicológico, ou ambos, são afetados negativamente.

Essas definições que relacionam o conforto com o desconforto foram questionadas, já que não implicam necessariamente em uma resposta positiva, que deveria estar presente na percepção do conforto, como afirmam Linden, Guimarães e Tabasnik (2005). Assim, outros conceitos mais abrangentes de conforto, que englobam também a motivação e o contexto de uso, foram surgindo já que a ausência do desconforto não resulta automaticamente em conforto.

Zhang, Helander e Drury (1996) afirmam que o conforto é um conceito extremamente complexo que envolve a ausência de desconforto, mas também a presença de uma série de percepções positivas que vão além, assim como incluem a estética. Richards (1980) também destaca os aspectos positivos do conforto, salientando que é um estado que envolve uma sensação de bem-estar subjetivo, em reação a um ambiente ou situação. Slater (1985), afirma que o conforto é “um estado prazeroso de harmonia fisiológica, física e psicológica entre o ser humano e o ambiente”.

Segundo os autores que destacam os aspectos positivos e prazerosos, chega-se a conclusão que, para sentir conforto, mais coisas além do desconforto devem ser experienciadas. Para tanto, considera-se que o desconforto está bastante relacionado a aspectos físicos e o conforto a aspectos emocionais. De Looze et al. (2003) desenvolveram um esquema para explicar os efeitos desses diferentes fatores no conforto e desconforto (figura 9). Neste modelo vários fatores influenciam a experiência de conforto, como as expectativas e emoções do usuário, as questões estéticas do produto e os motivos psico-sociológicos para realizar uma tarefa. Já para o desconforto, as partes fisiológicas são consideradas, como a capacidade física do usuário, as características físicas do produto e a dificuldade da tarefa a ser realizada. Se este modelo fosse aplicado em assentos, pode-se dizer que uma influência ambiental seria a temperatura, a parte física poderia ser a espuma, a estética poderia ser a cor que o produto possui e que é notada pela visão do usuário. (VINK; DE LOOZE, 2008).





realizado em 1916, pela Comissão Americana de Ventilação, a fim de determinar a influencia das condições térmicas no rendimento do trabalho, com foco no trabalho físico do operário. O interesse surgiu primeiro pelo aumento do trabalho gerado pela Revolução Industrial e, depois, pelas guerras, quando tropas tinham que ser deslocadas para locais com climas diferentes. (FROTA, 2003).

Há seis fatores conhecidos que influenciam no conforto térmico: a temperatura do ar, radiação térmica, velocidade do ar, umidade, vestimentas e atividade. Para Sakoia et al. (2007), o efeito combinado dos cinco fatores (exceto a atividade) sobre o estado térmico humano pode ser descrito pelas relações entre a percepção humana, o estado térmico fisiológico da pele (a temperatura, umidade, etc.), e a taxa de transferência de calor na superfície da pele.

Também é necessário conhecer como funciona o controle térmico do corpo humano. A temperatura normal do corpo humano é de 37°C. Em um ambiente com temperatura constante de 20°C, a temperatura na superfície da pele sem vestimentas é de aproximadamente 33°C. (NICHOLSON et al., 1999). Para que uma pessoa esteja em estado de conforto térmico, no desempenho das atividades, admite-se pequenas oscilações nessa temperatura, sendo que em situações mais extremas, admite-se variações um pouco maiores para se evitar os perigos de stress térmico (LAMBERTS; XAVIER, 2002), sendo que 32°C é o limite inferior e 42°C é o limite superior para sobrevivência, em estado de enfermidade. (FROTA, 2003).

O organismo humano experimenta sensação de conforto térmico quando perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação<sup>5</sup>, o calor produzido pelo organismo compatível com sua atividade. (LAMBERTS; XAVIER, 2002). O ser humano necessita uma certa quantidade de calor para seu funcionamento.

A energia gerada pelo calor, essencial para a sobrevivência humana, é conseguida através de fenômenos térmicos, principalmente por reações químicas internas, sendo a mais importante a combinação de carbono, introduzido no organismo sob a forma de alimentos, com o oxigênio, extraído do ar pela respiração. Para Frota (2003), “esse processo de produção de energia interna a partir de elementos orgânicos, é chamado de metabolismo”.

---

<sup>5</sup> O controle de termorregulação do fluxo sanguíneo da pele humana é vital para a manutenção de temperaturas normais do corpo durante desafios para a homeostase térmica, e o controle da circulação cutânea humana inclui elementos neurais e locais. (LAMBERTS e XAVIER, 2002).

O metabolismo é importante para que o corpo se mantenha em equilíbrio: 20% da energia é transformada em trabalho e 80% é dissipada, para que este equilíbrio seja mantido constantemente. A regulação normal fisiológica do microclima da pele é necessária para manter o equilíbrio térmico entre o ganho de calor com o corpo pelos processos metabólicos e a perda de calor da pele com o meio. (NICHOLSON et al., 1999). Quando o metabolismo trabalha em excesso, ocorre a fadiga-higrométrica que, para Frota (2003), “é gerado por um ambiente e outras condições desfavoráveis, tanto em relação ao frio quanto ao calor”.

A condições de conforto térmico são, portanto, função de uma série de variáveis. Para avaliar tais condições, o indivíduo deve estar apropriadamente vestido e sem problemas de saúde ou aclimatação (FROTA, 2003), e deve-se levar em conta as variáveis pessoais. (LAMBERTS; XAVIER, 2002). Segundo Verheyen et al. (2011), o ambiente térmico pode ser uma importante fonte de estresse indesejado sobre o corpo e, assim, é necessário conhecer os usuários para perceber o conforto térmico individual.

Por exemplo, em pesquisas de Webb e Parsons (1997), foi notado que homens e mulheres possuem diferentes respostas de conforto térmico e isso é naturalmente co-fundamentado pelas vestimentas que ambos usam. Os resultados encontrados mostram que existem algumas diferenças para condições de neutras a quentes, mas as mulheres tendem a ficarem com temperaturas mais baixas em condições térmicas frias.

As pessoas com deficiência também tem seu conforto afetado por sua restrição. Verheyen et al. (2011) afirmam que o conforto térmico de pessoas com deficiência pode ser diferente da população considerada saudável, pois a natureza da deficiência afetará a termofisiologia, a sensação térmica, o metabolismo, o fluxo de sangue, a resposta do sistema regulatório, como o controle vasomotor da temperatura da pele ou a habilidade de transpirar. Dependendo do tipo de deficiência e o estado de saúde, a oportunidade de adaptação ao meio pode ser restrita, limitando a gama de condições térmicas ambientais que proporcionam conforto. Também, o uso de equipamentos de TA (como a cadeira de rodas), os tratamentos médicos e o uso de medicamentos, podem afetar a sensação térmica e a percepção de conforto. Segundo Lamberts e Xavier (2002), os principais motivos pelos quais pessoas com deficiência experienciam diferenças no conforto térmico são diferenças na mobilidade, postura e antropometria, assim como efeitos termo

regulatórios causados pela própria deficiência (fluxo de sangue, suor etc.), ou métodos para melhorar alguma função, como fármacos.

Exemplificando essas diferenças, um local pode ter condições ambientais para pessoas sem deficiência física confortáveis e neutras. Já para as pessoas com deficiências físicas, tais condições podem levar ao desconforto térmico e até mesmo à pequenos desvios; para essas pessoas esse ambiente pode ser percebido como uma ameaça e levar a altos níveis de insatisfação e desconforto. É como se uma pessoa é colocada em um ambiente que tornou-se progressivamente mais quente ou mais frio e esta não é capaz de controlar o ambiente ou retirar-se dele. (PARSONS, 2000).

Hill et al. (2000) conduziu estudos de campo com pessoas com deficiências, realizando questionários com cuidadores e profissionais da área da saúde. Com isso, mostrou que as habilidades funcionais diminuem para as pessoas com deficiência quando os ambientes estão fora das necessidades para prover conforto térmico, o que pode levar a desconforto, aumento da dor e menor qualidade de vida.

Em um experimento de laboratório, Webb e Parsons (1997) compararam medidas subjetivas e objetivas quanto ao conforto de 16 pessoas com e sem deficiências. As deficiências dos usuários variavam de paralisia cerebral, spina bífida, derrame cardiovascular, cegueira, paralisia, encefalite, síndrome de Guillain-Barré, e amputados (sem os membros inferiores, como parte das pernas). Os resultados desse experimento mostraram que não existem grandes diferenças nas respostas dos sujeitos com e sem deficiências. As variações foram maiores em ambientes frios e menores em ambientes considerados com temperatura acima da média de conforto (maiores que 20°C).

Há algumas normas que focam o conforto térmico de pessoas com deficiências, mas a maioria visa o conforto do ambiente, e não das superfícies de suporte. A ISO 14415 (2005) foi feita para ser aplicada junto com a ISO 7730 (1994), para a determinação e interpretação do conforto térmico no caso de pessoas com requerimentos especiais, tais como pessoas com deficiência física, gravidez, doença ou envelhecimento. Essas normas técnicas contêm considerações gerais sobre a percepção de conforto térmico em ambientes, assim como especificações de condições para conforto térmico. Também são discutidas mudanças na fisiologia e sensação térmica, respostas termo-regulatórias e a percepção de conforto térmico, em termos de ambientes para pessoas com deficiências específicas.

Assim, os requisitos para o conforto térmico das pessoas com deficiência devem ser concebidos de forma individual, para cada cadeirante. Este fato é confirmado pelo padrão internacional de conforto térmico para pessoas com requerimentos especiais, declarando que a consideração dos requisitos individuais pode ser ainda mais necessária para as pessoas com deficiência do que para as pessoas sem restrições.

Alguns auxílios tecnológicos podem ajudar na melhora dos requerimentos térmicos, como os materiais usados na construção da cadeira de rodas. (LAMBERTS; XAVIER, 2002). Além disso, é sugerido que a pessoa tenha a possibilidade do controle térmico individual (ISO 14415, 2005). Assim, faz-se necessário estudar como as superfícies de suporte, mais especificamente os assentos, influenciam no conforto térmico.

### **2.2.2 Conforto térmico em superfícies de suporte**

Devido ao metabolismo humano, calor e umidade são gerados continuamente e o sentimento de conforto depende do balanço entre as trocas desses na interface superfície do assento – corpo humano. Zacharkow (1988) afirma que essas trocas são alteradas pela área de contato com o corpo (quanto maior a área, menores as trocas), e pela pressão gerada pelo corpo em uma superfície. O acúmulo de temperatura e de umidade na superfície da pele pode levar ao desconforto, em parte por causa de um aumento no coeficiente de atrito, quando a pele está úmida. Transpiração que está presa contra a pele e o assento (espuma e tecido) pode, por exemplo, produzir uma sensação pegajosa, se está quente. A junção da espuma e do tecido é um dos fatores determinantes do microclima. (FAZLOLLAHTABAR, 2010). No entanto, há pouca literatura publicada, que pode ser utilizada para conceber um microclima confortável.

Existe a evidência que a temperatura na interface corpo-assento pode ter um importante papel no conforto percebido da pessoa quando sentada. (LIU et al., 2011). A superfície na qual o usuário está em contato possui um importante papel na dissipação do calor e da umidade para longe da pele e, também, para manter o microclima fisiológico da pele. Segundo Nicholson et al. (1999), o excesso de isolamento reduz as perdas de calor resultando em aumento da temperatura e suor. Se a umidade não pode ser evaporada, não haverá a perda de calor e o suor se

acumulará, resultando na super-hidratação da pele. Em alguns casos, a superfície pode dissipar demais o calor, o que gera baixa temperatura, desidratação da pele e vasoconstrição.

Mais além, Liu et al. (2011) afirmam que mudanças na temperatura podem afetar a viabilidade do tecido, e assim, propiciar a formação de úlceras. Fatores como o estresse térmico são conhecidos por influenciar o desempenho e efetividade humana, tanto psicologicamente quanto fisiologicamente. Por exemplo, a baixa temperatura pode diminuir a flexibilidade do tecido podendo causar a vasoconstrição e a diminuição de sangue nas áreas afetadas (o que aumenta a probabilidade de ulceração) (NICHOLSON et al., 2011); em contraste, o aumento da temperatura aumenta a flexibilidade, mas pode deixar a pele mais sensível. (LIU et al., 2011). Assim, é importante estudar a temperatura entre o corpo e o assento, já que este fator impacta no conforto da pessoa sentada.

A presença de umidade e úlceras podem aumentar a atividade microbiana e o risco de infecções. Bactérias aumentam a demanda no metabolismo local, tanto por seus próprios requerimentos quanto pela resposta do mecanismo de defesa do corpo. A super-hidratação da pele do acúmulo de umidade pode mudar as propriedades do tecido humano. O tecido úmido é mecanicamente mais fraco que o tecido seco, levando ao aumento da maceração e da escoriação. A umidade também aumenta o coeficiente de fricção entre o paciente e o sistema de suporte. Quando ocorre o aumento da fricção, por exemplo, ocorre o cisalhamento do tecido, o que pode causar feridas intra-epidermais e, posteriormente, erosões na superfície da pele (Id.). No entanto, se o tecido não gerar um atrito mínimo, o paciente pode “escorregar” no assento.

Resumidamente, analisando o material bibliográfico coletado, pode-se afirmar que o conforto térmico sentado do cadeirante difere de pessoas sem restrições, por isso, pouco dos dados coletados dos outros estudos são aplicáveis. Chega-se a conclusão que existem muitos fatores que afetam o conforto dos assentos, tais como, o material, a geometria do assento, a antropometria do ocupante, a quantidade de tempo despendida no assento e a subjetividade do usuário. Analisando os artigos similares, que abordam o conforto térmico em carros e aviões, alguns fatores podem ser considerados para os assentos de cadeiras de rodas, como: o calor e a umidade do corpo devem passar pelo assento; materiais com poros são preferíveis pois reduzem a resistência do calor passar por eles; espumas

com baixa densidade devem ser evitadas, pois aumentam a resistência à difusão de calor (KYUNG, NUSSBAUMA e BABSKI-REEVES, 2008; CENGIZ e BALBALIK, 2009; FAZLOLLAHTABAR, 2010; HÄNEL, DARTMAN e SHISHOO, 2011; ALAHMER, ABDELHAMID e OMAR, 2012).

Também, é importante ressaltar que Cengiz e Balbalik (2009) indicam como um dos principais determinantes do conforto térmico em assentos, o material de cobertura. Um material que recobre o assento do carro deve ser resistente à degradação ultravioleta e abrasão, durável, e também ser respirável e transportar a umidade. Nos estudos dos assentos de cadeiras de rodas, pouco se fala do material de cobertura. No entanto, considera-se este tão importante quanto o material do assento, por ser parte influente no microclima gerado.

Mesmo sem diretrizes específicas, alguns estudos estão buscando projetos para o controle do conforto térmico, desenvolvendo aquecedores de assento e dispositivos para ventilação dos mesmos. (KOLICH, 2008). Essas inovações estão sendo desenvolvidas com relação direta ao projeto de assentos de carros, no entanto, não são soluções que poderiam ser transpassadas para cadeiras de rodas, por necessitar de uma fonte de energia para funcionarem. Mesmo nas cadeiras motorizadas, que usam bateria, essas soluções no estágio atual do conhecimento não seriam pertinentes, devido a duração desta bateria. Assim, é sugerido por Marcuzzo (2012), que ocorra uma modificação no material da superfície de suporte, com a aplicação de microcápsulas de PCMs.

### 2.3 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCMs)

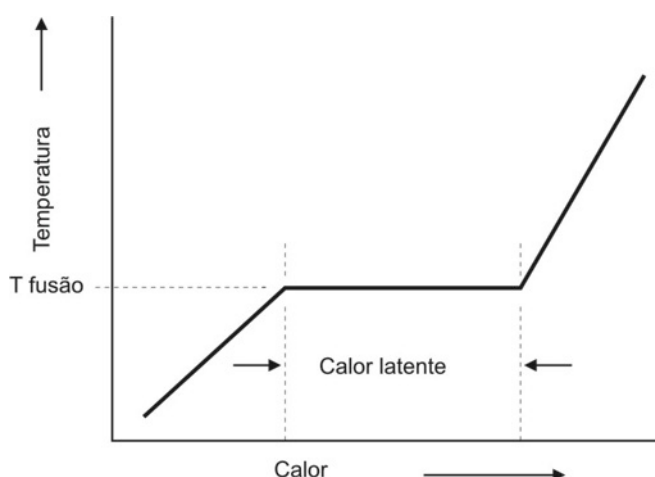
O armazenamento de energia térmica ocorre com uma variação da energia interna de um material, como o calor sensível, o calor latente e termoquímico ou a combinação destes. (DAO; JEONG, 2015, SHARMA et al., 2009). Os PCMs são materiais de armazenamento de calor “latentes”. O armazenamento de calor latente baseia-se na absorção ou liberação de calor quando um material de armazenamento é submetido a uma mudança do estado sólido para líquido ou líquido para o gasoso, ou vice-versa. (NEJMAN, 2014; SHARMA et al, 2009). Segundo Borreguero et al. (2010), essa mudança ocorre quando a temperatura passa ou ultrapassa a temperatura de mudança de fase do material. Ainda, esses materiais absorvem ou liberam esse calor latente fazendo com que a temperatura do material seja mantida

constantes no processo de mudança de fase. (BAJAJ, 2001; MÄKINEN, 2006; YOU et al, 2008, ZHANG; WANG; WU, 2015).

Os PCM podem, portanto, ser definidos de uma forma simplificada, como materiais com a capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, absorvendo ou libertando energia do meio envolvente. Durante este processo de mudança de fase, a temperatura do PCM mantém-se praticamente constante. Quando a mudança de fase está completa, o aquecimento/arrefecimento contínuo resulta no aumento/diminuição da temperatura, de forma gradual e definida por uma propriedade denominada de calor sensível. (DA SILVA, 2009).

A principal propriedade dos PCMs é uma maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume do que a dos materiais convencionais. Quando a temperatura ambiente sobe, as ligações químicas do material irão “quebrar-se” e o material vai mudar do estado sólido para líquido. Esta mudança de fase é um processo endotérmico e como resultado, irá absorver o calor. À medida que a temperatura ambiente cai novamente, o PCM irá retornar ao estado sólido e libertar o calor absorvido (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Este ciclo estabiliza a temperatura e diminui as cargas de aquecimento e resfriamento, influenciando nas temperaturas do ambiente ou do corpo. A quantidade de calor que é necessária para fundir os sólidos a uma temperatura constante é chamado a entalpia de fusão. O calor latente de fusão é maior do que as capacidades de calor sensível dos materiais. (ERKAN, 2004). A figura 10 dá uma explicação gráfica desses fenômenos.

**Figura 10 – Mudanças de temperatura e calor durante a mudança na fase**



Fonte: Tradução nossa de Erkan (2004).

A aplicação dos PCM em armazenamento de energia é bem conhecido em muitos campos. Bayes-Garcia et al (2010) justificam esse fato pelas propriedades do material, que podem estabilizam as mudanças térmicas de um ambiente. Mohaddes et al. (2014) afirmam que os PCMs são bons para estabilizar temperaturas em ambientes inconstantes.

O estudo dos PCMs foi iniciado por Telkes e Raymond em 1940, mas não recebeu muita atenção até a crise de energia do final de 1970 e início de 1980, na qual foram amplamente pesquisados para uso em aplicações diferentes, especialmente para sistemas de aquecimento solar. Agyenim et al. (2010) afirmam que as pesquisas diminuíram, mas que hoje, com uma nova crise energética, surgiu um novo interesse. No entanto, sistemas de aquecimento solar não são o único uso para os PCMs. Muitas aplicações possíveis foram relatadas (DA SILVA, 2009, NEJMAN; GOETZENDORF-GRABOWSK, 2014, MARCUZZO, 2012, NEJMAN ET AL., 2014, SALAÜN; VROMAN; ELMAJID, 2012, YOU et al, 2010), como a inclusão de PCMs em materiais de construção para a estabilização da temperatura do ambiente, e as aplicações em tecidos, visando o conforto térmico humano. A tabela 1 mostra a amplitude da aplicação de PCMs.



**Tabela 1 – Aplicação de PCMs em Tecidos**

<b>Aplicação</b>	<b>Descrição breve</b>
Roupas casuais	Roupas íntimas Jaquetas Roupas esportivas Roupas para esqui
Roupas profissionais	Uniformes de bombeiros Coletes à prova de balas Roupas de mergulho Trajes espaciais Trajes de aviadores Roupas para navegação
Decoração de interiores	Cortinas Roupas de cama Colchas
Calçados	Botas de esqui Sapatos de golfe
Usos médicos	Gaze cirúrgica Bandagens Fraldas
Materiais de construção	Tetos Paredes Concreto
Outros usos	Interior automotivo Sacos de dormir

**Fonte: Adaptado de Erkan (2004).**

Segundo Nejman et al. (2014), a escolha do PCM varia muito conforme a aplicação, assim, como indica Farid et al (2004), eles devem ser escolhidos com base em sua temperatura de fusão. Os PCMs devem ter uma fusão ou congelamento no mesmo intervalo que a temperatura de aplicação desejada. Para aplicações têxteis que visam o conforto térmico, a temperatura de fusão (de absorção de calor) é de 20 a 40°C, próxima da temperatura corporal. (ERKAN, 2004). Mccullough e Shim (2006) afirmam que a temperatura de transição do PCM deve ser ajustada de modo a que os PCMs fiquem na fase líquida quando usado no ambiente quente, e na fase sólida no ambiente frio.

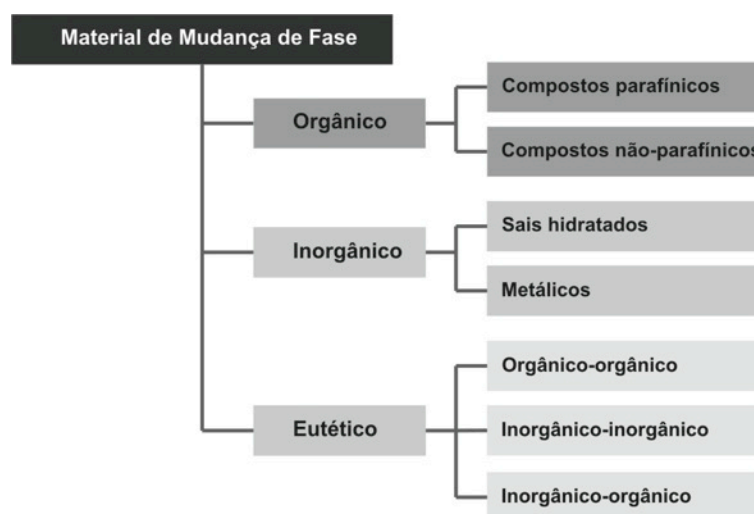
Da Silva (2009) sugere que alguns itens sejam considerados, sob o ponto de vista termofísico, para assegurar que o PCM escolhido seja adequado para a aplicação, como: temperatura de transição de fase na gama de temperaturas de

operação desejadas; elevado calor de transição por unidade de volume, de modo a armazenar o máximo de energia, incorporando o mínimo PCM possível; elevado calor sensível, traduzido pela sua capacidade calorífica, de modo a aumentar a sua capacidade de armazenamento de energia; elevada condutividade térmica tanto no estado sólido como no estado líquido, de forma a mais facilmente promover a transferência de calor; reduzida variação de volume durante a transição de fase de forma a reduzir os problemas com a sua contenção e processo de fusão congruente de forma a manter constante a capacidade de armazenamento ao longo de ciclos repetidos.

### 2.3.1 Tipos de Materiais de Mudança de Fase

Os PCMs podem ser classificados em orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas, como pode ser visualizado no esquema da figura 11. De acordo com Da Silva (2009), “os compostos orgânicos são ainda divididos em parafínicos e não parafínicos enquanto os compostos inorgânicos se dividem em sais hidratados e metálicos”. As misturas eutéticas são composições de dois ou mais componentes que fundem e cristalizam congruentemente formando uma mistura de cristais compostos. Farid et al. (2004) afirma que os grupos mais comuns de PCMs são os compostos inorgânicos-orgânicos.

Figura 11 – Classificação dos Materiais de Mudança de Fase



Fonte: Adaptado de Sharma et al (2009).

As misturas eutéticas, ou simplesmente eutéticos, são misturas de dois ou mais compostos orgânicos, inorgânicos ou ambos, podendo assim apresentar temperaturas de transição mais aproximadas às necessidades do que os compostos que a originam. (DA SILVA, 2009). Eutéticos podem ser divididos em três grupos de acordo com os materiais que são constituídos: (i) orgânico-orgânico, (ii) inorgânico-inorgânico e (iii) Eutéticos inorgânico-orgânico. Pode-se obter um eutético com vários sólidos gerando um PCM que o ponto de fusão é tão baixo quanto possível e sua densidade de armazenamento volumétrico é ligeiramente maior do que a de compostos orgânicos. No entanto, segundo Baetens, Jelle e Gustavsen (2010), os dados disponíveis sobre essas misturas são limitados quanto às suas propriedades térmicas e físicas. Silva (2009) afirma que a principal desvantagem das misturas eutéticas é o seu custo.

Como afirma Da Silva (2009), “os compostos inorgânicos são sais hidratados, incluindo o Sal de Glauber (sulfato de sódio deca hidratado), um dos materiais mais estudados no início das investigações sobre os PCM”. Sais hidratados são materiais atrativos para armazenamento de energia térmica devido à sua elevada densidade de cerca de 240kJ/kg, a sua elevada condutividade térmica relativa de cerca de 0,5 W/m°C e o seu custo razoável em comparação com cera de parafina. (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). O Sal de Glauber, que contém 44% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 56% H<sub>2</sub>O em peso, tem sido estudado desde 1952. Possui uma temperatura de fusão de cerca de 32,4°C e um elevado calor latente de 254 kJ/kg (377 MJ/m<sup>3</sup>), sendo é um dos materiais mais baratos que podem ser utilizados para a armazenagem de energia térmica. No entanto, os problemas de segregação de fases e sub-resfriamento têm limitado a sua aplicação. (FARID et al., 2004).

Os PCMs inorgânicos em geral, têm um calor de fusão bastante elevado, boa condutividade térmica, são baratos e não-inflamáveis. Grande parte dos sais inorgânicos hidratados possuem um intervalo de temperatura de absorção e liberação de calor por volta de 20-49°C. (NELSON, 2001). No entanto, a maior parte deles são corrosivos para a maioria dos metais, e se submetidos a uma super-refrigeração, sofrem uma decomposição da fase. Os PCM inorgânicos possuem algumas vantagem em relação aos orgânicos, como elevadas entalpias de transição, não são inflamáveis, são mais baratos e de fácil acessibilidade. No entanto, são mais suscetíveis à decomposição, são corrosivos e podem apresentar sub-arrefecimento, o que afeta as suas propriedades de transição (DA SILVA, 2009).

Outra desvantagem em relação aos sais hidratados é que sua alta densidade de armazenamento é difícil de manter e geralmente diminui com os ciclos. Isto é devido a maioria dos sais hidratados derreter de forma congruente com a formação do sal inferior hidratado, tornando o processo irreversível e levando ao declínio contínuo na sua eficiência de armazenamento. (FARID et al., 2004).

Os materiais orgânicos de mudança de fase são, em geral, quimicamente estáveis, não sofrem de sobreaquecimento, não são corrosivos, não são tóxicos e têm um elevado calor latente de fusão (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Os PCMs orgânicos podem ser subdivididos em dois grupos: parafinas e não-parafinas, destacando-se as ceras parafínicas, referidas também como misturas parafínicas e alcanos. (BAYES-GARCIA et al., 2010).

As ceras de parafina comerciais, ou  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$ , são pouco dispendiosos e possuem uma densidade de armazenamento térmico razoável de 120kJ/kg até 210 kJ/kg. (SÁNCHEZ et al., 2008). Estes materiais estão disponíveis em uma larga gama de temperaturas de fusão (cerca de 20°C até cerca de 70°C), e são quimicamente inertes. Além disso, têm uma baixa pressão de vapor na massa fundida e não sofrem separação de fases. (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010).

As parafinas são constituídas por cadeias lineares de carbono e hidrogênio, e isso influencia suas temperaturas de fusão, que variam em função do número de átomos de carbono que os constituem. De acordo com Mirante (2007), o ponto de fusão aumenta com o comprimento da cadeia, tal como o calor latente. As parafinas puras, contém geralmente entre 14 e 40 átomos de carbono, enquanto que as ceras parafínicas contém geralmente entre 8 e 15 átomos de carbono. (DA SILVA, 2009).

As ceras de parafina comerciais são baratas e possuem uma vasta gama de temperaturas de fusão. Elas passam por sub-resfriamento insignificante e são quimicamente inertes e estáveis sem separação de fase. No entanto, segundo Farid et al. (2004), ceras de parafina puras possuem alto custo, e, por conseguinte, apenas parafinas de grau técnico acabam sendo utilizadas. As ceras de parafina comerciais mais estudadas são aquelas que derretem em torno de 55°C.

Um grande espectro de PCMs parafínicos estão disponíveis com grande diferença na capacidade de armazenamento térmico e temperatura da mudança de fase. Alguns deles e suas propriedades podem ser comparados na tabela 2. Segundo Nejman e Goetzendorf-Grabowsk (2013), as parafinas mais usadas para prover o conforto térmico são aquelas com temperatura de transição dentro da

corporal humana (18-37°C), como n-Octadecano, n-Hexadecano, n-Nonadecano, n-Eicosano. Embora existam vários tipos de parafina, o eicosano é o mais escolhido quando se fala em conforto térmico humano, porque sua temperatura de mudança de fase é muito próxima da temperatura do corpo. (ERKAN, 2004).

**Tabela 2 – Propriedades térmicas dos materiais de mudança de fase parafínicos**

PCM	Nº de átomos de carbono	Temperatura de mudança de fase (°C)	Temperatura de cristalização (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
Eicosano	20	36.1	30.6	247
Nonadecano	19	32.1	26.4	222
Octadecano	18	28.2	25.4	244
Heptadecano	17	22.5	21.5	213
Hexadecano	16	18.5	16.2	237

**Fonte: Adaptado de Mäkinen (2006) e Da Silva (2009).**

Há grande possibilidade das parafinas serem utilizadas em fibras térmicas reguladoras, tecidos, espuma, insulação ou materiais de construção. (ALKAN; SARI; KARAIPEKLI, 2011). Segundo Nelson (2001), as principais propriedades requeridas de uma parafina para ser usada nesses produtos como termorregulador são: grande calor de fusão; pequenas diferenças de temperatura entre o ponto de fusão e o ponto de solidificação; não prejudicial ao meio ambiente; baixa toxicidade; não inflamável; estabilidade para a repetição de derretimento e solidificação; grade condutividade térmica, para efetiva transferência de calor; facilidade de disponibilidade; e baixo custo.

### **2.3.2 Materiais de Mudança de Fase como termorreguladores**

Estudos de sistemas de mudança de fase têm investigado sistemas e otimização de processos, comportamento transitório e desempenho em campo, para serem aplicados como materiais termorreguladores. (AGYENIM et al., 2010). Um material termorregulador é um material inteligente que possui a propriedade de oferecer uma resposta adequada à mudanças na temperatura externa e ao estímulo do ambiente. Sánchez et al. (2010) alegam que o nível de conforto térmico depende

da troca térmica entre o corpo humano e o ambiente que o cerca, e que esse efeito pode ser obtido com a incorporação de PCMs.

Segundo Bayes-Garcia et al. (2010), os materiais que mudam de fase podem ser utilizados a fim de aumentar o conforto térmico de edifícios e até roupas (usos de tecidos), sem afetar grandemente a sua massa real. Pause (2002) salienta que os têxteis contendo PCM podem ser usados em veículos automotivos para aumentar o conforto térmico, como têxteis contendo PCM para os tapetes e estofamentos. Pause (1999) declara que os tecidos tratados com PCMs mostram potencial para aplicações médicas, como roupas cirúrgicas, materiais de cama e materiais usados nos cuidados intensivos.

A indústria têxtil utilizou os PCMs no início de 1980 nos EUA pela NASA (*Nation Aeronautics and Space Administration*), com o objetivo de gerir as propriedades de barreira térmica de trajes espaciais. De acordo com Sánchez et al. (2008), as aplicações comerciais dos PCMs na indústria têxtil continua a crescer em tecidos com novas propriedades e de valor agregado como, por exemplo, têxteis médicos e têxteis técnicos.

Os desenvolvedores e produtores de materiais de mudança de fase em têxteis afirmam que roupas feitas desses são roupas de “isolamento dinâmico”, ou seja, que estas manterão uma pessoa aquecida mais do que os isolamentos convencionais quando usado em ambientes frios. Mccullough e Shim (2006) afirmam que o uso de roupas com PCMs ao ar livre diminui a espessura e o peso do vestuário exigido por regular a temperatura interna.

Mas os PCMs também são úteis em situações de calor. As empresas que produzem roupas com PCMs afirmam que essas melhoram o conforto das pessoas que passam por mudanças na atividade e produção de calor metabólico. Eles estão assumindo que as roupas PCM irão absorver um pouco do calor corporal extra produzido durante o exercício, mudando para o estado líquido, e produzir um efeito de resfriamento temporário. Quando a pessoa se torna inativa, o PCMs irão se solidificar novamente e liberar calor. Isso tem sido chamado de "efeito regulador térmico" de PCMs. (MCCULLOUGH; SHIM, 2006).

Assim, os tecidos contendo materiais de mudança de fase reagem imediatamente com mudanças na temperatura ambiente, e as temperaturas em diferentes áreas do corpo (RUPP, 1999) e são chamados de tecidos inteligentes, por serem bastante diferentes da maioria dos tecidos sem PCM (referidas como tecidos

não-PCM), tais como poliéster, nylon, quando comparados às propriedades térmicas. (YING et al, 2004).

As propriedades térmicas de tecidos PCM são dinâmicas e ativamente sensíveis, ou seja, as suas propriedades térmicas estão relacionadas com alterações de temperatura e tempo. Por exemplo, quando a temperatura do ambiente atinge o ponto de fusão PCM, o estado físico do PCM em que o tecido vai mudar do estado sólido para líquido, juntamente com a absorção de calor, enquanto que a temperatura dos tecidos PCM permanece constante no ponto de fusão, de modo que ajusta a sua temperatura automaticamente. O processo inverso ocorre quando a mudança de fase é a partir do líquido para o estado sólido durante o processo de arrefecimento. Para tecidos não-PCM, suas propriedades térmicas são quase estáticas e passivamente receptivas.

Para Bajaj (2001), um tecido de roupa ideal, em termos de conforto térmico, deve ter os seguintes atributos: alta resistência térmica para proteção contra o frio, baixa resistência ao vapor de água, e características de rápido transporte líquido para transferência de calor de forma eficiente, eliminando sensações táteis desagradáveis devido à transpiração em condições de alto estresse térmico. Salaün et al. (2010), declaram que para as aplicações de vestuário e produtos de decoração, o PCMs devem mudar suas fases dentro de uma faixa de temperatura para fazer o ser humano se sentir confortável (18°C a 35°C). Deste modo, segundo Zhang e Wang (2009), podem ser utilizados como proteção para todas as estações climáticas.

Segundo Nelson (2001), os materiais de mudança de fase interagem com o microclima ao redor do corpo humano, respondendo a flutuações na temperatura que são causadas por mudanças nos níveis de atividade e no ambiente externo. Mäkinen (2006) sugere que o excesso de calor que uma pessoa produz pode ser armazenado em algum lugar do sistema de roupas e, em seguida, de acordo com a exigência, ativado novamente quando ele começa a ficar frio. Assim, segundo Salaün et al, (2010), os PCMs devem reagir às mudanças de temperatura, tanto do corpo quanto da camada exterior da peça de vestuário.

Mäkinen (2006) destaca algumas vantagens de uma vestimenta com PCM, como a produção de um efeito de "resfriamento", absorvendo o calor do corpo excedente, e a geração de um efeito de isolamento, causada pela emissão de calor do PCM, criando uma barreira térmica que reduz o fluxo de calor do corpo para o

ambiente e evitando a perda de calor do corpo indesejada. Por fim, gera um efeito termorregulador, resultante de qualquer absorção de calor ou de emissão de calor do PCM em resposta a qualquer variação de temperatura no microclima, o efeito de regulação térmica mantém a temperatura aproximadamente constante microclima.

Os efeitos de magnitude e duração do aquecimento e arrefecimento em PCM nos sistemas de vestuário são dependentes de vários fatores. Cada uma destas variáveis deve ser considerado em relação com o tipo de transiente de temperatura previsto durante o uso (isto é, temperatura do ambiente e/ou das mudanças de temperatura da pele). Segundo Mccullough e Shim (2006), algumas dessas variáveis incluem: as temperaturas de transição (ou seja, de fusão / pontos de congelamento) dos PCMs incorporadas cada camada vestuário; o efeito da mistura de PCM com diferentes temperaturas de transição de uma camada de vestuário; a quantidade e a pureza do PCMs; o número de camadas de vestuário em um conjunto de roupas; a ordem de colocação de PCM e não-PCM nas camadas de vestuário; e a quantidade de área de superfície corporal coberta por roupas com PCMs.

No entanto, mesmo com os benefícios, há algumas questões quanto à aplicação dos PCMs nos objetos. Um dos critérios mais importantes que têm limitado o uso generalizado é a vida útil dos sistemas de PCMs, ou seja, o sistema de armazenamento e o número de ciclos que podem suportar, sem qualquer degradação em suas propriedades. De acordo com Farid et al. (2004), a estabilidade insuficiente a longo prazo dos materiais de armazenamento é devido a dois fatores: à baixa estabilidade das propriedades e/ou à corrosão de materiais entre o PCM e seu sistema de armazenamento. Assim, de acordo com Zhang, Wang e Wu (2015) e Dao e Jeong (2015), um problema a resolver é a migração do líquido, assim, é importante estudar o tipos de “embalagem” para o PCM. Segundo Bayes-Garcia et al. (2010), o principal sistema de armazenamento e proteção dos PCMs são as microcápsulas, que consistem em “recipientes” pequenos, que guardam o PCM no seu núcleo, protegendo-o por uma casca.

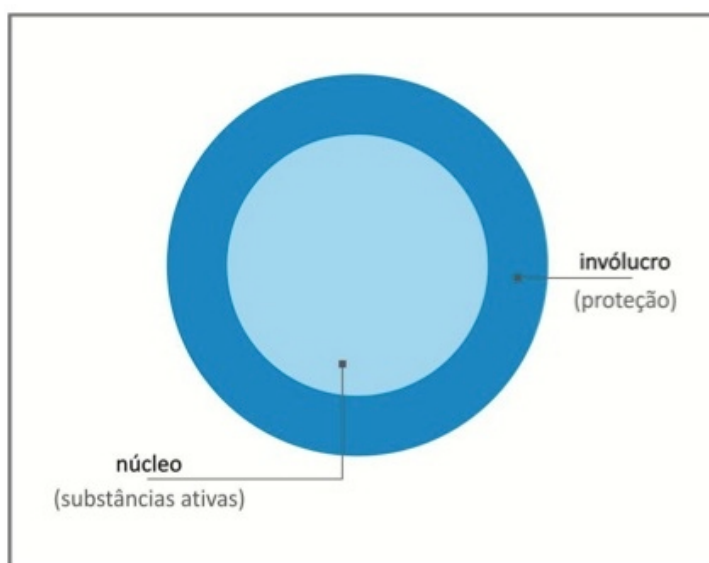


## 2.4 MICROCÁPSULAS

Segundo Gil et al. (2014), o microencapsulamento é um processo que consiste em envolver pequenas partículas ou gotículas de um líquido ou sólido, denominado núcleo, por uma camada ou parede de um material sólido, denominada cápsula. A microencapsulação forma um pó, que é então adicionado a outro material, conferindo-lhe novas propriedades (KUZNIK et al, 2011). Esta tecnologia é aplicada a variados ramos industriais, como a indústria farmacêutica, química, agrícola, alimentar, cosmética, têxtil. (YOU et al, 2008). Assim, como afirma Nelson (2001), a microencapsulação de líquidos e sólidos é uma tecnologia que pode prover a materiais novas propriedades e valor agregado.

As microcápsulas são definidas como partículas minúsculas, onde há um os material nucleado cercado por um revestimento, chamado de casca. O núcleo é a parte intrínseca e contém o ingrediente ativo, enquanto o invólucro é a parte extrínseca, e protege o núcleo permanente ou temporariamente da atmosfera externa (ROSSI, 2012), como é demonstrado no esquema da figura 12. Elas normalmente possuem forma esférica, com diâmetros na gama de 1-1000 $\mu$ m (SALAÜN; VROMAN; ELMAJID, 2012, YOU et al., 2008), mas com uma distribuição situada preferencialmente, entre 1 e 60 $\mu$ m. (DA SILVA, 2009).

**Figura 12 – Esquema da estrutura de uma microcápsula**



Fonte: Rossi (2012).

As microcápsulas podem ser classificadas em dois tipos: quanto ao material da casca e quanto ao material ativo (presente em seu núcleo). Ainda, o são divididas de acordo com o material que envolve a casca, que pode ser polimérico, cerâmico ou de gelatina. Segundo Rossi (2012), as propriedades mecânicas e físico-químicas são determinadas pelo material da casca, além das suas características serem decisivas para as aplicações dessas microcápsulas.

A literatura tem relatado a relação entre as morfologias da casca, sua resistência e permeabilidade (SU et al., 2007), podendo a casca também ser divididas quanto à essa característica, em porosa e não porosa. Aquelas que são porosas normalmente liberam o material do núcleo aos poucos; as não porosas servem como proteção, que ainda podem ser permanentes ou temporárias. As microcápsulas temporárias também liberam o núcleo aos poucos, quando ela é rompida. Já as permanentes devem proteger o núcleo por tanto tempo quanto possível. Para microencapsular PCMs, é preferível a casca não porosa permanente, para que seu conteúdo quando no estado líquido, não seja desperdiçado ou jogado fora. (KUZNIK et al, 2011).

O confinamento de material PCM por microencapsulação facilita a sua incorporação em uma ampla variedade de aplicações, como em fibras, tecidos, revestimentos, equipamentos de fisioterapia, painéis de isolamento, e paredes (SÁNCHEZ et al., 2008). Há muitas vantagens do PCM microencapsulado, tal como o aumento da área de transferência de calor, reduzindo a reatividade em relação ao ambiente externo; o controle as alterações no volume do material de armazenamento como ocorre a mudança de fase (FARID et al, 2004; BAYES-GARCIA et al., 2010, NEJMAN; GOETZENDORF-GRABOWSK, 2013, ZHANG; WANG; WU, 2015), a proteção o PCM contra as influências do meio ambiente exterior; a resistência à variações de volume do PCM quando a mudança de fase ocorre; e permite um sistema pequeno de armazenamento de energia. (ALKAN; SARI; KARAIPEKLI, 2011).

#### **2.4.1 Processos de microencapsulação**

Um grande número de processos de microencapsulação foram desenvolvidos para reter estas substâncias e a escolha do invólucro está relacionado com as propriedades físicas e químicas do núcleo, material de revestimento, e as

características finais cápsulas. O material de revestimento ou o revestimento deve ser capaz de formar uma película que é coesiva, com o material do núcleo ser quimicamente compatíveis e não reativos com o material do núcleo e proporcionar as propriedades de revestimento desejadas, tais como a resistência, a flexibilidade, a impermeabilidade, propriedades ópticas, e estabilidade. (ESCOBAR et al., 2011).

Segundo Da Silva (2009), “os métodos de microencapsulamento são basicamente divididos em processos químicos, físico-químicos ou mecânicos”, como no esquema da figura 13. Um dos métodos mais típicos para microencapsular PCM é a dispersão de gotas de PCM numa solução aquosa (dispersão de óleo-em-água) com a formação de paredes na volta dessas gotículas que ficam em suspensão. Esse método usa técnicas como a coacervação e a polimerização *in-situ*. A cápsula nessas técnicas, pode ser fabricada em diversos materiais, sendo os mais usados a poliureia, o poliuretano, o polimetilmetacrilato, o polivinil acetato, o poliestireno ou resinas de ureia-formaldeído, melamina-formaldeído ou gelatina-formaldeído. (DA SILVA, 2009).

**Figura 13 – Processos possíveis de microencapsulação**



**Fonte: Adaptado de Da Silva (2009).**

Dos processos físico-químicos, a técnica mais utilizada é a microencapsulação por coacervação, que inclui três etapas principais: (1) fase da solução de polímero de revestimento, (2) adsorção da coacervação em torno das partículas de núcleo e (3) solidificação das microcápsulas. (SU et al., 2007). A polimerização *in situ* geralmente envolve dois líquidos imiscíveis como, por exemplo,

água e solvente orgânico, de atuação direta, e líquidos intermediários orgânicos complementares, que irão reagir com cada um para estabelecer um pré-condensado sólido. (SARIER; ONDER, 2007).

Dos processos físicos mecânicos, a técnica que se destaca é o *spray dry* (também conhecida como atomização). Para Marcuzzo (2012), esta é uma operação unitária na qual um líquido contendo o material ativo (a ser encapsulado) é atomizado em uma corrente de ar para instantaneamente obter-se um sólido em pó. Geralmente o gás usado é o próprio ar ou raramente um gás inerte como o nitrogênio. O líquido com o material ativo que alimenta o atomizador pode ser uma solução, emulsão ou uma suspensão. A técnica da atomização, dependendo do material alimentador e das condições de operação, produz um pó fino com granulometria entre 10-50 $\mu$ m ou mais grosso, com partículas entre 2-3mm. (HAWLADER; UDDINA; KHIN, 2003).

Dentro dos métodos químicos, o mais conhecido é a polimerização interfacial. Este processo dá-se nas interfaces dos materiais resultando em microcápsulas. Segundo Kage et al. (2002), basicamente as técnicas que envolvem a polimerização interfacial lidam com dois líquidos imiscíveis. Os monômeros ou reagentes, responsáveis pela formação do invólucro, estão mutuamente presentes nos dois líquidos imiscíveis, ou seja, são fornecidos tanto pelo meio externo ao núcleo quanto pelo material de núcleo. Eles devem se difundir na interface entre os líquidos para que possam reagir e formar uma membrana que recobre a superfície do núcleo. Uma vez iniciada a reação, o invólucro formado forma uma barreira para a difusão e começa a limitar a velocidade da polimerização. (MARCUIZZO, 2012).

Um dos processos de microencapsulação mais conhecidos é a polimerização *in situ*. Neste processo, um óleo é emulsionado em água usando polímeros solúveis e agitadores de elevada rotação que originam uma emulsão estável contendo gotículas de óleo do tamanho desejado. Uma resina é adicionada à emulsão. Devido ao pH ácido da emulsão é iniciado o processo de polimerização o qual conduz à reticulação da resina que polimeriza na interface das gotículas de óleo e a fase aquosa, e à medida que vai reticulando conduz à formação da parede polimérica em redor das gotículas de óleo. (DA SILVA, 2009).

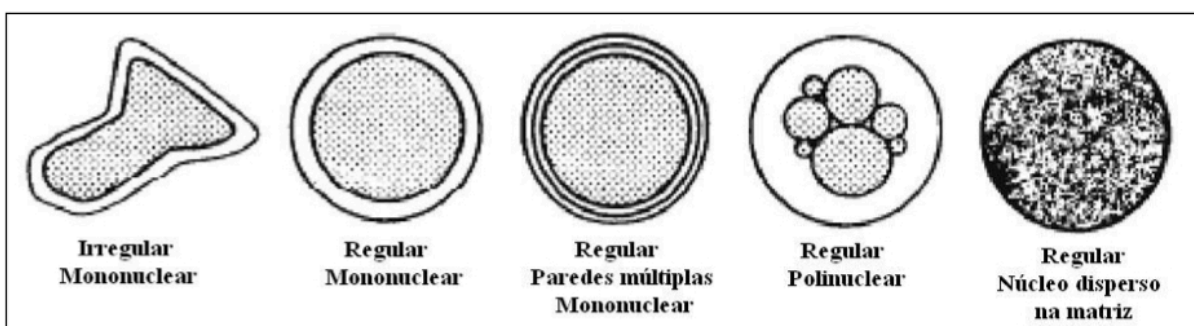
De acordo com Sarier e Onder (2007), os processos *in situ* tem a capacidade de produzir microcápsulas com a melhor qualidade em termos de difusão, de resistência da parede da casca, e de um tamanho que varia entre 5 e 100 $\mu$ m. Os

materiais mais adequados para casca são, segundo Nejman et al. (2014), os poliméricos. Os polímeros adequados são a poliamida, poliéster, poliuretano, poliureia, ou como substâncias, pode ser formado a partir de intermediários de resina ou monómeros. (SARIER; ONDER, 2007).

Os principais materiais de revestimento para o encapsulamento de PCMs são melamina-formaldeído (MF), resinas de ureia-formaldeído (UF) e poliuretano (PU). (ALKAN; SARI; KARAIPEKLI, 2011). A razão para a escolha de resina de melamina-formaldeído como o componente do invólucro das microcápsulas é devido à sua elevada reatividade e utilização eficiente do polímero nos invólucros das microcápsulas. Além disso, estudos relataram as várias propriedades destas microcápsulas, incluindo boa resistência mecânica, bem como a estrutura química estável. (ZHANG; WANG, 2009).

Dependendo do processo e dos seus reagentes, as microcápsulas podem apresentar formas diferentes, sendo elas regulares ou irregulares. Ainda conforme sua morfologia, podem ser classificadas como mononucleares, polinucleares e dispersas na matriz. As morfologias mais elementares de microcápsulas estão representadas na figura 14. Segundo Marcuzzo (2012), as microcápsulas mononucleares contêm o invólucro ao redor do núcleo, enquanto as cápsulas polinucleares possuem vários núcleos dentro do invólucro. Podem ocorrer ainda microcápsulas mononucleares com múltiplos invólucros.

**Figura 14 – Morfologia básica das microcápsulas**



**Fonte: Marcuzzo (2012).**

Assim, o tipo e a morfologia das microcápsulas formadas está atrelado à natureza do processo, já que depende da deposição do material da casca na superfície de partículas do núcleo. Alguns estudos que obtiveram microcápsulas

pelo processo de microencapsulação interfacial e coacervação serão discutidos na próxima secção, 2.4.2.

#### 2.4.2 Obtenção de microcápsulas de PCMs

Uma das pesquisas acompanhadas foi a realizada por Escobar et al. (2011) no LdSM<sup>6</sup>. Foram obtidas microcápsulas de óleos essenciais com o processo de microencapsulamento de polimerização interfacial. Esse processo foi produzido em uma emulsão de óleo-em-água. Nesta técnica, dois monómeros são dissolvidos na emulsão contendo o material do núcleo, e os processos de polimerização ocorrem na interface óleo-água.

Como material de casca foi utilizada a resina melamina-formaldeído. Essa resina tem vantagens, como alta resposta aos monômeros, curto tempo de reação e espessuras finais da casca de fácil controle. O processo experimental ocorreu em duas etapas. O primeiro passo consiste na estabilização da emulsão por utilização de agente tenso-ativo e o segundo passo é a microencapsulação por polimerização *in situ*.

Foram obtidas cápsulas (micro e nano) sintetizadas com diferentes surfactantes, com variações consideráveis no diâmetro, provando a importância do conhecimento sobre as características do surfactante para este tipo de aplicação. As microcápsulas preparadas com o surfactante Tween 80 tiveram os melhores resultados no que diz respeito ao diminuto tamanho das partículas (385 nm). As alterações na distribuição de tamanho das microcápsulas obtidas com diferentes surfactantes pode ser relacionada com a estrutura química do surfactante. O surfactante Tween 80 tem a parte apolar de cadeia muito longa em comparação com outros agentes tenso-ativos, o que faz a emulsão mais estável porque o segmento lipofílico<sup>7</sup> cobre melhor a gotícula de óleo essencial.

Outra pesquisa que visou estudar a variação de tamanho no processo de microencapsulamento foi a de Hawlader, Uddina e Khin (2003). Eles realizaram um estudo sobre a obtenção de microcápsulas de parafina com o processo de coacervação e com o processo de *spray dry*, comparando os resultados desses dois

---

<sup>6</sup> Laboratório de Design e Seleção de Materiais, localizado na Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>7</sup> A substância lipofílica é aquela que tem afinidade e é solúvel em lipídios.

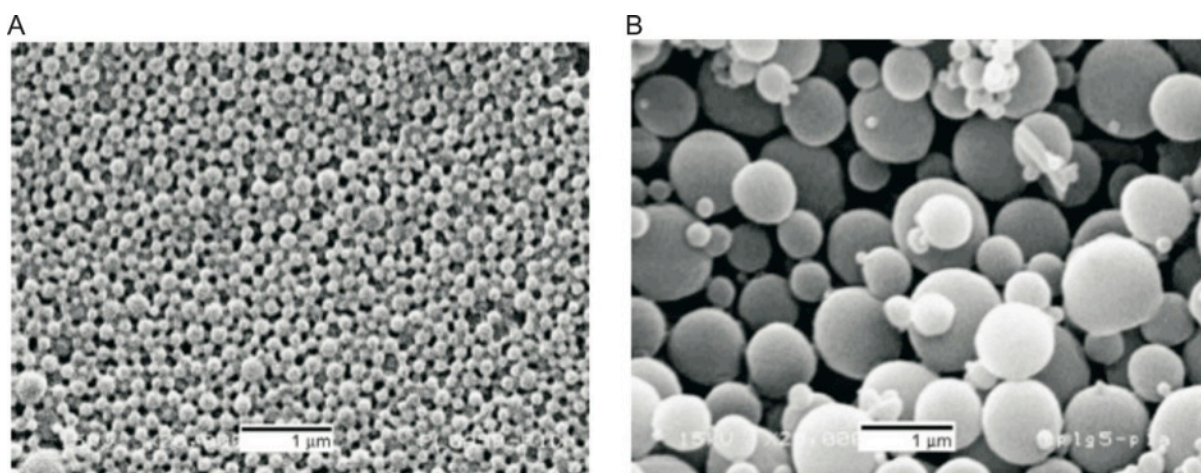
processos. O material da casca foi gelatina e o núcleo foi parafina com ponto de fusão entre 60 e 62°C.

No processo de coacervação, duas soluções foram feitas e depois misturadas. Gerou-se uma primeira solução com água destilada e o material da casca. Em outro recipiente, a parafina foi derretida e depois adicionada na solução da gelatina, juntamente com um homogeneizador (tween 80). Esse processo de homogeneização foi realizado adicionando o reagente gota a gota, a uma rotação de 10.000 RPM e a temperatura foi mantida a 65°C. Após, a temperatura foi reduzida a temperatura do ambiente, e como resultado, as partículas se separaram em duas fases: uma delas contém das partes coacervadas. O último passo foi endurecer as microcápsulas, adicionando formaldeído. Essa última etapa levou 16h. Quando pronto, a solução foi filtrada e o precipitado foi encharcado com etanol absoluto. Essa solução foi filtrada novamente e secada em um forno com vácuo.

No processo de *spray dry*, uma emulsão da parafina e uma dos materiais da casca também são obtidas de forma similar ao processo de coacervação. Essas soluções foram adicionadas uma a outra com o spray usando um Mini-spray Fryer Buchi 191. As emulsões foram atomizadas com uma taxa de 20 ml/min por uma centrífuga operando a 25.000 RPM. A temperatura inicial foi de 130°C e a de mistura de 80°C. As microcápsulas foram retiradas do equipamento e armazenadas em um recipiente de polietileno.

Para análise das micropartículas geradas pelos processos, foram realizadas imagens em um MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), e foi visto que ambos os processos geram microcápsulas de forma esférica com uma distribuição de tamanho uniforme. No entanto, as microcápsulas realizadas com o processo de spray (figura 15A) ficaram menores do que as obtidas pelo processo de coacervação (figura 15B).

**Figura 15 – Microcápsulas obtidas no estudo de Hawlader, Uddina e Khin (2003)**



**Fonte: Hawlader, Uddina e Khin (2003).**

**Notas: (A) Processo de *dry spray*; (B) Processo de coacervação.**

Há vantagens e desvantagens em ambos os processos, enquanto o processo de spray gera microcápsulas menores, é necessário ter o equipamento específico para que possam ser obtidas. Já no processo de coacervação, as microcápsulas são maiores, mas é possível realiza-las com equipamentos mais simples. No entanto, o tempo também é considerado, sendo que o processo de coacervação por eles descrito demora mais de um dia para a obtenção. A eficiência da microencapsulação depende dos parâmetros do processo, tais como a proporção de núcleo para revestimento, o tempo de adição dos emulsionantes e da quantidade de agente de homogeneização. Também, com esse estudo chega-se a conclusão que a eficiência de encapsulação aumenta à medida que o tempo de homogeneização aumenta. No entanto, quando o tempo de homogeneização vai até um valor crítico, 10 min; depois disso a eficiência de encapsulação diminui.

Bayes-Garcia et al. (2010) também realizaram um estudo utilizando gelatina como material de casca. Além da gelatina, também utilizaram como material de casca a goma arábica e o ágar-ágar. Foram feitos vários esforços para obter microcápsulas, variando os procedimentos (usando temperaturas mais baixas, a trabalhar com componentes diluído em vez de pó, etc.) visando a otimização do processo. Neste sentido, observou-se que o principal processo de agitação, um banho de ultra-som, tornou o tamanho microcápsulas mais uniforme e a distribuição das microcápsulas mais estreita, do que se a agitação fosse realizada mecanicamente. No entanto, um resultado negativo bastante significativo foi encontrado: depois de cerca de um mês de armazenagem à temperatura ambiente,

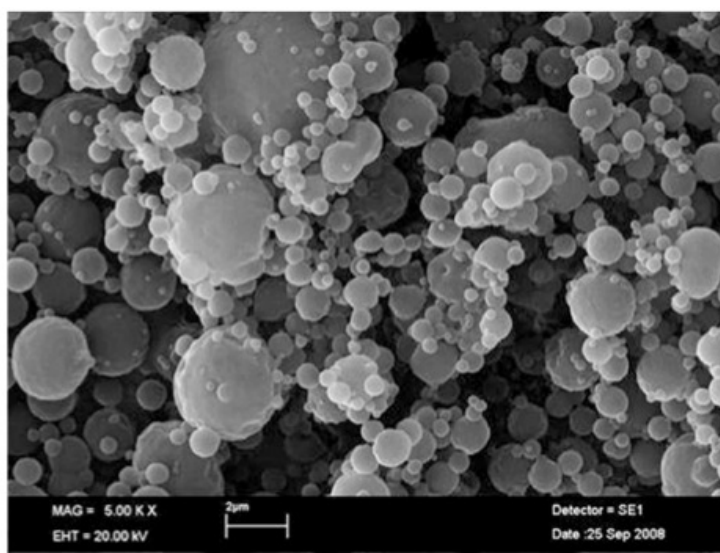


os pesquisadores observaram um crescimento de microrganismos na amostra com casca de gelatina. Este fato pode ser devido à composição do pó de gelatina. Obviamente, este crescimento microbiano se tornaria um grande inconveniente, devido à aplicação final de microcápsulas.

Alkan, Sari e Karaipekli (2011), assim como Hawlader, Uddina e Khin (2003), realizaram um estudo de obtenção de microcápsulas de parafina por polimerização *in situ*, mas utilizaram eicosano e com um processo similar ao de Escobar et al (2011). Nesta técnica, a reação de formação de polímero tem lugar em água contendo surfactante, monómeros, e um iniciador solúvel em água. Este método de polimerização oferece características desejáveis, tais como a dissipação de calor imediato, menos dependência de solventes orgânicos voláteis, e baixa viscosidade mesmo em pesos moleculares elevados.

Segundo os autores, as microcápsulas contendo eicosano foram preparadas com sucesso, com o diâmetro médio de 0.7  $\mu\text{m}$ , e distribuição com um intervalo entre 0.4 and 2.3  $\mu\text{m}$  e com uma superfície lisa. Ao analisar as imagens de MEV (figura 16), pode-se notar que há uma grande variação no tamanho das microcápsulas.

**Figura 16 – Microcápsulas de eicosano do estudo de Alkan, Sari e Karaipekli**



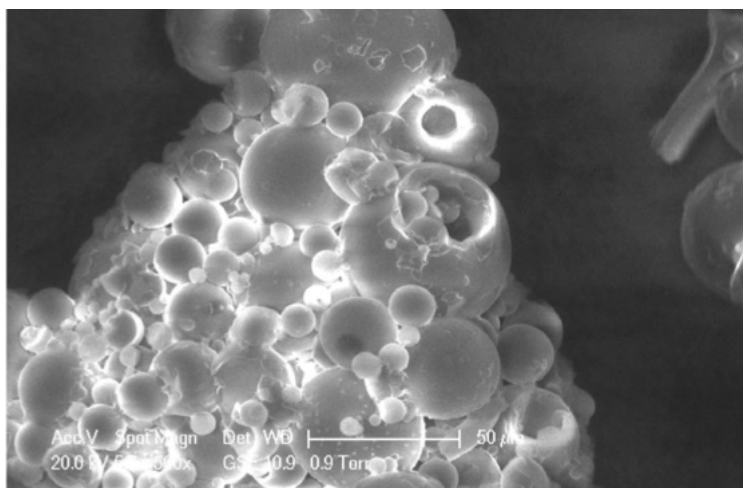
**Fonte: Alkan, Sari e Karaipekli (2011).**

Eles chegaram também a conclusão que a capacidade de energia de liberação depende da proporção do núcleo para revestimento, já que uma casca muito espessa não proporciona uma boa interação do núcleo com o ambiente. No

entanto, uma quantidade mínima de material de revestimento tende a resultar no revestimento incompleto do material do núcleo. Neste estudo, foi utilizada uma proporção de núcleo – casca de 1:2 e 1:1, a segunda, com proporção igual não proporcionou resultados satisfatórios, não formando as microcápsulas.

No estudo experimental de Sánchez et al. (2008) foi pesquisado uma forma de obter microcápsulas de parafina de tamanhos uniformes, por meio de uma membrana micro-porosa. Foi utilizado o processo de polimerização *in situ* e para a casca, uma membrana porosa comercial tipo tubular Shirasu, tamanhos de poros de 5,5 µm. Para a síntese das microcápsulas, foi utilizado um béquer jaquetado para as reações de polimerização, equipado com controle digital de frequência e temperatura, um condensador de refluxo, e um tubo de entrada de gás nitrogênio sob agitação. Esse processo de síntese envolveu duas fases: uma fase contínua, que continha água e polivinilpirrolidona, e uma fase descocontínua, contendo estireno, cera de parafina, e peróxido de benzoíla. Pelas imagens dos MEVs (figura 17), pode-se visualizar que as microcápsulas obtidas são esféricas, com superfícies lisas, no entanto, seu tamanho é bastante variado. Outro porém deste estudo é o material da casca: a membrana comercial utilizada possui custo bastante alto.

**Figura 17 – Microcápsulas obtidas no estudo de Sánchez et al. (2008)**



**Fonte: Sánchez et al. (2008).**

Mohaddes et al. (2014) também obtiveram microcápsulas de eicosano através de uma emulsão ultra-homogeneizada com eicosano concentrado para tentar aumentar a quantidade de troca de calor. O que concluíram é que apenas uma

grande quantidade de eicosano não é suficiente, mas também influenciam a temperatura do processo, a taxa de homogeneização e o material da casca.

Zhang, Wang e Wu (2015) obtiveram uma microcápsula com dupla função utilizando eicosano como núcleo, e assim, com características termorreguladoras, e com  $ZrO_2$  na sua casca, provendo características de fotoluminescência. Assim como Jiang, Wang e Wu (2014), que conseguiram obter microcápsulas com núcleo de eicosano e casca com  $Fe_3O_4/SiO_2$ , que provê características magnéticas às microcápsulas.

Pode-se ver através da análise dessas pesquisas que há várias maneiras de obter microcápsulas, sendo de parafina ou outros materiais de núcleo. Todos os autores concordam que o tamanho das partículas é importante, além da formação da casca, e que esses fatores podem ser controlados através dos processos. No entanto, existem processos mais automatizados, que demoram menos tempo mas normalmente, devido ao equipamento, possuem custo alto. Vale a pena observar que, como mostrado no estudo de Escobar et al. (2011), é possível gerar microcápsulas com tamanhos uniformes com um processo mais simples, apenas controlando as variáveis do processo, como a escolha certa do surfactante.

É importante salientar que a capacidade térmica (calor latente), das microcápsulas de PCM não depende apenas do tamanho de partícula, mas também da quantidade específica dessas nos materiais em que são aplicadas. Quanto mais elevado o conteúdo de microcápsulas com PCMs em um material, maior será a quantidade de energia térmica armazenada. (SÁNCHEZ et al., 2008). Assim, as microcápsulas contendo PCMs podem ser usadas para modificar a capacidade dessa energia dos materiais, assegurando uma ampliação nas propriedades físico-químicas. (BORREGUERO et al., 2010).

### **2.4.3 Aplicação microcápsulas em tecidos**

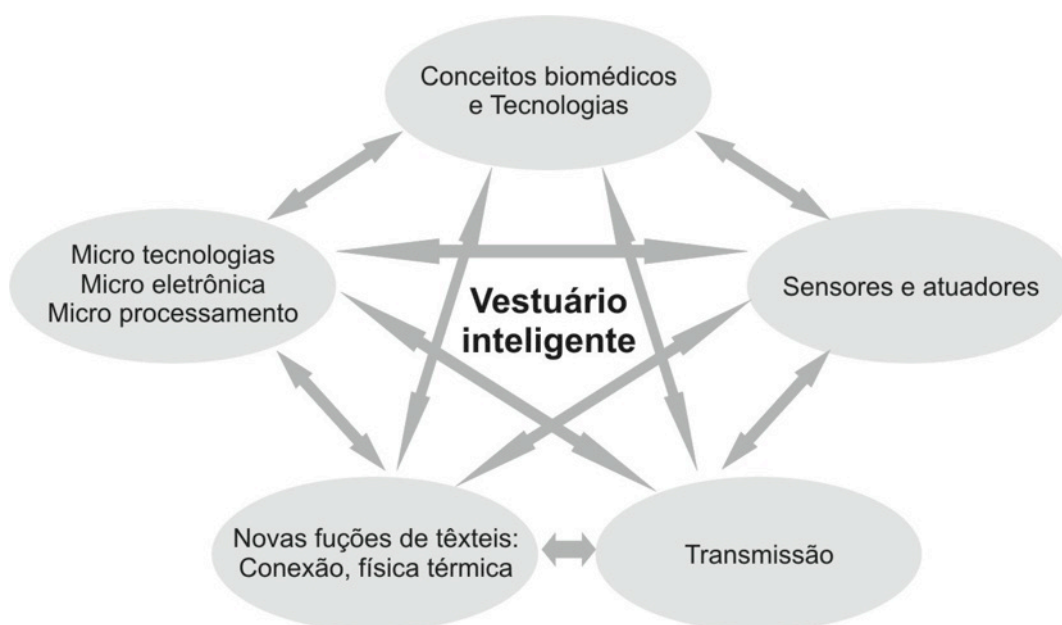
Os materiais que mudam de fase têm sido amplamente estudados desde o final dos anos 1970, e também têm sido vastamente utilizados para fibras e tecidos, sistemas de armazenamento de calor solar e nuclear, edificações etc. (YOU et al., 2008). Para evitar qualquer difusão destes PCMs líquidos no material, estes compostos necessitam ser contidos em uma cápsula (SALAÜNA et al, 2010). Como dito anteriormente, a tecnologia para incorporar microcápsulas de PCM em

estruturas têxteis foi desenvolvido no início dos anos 80 no programa de pesquisa da NASA. (NELSON, 2001).

Atualmente, para vestuário e produtos de decoração, as microcápsulas de PCMs foram incorporadas em fibras acrílicas e espumas de poliuretano. (PAUSE, 2002, ZHANG; WANG, 2009). Segundo afirmam Salaüna et al. (2010), nos últimos anos os materiais de mudança de fase têm sido usados para manufaturar tecidos termorreguladores para melhorar o conforto térmico de usuários. Hoje em dia, fibras contendo PCM e tecidos ou espumas revestidas com camadas de microcápsulas de PCM são utilizadas em diversas aplicações têxteis, como lista Da Silva (2002), como vestuário (fatos de ski, luvas, meias, camisolas) calçado, equipamento de proteção, têxteis médicos, entre outras.

A partir daí surge o conceito de “produtos inteligentes”. Sendo o vestuário um produto, essas roupas têm suas características ampliadas, seja pela adição de microtecnologias, sensores ou por um novo projeto ou conceito, como exemplificado no esquema da figura 18. Assim, têxteis contendo microtecnologias fazem parte dessa nova categoria de produtos.

**Figura 18 – Fatores envolvidos na obtenção de vestuário inteligente**



**Fonte: Adaptado de Dittmar et al. (2005).**

Para Nelson (2002), as microcápsulas aplicadas em tecidos variam desde acabamentos com fragrâncias, policrômicos e termocrômicos até retardantes de

fogo. No entanto, não apenas o núcleo da microcápsula muda, mas também o tipo de casca. Por exemplo, produtos cosméticos e fármacos, possuem um meio de liberação controlada das substâncias de núcleo. Da Silva (2009) afirma que, no caso dos PCM, pretende-se que este material se mantenha no interior da microcápsula em condições normais de manuseamento e que apenas interaja indiretamente com o ambiente envolvente. Assim, sua casca deve ser resistente para que o material não seja liberado no material, perdendo sua eficiência.

Segundo Cruz et al. (2011), no caso particular da utilização de acabamentos termorreguladores, assume-se como objetivo a necessidade de proporcionar maior conforto ao utilizador a partir da utilização de materiais que possam armazenar ou libertar calor em função das necessidades de aquecimento ou arrefecimento. Sánchez et al. (2008) afirmam que têxteis contendo PCMs ajudam para neutralizar o frio e o superaquecimento que, como visto anteriormente, é o efeito descrito como a termorregulação. Erkan (2004) observa que os novos materiais de isolamento têxteis tornaram-se importantes ao passo que regulam a temperatura de acordo com o ambiente e a temperatura do corpo.

Portanto, a funcionalidade do tecido termorregulador depende da transferência de calor entre a pele e o meio ambiente. Salaün et al. (2010) afirmam que a permeabilidade ao ar do têxtil é um dos fatores mais importantes para o conforto térmico. Este fator depende principalmente da construção, o peso do tecido e pode variar para o tratamento de acabamento. Assim, o fabrico de um tecido termorregulador deve ser uma média entre a respirabilidade e a transferência térmica do tecido.

Com isso em mente, a aplicação de PCMs em estruturas têxteis, podem proporcionar vários efeitos e benefícios térmicos quando devidamente aplicados. Alguns desses benefícios são um efeito de isolamento/aquecimento, através da libertação de calor do PCM para a estrutura têxtil, criando uma barreira térmica que reduz o fluxo de calor do corpo humano para o ambiente envolvente, reduzindo deste modo a perda do calor do corpo, e um efeito termorregulador que mantém a temperatura desse microclima praticamente constante. (DA SILVA, 2009).

Para que esses benefícios sejam obtidos, McCullough e Shim (2006) observam que a camada (ou camadas) de roupas contendo PCMs deve atravessar a faixa de temperatura de transição antes daquela em que o PCM vai mudar de fase, gerando ou absorvendo o calor. Consequentemente, o utilizador tem de fazer algo

para levar a temperatura do tecido PCM para mudar. PCMs são um fenômeno transitório, pois eles não têm nenhum efeito sob condições térmicas em estado estacionário.

Para provar os benefícios dos têxteis com microcápsulas de PCMs, Nejman e Goetzendorf-Grabowsk (2013) realizaram um estudo com o objetivo de determinar as propriedades termorreguladoras de tecidos de malha de poliéster modificadas com PCM. Os resultados dos tecidos com microcápsulas foram comparados com os tecidos sem a aplicação das mesmas. A avaliação do efeito da modificação das propriedades termorreguladoras de tecidos foi realizada com base em termogramas obtidos por análise da técnica de Calorimetria de Varrimento Diferencial (*Differential Scanning Calorimetry*, DSC). Os tecidos com microcápsulas melhoraram as trocas de calor em 40%. Conforme observado por Sánchez et al. (2008), essa melhoria pode variar com a quantidade de microcápsulas aplicadas na superfície. Outro fator que afeta a melhoria das propriedades termorreguladoras é a estabilidade térmica da microcápsula. Zhang e Wang (2009) afirmam que a seleção de uma casca adequada pode melhorar a estabilidade térmica de micro-PCMs.

Para a incorporação de microcápsulas em materiais têxteis, é necessário que as partículas possuam um tamanho regular e uniforme. É possível utilizar partículas de microcápsulas com uma vasta gama de 0,5 a 100 $\mu$ m para aplicações têxteis. (ZHANG; WANG, 2009). Sarier e Onder (2007) recomendam partículas a 10 $\mu$ m para a incorporação em produtos têxteis por meio de revestimento. Parece evidente que quanto menor o tamanho de partícula de microcápsulas contendo PCM, melhores serão suas propriedades, tais como a suavidade, um calor homogêneo absorvendo ou libertando calor, e boa durabilidade de lavagem, da temperatura inteligente têxteis adaptáveis independente do método de incorporação utilizado. (SÁNCHEZ et al., 2008).

Para modificar matérias têxteis, são utilizadas diferentes técnicas de incorporação de microcápsulas em sua estrutura. Essa incorporação em fibras pode ser feita diretamente no interior da matriz de fibras de polímeros. No entanto, segundo Nejman e Goetzendorf-Grabowsk (2013), o método mais comum de modificação têxteis é o revestimento com uma pasta que contenha microcápsulas. Trabalhos publicados também dão exemplos da utilização de métodos tais como a laminação, impressão ou a adição de PCM ao banho de corante.

Cruz et al. (2011), afirmam que as microcápsulas com PCM's podem ser aplicadas às fibras na extrusão, por revestimento ou por impregnação. Estas microcápsulas são revestidas por um polímero, cujo interior contém uma parafina, com as propriedades de mudança de fase sensíveis a pequenas diferenças de temperatura.

Rossi (2012) realizou um estudo sobre a aplicação de microcápsulas em dois tecidos, algodão e poliéster. Também utilizou diferentes tipos de microcápsulas, sendo uma delas de casca polimérica, com interior de frutas vermelhas e erva-doce, e outra de casca cerâmica, com núcleo com frutas vermelhas, algas marinhas e luminescentes. Essas microcápsulas foram aplicadas através de dois diferentes métodos: serigrafia e impregnação. Esses métodos ainda tiveram uma variação, sendo elas: serigrafia com verniz a base d'água, serigrafia com um verniz solvente, serigrafia com um verniz industrial fosfocrômico, impregnação somente com água e impregnação com água e resina a base d'água.

Para testar a durabilidade das microcápsulas nos têxteis, realizou um teste de durabilidade. (NBR ISO 105- C06:2010). As amostras foram colocadas em um béquer com uma solução e agitadas por um agitador mecânico durante um ciclo de 45 min, simulando ensaios múltiplos que correspondem a aproximadamente até 5 ciclos de lavagens domésticas ou comerciais. Após cada ciclo de lavagem, as amostras foram colocadas para secagem em uma estufa com a temperatura de até 50°C, totalizando 6 ciclos, o que corresponde a aproximadamente 30 lavagens domésticas ou comerciais.

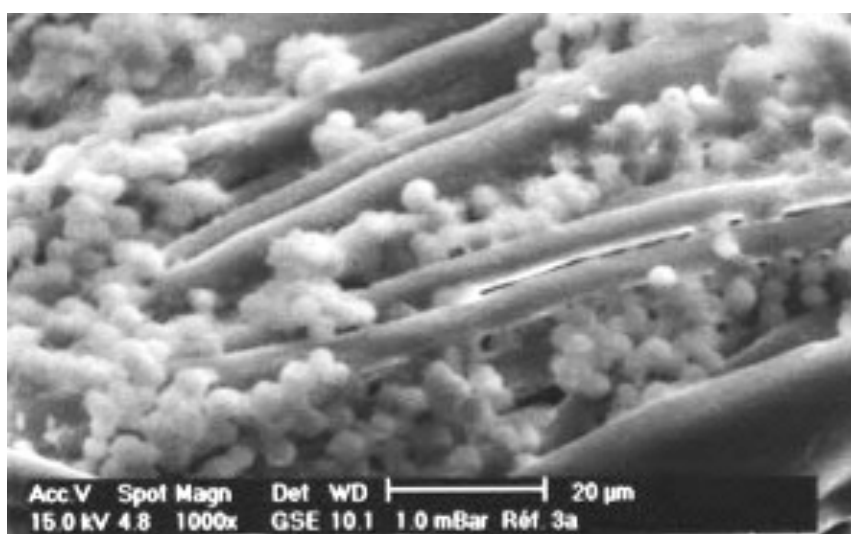
O autor observou que, independentemente do tipo de microcápsula, o verniz tem influencia na sua distribuição no tecido. O verniz à base de água fornece uma distribuição uniforme das microcápsulas na solução, e o verniz à base de solvente gera a formação de aglomerados de microcápsulas. Após as lavagens, a presença das microcápsulas que foram aplicadas com impregnação e uso de verniz permaneceu visualmente a mesma, sem grandes alterações nesta forma. A serigrafia com verniz à base de água também se mostrou resistente a 30 lavagens.

Os resultados obtidos nesta pesquisa de Rossi (2011) indicam que a escolha da técnica, do tipo de casca da microcápsula, em combinação com verniz ou resina, de acordo com o suporte é fundamental para determinar o resultado final da aplicação, tanto em termos de aspecto visual como no que diz respeito à presença de microcápsulas nas fibras dos suportes analisados. Somente com a sua adequada

combinação é que se pode desenvolver produtos que possam realmente conter as características das microcápsulas utilizadas.

Salaün et al., (2010) estudaram a aplicação de microcápsulas de PCMs em tecidos incorporados através da técnica de revestimento. A impregnação foi feita em um tecido têxtil de algodão com diferentes banhos contendo um ligante e as microcápsulas em diferentes concentrações. Essa impregnação ocorreu sob meio de imersão do tecido por 2 min. Depois de impregnadas, as amostras foram prensadas, com leve pressão, a fim de manter as microcápsulas intactas. Em seguida, a fase de secagem foi realizada sob ventilação de 0,5 m/min de velocidade durante 4 min a 100°C (para evaporar a água) e 4 min a 150°C (para assegurar a reação do ligante). Pode-se visualizar na figura 19, através das imagens de MEV, as microcápsulas de PCM nas fibras dos tecidos. Assim, chega-se a conclusão que a aplicação das microcápsulas depende também do tipo de adequado para a fixação das mesmas na superfície desejada.

**Figura 19 – Impregnação de microcápsulas de PCM em tecidos**



**Fonte: Salaün et al. (2010).**

Sánchez et al. (2010), assim como Salaün et al. (2010), aplicaram microcápsulas de parafina com a técnica de revestimento para a fixação das mesmas no substrato têxtil. Para tanto, o tecido virgem foi fixado na superfície do aplicador, assegurando o tecido com grampos. O substrato de tecido impregnado seco com a formulação de revestimento e as microcápsulas foram curados a 95°C durante 11 min.



Para a análise térmica, as amostras foram avaliadas através da termografia infravermelha (IR). Os tecidos com as microcápsulas e sem elas foram aquecidos até uma temperatura mais elevada do que a da mudança de fase do PCM (45°C) encapsulada. O objetivo foi comparar o efeito termorregulador após o resfriamento até a temperatura ambiente por câmera de visão infravermelha. Segundo os autores, essa análise confirma o efeito termorregulador do revestimento têxtil com microcápsulas incorporadas por parafina e da eficácia da técnica de fixação selecionado.

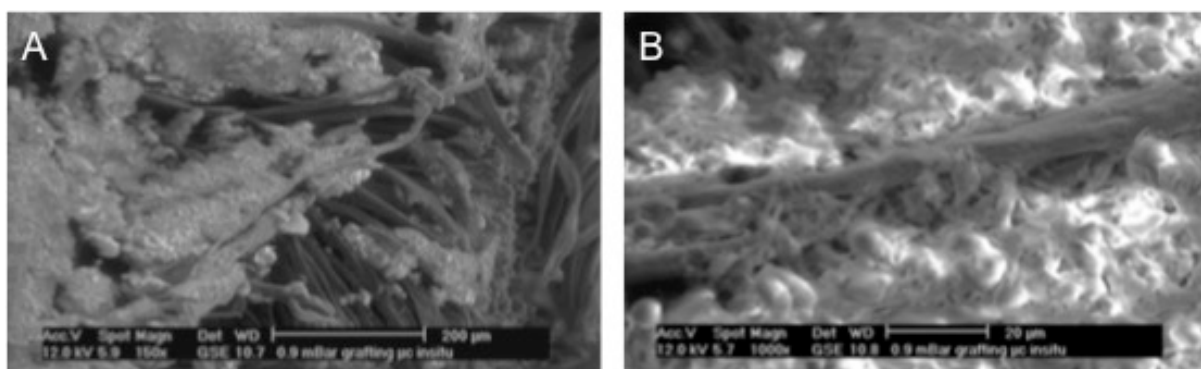
Uma outra maneira de obter têxteis PCM é adicionando-as às fibras na fiação. Este processo foi desenvolvido na década de 1990. Nesta técnica, Erkan (2004) explica que os PCMs são adicionados ao polímero líquido, solução de polímero, ou material de base, e, em seguida, a fibra é fiada de acordo com métodos convencionais, tais como fiação a seco ou a úmido e de extrusão de polímero em fusão. Um problema encontrado por essa técnica é a destruição das microcápsulas nos processos de tecelagem: dependendo do processo, a casca é rompida e o conteúdo liberado no tecido.

Pause (2003) introduziu um método que envolve a incorporação direta dos PCMs em uma película de polímero (0,3 mm de espessura), que é então laminada para o sistema de não-tecido. Pause reivindicou que, quando a laminação é comparada com as outras aplicações de PCM em peças de vestuário, o método oferece as seguintes vantagens: uma alta concentração de PCM por unidade de área e qualquer aumento o peso da roupa é minimizado. No entanto, esse processo é realizado mecanicamente, necessitando assim de um equipamento específico para a aplicação da lâmina contendo as micropartículas.

Nejman et al. (2013) incorporaram microcápsulas com núcleo de PCM através de revestimento polimérico em fibras de poliéster. Viram que as microcápsulas aumentaram a absorção de calor entre 30-40%. Assim, puderam comprovar que o tecido com microcápsulas ampliou a uniformidade do calor emitido e absorvido ao ser comparado com o tecido sem microcápsulas.

Salaün, Vroman e Elmajid (2012) desenvolveram um método para produzir tecidos inteligentes em um método com apenas um processo, através da formação das microcápsulas de poliamida nas fibras de celulose. As imagens de MEV, figura 20, mostraram que as microcápsulas não ficaram uniformes na superfície da fibra, podendo observar alguns pontos sem microcápsulas.

**Figura 20 – Impregnação de microcápsulas de PCM em tecidos**



Fonte: Salaün, Vroman e Elmajid (2012).

Também foi possível observar que as partículas aglomeradas estão apenas na superfície, e que algumas micropartículas podem ser observadas no interior da fibra. Com uma ampliação maior (figura 20B), pode-se observar a presença de microcápsulas de 5µm de diâmetro. Os vários fios da fibra parecem estar ligados com as micropartículas e o filamento.

#### **2.4.4 Aplicação microcápsulas em espumas de PU**

Segundo Lee et al. (2005), as espumas são definidas como materiais que contém espaços vazios gasosos rodeadas por uma matriz mais densa, que geralmente é um líquido ou sólido. As espumas têm sido amplamente utilizadas em uma variedade de aplicações como, por exemplo, isolamentos, almofadas, absorventes e diversas estruturas.

As Espumas de Poliuretano (PU) estão disponíveis em ambas as formulações termofixos e termoplásticos. Os Poliuretanos (PUs) são materiais poliméricos únicos com uma ampla gama de propriedades físicas e químicas. Com combinações de materiais monoméricos, PUs podem ser adaptados para atender a demandas diversificadas de várias aplicações, como revestimentos, adesivos, fibras, elastômeros termoplásticos e espumas.

Dependendo da composição da espuma, da morfologia celular e das propriedades físicas, podem ser categorizadas como espumas rígidas ou flexíveis. (SAHA; KABIR; JEELANI, 2008). Espumas rígidas são amplamente utilizados em aplicações, tais como a construção de isolamento, eletrodomésticos, transportes, embalagens, móveis e recipientes de alimentos e bebidas; enquanto que espumas

flexíveis são usados como móveis, transporte, roupas de cama, tapetes, têxteis, aplicações esportivas, choque e atenuação do som, e sapatos. (LEE et al., 2005).

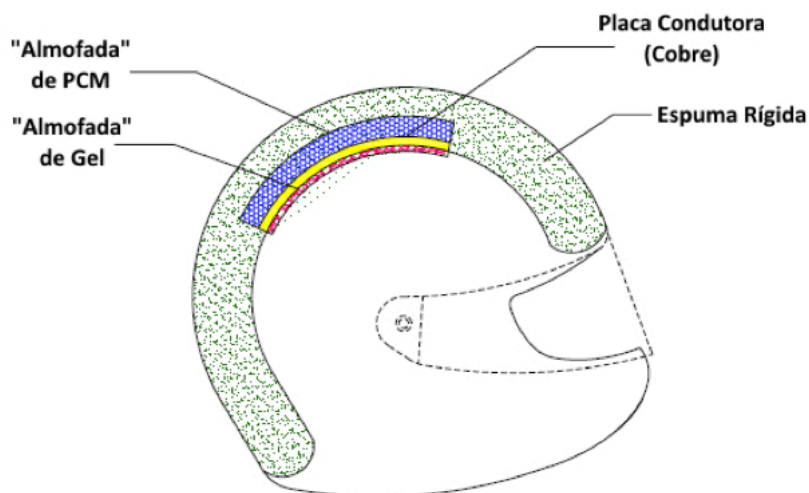
As espumas de poliuretano flexíveis são amplamente utilizadas como materiais de isolamento em edifícios, devido à sua baixa condutividade térmica e estabilidades mecânica e química elevadas. (BORREGUERO et al., 2010). Uma das aplicações de espumas de poliuretano em construção é geralmente como núcleo das estruturas de sanduíche, em conjunto com os dois materiais de folha em torno dele. Materiais de folha carregam a maior parte da carga estrutural, enquanto núcleo faz a estrutura mais leve. O núcleo aumenta o momento de inércia, rigidez à flexão e a capacidade de absorção de energia do sanduíche. Também amortece internamente a onda de tensão, uma vez que se propaga através do núcleo no caso de impacto. Isto atrai essas estruturas de sanduíche para serem usadas em aplicações aeroespaciais, marinhas e automóveis. (SAHA; KABIR; JEELANI, 2008).

As espumas de PU representam o maior mercado entre espumas poliméricas, estimado em quase dois bilhões de quilos, apenas nos EUA. Cao et al. (2005) afirmam que em 2001, o uso de produtos de espuma de polímero EUA foi de US\$ 16,2 milhões. Segundo Lee et al. (2005), os PUs ocupam a maior quota de mercado (53%) em termos da quantidade consumida, enquanto que PS é o segundo (26%).

De acordo com Borreguero et al. (2010), espumas de PU possuem boas propriedades de isolamento, mas a sua capacidade de regulação térmica pode ser melhorada através da incorporação de materiais de mudança de fase (PCMs). A tentativa de aplicar microcápsulas de PCMs em espuma de poliuretano para melhorar o seu desempenho térmico foi iniciada na década de 1990. Esta tecnologia foi desenvolvida para uso em uma variedade de aplicações, tais como calçados, roupas, interiores de automóveis, e de produtos médicos.

Uma aplicação muito interessante dos PCM em espumas de PU foi investigada por Fok, Tan e Sua (2011) e diz respeito ao potencial de arrefecimento destes materiais quando incorporados em capacetes. Os investigadores conceberam um sistema (figura 21) para que a temperatura da cabeça se mantenha em torno dos 30°C. Foi selecionado para tal o eicosano, com uma gama de temperaturas de operação entre 18 e 38°C e uma temperatura de fusão de 28°C. Os resultados demonstraram ser possível manter a temperatura pretendida durante cerca de 2 horas.

**Figura 21 – Microcápsulas incorporadas em espumas internas de capacetes**



Fonte: Adaptado de Fok, Tan e Sua (2011)

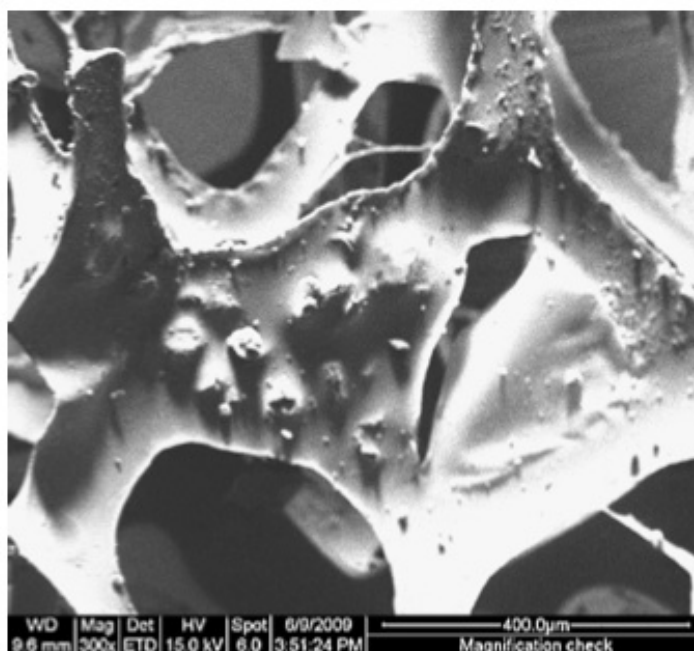
You et al (2008) afirmam que a produção deste tipo de espumas com microcápsulas não tem sido relatado em detalhe. Grande parte dos estudos que pesquisam a aplicação de microcápsulas de PCM em espumas de PU focam na dispersão das partículas na matriz de polímero, de modo que as interações a nível molecular pode ser alcançado para produzir um material com propriedades térmicas e mecânica superiores. Segundo Saha, Kabir e Jeelani (2008), as partículas, quando dispersas uniformemente no polímero, podem produzir um grande número de regiões de interface, aumentando a sua eficiência.

O processo mais comum de aplicação de microcápsulas em espumas de PU é misturar as microcápsulas na solução do polímero antes desta reagir. Normalmente, as microcápsulas são adicionadas e misturadas vigorosamente com agitação forte, para se obter uma mistura uniforme. Adiciona-se então um catalisador ao mesmo copo sob forte agitação por um curto tempo (durante 5-10s). A mistura resultante é deixada em repouso durante cerca de 1 min, permitindo a formação e o crescimento da espuma.

No estudo de You et al. (2010) foram obtidas espumas com microcápsulas através desse método. Foram aplicadas microcápsulas de octadecano com casca de melamina-formaldeído (polimerização *in situ*). Foram investigadas as influências de das microcápsulas na morfologia, propriedades de calor, e as propriedades mecânicas das espumas. As microcápsulas ficam impregnadas nas fibras da espuma (figura 22), o que dispensa a aplicação de um ligante. Eles observaram que, à medida que o conteúdo de microcápsulas é aumentado, o armazenamento de

calor e a capacidade de termorreguladora da espuma se tornar maior. No entanto, as densidades das espumas são aumentadas quando o conteúdo de microcápsulas é aumentado.

**Figura 22 – Aplicação de microcápsulas em espumas de PU pelo método de adição na reação de polimerização**



**Fonte: You et al. (2010).**

Borreguero et al. (2010) estudou a incorporação de parafina microencapsulada em espumas de PU sintetizados analisando o processo da formação de espuma e as propriedades físicas e mecânicas do produto final. As espumas de PU foram sintetizadas pela mistura de polioliol, silicone, água, amina e microcápsulas, sendo essa mistura agitada adicionalmente durante 1 min. Em seguida, a quantidade adequada de isocianato foi adicionada à mistura e a solução foi agitada durante apenas 5s até ao momento em que a espuma começou a crescer. Finalmente, as espumas obtidas foram curadas à temperatura ambiente.

Os resultados desse estudo indicam que o processo de formação de espuma é afetado pelo conteúdo microcápsulas, que diminui o aumento da taxa de espuma e seu tamanho final. Chegaram a conclusão que um teor de 21% de microencapsulados podem ser incorporados nas espumas de PU, melhorando a capacidade de armazenamento de energia destes materiais, com leve decaimento

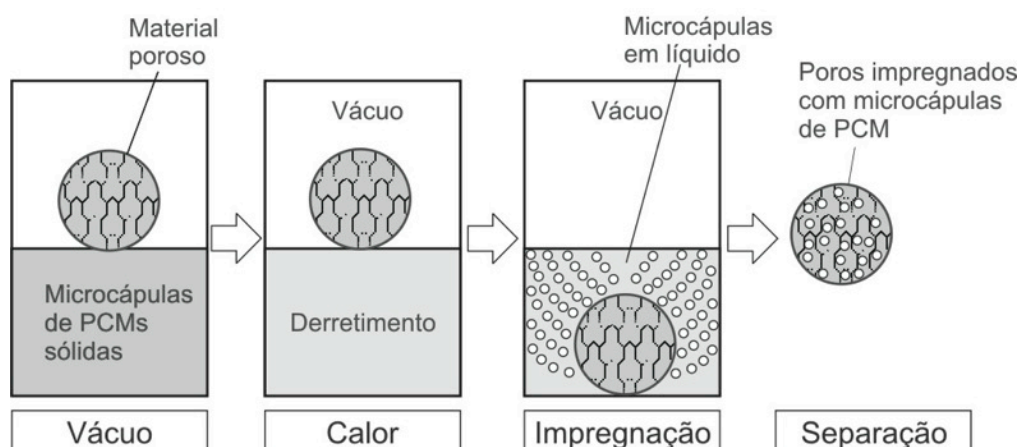
nas propriedades mecânicas da espuma, assim, sem prejudicar as demais características que devem ser providas.

Essa técnica de adicionar as microcápsulas no processo de polimerização da espuma de PU possui vantagens como a rapidez do processo, sua eficiência, pois as microcápsulas são fixadas nas fibras das espumas e por vários autores já terem descrito e analisado este processo. No entanto, no caso dos assentos customizados, em que as espumas de PU são cortadas posteriormente ao processo de polimerização, as microcápsulas podem ser derretidas com os cortes. Além do mais, uma porção considerável de material é desperdiçado, pois todas as microcápsulas que estão nos cavacos são descartadas. Assim, buscou-se outros processos de aplicação das microcápsulas nas espumas de PU, que pudesse ser realizado após o corte dos assentos personalizados.

Nomura, Okinaka e Akiyama (2009) não realizaram a impregnação de espumas de PU, mas sim em materiais porosos como perlite expandida (EP), terra diatomácea (DE) e gama-alumina (GA) foram selecionados como os materiais porosos. Devido ao tipo do processo, ele aqui foi relatado.

Ao início do processo, o PCM microencapsulado sólido e os materiais porosos foram colocados em um forno elétrico com uma bomba de vácuo para evacuar o ar no forno. O forno foi mantido a 150°C, a fim de derreter o sólido que envolvia as microcápsulas. Os materiais porosos foram colocados em contato físico com os PCMs líquidos, esses por sua vez entram e impregnam o material poroso. Após, a bomba de vácuo foi desligada para permitir que o ar entrasse novamente no forno. Finalmente, os materiais porosos cheios com as micropartículas foram retirados e deixados para secar em temperatura ambiente. Após ainda foi retirada uma amostra para analisar se as microcápsulas tinham sido impregnadas com sucesso. Um esquema desse processo é demonstrado na figura 23. Esse processo mostrou-se bastante eficiente. Como as espumas possuem poros bem abertos, é possível utilizar este estudo como base e simplificá-lo.

**Figura 23 – Impregnação de materiais porosos com microcápsulas de PCMs**



Fonte: Adaptado de Nomura, Okinaka e Akiyama (2009).

Saha, Kabir e Jeelani (2008) também estudaram uma aplicação de partículas em espumas de PU. Seu processo consiste em três passos, como mostrado na figura 24. No passo 1, a mistura é submetida à vibração por ultrassom de alta intensidade durante 40 min a amplitude de 60% para produzir uma dispersão homogênea. A fim de evitar o aumento da temperatura durante essa vibração, um arrefecimento externo é empregado, submergindo o recipiente de mistura em um banho termostático de cerca de  $\pm 1\text{C}$  durante todo o período de aplicação do ultrassom. No passo 2, as partículas são misturadas, utilizando um agitador mecânico a 2500 rpm durante cerca de 30s. Um molde de alumínio é aquecido dentro de um forno a cerca de  $50^{\circ}\text{C}$  antes de verter a mistura, e então, a mistura é vertida no molde. Esse molde é prensado com a finalidade de dissipar as partículas uniformemente na espuma. Ele é mantido no interior do forno a  $37,8^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para a cura. Finalmente, a espuma com partículas é retirada do molde. A impregnação ocorreu com sucesso, mas mesmo prensando a espuma, as partículas se aglomeram devido a sua energia de superfície elevada.

**Figura 24 – Passo a passo do método de impregnação de microcápsulas em espumas de PU desenvolvido por Saha, Kabir e Jeelani**



**Fonte: Adaptado de Saha, Kabir e Jeelani (2008).**

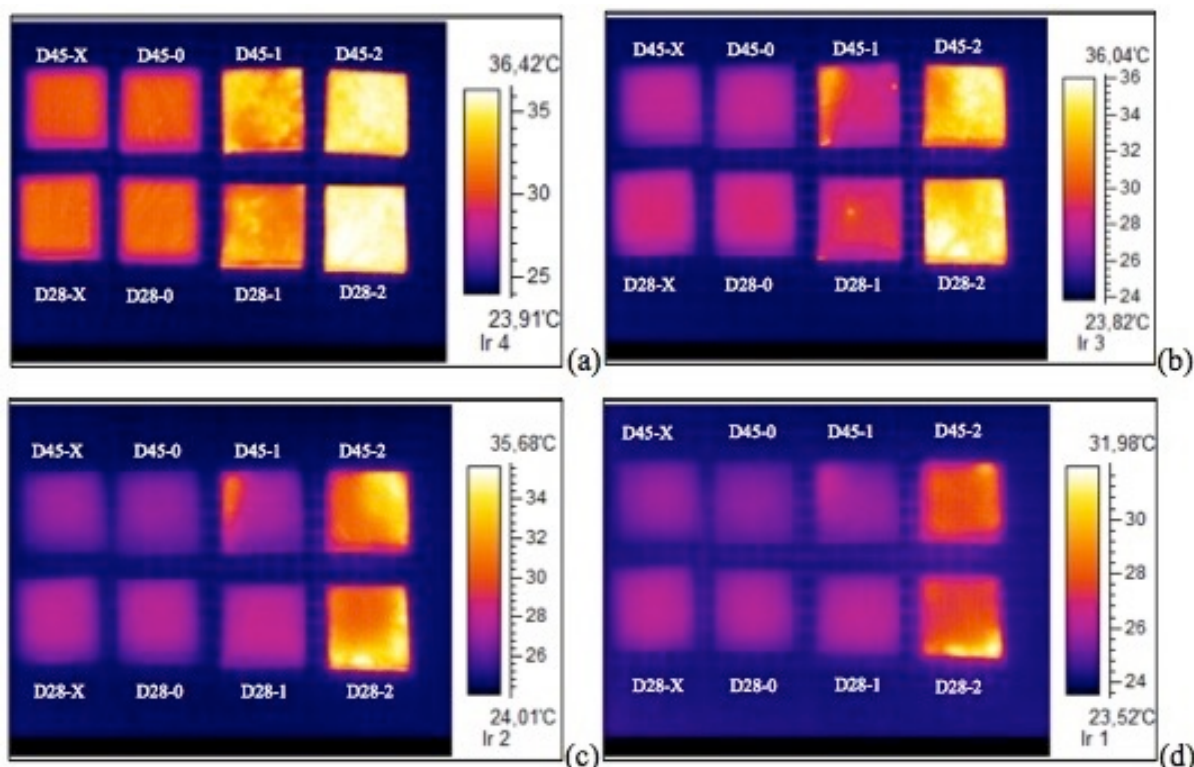
Marcuzzo (2012) desenvolveu um processo de aplicação de microcápsulas em espumas de PU com base no processo de impregnação de Rossi (2011) para tecidos. A autora gerou microcápsulas de eicosano com casca de melamina-formaldeído. Para a aplicação, essas micropartículas foram diluídas em meio aquoso a temperatura ambiente e inseridas por imersão em corpos de prova das espumas de poliuretano de densidades 28kg/m e 45kg/m. A impregnação ocorreu sob agitação leve em meio aquoso por 30min, para que as microcápsulas preenchessem as células da espuma. Uma resina sintética foi sintetizada separadamente e depois inserida em outras espumas de PU, para verificar se o simples enchimento dos poros da espuma poderia melhorar o conforto térmico.

Assim, oito corpos de prova foram gerados. Para comparação, as amostras foram impregnadas com microcápsulas apenas na superfície (D28-1 e D45-1) e através de todo o material (D28 e D45-2-2). Duas amostras foram impregnadas com uma resina de melamina-formaldeído (D28-D45 e D28-X). Também foram deixados dois espécimes sem aplicar microcápsulas ou resina (D28 e D45-0-0).

Para avaliação do efeito termorregulatório das espumas, foi utilizando um termógrafo IR. Todas as amostras foram aquecidas num forno durante 12min a 40°C, temperatura aproximada qual ocorre a mudança de fase de eicosano. As superfícies foram então termografadas pouco depois de serem removidas do forno e, também, ao arrefecer, de 2 em 2 minutos (figura 25).



Figura 25 – Análise termográfica das espumas de PU do estudo de Marcuzzo



Fonte: Marcuzzo (2012).

Notas: (A) Espuma aquecida por 12 min a 40°C; (B) após resfriar 2 min; (C) após resfriar 4 min, (D) após resfriar 6 min.

Observou-se que as espumas impregnadas com resina de melamina-formaldeído não armazenam calor, o que comprova que o aumento da capacidade de calor do sistema é devido à adição de um PCM. Verificou-se que as espumas com microcápsulas arrefecem mais lentamente do que as espumas sem microcápsulas, devido à grande quantidade de calor absorvido pelo eicosano no processo de mudança de fase. Além disso, as amostras que contêm microcápsulas apenas na sua superfície têm um comportamento semelhante para as espumas sem microcápsulas. Isto devido às baixas quantidades de microcápsulas localizadas superficialmente, como tal, elas absorvem e liberam calor muito rapidamente. Assim, vê-se que o melhor resultado foi as amostras D28 e D45, com microcápsulas eicosano em todo o corpo da espuma.

A aplicação é feita por meio da imersão que, para as amostras analisadas, foi eficiente. Contudo, esse processo torna-se bastante dispendioso quando o objetivo é impregnar um assento inteiro. É necessário uma grande quantidade de

microcápsulas para serem colocadas em uma solução. Além do mais, esse é um processo em que não se tem muito controle de quanto material é aplicado.

Fora esse fato, nesse estudo foi considerada que para gerar o efeito termorregulador, é necessário impregnar microcápsulas em toda a extensão da espuma, no entanto nada foi dito quanto a quantidade das microcápsulas que foram aplicadas. Sánchez et al. (2008) falam em seu estudo da importância da quantidade de microcápsulas de PCM para aumentar a capacidade térmica, assim quanto mais microcápsulas forem aplicadas, mais energia térmica o material poderá armazenar. Borreguero et al. (2010) também afirmam que é necessário levar em conta a quantidade de partículas aplicadas nas espumas. Sendo assim, ainda é necessário pesquisar formas de impregnação de espumas de PU, visando o bom aproveitamento da quantidade de material aplicada e também os efeitos gerados por estes.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

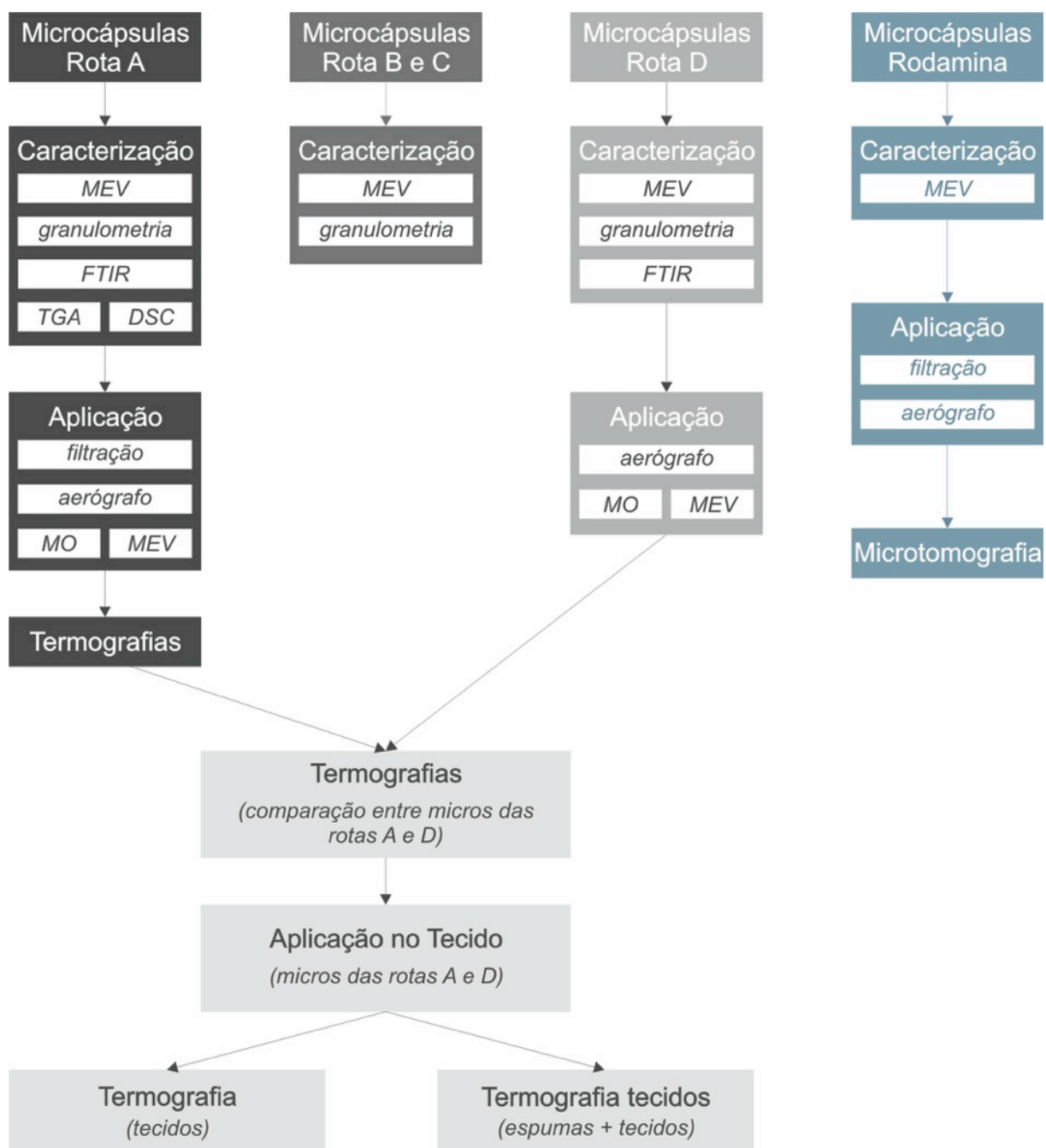
Essa seção apresenta os materiais usados e os métodos empregados para o experimental desenvolvido. Todos os materiais utilizados para a obtenção das microcápsulas e para a verificação da ampliação da estabilidade térmica do material estão citados em cada uma das sessões.

Os procedimentos experimentais começaram com uma fase inicial com obtenção de microcápsulas com base no método de Marcuzzo (2012). No entanto, esse processo não mostrou uma obtenção efetiva, com várias dificuldades na formação da casca. Já os procedimentos experimentais na fase efetiva foram divididos em 4 etapas, como mostra em resumo a figura 26.

A Rota A consistiu na obtenção das microcápsulas baseada no processo de Alkan, Sari e Karaipekli (2011) e Escobar et al. (2011); caracterização das mesmas; a inserção em amostras de espumas de PU através de duas técnicas diferentes; e a análise termográfica das amostras. As Rotas B e C consistiram na variação de parâmetros do processo (surfactante e tipo de agitação), objetivando aumentar o tamanho das microcápsulas além da sua caracterização. Na Rota D, obteve-se microcápsulas com outro surfactante; caracterização das mesmas; e inserção com o método com melhor resultado da Rota A. Foi então realizada uma comparação do efeito termorregulador entre as amostras de espumas de PU com as microcápsulas obtidas nas Rotas A e D; a seleção do melhor parâmetro; aplicação das microcápsulas e a análise termográfica da combinação tecido e espuma.

Paralelamente, foram obtidas microcápsulas de rodamina para verificar a dispersão das partículas em um micrótomo. O equipamento consegue obter imagens através da diferença de densidade dos materiais, assim, foi necessário obter microcápsulas com material que apresenta densidade significativamente diferente da espuma (no caso, a rodamina). Todos os passos aqui resumidos são detalhados nas subseções na sequência.

Figura 26 - Visão geral do procedimento experimental



### 3.1 OBTENÇÃO DAS MICROCÁPSULAS

Foram utilizados como reagentes água DI (200mL + 7mL); formaldeído marca Sigma-Aldrich 37%wt em H<sub>2</sub>O, 10-15% de metanol como estabilizador (6 mL); melamina marca Sigma-Aldrich 99% (2,5 g); eicosano marca Sigma-Aldrich 99% (6 e

3 g); solução de ácido acético marca F-Maia 99,7%; solução de trietanolamina marca Cromoline 60% com 0,2% de água e 0,001% de ferro. Na primeira obtenção (Rota A), foi utilizado 1 g de Tween 20 marca Neon (polietileno glicol sorbitano monolaurato 20) como surfactante.

O método de Alkan, Sari e Karaipekli (2011) e Escobar et al. (2011) consiste na obtenção de microcápsulas por polimerização *in situ*. Segundo Kage et al (2002), as técnicas que envolvem a polimerização *in situ* lidam com dois líquidos imiscíveis. Os monômeros ou reagentes para ocorrência da polimerização, responsável pela formação do invólucro, estão mutuamente presentes nos dois líquidos imiscíveis. Eles devem difundir na interface entre os líquidos para que possam reagir e formar uma membrana que recobre a superfície do núcleo. (MARCUIZZO, 2012). Assim, nessa metodologia a interface entre as duas fases imiscíveis serve apenas para separar as micropartículas inicialmente formadas e impedir o crescimento secundário, que levaria a formação de aglomerados com partículas de formato irregular.

Para gerar a emulsão, foi colocado 200 mL de água deionizada em um béquer jaquetado de 600 mL com agitação de 100 rpm em um agitador mecânico (Fisatron 713D). O surfactante foi adicionado e misturado até dissolvê-lo completamente. As mangueiras do banho termostático foram conectadas às olivas do béquer jaquetado, e a temperatura do banho ajustada para 60°C. Em separado, o eicosano foi fundido com o auxílio de um agitador magnético TE-0851 com aquecimento. O eicosano fundido foi adicionado à solução já quente e misturada. Em outro béquer, essa solução foi levada para o agitador ultrassônico (Cole Parmer modelo CV33), com parâmetros do equipamento em uma amplitude de 60% e tempo de 10 minutos. O pH da solução foi ajustado para 4,5 com o uso da solução de ácido acético.

Para o pré-polímero, foi colocado em um béquer de 50 mL, 7 mL de água deionizada e adicionado o formaldeído. A solução foi levada para aquecer em um agitador magnético TE-0851 com aquecimento com auxílio de um bastão magnético e aquecida até 70°C, mantendo agitação branda. A melamina foi adicionada e misturada até a solução ficar límpida novamente. O pH foi ajustado para 8,5 utilizando a solução de trietanolamina.

Para as microcápsulas, a emulsão e o pré-polímero foram misturados. Com a utilização de um agitador mecânico (Fisatron 713D) a 500 rpm, a emulsão foi

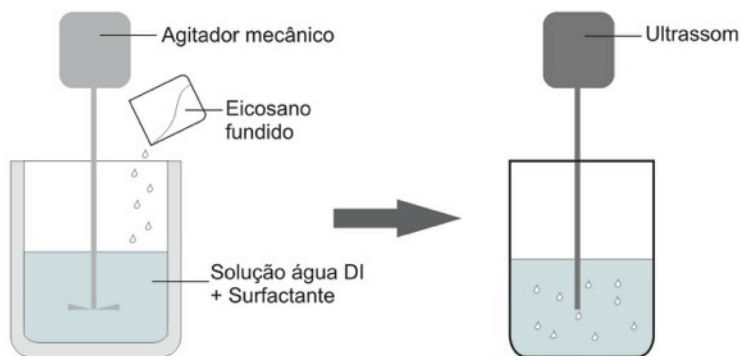
colocada em agitação. Com auxílio de um funil de adição, o pré-polímero foi adicionado lentamente. Após a adição do pré-polímero, a solução ficou em agitação por 1,5 horas. Após, a velocidade do agitador foi ajustada para 100 rpm e o pH para 9 utilizando a solução de trietanolamina. A solução foi colocada em uma centrífuga (Marca Quimis, Centrífuga para Tubos), para a separação de fase, com a velocidade máxima do equipamento, e deixado ali por 20 minutos. A fase líquida foi descartada através de uma filtração e a fase sólida, que contém microcápsulas, foi colocada para secar no dessecador. (BERETTA et al., 2016)<sup>8</sup>. O esquema de obtenção pode ser visualizado na figura 27.

---

<sup>8</sup> Parte da pesquisa será publicada em dezembro de 2016 em um artigo no Journal of Engineering Science and Technology.

**Figura 27 - Esquema para a obtenção das microcápsulas**

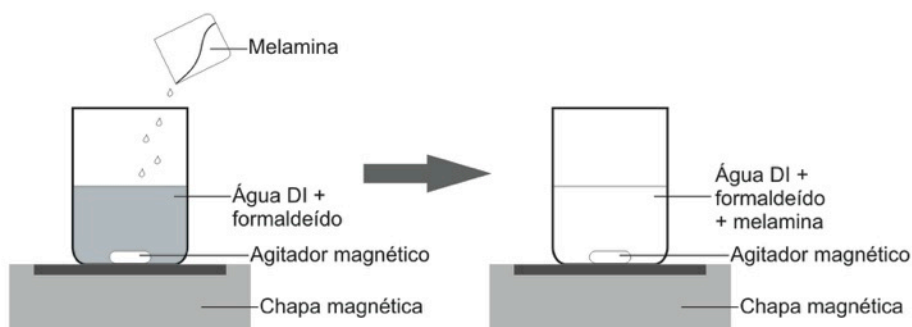
Emulsão



O eicosano fundido é adicionado na solução água DI e surfactante

A mistura é levada ao ultrassom por 10 min com 60% de amplitude. O pH é justado para 4.5 com a solução de ácido acético

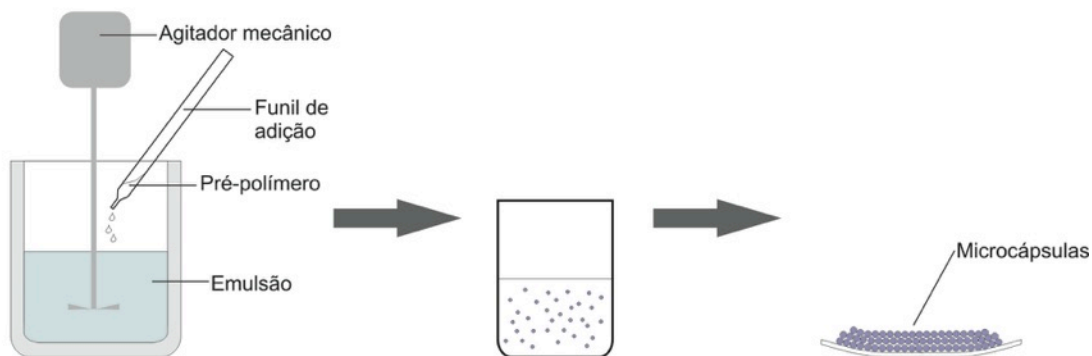
Pré-polímero



A solução de água DI e formaldeído é aquecida até 70°C e a melamina é adicionada

A solução é agitada até ficar límpida e o pH é ajustado para 8.5 com trietanolamina

Microcápsulas



O pré-polímero é adicionado à emulsão que está em agitação de 500 rpm. É agitado por 1,5 h. A velocidade é reduzida para 100 rpm e o pH ajustado para 9 com a solução de trietanolamina.

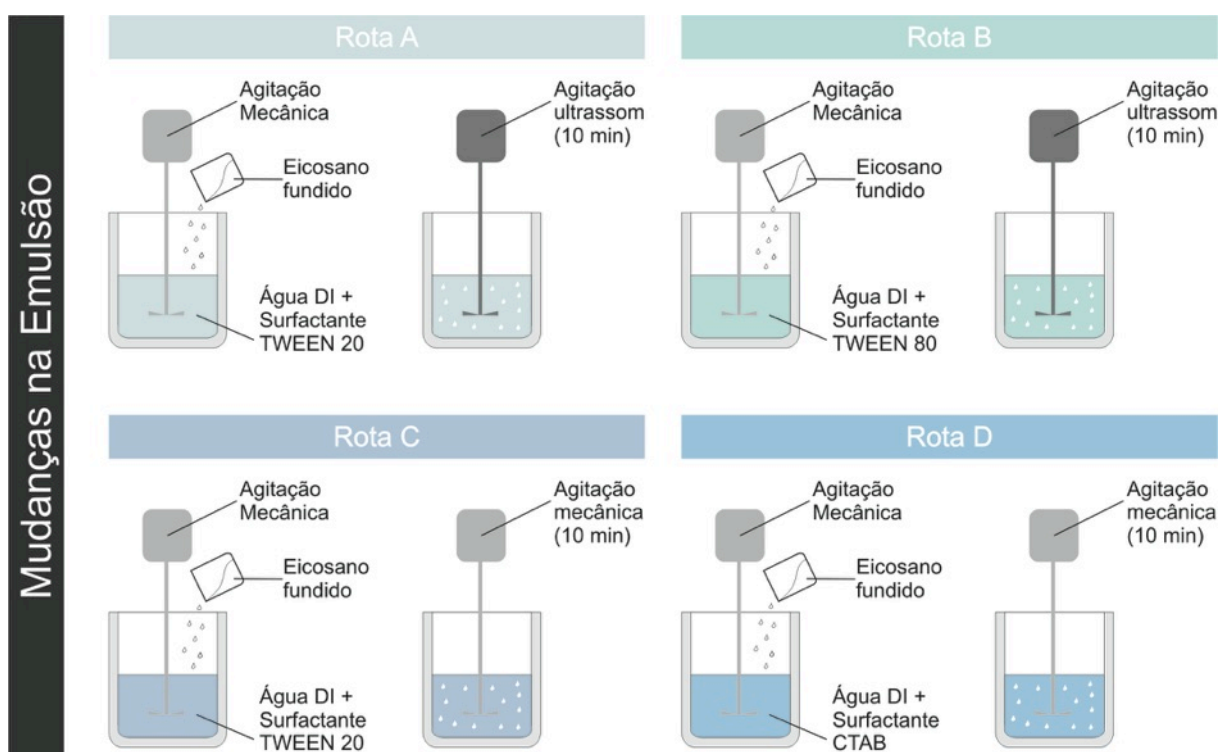
A solução é colocada em uma centrífuga por 20 min para separar a fase líquida da fase sólida.

A fase líquida é descartada através de uma filtração e a fase sólida, que contém microcápsulas, é colocada para secar no dessecador

### 3.1.1 Mudanças dos parâmetros de obtenção

A segunda etapa consistiu na obtenção de microcápsulas com tamanhos maiores para verificar se o tamanho das mesmas influenciaria no efeito termorregulador. Para tanto, os parâmetros de agitação e tipo de surfactante foram modificados. As rotas alternativas de obtenção são delineadas na figura 28.

Figura 28 – Alterações no processo de obtenção das microcápsulas



A Rota A foi considerada o método original, explicado acima no item 3.1. A Rota B consistiu na mudança apenas de surfactante, utilizando o tween 80 (polietileno glicol sorbitano monolaurato 80) marca Sigma-Aldrich. A quantidade permaneceu a mesma (1g), assim como os outros parâmetros. Na Rota C voltou-se para o surfactante tween 20, porém com agitação mecânica no lugar de agitação com ultrassom. O ultrassom dissipa a emulsão formando pequenas gotículas, que serão o núcleo da microcápsula. A agitação mecânica também dissipa a emulsão, porém em menor velocidade, logo, as gotículas ficam maiores. A velocidade da agitação mecânica foi ajustada para 9000 rpm, mantida por 10 min. Na Rota A foi



testado o surfactante CTAB (brometo de cetiltrimetilamônio) marca Neon 98-100%, por este ter apresentado tamanhos maiores de microcápsulas em estudo anterior. (ESCOBAR et al., 2011). Com base nos resultados da Rota B, manteve-se a agitação mecânica. A quantidade de surfactante teve de ser aumentada para 1,5 g. Os outros parâmetros do processo foram mantidos.

### 3.1.2 Caracterização das microcápsulas

Para a visualização da formação, morfologia e tamanho foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) marca Hitachi modelo TM3000. Este é um instrumento usado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos, sendo versátil para avaliação, exame e análise das características microestruturais e morfológicas de amostras. A grande vantagem desse instrumento é a elevada profundidade de campo, da ordem de 10  $\mu\text{m}$  para aumentos típicos de cerca de 10.000 X, chegando a 1 cm para aumentos de 20 X.

Para analisar a distribuição do diâmetro médio das partículas, foi realizada uma análise granulométrica. A análise foi feita a úmido, usando água como dispersante, e o equipamento utilizado foi um granulômetro a laser (marca CILAS, modelo 1180, com faixa de 0,04  $\mu\text{m}$  – 2500  $\mu\text{m}$ ). Também foi realizado uma Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy* - FTIR) da microcápsula, do eicosano e da microcápsula macerada (FTIR marca Parkin Elmer modelo Spectrum 100). O FTIR gera um espectro dos materiais, assim, ao macerar a microcápsula, esperou-se ver uma combinação dos espectros da microcápsula e do eicosano, comprovando que de fato ocorreu a microencapsulação do material.

Para obter informações com relação às variações de massa em função do tempo e/ou da temperatura sob determinadas condições atmosféricas foi realizada uma Análise Termogravimétrica (TGA - *Thermogravimetric Analysis*). As curvas obtidas fornecem informações relativas à composição e estabilidade térmica da amostra, dos produtos intermediários e do resíduo formado.

Foi feita também uma análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*). Esta é a técnica na qual se mede a diferença de energia fornecida à substância e a um material de referência (termicamente estável), em função da temperatura, enquanto a substância e o material de referência são

submetidos a uma programação controlada de temperatura. Durante o processo de aquecimento ou resfriamento, a amostra pode sofrer alterações de temperatura devido a eventos endotérmicos ou exotérmicos. Assim, as curvas de DSC obtidas mostram picos ascendentes que caracterizam eventos exotérmicos, enquanto os picos descendentes representam os eventos endotérmicos.

Foram analisadas 6 amostras por TGA, sendo elas a microcápsula obtida, apenas o material de núcleo (eicosano) e apenas a casca de melamina-formaldeído com ar; e 3 amostras por DSC, novamente a microcápsula obtida, apenas o núcleo e apenas a casca. Por desconhecer a estabilidade térmica das amostras, o TGA teve parâmetros amplos, com ar como atmosfera, iniciando a análise a uma temperatura de 35°C e uma rampa de aquecimento de 10°C/min até 700°C. O DSC iniciou-se a uma temperatura de -40°C, com uma isoterma de 2 min. A rampa de aquecimento foi de 10°C/min até 110°C. Foi feita mais uma isoterma de 2 min e, então, uma rampa de resfriamento de 10°C/min até -40°C.

### 3.2 INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NAS AMOSTRAS DE PU

Os materiais dos assentos selecionados são aqueles mais usados para superfícies de suporte de cadeiras de rodas: espumas de PU de densidade 50 kg/cm<sup>3</sup>. Adicionalmente, esse material também já é utilizado para a confecção dos assentos personalizados desenvolvidos pelo LdSM.

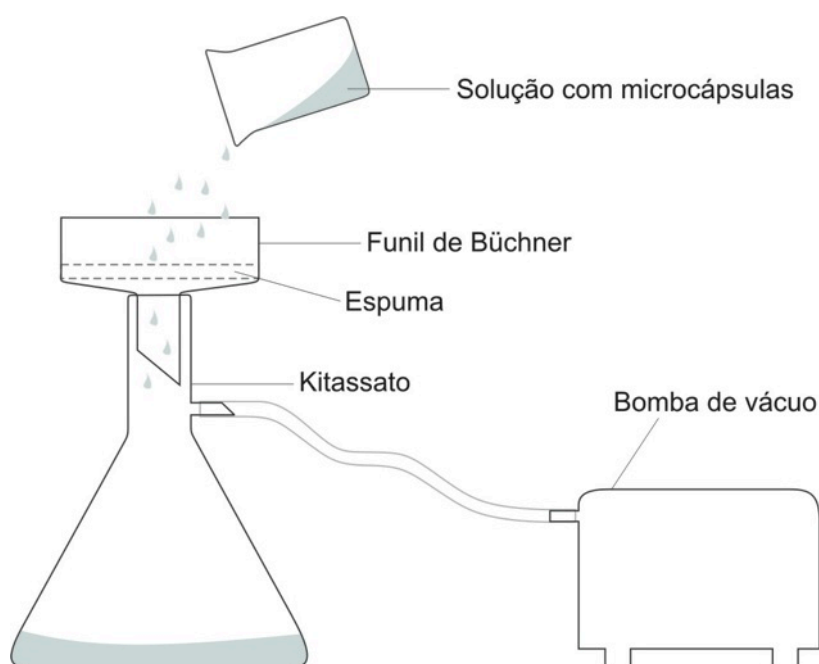
Um dos pontos do trabalho é a inserção das microcápsulas nos materiais que constituem o assento, para tornar viável a aplicação de microcápsulas nos assentos personalizados desenvolvidos no LdSM. Marcuzzo (2012) sugere um método de impregnação por imersão, similar ao utilizado na impregnação de tecidos citada por Rossi (2012). Como explicado no capítulo 2, neste método, a espuma é imersa em um líquido que contém as microcápsulas, que é agitado por meio mecânico. Nesse estudo, as amostras eram de 6cm. No entanto, ao aumentar a escala, esse método torna-se dispendioso, tanto de material, quanto de energia e tempo (12 h). Além disso, a agitação mecânica em contato com as espumas e microcápsulas pode resultar na quebra das partículas, liberando o material de núcleo. Assim, optou-se por investigar outras técnicas de inserção, sendo elas a infiltração e a aerografia.

O método por infiltração desenvolvido foi baseado em Nomura, Okinaka e Akiyama (2009), citado no item 2.4.4. Essa técnica objetiva dispersão das partículas

por toda a amostra, para gerar um ajuste microclima uniforme por todo o material. O método desenvolvido pelos autores necessita de uma câmara de vácuo, pois os materiais impregnados no estudo possuem poros muito pequenos. No caso das espumas, isso não é necessário, ao passo que sua estrutura celular possui poros abertos, maiores que as microcápsulas obtidas. Foi aproveitado que, no processo de obtenção das microcápsulas desenvolvido por este trabalho, já ocorre uma última filtração por vácuo para separar a fase líquida da sólida. Essa filtração ocorre com o auxílio de um filtro de papel. Para a aplicação, esse filtro foi substituído pelo material que deveria ser impregnado, neste caso, a espuma de PU. As amostras possuíam o exato diâmetro do filtro cerâmico (10 cm) e 1 cm de espessura).

Para inserir as microcápsulas por filtração, foi utilizado um funil de Büchner com 10cm de diâmetro, um kitassato e uma bomba de vácuo. A amostra de espuma foi encaixada com precisão dentro do funil de Büchner, este foi encaixado no kitassato, e as mangueiras da bomba de vácuo acopladas nas saídas do kitassato, conforme esquema da figura 29. As microcápsulas foram diluídas em água DI e resina a base d'água e despejadas por cima da espuma. (BERETTA et al., 2015).

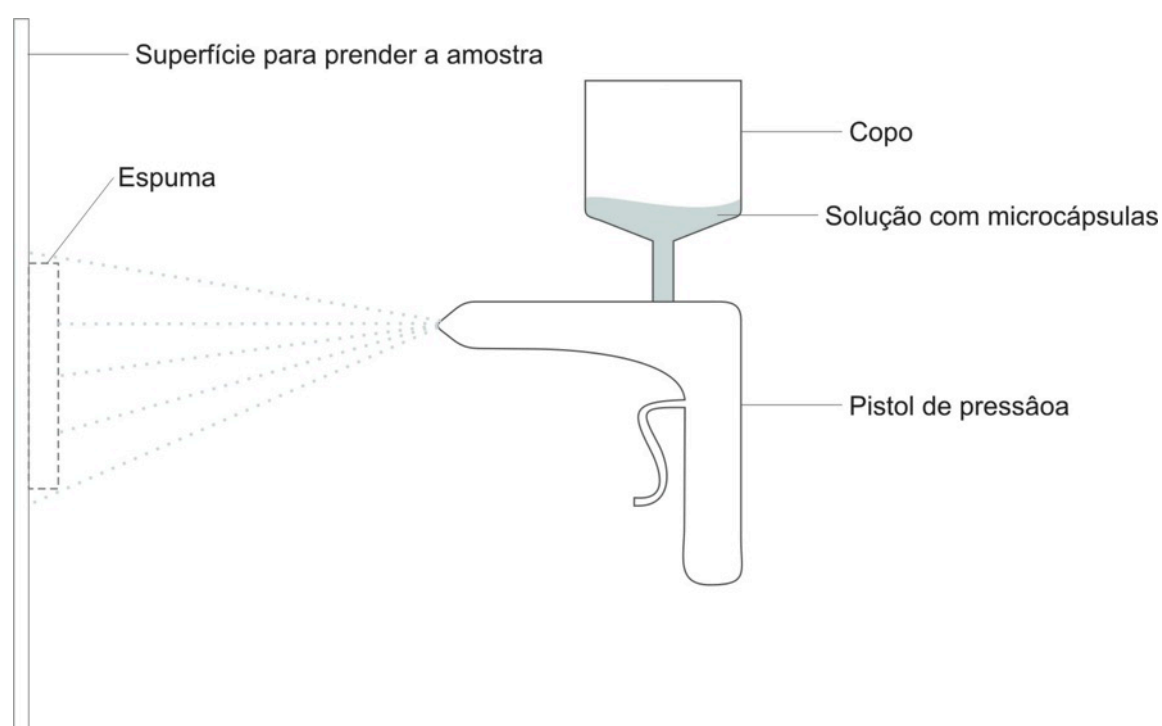
**Figura 29 – Esquema para aplicação das microcápsulas com uso de vácuo**



**Fonte: Traduzido de Beretta et al. (2016).**

A segunda aplicação foi realizada com a técnica de aerografia, com uso de uma pistola de pressão para pintura HVLP TMX PPG14 com alimentação por gravidade, bico de diâmetro 1,4mm, leque de pintura de 180-260mm, vazão de 190 mL/min e pressão de trabalho de 30-43 psi (3bar). As microcápsulas foram diluídas na mistura de água e resina na mesma proporção da aplicação com filtração. As misturas dos testes foram colocadas separadamente no copo atrelado à pistola e dispersadas pela superfície da amostra (BERETTA et al., 2015), como mostra esquema da figura 30.

**Figura 30 – Esquema para aplicação das microcápsulas por aerografia**



**Fonte: Traduzido de Beretta et al. (2016).**

As especificações das amostras podem ser visualizadas na tabela 03. A amostra 00 foi deixada como padrão, sem microcápsulas ou resina. As amostras 1 e 4 foram geradas sem microcápsulas, apenas com 2,5g de resina e 45ml de água DI, com filtração e pistola respectivamente, para verificar se a resina interferiria no efeito termorregulatório da espuma. A resina escolhida e a quantidade utilizada foi baseada nos estudos realizados por Rossi (2012), nos quais foi mostrado que, independentemente do tipo de microcápsula, o verniz é necessário para fixar as

microcápsulas em um substrato e que este possui influencia na sua distribuição das micropartículas. O verniz à base de água se mostra resistente e fornece uma distribuição uniforme das microcápsulas na solução, enquanto o verniz à base de solvente, mesmo resistente, forma aglomerados de microcápsulas pelo substrato.

Nas amostras 2 a 6 foram aplicadas as microcápsulas obtidas na Rota A. Nas amostras 2 e 3, foram realizadas aplicações com filtração, geradas com 4 g e 8 g de microcápsulas respectivamente, diluídas em 45 mL de água deionizada com 2,5 g de resina a base d'água. Nas amostras 5 e 6, foram realizadas aplicações com aerografia, geradas com 4 g e 8 g de microcápsulas respectivamente, diluídas em 45ml de água deionizada com 2,5 g de resina a base d'água.

Nas amostras 7 e 8 foram aplicadas as microcápsulas obtidas na Rota D. Foram aplicados 4 g e 8 g de microcápsulas respectivamente, diluídas em 45 mL de água deionizada com 2,5 g de resina a base d'água. Para as amostras 9 e 10; 8 g de microcápsulas diluídas em 45 mL de água deionizada com 2,5 g de resina a base d'água foram aplicadas bilateralmente, ou seja, foram aplicados 4 g na parte frontal, a espuma foi virada e foram aplicados 4 g na parte posterior. Na amostra 9 foram aplicadas as microcápsulas da Rota A e, na amostra 10, aquelas obtidas na Rota D. Todas as amostras foram deixadas para secar por 48 h em ambiente com temperatura (20°C) e umidade (40%) controlados.

Tabela 03 – Especificações das amostras de espuma PU

Amostra	Resina (g)	Microcápsulas (g)	Método de aplicação	Tipo de microcápsula
00	-	-	-	-
1	2,5	-	filtração	-
2	2,5	4	filtração	Micro Rota A
3	2,5	8	filtração	Micro Rota A
4	2,5	-	aerografia	-
5	2,5	4	aerografia	Micro Rota A
6	2,5	8	aerografia	Micro Rota A
7	2,5	4	aerografia	Micro Rota B
8	2,5	8	aerografia	Micro Rota B
9	2,5	8 bilateralmente	aerografia	Micro Rota A
10	2,5	8 bilateralmente	aerografia	Micro Rota B

As amostras foram pesadas antes e depois da aplicação com uma balança de precisão marca Quimis. Para verificação da eficácia da impregnação foi utilizado o MEV marca Hitachi modelo TM3000 e MO (Microscópio óptico) marca Olympus modelo Infinity 1 SZX16. Este último é um instrumento básico para o estudo de detalhes a estrutura e formato de partículas de aproximadamente 2  $\mu\text{m}$ . Nessa técnica, são as variações espaciais na amplitude da luz que entra na objetiva da lente que resulta diretamente no contraste da imagem resultante. (MARCUIZZO, 2012).

### 3.2.1 Análises termográficas das amostras de PU

Para verificar a dispersão térmica e o efeito termorregulatório das espumas com microcápsulas de eicosano, foram feitas análises térmicas com um termógrafo Infravermelho (IR) marca Testo modelo 890. Para analisar as espumas, todas as amostras foram aquecidas em um forno durante 12 min a 45°C, temperatura

aproximada qual ocorre a mudança de fase de eicosano. As superfícies foram então termografadas pouco depois de serem removidas do forno e, também, ao serem deixadas a arrefecer, de 2 a 2 minutos. O ambiente em que as termografias foram realizadas tinha temperatura e umidade controlados (20°C e 40%).

Primeiramente foi realizado um termograma comparando somente as amostras impregnadas com as microcápsulas da Rota A. Após, as amostras realizadas com as microcápsulas da Rota A e D foram comparadas. Foram selecionadas as amostras que obtiveram os melhores resultados de ambas as microcápsulas e essas foram posteriormente analisadas juntamente aos tecidos, descritos no item 3.7.

### 3.3 INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NOS TECIDOS

As microcápsulas que apresentaram os melhores resultados nos testes com as espumas, foram aplicadas nos tecidos. Normalmente é utilizado para recobrir as espumas dos assentos um tecido 100% poliéster (polietileno tereftalato – PET). No entanto, esta fibra sintética dificulta as trocas de calor com o meio, sendo prejudicial para o conforto térmico. Assim, baseado no capítulo 2.2 da revisão bibliográfica, foi escolhido um tecido com 70% PET e 30% algodão, por o algodão ser uma fibra natural que melhora a respirabilidade e o PET ajudar na resistência. As amostras possuíam o mesmo diâmetro das espumas, 10 cm.

Por mostrar um melhor aproveitamento de material e tempo do que o método por imersão estudado por Rossi (2011) e Marcuzzo (2012), as amostras foram preparadas com aplicação por aerografia. Um tecido foi deixado sem microcápsulas como amostra padrão (amostra 11). Foram preparadas 4 amostras com microcápsulas, sendo todas diluídas em 45 mL de água DI e 1,5 g de resina à base d'água. Pelas amostras de tecido possuírem 2 mm, foram aplicados 2 e 4 g de microcápsulas das rotas A e D. As especificações das amostras podem ser visualizadas na tabela 04.

Tabela 04 – Especificações das amostras de tecido

<b>Amostra</b>	<b>Resina (g)</b>	<b>Microcápsulas (g)</b>	<b>Método de aplicação</b>	<b>Tipo de microcápsula</b>
11	-	-	-	-
12	1,5	2	aerografia	Micro Rota A
13	1,5	4	aerografia	Micro Rota A
14	1,5	2	aerografia	Micro Rota B
15	1,5	4	aerografia	Micro Rota B

As amostras de tecido também foram caracterizadas através de MEV (marca Hitachi modelo TM 3000) e MO (marca Olympus modelo Infinity 1 SZX16).

### 3.3.1 Análises termográficas dos tecidos

Para verificar se os tecidos com a inserção das microcápsulas apresentaram aumento no efeito termorregulador, foi feita uma análise comparativa das amostras com o mesmo termógrafo utilizado nas amostras de PU. Os parâmetros de aquecimento e tempo entre termografias foram os mesmos utilizados para as espumas. O ambiente em que as imagens foram conduzidas apresentava temperatura e umidade relativa controladas (20°C e 40%).

### 3.3.2 Análises termográficas das combinações de espumas e tecidos

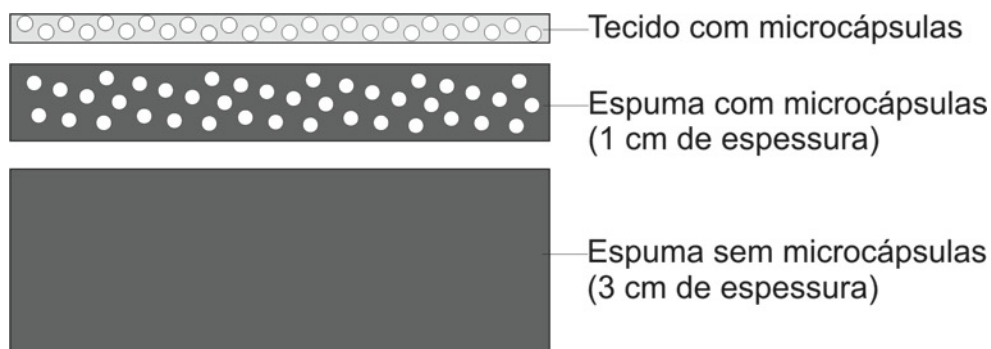
Para simular o efeito termorregulador em um assento, foi necessário analisar o tecido e a espuma em conjunto. Foram selecionadas as amostras de espuma e de tecido que mostraram os melhores resultados individualmente, e estas foram combinadas para análise termográfica utilizando um termógrafo marca Testo modelo 890. As combinações feitas foram espuma e tecido sem microcápsulas; espuma com microcápsulas e tecido sem microcápsulas; espuma sem microcápsulas e tecido com microcápsulas; e espuma e tecido com microcápsulas.

Também foi realizado uma simulação de um sanduíche de espuma sem microcápsulas, espuma com microcápsulas e tecido com microcápsulas, verificando



se a aplicação de uma camada de microcápsulas poderia melhorar o efeito termorregulador de um bloco. Esse esquema pode ser visualizado na figura 31.

**Figura 31 – Sanduiche de espumas e tecido**



### 3.4 OBTENÇÃO DAS MICROCÁPSULAS DE RODAMINA

Para permitir a visualização da distribuição das microcápsulas no microcomógrafo, o procedimento escolhido foi inserir microcápsulas cerâmicas com núcleo de rodamina nas espumas. A rodamina possui maior densidade do que o eicosano, o que possibilita a visualização das microcápsulas na espuma. Como esse processo utiliza microcápsulas com casca cerâmica, é provável que haja mudanças na distribuição. No entanto, com isso é possível ter uma ideia de como as microcápsulas se comportam com a aplicação por filtração e por aerografia, salientando que foi realizada previamente a microtomografia das microcápsulas com núcleo de eicosano e não foi possível visualizá-las.

A técnica de obtenção é bastante similar, por polimerização interfacial. Foram usados como reagentes 250 mL de água DI; 34 mL de HCl 37%; 5,1755 g de CTAB marca Neon 98-100% (surfactante); 4,0833 g de TEOS (ortossilicato de tetraetilo) marca Sigma-Aldrich 98% e quanto for necessário de material luminescente Rodamina-B (Cl.45170) P.A. marca Synth.

Como método de síntese, iniciou-se com a solução A, colocando em um béquer de 400 mL a água DI e o surfactante. A solução foi colocada para agitar com o auxílio de um agitador mecânico, setando o equipamento para 500 rpm. Após a completa dissolução do surfactante, adicionou-se o ácido. A solução foi reservada.

Para a solução B, foi colocado em um béquer de 50 mL o TEOS e adicionado o material luminescente, e agitado vigorosamente. A solução A foi então colocada para agitar com o auxílio de um agitador mecânico a 200 rpm. Com o auxílio de um funil de adição, a solução B foi adicionada. A solução foi então deixada em agitação por 2 horas e, após, deixada a descansar por 24h. As microcápsulas foram lavadas com água DI e filtradas, indo para um dessecador por mais 24h.

Para verificar a formação, tamanho e geometria das microcápsulas obtidas, foram realizadas imagens em MEV.

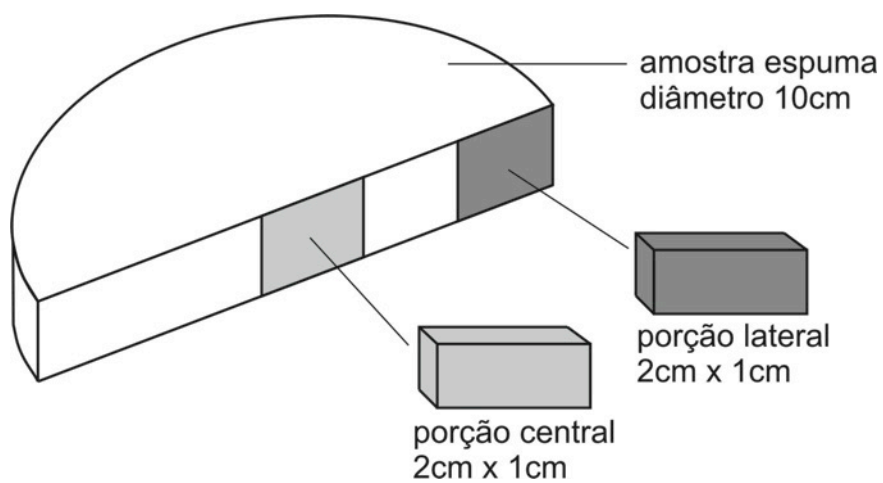
#### **3.4.1 Aplicação nas espumas de PU**

As microcápsulas de rodamina foram aplicadas através do método de filtração por vácuo e por aerografia. Foram aplicadas 8 g de microcápsulas em ambos os métodos, sendo por aerografia aplicadas também bilateralmente.

#### **3.4.2 Microtomografias**

Para compreender como a dispersão das microcápsulas pela espuma influenciava no efeito termorregulador, foram realizadas análises em um microtomógrafo Shimadzu SMX-90CT, localizado na Universidade de Passo Fundo em Soledade-RS. Esse equipamento gera uma imagem de toda a espuma, podendo ser visualizado onde as microcápsulas estão alocadas (se apenas na superfície da espuma ou por toda a espuma). As amostras geradas foram de 10 cm de diâmetro e 1 cm de espessura, mas, por restrições do equipamento (microtomógrafo), a amostra foi fatiada em 1 x 2 cm, sendo analisadas partes centrais e laterais da amostra. Um esquema do fatiamento pode ser visto na figura 32.

Figura 32 – Fatiamento das amostras de espuma para análise no micrótomografo



No próximo capítulo serão detalhados, explicados e comparados os resultados dos métodos aqui descritos.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos através dos métodos descritos no capítulo 3. Os mesmos serão discutidos e comparados aos estudos anteriores apresentados no capítulo 2.

### **4.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MICROCÁPSULAS**

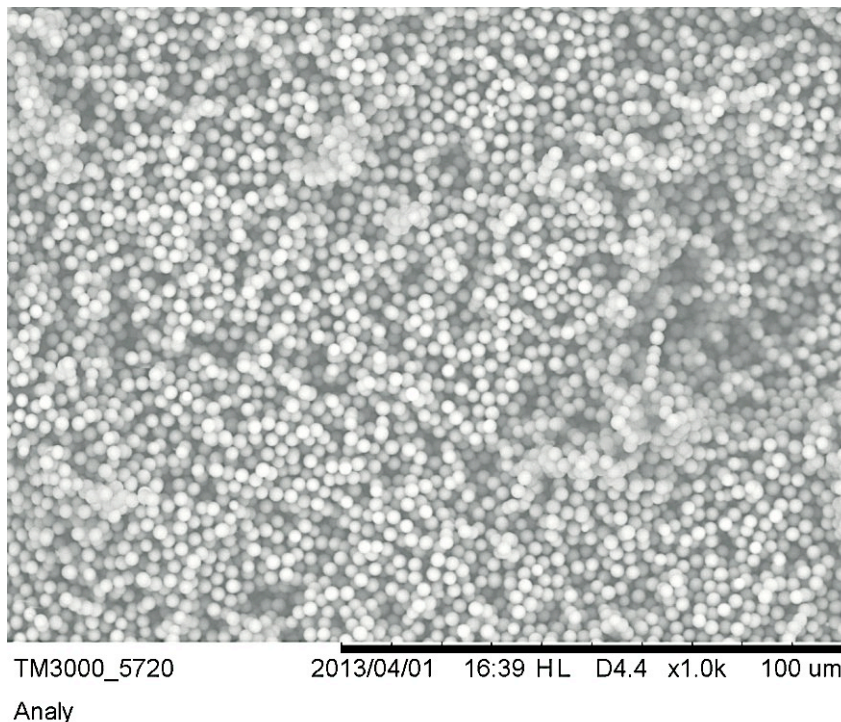
Para melhor entendimento, os resultados referentes às obtenções e caracterizações das microcápsulas serão divididos conforme as Rotas A, B, C e D explicadas no item 3, materiais e métodos.

#### **4.1.1 Rota A**

Na primeira vez que o método foi executado, foi utilizado como surfactante o tween 20 e 6 g de eicosano, como adaptado de Escobar et. al (2011). Após a filtragem, a fase líquida foi colocada novamente na centrífuga e o material depositado no fundo foi pesado em uma balança de precisão. Observou-se que sobraram 3,4 g de eicosano, assim, esse reagente foi ajustado para 3 g nas obtenções que se seguiram para evitar perdas no processo. Na figura 33 pode-se observar na imagem gerada por MEV resultados satisfatórios já com a utilização destes parâmetro iniciais. Não foi observado a formação de aglomerados de microcápsulas, sendo gerado um pó solto, diferentemente dos resultados observados com o método baseado em Marcuzzo (2012). Estes resultados podem ser visualizados no Apêndice A.

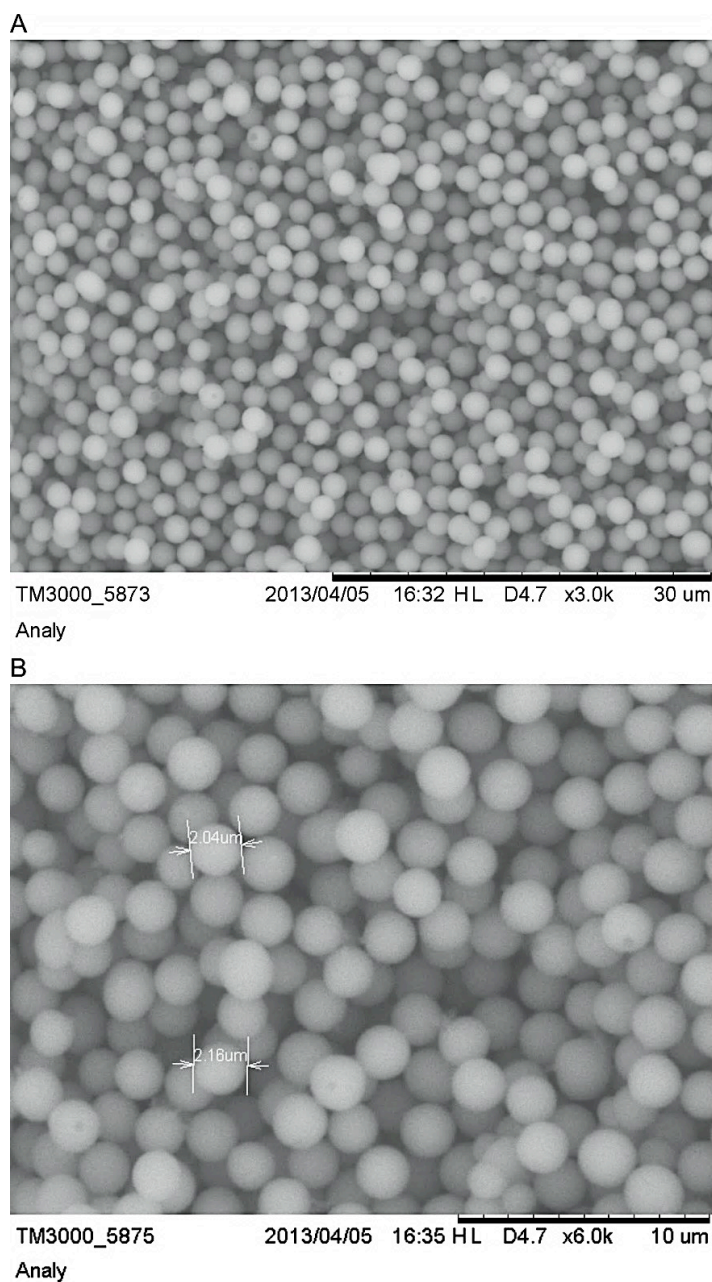
Pode-se dizer com esse resultado que o tempo de encapsulamento estava correto já que, como observado por Escobar et al. (2011); Hawlader, Uddina e Khin (2003); e Mohaddes et al. (2014), a eficiência de encapsulação aumenta à medida que o tempo de homogeneização aumenta. No entanto, quando o tempo de homogeneização vai até um valor crítico (10 min), depois disso a eficiência de encapsulação diminui. No caso da atual obtenção, esse foi o tempo que a solução foi agitada até homogeneizar-se.

**Figura 33 – Microscopia mostrando as microcápsulas de parafina utilizando 6g de parafina com tween 20 com aumento de 1.000 X potência 15kV.**



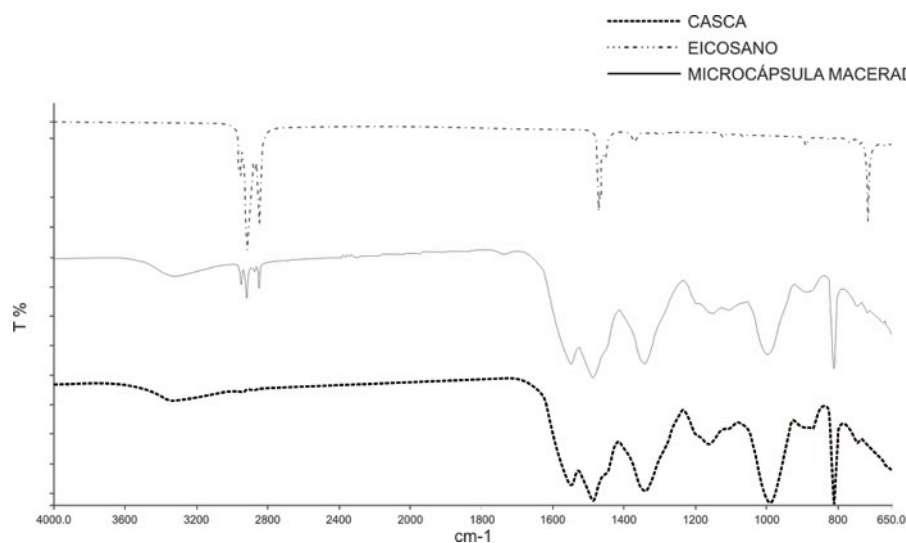
Os ensaios que se seguiram utilizaram 3 g de eicosano e tween 20 como surfactante. Os resultados foram satisfatórios, gerando perdas mínimas no processo. Além disso, é possível visualizar na imagem gerada por MEV da figura 34, que as microcápsulas possuem morfologia uniforme, casca sem ondulações e pouca variação de tamanho. Pode-se observar um tamanho mínimo de 2,04  $\mu\text{m}$  e um máximo de 2,16  $\mu\text{m}$ . Em comparação ao estudo de Alkan, Sari e Karaipekli (2011), em que a imagem obtida por MEV apresentava tamanhos bastante variados, pode-se notar que as microcápsulas formadas pela combinação com o método de Escobar et al. (2011) possuem um tamanho geral mais uniforme.

**Figura 34 – Microscopia mostrando as microcápsulas obtidas utilizando tween 20 com aumento de 3000X (A) e 6.000X (B) com potência 15kV**



Na figura 35 são apresentados os espectros gerados pela análise através de FTIR. É possível observar no espectro do eicosano um pico acentuado em aproximadamente  $2953,66\text{ cm}^{-1}$ , inexistente no espectro da casca vazia. No espectro da microcápsula macerada, é possível observar este pico do eicosano, não tão acentuado ao ser combinado ao espectro da casca vazia. Assim, é possível afirmar que o eicosano foi possivelmente encapsulado dentro das micropartículas. (BERETTA et al., 2015).

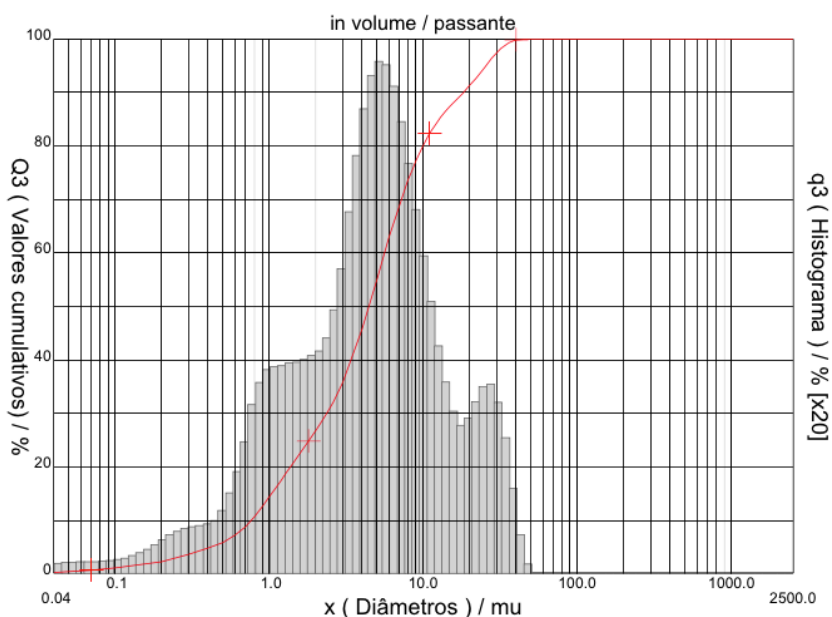
**Figura 35 – Espectros da casca de Tween 20, do eicosano e da microcápsula macerada**



Fonte: Adaptado de Beretta et al. (2016).

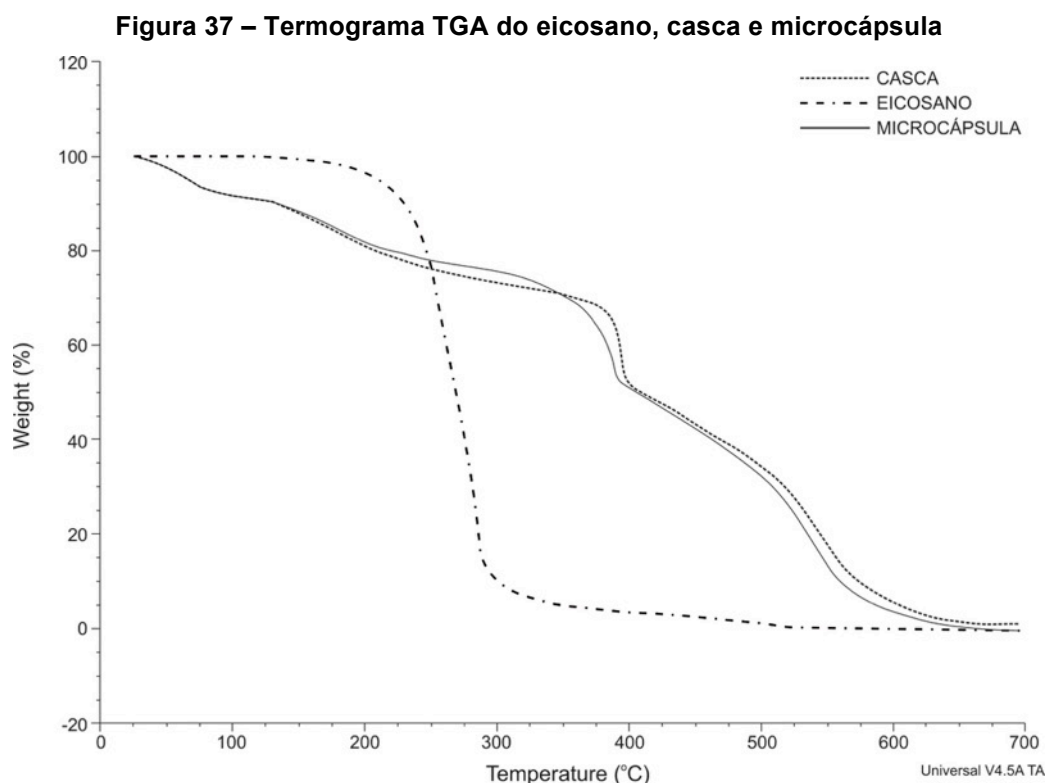
A granulometria realizada mostra que o diâmetro médio das microcápsulas da Rota A é de 6,96  $\mu\text{m}$ , com distribuição do diâmetro a 10% de 0,76  $\mu\text{m}$ , a 50% de 4,43  $\mu\text{m}$  e a 90% de 18,21  $\mu\text{m}$ . O histograma gerado (figura 36) mostra que a maior concentração de tamanho se localiza entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . O estudo de Alkan, Sari e Karaipekli (2011) mostrou diâmetro médio de 0,7  $\mu\text{m}$ , e distribuição com um intervalo entre 0,4 e 2,3  $\mu\text{m}$ .

**Figura 36 – Granulometria da microcápsula da Rota A**





Também para caracterizar as microcápsulas obtidas na Rota A, foi realizada uma análise termogravimétrica (TGA), verificando a perda de massa. Para comparação, foram obtidos termogramas do eicosano, da casca de melamina-formaldeído e das microcápsulas (gráfico 37). Pode-se observar que a massa residual do material decresce com o aumento da temperatura, conforme esperado devido a degradação do material.



Fonte: Adaptado de Beretta et al. (2016).

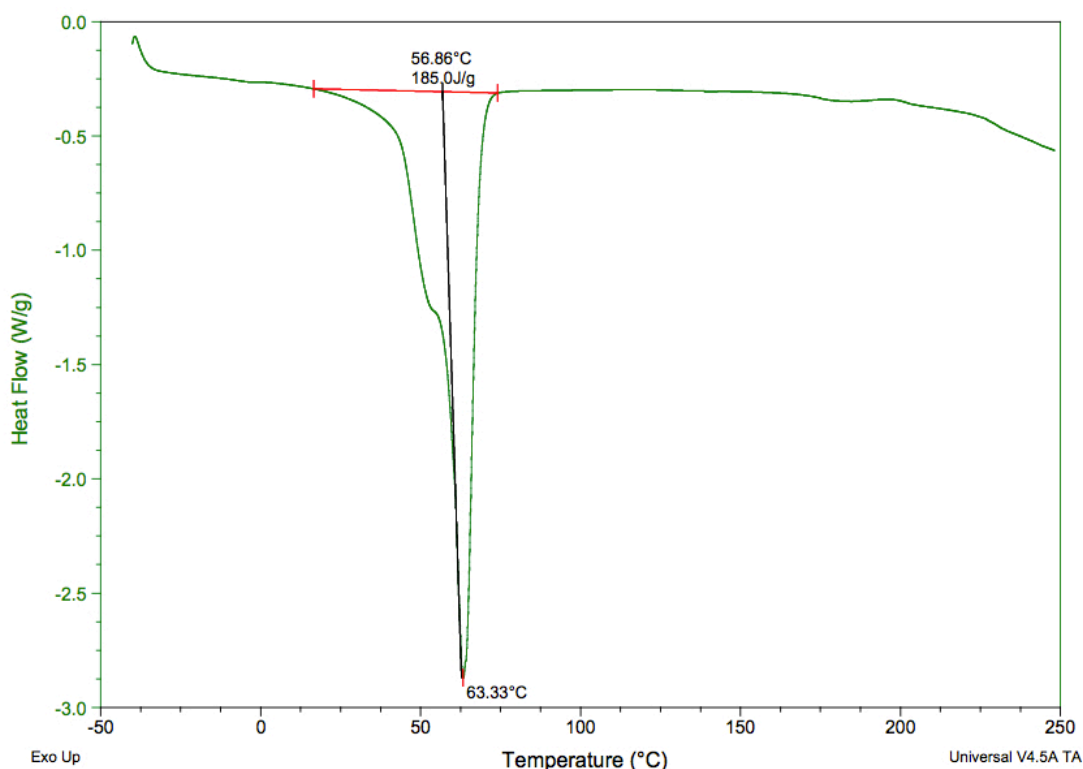
No termograma do eicosano (figura 37 linha tracejada), pode-se observar que ocorre praticamente uma única etapa de perda de massa, iniciada por volta de 200°C, e que termina em 325°C, o que corresponde a degradação do eicosano, havendo uma muito leve perda por volta de 500°C. No termograma da casca de melamina-formaldeído (figura 37 linha contínua), ocorrem 4 quedas, perceptíveis, na curva, que são relativas a momentos diferentes de perdas de massa, típicos de um polímero termofixo. Há duas quedas na curva com pequena perda de massa, próximo a 60°C e a 150°C, o que normalmente é associado a volatilização de água, reagentes residuais e oligômeros de baixo peso molecular. No entanto, a perda significativa de massa ocorre a partir de 380°C, devido a decomposição da



melamina-formaldeído. Assim, a temperatura em que o eicosano inicia sua perda significativa de massa é muito menor do que a da casca de melamina-formaldeído, indicando que a estabilidade térmica da casca obtida é melhor do que o do eicosano puro, o que justifica microencapsular o eicosano com casca de melamina-formaldeído, protegendo assim o conteúdo do núcleo. O termograma das microcápsulas (figura 37 representado pela linha ponto e traço) apresenta uma curva similar ao da casca, o que possivelmente ratifica que o invólucro produzido possui espessura suficiente para proteger o material do núcleo da degradação térmica. (BERETTA et al., 2015).

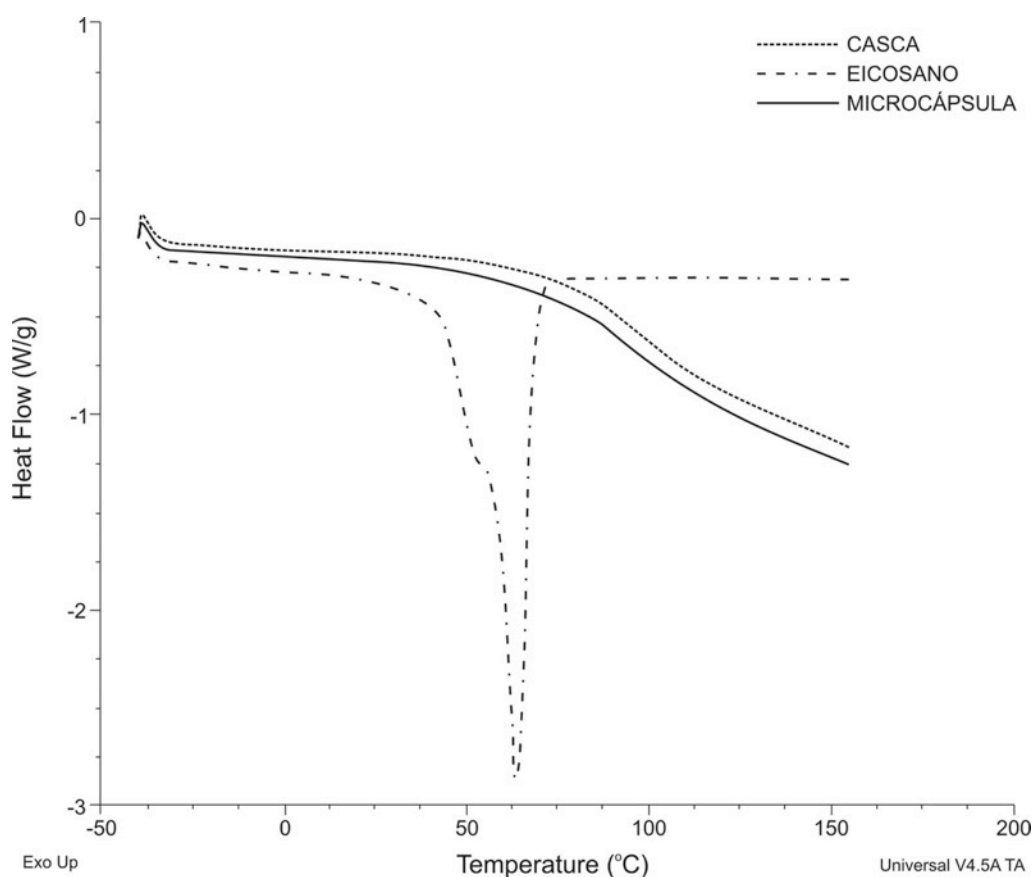
Foram também analisadas as propriedades térmicas das microcápsulas (eicosano, casca e microcápsula), através do uso de um DSC para verificar a mudança de fase do material. A curva do DSC para o eicosano (figura 38) mostra que a temperatura na qual ocorre a mudança de fase do PCM é de  $56,86^{\circ}\text{C}$ . A área do pico endotérmico corresponde ao calor de fusão da parafina durante o processo de mudança de fase, no valor de  $185\text{ J/g}$ .

Figura 38 – Curva DSC para o eicosano



Na figura 39 é mostrada a curva do DSC da microcápsula e, para comparação como na análise por TGA, são mostradas também as curvas geradas pelo DSC do eicosano e da casca de melamina-formaldeído.

**Figura 39 – Curva DSC para o eicosano, a casca e a microcápsula**



**Fonte: Traduzido de Beretta et al. (2016).**

Segundo a curva das microcápsulas, estas possuem um comportamento similar ao da casca de melamina-formaldeído, o que possivelmente significa, como observado na análise de TGA, que o núcleo de eicosano está protegido pela casca que possui uma espessura adequada para proteger o material de seu interior. (BERETTA et al., 2015). O estudo de Alkan, Sari e Karaipekli (2011), no qual a obtenção foi baseada, visou a formação de uma casca de melamina-formaldeído com maior espessura, para que essa protegesse o conteúdo, diferente daquelas que desejam a liberação controlada do núcleo. Assim, chega-se a conclusão que a

afirmação dos autores (Id.) estava correta e que a casca pode proteger o núcleo das ações externas.

#### **4.1.2 Rota B**

Observou-se a necessidade de obter-se microcápsulas com tamanhos maiores, já que a quantidade de PCM dentro da microcápsula pode aumentar o efeito termorregulador do material que é aplicado. Assim, para a Rota B, a única alteração no processo foi a mudança de surfactante, verificando se estas proveriam um efeito termorregulador ampliado.

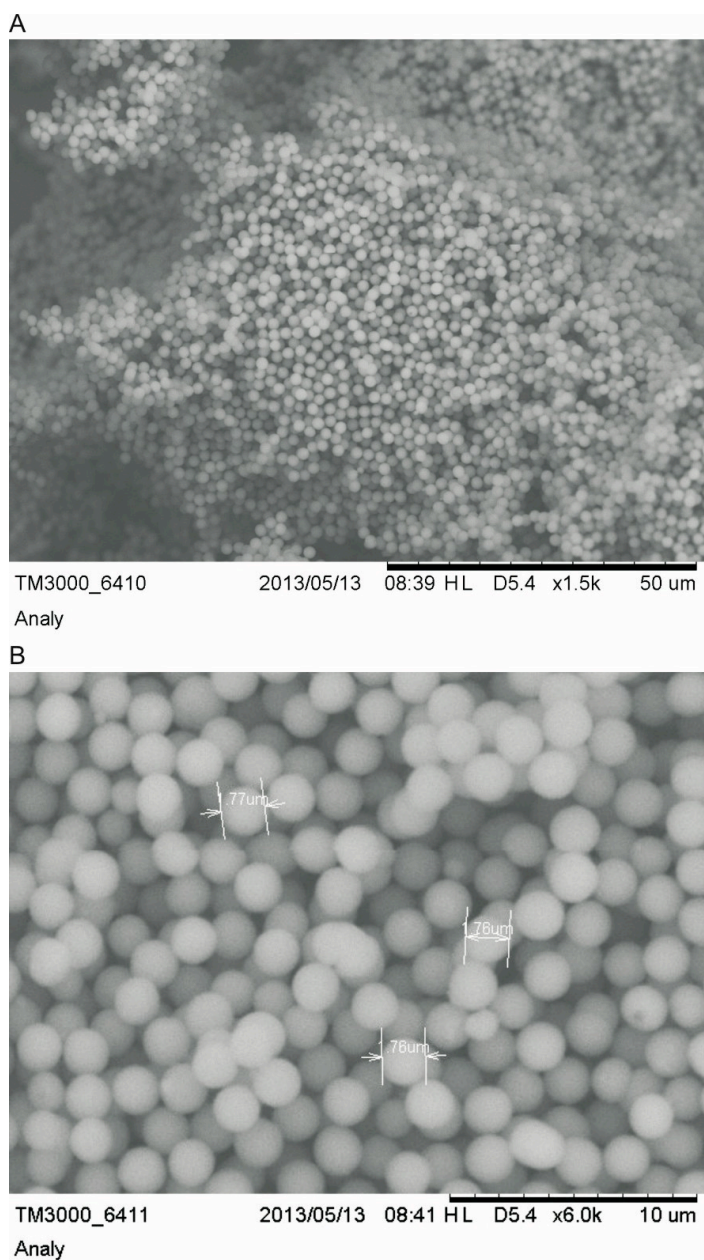
Foi visto no estudo de Escobar et al. (2011) que os tipos de surfactantes afetam o tamanho das microcápsulas obtidas. Essas alterações no tamanho das microcápsulas obtidas com diferentes surfactantes podem estar relacionadas com a estrutura química do surfactante, principalmente quando o material de núcleo permanece o mesmo. (Id.).

Adicionalmente, a espuma possui poros grandes, tornando-se fácil a inserção de micropartículas, não havendo a necessidade de ser de tamanhos diminutos, como observado na impregnação de tecidos estudada por Rossi (2012). Para esse tipo de substrato, é necessário tamanhos pequenos, ao passo que partículas muito grandes não podem ser impregnadas, ficando apenas na superfície e se desprendendo com facilidade. (Id.).

Assim, foi realizado um teste com Tween 80 como surfactante. Os surfactantes Tween 20 e Tween 80 são emulsionantes não-iônicos e a maneira de estabilização da emulsão é por reforçar a interface entre a fase contínua e a fase dispersa, chamado fortalecimento interfacial. Este mecanismo de estabilização emulsão tem uma vantagem sobre a estabilização de carga, com uma não desestabilização de eletrólitos. (ESCOBAR et al., 2011).

Observou-se uma diminuição no tamanho das microcápsulas, enquanto sua morfologia continuou uniforme. A figura 40A mostra as microcápsulas obtidas, com uma superfície lisa e uniforme como as com Tween 20, e a figura 40B mostra o tamanho das partículas geradas.

**Figura 40 – Microscopia das microcápsulas mostrando o resultado da utilização do tween 80 como surfactante com aumentos de 1.500X (A) e 6.000X (B) potência 15kV**



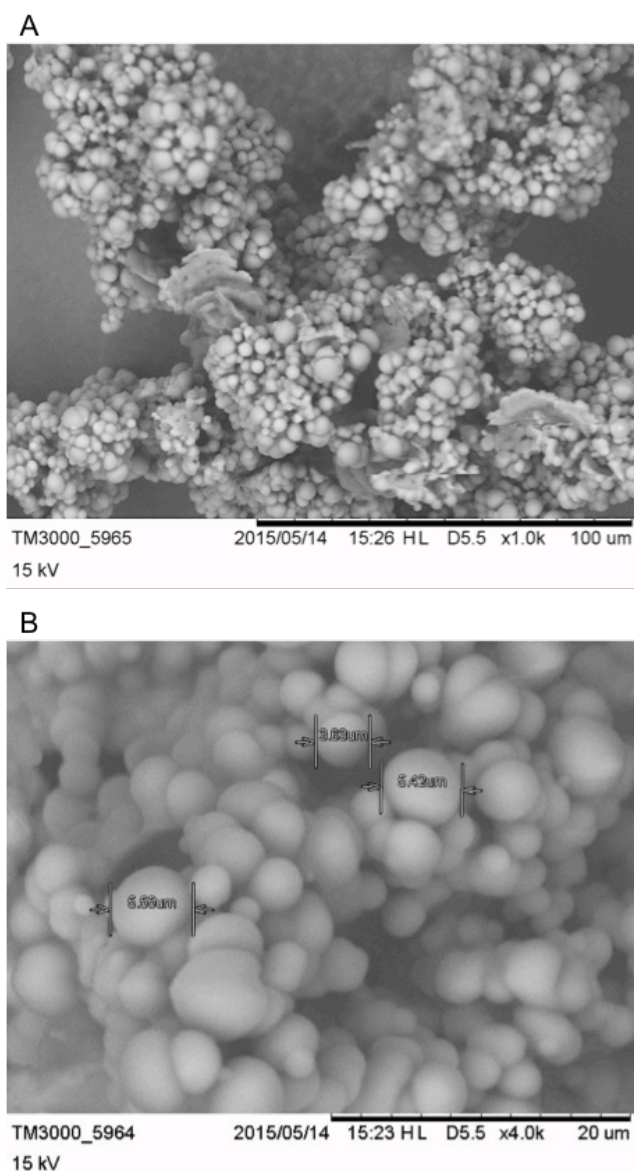
Os tamanhos tiveram uma menor variação do que o surfactante Tween 20, com uma média de 1,76  $\mu\text{m}$ . Como o resultado foi contrário ao qual era desejado (diminuição do tamanho ao invés de seu aumento), essas microcápsulas não foram utilizadas. Como não seriam aplicadas, foram caracterizadas apenas por MEV e não foi realizada a análise granulométrica das mesmas.

### 4.1.3 Rota C

Mesmo que a agitação com ultrassom seja recomendável, já que, como observado por Bayes-Garcia et al. (2010), torna o tamanho microcápsulas mais uniforme e a distribuição das microcápsulas mais estreita do que se a agitação fosse realizada mecanicamente, optou-se por realizar a obtenção das microcápsulas com a agitação mecânica. A agitação mecânica faz com que as gotículas de eicosano tornem-se maiores, o que irá refletir no tamanho das microcápsulas. Assim, partiu-se para uma agitação mecânica de 9.000 rpm da emulsão por 10 min (tempo de emulsificação igual ao realizado com o ultrassom). O pH foi ajustado para 4,5 e seguiu-se com o processo como o original, com a adição do pré-polímero. O surfactante utilizado continuou sendo o Tween 20.

Através de imagem gerada através de MEV, notou-se um aumento do tamanho das microcápsulas. No entanto, também observou-se uma maior variação de tamanhos, como pode ser visualizado na figura 41B, de 3,63  $\mu\text{m}$  a 6,29  $\mu\text{m}$ . As microcápsulas também ficaram mais aglomeradas, exemplificado na figura 41A, diferentemente daquelas obtidas com o ultrassom. No entanto, esses aspectos não afetam sua aplicação, já que as microcápsulas, antes de serem aplicadas, foram peneiradas e diluídas em uma solução de água DI. Esse processo solta as partículas, que podem ser distribuídas mais uniformemente pela estrutura da espuma.

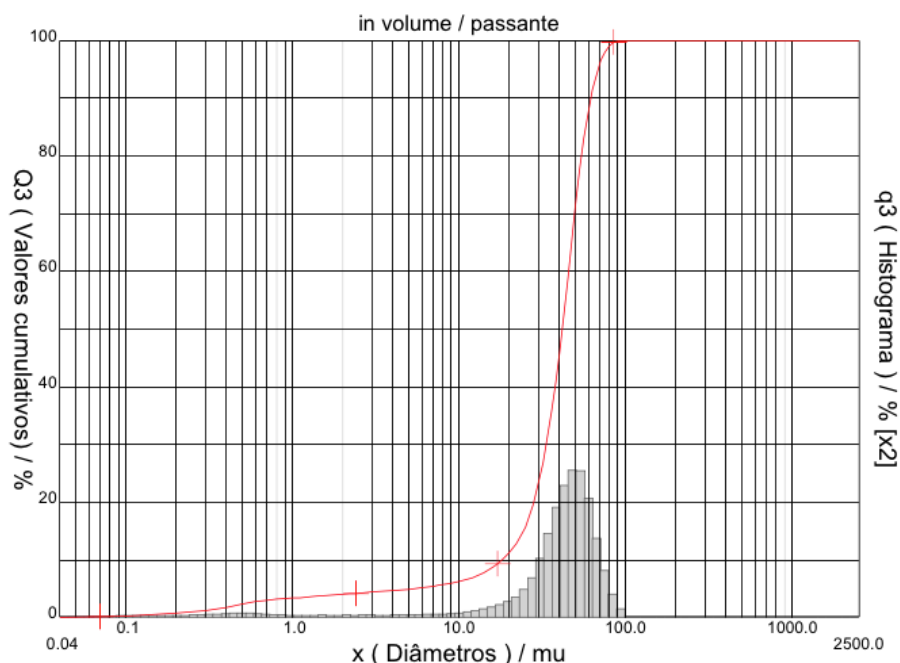
**Figura 41 – Microscopia das microcápsulas mostrando o resultado da utilização do tween 20 como surfactante e agitação mecânica da emulsão com aumentos de 1.000X (A) e 6.000X (B) potência 15kV**



Para essas microcápsulas, também foi realizada uma granulometria (figura 42). A granulometria mostra o diâmetro médio das microcápsulas de 40,73  $\mu\text{m}$ , com distribuição do diâmetro a 10% de 18,09  $\mu\text{m}$ , a 50% de 41,51  $\mu\text{m}$  e a 90% de 61,67  $\mu\text{m}$ . Esse resultado se diferencia do visto na imagem gerada por MEV (figura 41B). Todavia, pode ser que o acúmulo das microcápsulas, observado na imagem 41A, tenha influência, já que ao invés de medir as microcápsulas isoladas, a granulometria identifica grupos de micropartículas. O histograma gerado mostra que a maior concentração da distribuição do tamanho dos grupos de microcápsulas se

localiza entre 30  $\mu\text{m}$  e 60  $\mu\text{m}$ , sendo que tamanhos maiores e menores que estes podem ser considerados em menor quantidade.

**Figura 42 – Granulometria da microcápsula da Rota C**



Ainda foi testado um outro surfactante, o CTAB, como mostra a Rota D do próximo item, 4.1.4.

#### 4.1.4 Rota D

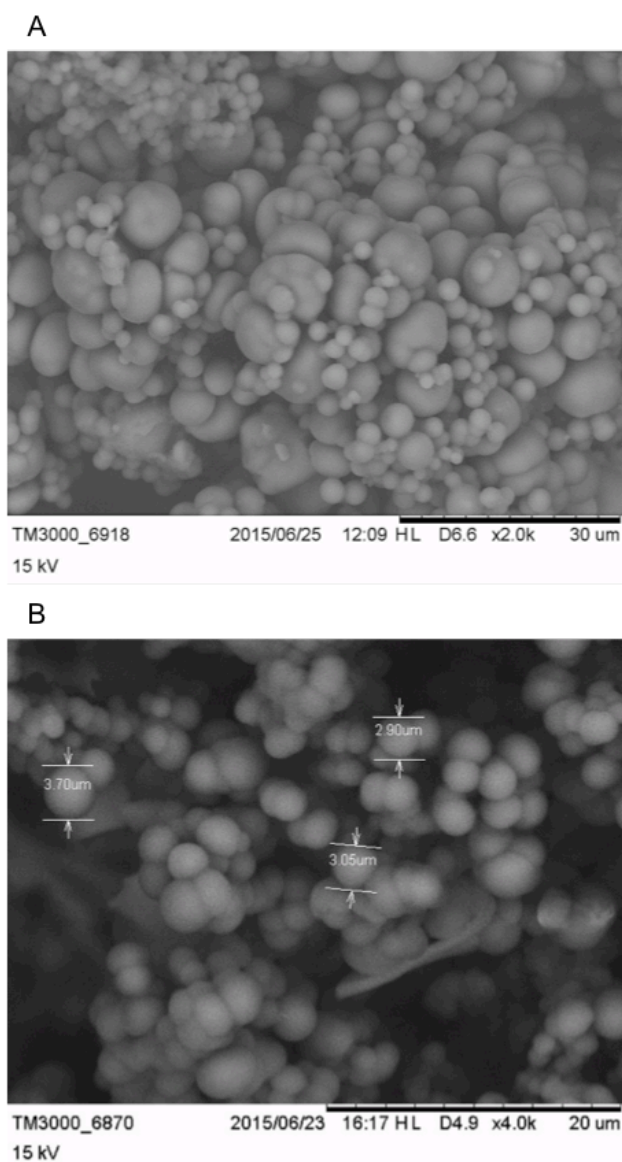
O surfactante CTAB foi escolhido pois mostrou microcápsulas de tamanhos maiores no estudo realizado por Escobar et al. (2011). Seguiu-se com a agitação mecânica da emulsão por mostrar tamanhos maiores do que a agitação com ultrassom, obtidos na Rota C.

O CTAB é um surfactante catiônico e estabiliza a emulsão através da redução de colisões de gotículas na fase de dispersão por estabilização de carga, em que as possibilidades de colisão são reduzidas pelos efeitos de repulsão de cargas elétricas. Quando esse surfactante foi adicionado à emulsão, a carga negativa associada com uma carga positiva hidrófila são dispersos aleatoriamente, agindo como um eletrólito. Este eletrólito é atraído à carga positiva das gotículas da fase dispersa, formando uma dupla camada elétrica, que reduz a estabilização da

emulsão. Este fenômeno é conhecido como “blindagem de carga” (do inglês *charge shielding*). Esta pode ser a razão do aumento de tamanho de partícula de microcápsulas obtidos a partir desse surfactante. (ESCOBAR et al., 2011).

A imagem das microcápsulas obtidas na Rota D pode ser observada na imagem gerada por MEV da figura 43.

**Figura 43 – Microscopia das microcápsulas mostrando o resultado da utilização do CTAB como surfactante e agitação mecânica da emulsão com aumentos de 2.000X (A) e 4.000X (B) e potência 15kV**

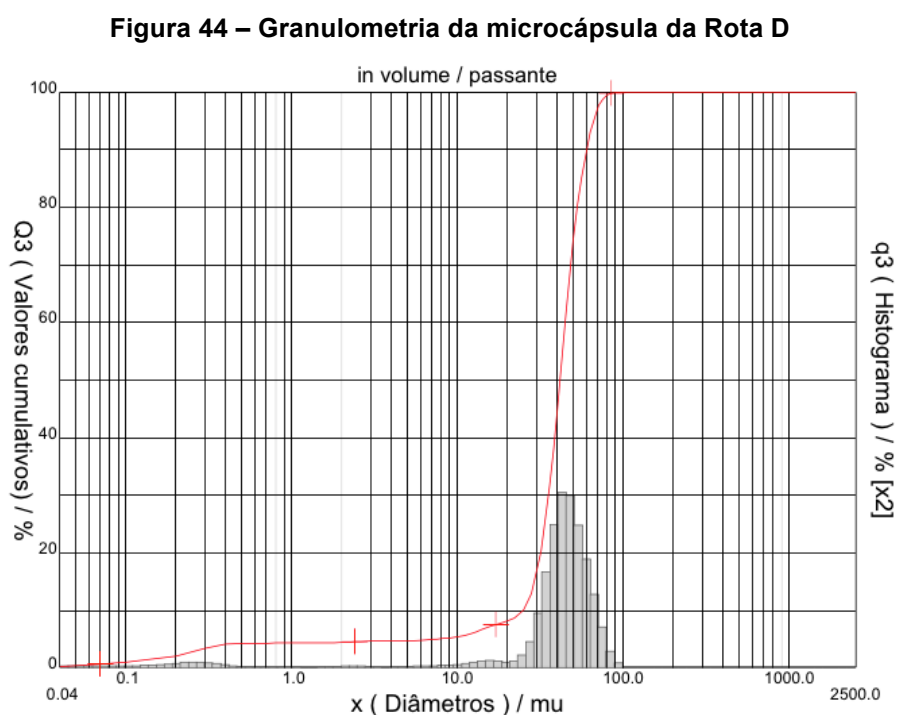


O surfactante CTAB gerou microcápsulas um pouco maiores se comparadas às da Rota C, de Tween 20 com agitação mecânica, repetindo a variação na distribuição de tamanhos e superfície lisa (figura 43A). Pode-se visualizar uma maior



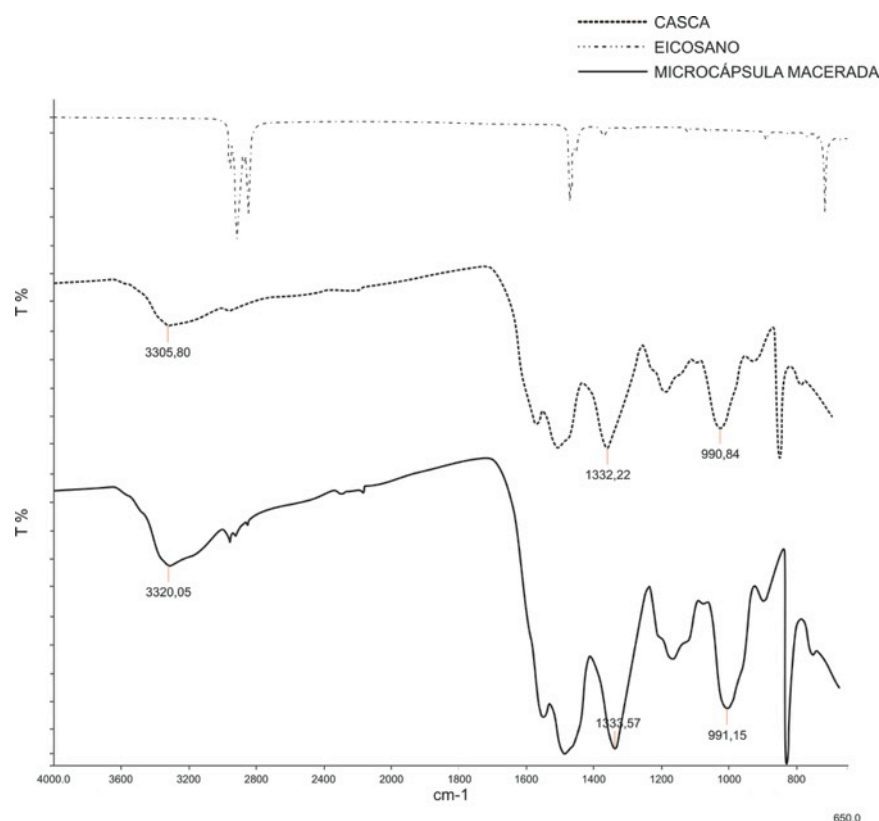
variação de tamanho, e também algumas cápsulas que parecem estarem aglomeradas. Adicionalmente, o tamanho médio observado possui diferença com as microcápsulas da Rota C, porém um pouco maiores, entre  $3,05\mu\text{m}$  e  $12,3\mu\text{m}$ , como mostra a figura 43B.

Para essas microcápsulas, também foi realizado um ensaio de análise granulométrica (figura 44). O resultado desta análise indica o diâmetro médio das microcápsulas de  $41,20\ \mu\text{m}$ , com distribuição do diâmetro a 10% de  $24,86\ \mu\text{m}$ , a 50% de  $41,42\ \mu\text{m}$  e a 90% de  $61,17\ \mu\text{m}$ . Como na análise granulométrica das amostras da Rota C, as microcápsulas se agruparam e o provável é que a distribuição seja relativa aos grupos, e não das microcápsulas individuais. O histograma gerado é similar aos das amostras de Tween 20, mostrando que a maior concentração da distribuição do tamanho dos grupos de microcápsulas se localiza entre  $30\ \mu\text{m}$  e  $70\ \mu\text{m}$ .



Foi realizado, como na Rota A, uma análise FTIR das microcápsulas obtidas com CTAB. Foram gerados os espectros do eicosano, da casca de CTAB e da microcápsulas macerada com o intuito de ver se havia eicosano dentro da microcápsula. Os espectros obtidos podem ser visualizados na figura 45.

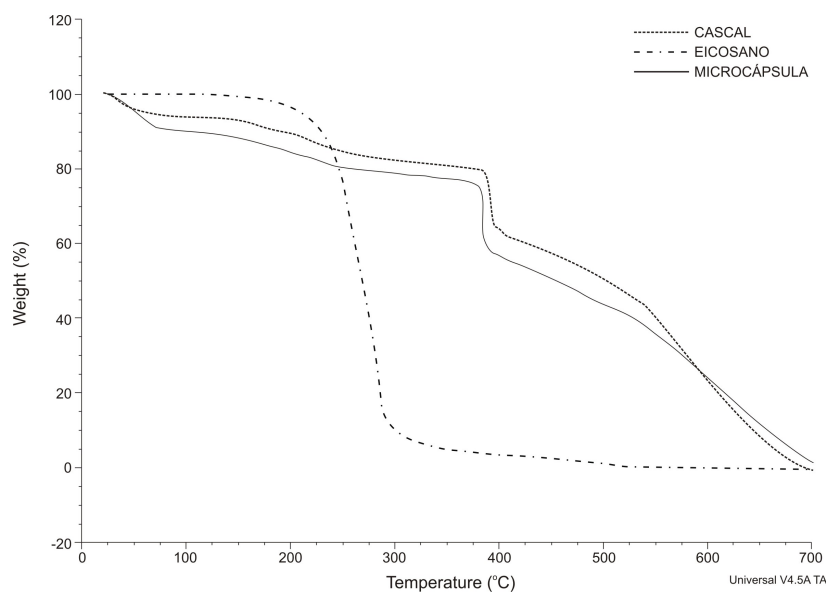
**Figura 45 – Espectros FTIR da casca de CTAB, do eicosano e da microcápsula macerada**



É possível notar que, como nos resultados de FTIR das microcápsulas da Rota A, há uma combinação dos espectros do eicosano e da casca no espectro da microcápsula macerada. Observa-se que ocorreu modificações nos picos principalmente onde o eicosano possui acentuações, como a  $2953,66\text{cm}^{-1}$ . Nota-se também que os picos ao final do espectro da microcápsula, a partir de  $1800\text{ cm}^{-1}$  sofreram alterações, possivelmente pela combinação dos picos proeminentes do eicosano. Com isso, é possível se afirmar que é provável que o eicosano foi encapsulado nas microcápsulas com surfactante CTAB.

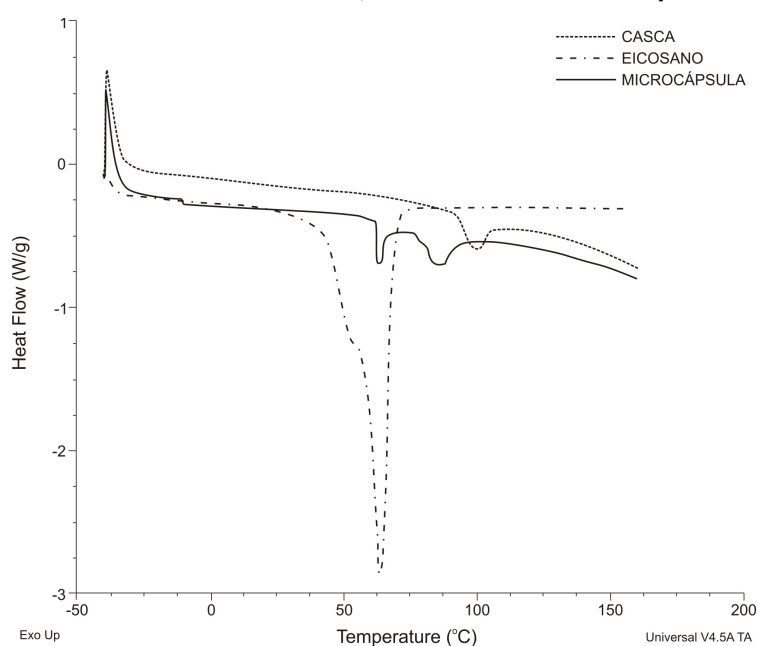
Como essa microcápsulas apresentou bons resultados na análise anterior, foi também realizada uma análise de TGA e DSC, verificando a perda de massa e mudança de fase das microcápsulas. A figura 46 mostra as curvas TGA para o eicosano, a casca de melamina-formaldeído e as microcápsulas da Rota D. Como para as curvas das microcápsulas da Rota A, a casca e a microcápsula apresentam comportamentos semelhantes, o que pode-se dizer que a perda de massa acontece de forma bastante similar para ambas.

**Figura 46 – Termograma TGA para o eicosano, a casca e a microcápsula da Rota D**



A figura 47 mostra as curvas DSC também para o eicosano, a casca de melamina-formaldeído e as microcápsulas da Rota D. Pode-se notar que as curvas da casca e da microcápsulas possuem um comportamento similar, no entanto, por volta de 60 e 70 C há uma perda significativa na curva da microcápsula, relativa à mudança de fase do eicosano. Com isso, pode-se concluir que as microcápsulas da Rota D são menos estáveis do que as da Rota A e sua casca protegem menos o material do núcleo, liberando-o com mais facilidade.

**Figura 47 – Curva DSC do eicosano, da casca e da microcápsula da Rota D**



As microcápsulas obtidas com Tween 20 do processo inicial já tinham sido inseridas primariamente nas espumas de PU e seu efeito térmico medido com um termógrafo. Após as mudanças de parâmetros, foram escolhidas as microcápsulas que seriam aplicadas nas espumas. As microcápsulas que foram selecionadas para serem inseridas na espuma foram as com CTAB como surfactante e agitação mecânica, por apresentarem tamanhos maiores (Rota D). Segundo Hawlader, Uddina e Khin (2003), a variação de tamanho da microcápsula influencia na reação com o meio e, conseqüentemente, nas trocas de calor, produzindo um resultado de absorção e liberação ampliado e mais uniforme quando em uso.

No subcapítulo 4.2 será detalhada a inserção das microcápsulas nas espumas através de filtração e aerografia, assim como sua caracterização por MEV e MO.

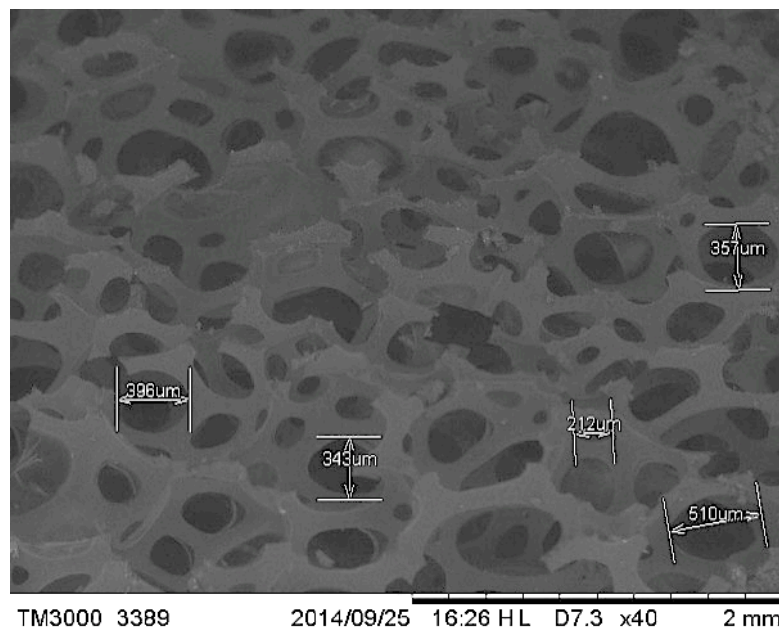
#### 4.2 INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NAS ESPUMAS DE PU

O estudo inicial efetuado por Marcuzzo (2012) realizou testes de inserção de microcápsulas de eicosano nas espumas flexíveis de PU após sua expansão, utilizando como técnica de inserção a impregnação por imersão em uma solução com microcápsulas. O método testado mostrou eficiência para fixar as partículas na espuma, no entanto, muitas das microcápsulas da solução não são transferidas para a espuma, desperdiçando material, e o tempo para impregnação também foi dispendioso (12h).

Dada justificativa acima, foi decidido caracterizar também as espumas com MEV e MO. Adicionalmente, foi possível realizar a comparação do tipo de distribuição das microcápsulas com os métodos de inserção testados, filtração e aerografia.

Para observar o quanto as microcápsulas se fixavam na estrutura celular da espuma, foi feito uma análise por MEV deste material sem inserção de microcápsulas mostrando sua estrutura original, sendo possível observar o tamanho dos poros. Esta imagem pode ser visualizada na figura 48.

**Figura 48 – Microscopia da espuma sem a inserção de microcápsulas mostrando sua estrutura com aumento de 40X e potência 15kV**



Seguiu-se a pesquisa com a inserção das microcápsulas por infiltração, que é descrita no subitem 4.2.1.

#### **4.2.1 Inserção das microcápsulas da Rota A com o método de filtração nas espumas de PU**

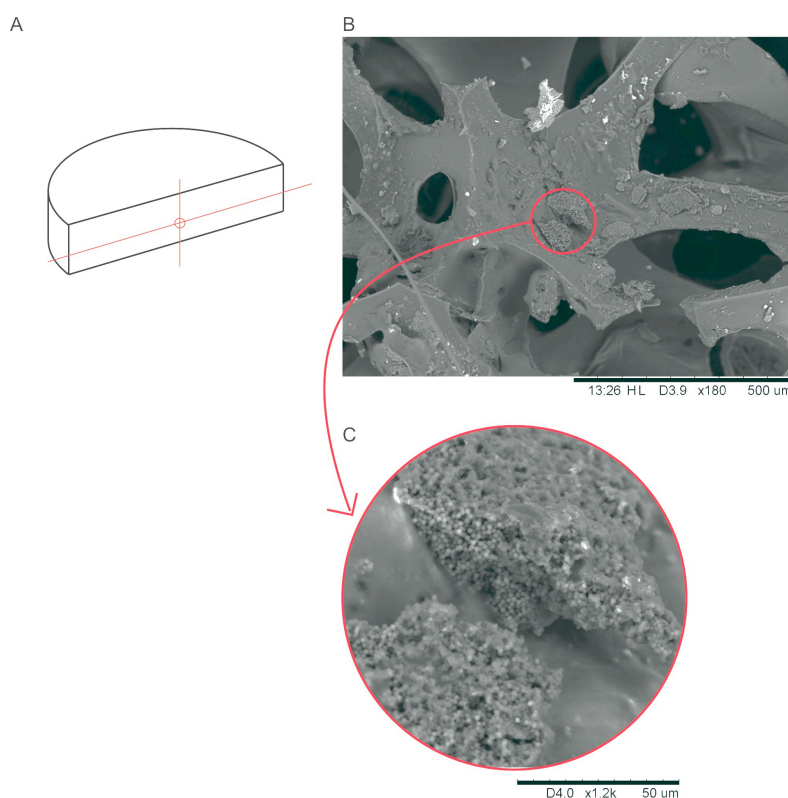
As microcápsulas obtidas utilizando Tween 20 do processo original foram aplicadas diretamente na espuma com a técnica de filtração. As amostras de espumas foram impregnadas com 4 g e 8 g, diluídas em uma solução de água DI e 2,5 g de resina à base d'água e despejadas em cima da espuma. As amostras foram pesadas antes e depois da inserção (tabela 05) e deixadas para secar por 24 h em ambiente com umidade relativa do ar de 40% e temperatura de 20°C. Pode-se observar que pelo método de filtração, a impregnação independente da quantidade de microcápsulas ou resina já que por volta de 16% do material é efetivamente inserido na espuma.

**Tabela 05 – Peso das amostras de PU antes e depois da inserção de microcápsulas através de filtração**

Amostra	Peso antes da inserção (g)	Peso depois da inserção (g)	$\Delta m$	Retido (%)
1 <i>Aplicação apenas de 2,5g resina</i>	4,829	5,265	0,436	17,4
2 <i>Aplicação de 4g de microcápsulas com 2,5g resina</i>	4,362	5,410	1,048	16,1
3 <i>Aplicação de 8g de microcápsulas com 2,5g resina</i>	5,139	6,864	1,725	16,4

As espumas impregnadas foram analisadas visualmente através das imagens geradas por MEV. Na figura 49 pode-se visualizar a impregnação da espuma com 4g de microcápsulas, onde (A) é relativo a posição em que a imagem foi gerada, (B) uma visão geral da distribuição das microcápsulas na espuma e (C) um aumento mostrando detalhes das partículas. Esse esquema é seguido por todas as imagens.

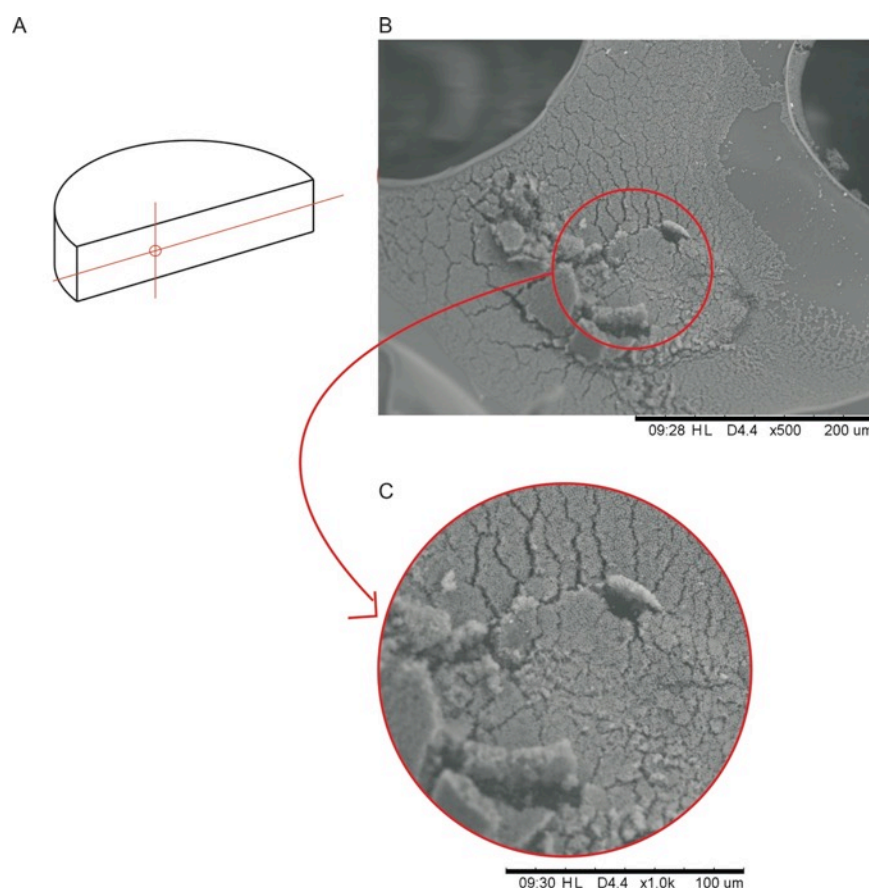
**Figura 49 – Microscopia da espuma com a inserção de 4g de microcápsulas mostrando sua distribuição pela estrutura da espuma com aumento de 180X(B) e 1.200X(C) e potência 15kV**



As imagens de MEV mostram que as microcápsulas penetraram na estrutura celular da espuma. As microcápsulas ficaram ancoradas na superfície das paredes da espuma, deixando os poros livres. Esse fato é desejável, pois os poros ajudam na dissipação do calor, como visto no capítulo 2. Assim, não é desejável que os poros sejam preenchidos com microcápsulas. A figura 49C mostra que as microcápsulas ficam agrupadas, muito devido à resina para fixação, como já abordado por Rossi (2012).

A figura 50, por sua vez, mostra a inserção de 8g de microcápsulas na estrutura da espuma.

**Figura 50 – Microscopia da espuma com a inserção de 8g de microcápsulas mostrando sua distribuição pela estrutura da espuma com aumento de 500X(A) e 1.000(X) e potência 15kV**



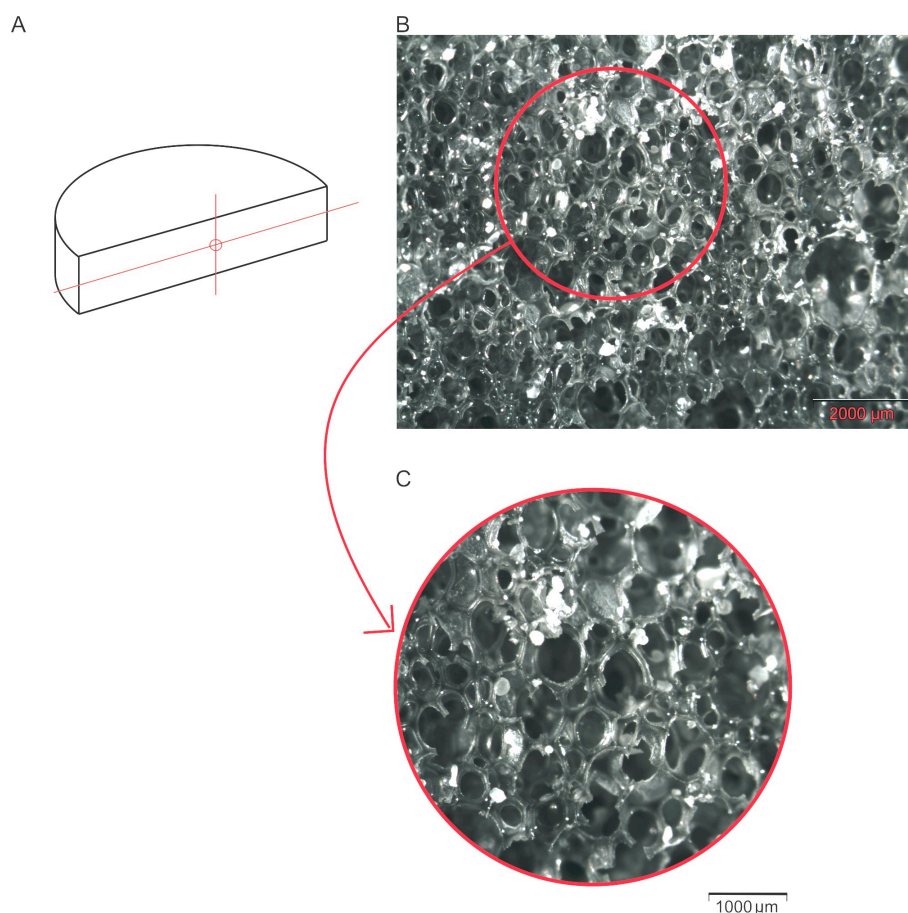
Pode-se ver que, mesmo com o aumento da quantidade de microcápsulas, elas se comportam de forma similar à inserção de 4g. Em comparação aos testes iniciais realizados anteriormente na fase exploratória, sem o uso de resina, pode-se



notar que a maior diferença é um aumento na quantidade de microcápsulas. A resina ajuda a fixar as microcápsulas na estrutura da espuma, aumentando sua quantidade.

Para descobrir o quanto as microcápsulas penetraram nas espumas, foi realizado uma análise da distribuição através do MO, pois este equipamento fornece uma visão de uma área mais ampla, e os grupos de microcápsulas agregados com a resina podem ser detectados modificando o contraste do MO. Para tanto, as espumas impregnadas foram fatiadas e observadas de vários pontos (porção central, porção intermediária e porção externa). Foi visto que todos os pontos possuíam microcápsulas, variando a quantidade dependendo da aplicação (4g ou 8g). A distribuição de 4g de microcápsulas pode ser visualizada na figura 51.

**Figura 51 – Microscopia óptica da espuma com a inserção de 4g microcápsulas mostrando a distribuição das microcápsulas pela estrutura da espuma com aumento de 50X (B) e 100X(C)**



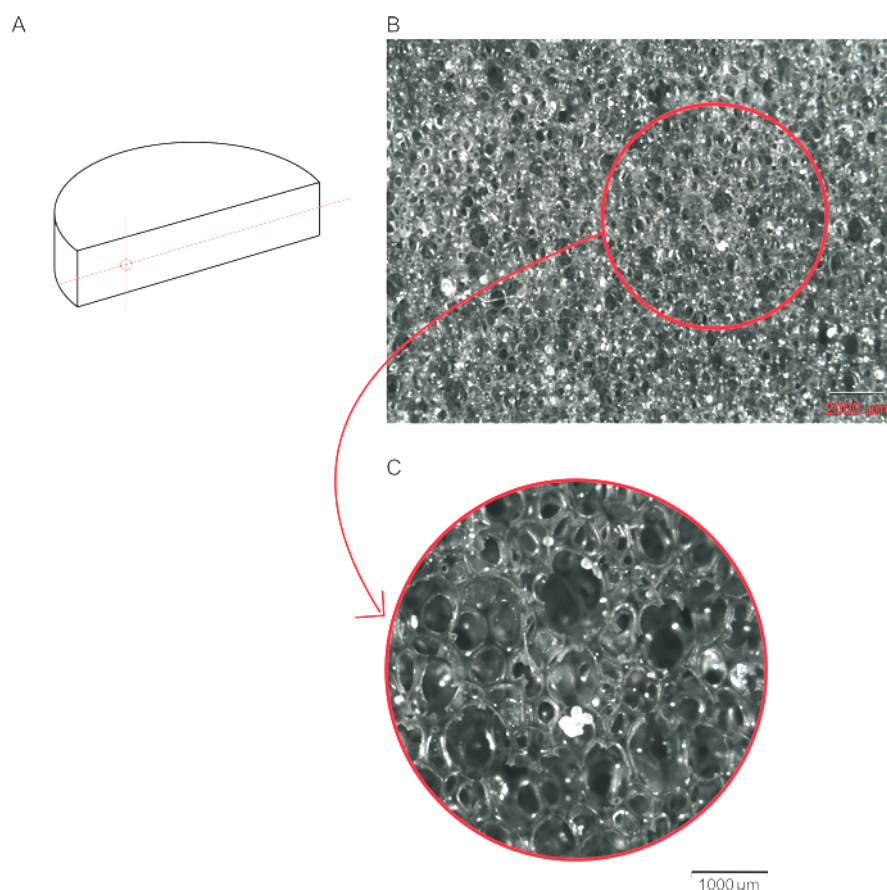
A figura 51A mostra a porção em que os grupos de partículas se concentram. Na figura 51B observa-se a imagem realizada com o microscópio óptico, onde os



pontos em branco são representativos da resina que agrupa as microcápsulas. A figura 51C apresenta uma aproximação de uma das áreas da espuma, que pode-se ver as microcápsulas ancoradas nos poros da espuma. Esta análise prova que o método a vácuo pode ser utilizado sem pressões altas para as espumas de PU, e que as mesmas se infiltram com facilidade no material.

A figura 52 mostra a distribuição de 8g de microcápsulas na espuma. É possível perceber que há um aumento, mesmo que pequeno, na quantidade de grupos de microcápsulas que estão ancorados na espuma.

**Figura 52 – Microscopia óptica da espuma com a inserção de 8g microcápsulas mostrando a distribuição das microcápsulas pela estrutura da espuma com aumento de 50X (B) e 100X(C)**



Os poros abertos da espuma facilitam a inserção das microcápsulas com esse método, e as partículas ficam apenas ancoradas na espuma. O tempo de inserção da filtração levou em média 4-5 min, o que é um ganho frente às 12h que o processo por impregnação leva. No entanto, ainda ocorre muito desperdício de material, já que o líquido com as microcápsulas passa pela estrutura da espuma e nem todas as microcápsulas são fixadas na estrutura celular do material. Levando

esses dados em conta, partiu-se para a exploração de outros métodos de inserção que desperdiçassem menos material, indo ao encontro do objetivo proposto.

#### **4.2.2 Inserção das microcápsulas da Rota A com o método de aerografia nas espumas de PU**

Segundo Azizi, Chevalier e Majdoub (2014), as microcápsulas podem ser aplicadas através de estamperia, tingimento por exaustão, impregnação, revestimentos e alguns tipos de *sprays*. Além disso, as microcápsulas podem ser aplicadas diretamente na matriz dos materiais, quanto isso é viável, sem modificar sua cor e toque. Ao que tange o método de aplicação por *spray*, os estudos mais comuns são na área de nano-pesticidas, como o de Ferreira, Vendramim e Forim (2012).

Há uma patente de Schade, Baggerly e Woods (1978), que relata a aplicação de microcápsulas com núcleo de peptídeos em comidas por revestimento utilizando um tipo de pistola. Como foi visto por estudos já realizados, pode-se dizer que as aplicações com *spray* e pistolas normalmente servem como revestimento, ou seja, são apenas aplicações superficiais. No entanto, há a questão da estrutura do substrato que está recebendo a aplicação. No caso das espumas, que possuem poros grandes (de 212  $\mu\text{m}$  a 510  $\mu\text{m}$ ) e abertos, esse método poderia ser útil, já que a estrutura do material facilita a inserção das microcápsulas.

Considerando os estudos citados, o método testado foi baseado nos estudos de Ferreira, Vendramim e Forim (2012) e Schade, Baggerly e Woods (1978), nos quais é utilizado uma pistola com um compressor para expelir as microcápsulas por um bico. Esse método foi escolhido já que insere as partículas diretamente no material, com menor desperdício do que o método por impregnação. A estamperia e o tingimento (*Opus citatum*), mesmo tendo aplicação direta na superfície do material, foram descartados por não utilizarem pressão, o que dificultaria a inserção das microcápsulas além da superfície.

As inserções se seguiram com a aplicação das microcápsulas diretamente na espuma, com uma solução nas mesmas proporções que a realizada com a filtração. As amostras foram pesadas antes e depois da aerografia, sendo que o aumento de peso observado foi maior do que às inserções com filtração. Pode-se dizer com isso que as amostras geradas com aerografia possuem maior quantidade de

microcápsulas do que as geradas com filtração, dada a quantidade de material retido, que variou de 58 a 92%. Os pesos das espumas com a técnica de aerografia e microcápsulas obtidas na Rota A podem ser vistos na tabela 06.

**Tabela 06 – Peso das amostras de PU antes e depois da inserção de microcápsulas através de aerografia**

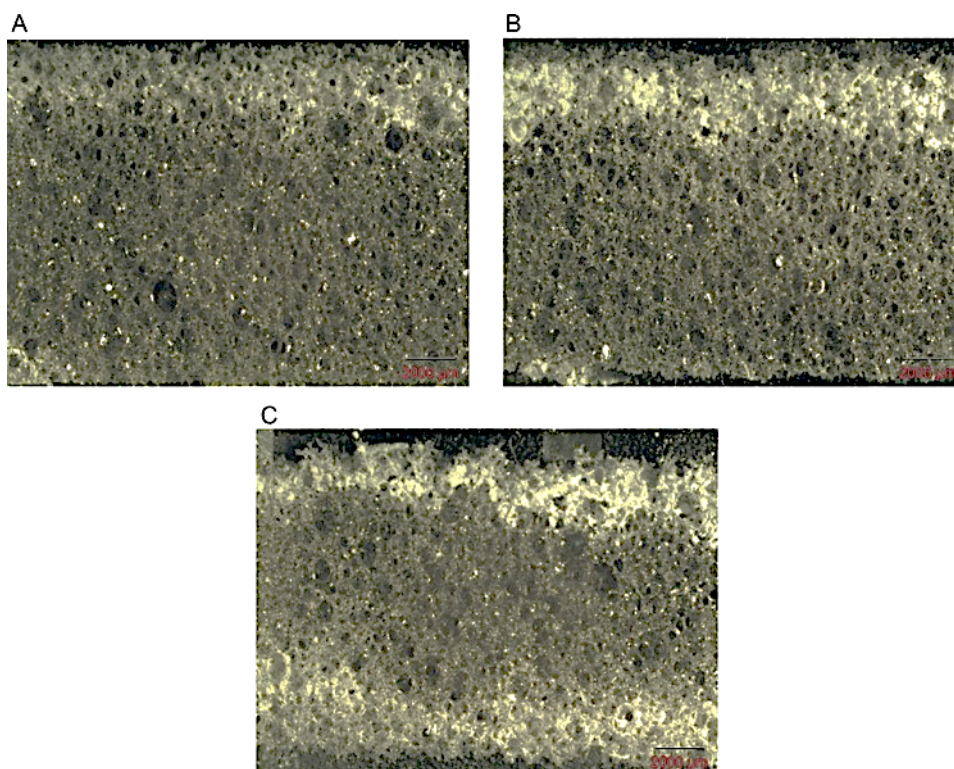
<b>Amostra</b>	<b>Peso antes da inserção (g)</b>	<b>Peso depois da inserção (g)</b>	<b><math>\Delta m</math></b>	<b>Retido (%)</b>
4 <i>Aplicação apenas de 2,5g resina com aerografia</i>	4,206	5,953	1,747	70
5 <i>Aplicação de 4g de microcápsulas com 2,5g resina</i>	5,518	11,497	5,979	92
6 <i>Aplicação de 8g de microcápsulas com 2,5g resina</i>	5,116	11,983	6,867	65,4
9 <i>Aplicação de 8g de microcápsulas, aplicadas bilateralmente, 4g em cada lado com 2,5g resina</i>	5,715	13,295	7,58	58,3

Notou-se que a aerografia distribuía as microcápsulas de forma uniforme, no entanto, as micropartículas não penetravam ao longo da espuma, concentrando-se na porção superior da espuma. As amostras, que possuem espessura de 1 cm, foram caracterizadas imagens de MO. Pode-se observar que as microcápsulas ocupam a 1/3 da espuma, como é mostrado na figura 53. Há uma grande diferença nas aplicações com 4 g e 8 g (figuras 53A e 53B, respectivamente). É possível afirmar que há uma concentração maior na espuma na qual foram aplicados 8g de microcápsulas, comprovando que a aerografia possui um melhor aproveitamento de material do que a filtração.

Com a intenção de aumentar a penetração mais na espuma, 8 g de microcápsulas foram aplicadas bilateralmente, ou seja, foram aplicados 4 g na parte superior, a espuma foi virada, e 4 g foram aplicados na parte posterior. O resultado desse processo pode-se perceber na figura 51C. Nota-se que as microcápsulas foram distribuídas ocupando 2/3 da espuma; no entanto, ainda não há penetração por toda a espuma. A pressão utilizada foi de 43 psi. No entanto, mesmo a espuma possuindo poros muitíssimo maiores do que as microcápsulas, estes não são

alinhados e simétricos, constituindo barreiras que impedem que as microcápsulas penetrem por toda a espuma. Esta pode ser a possível explicação pela qual as microcápsulas não penetraram até o centro da amostra.

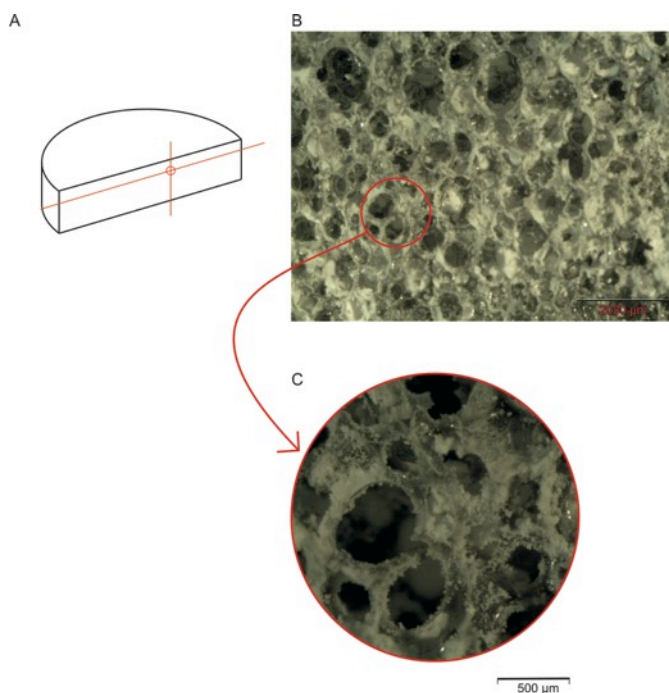
**Figura 53 – Microscopia óptica das espumas com microcápsulas mostrando a distribuição pela estrutura da espuma com o método de aerografia com aumento de 10X (A, B e C)**



**Notas: (A) Espumas com a inserção de 4g de microcápsulas; (B) Espumas com a inserção de 8g de microcápsulas; (C) Espumas com a inserção de 8g de microcápsulas, aplicadas bilateralmente, com 4g em cada lado.**

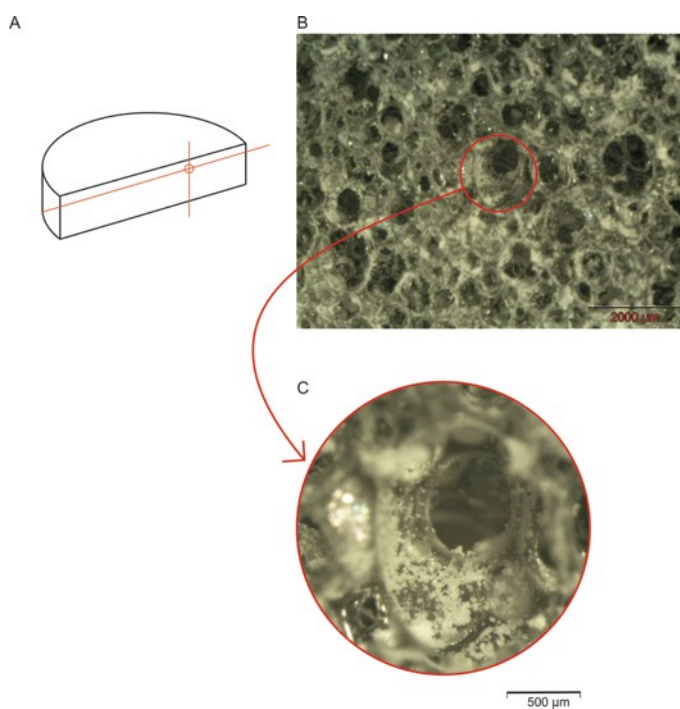
Para caracterizar as espumas, também foram geradas imagens de MO e MEV para cada aplicação (8g, 4g e 8g bilateral). A figura 54 mostra a imagem de MO para a espuma com aplicação de 4g através da aerografia. Nestas imagens é possível notar com mais clareza o efeito da resina do que se comparadas com as imagens geradas com o método de filtração. Observa-se uma “névoa” branca pela espuma, que tem o efeito de fixar as microcápsulas na estrutura da espuma. Nota-se também, na figura 54C, que a resina não preenche os poros, sendo este efeito desejado, como explicado no subitem anterior.

**Figura 54 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 4g de microcápsulas mostrando a distribuição pela espuma com o método de aerografia com aumento de 50X (B) e 100X (C)**



A figura 55 mostra a imagem gerada em MO para a inserção de 8g de microcápsulas na espuma.

**Figura 55 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas mostrando a distribuição pela espuma com o método de aerografia com aumento de 50X (B) e 100X (C)**

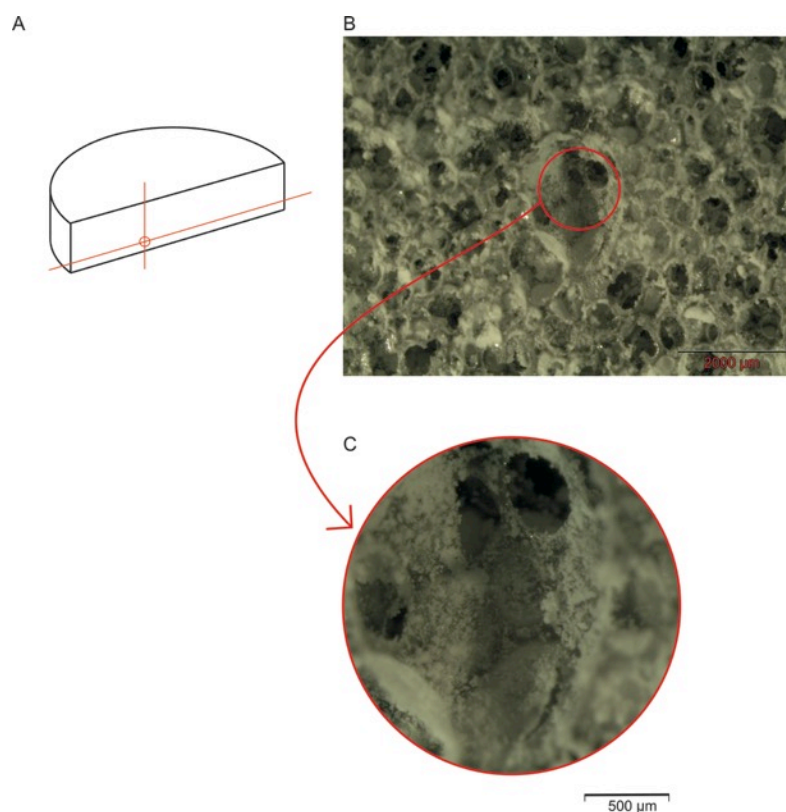




Em comparação à imagem 54, observa-se um maior acúmulo de material, como pode ser visto na ampliação (figura 55C). Esse efeito é esperado ao passo que a quantidade de microcápsulas foi dobrada.

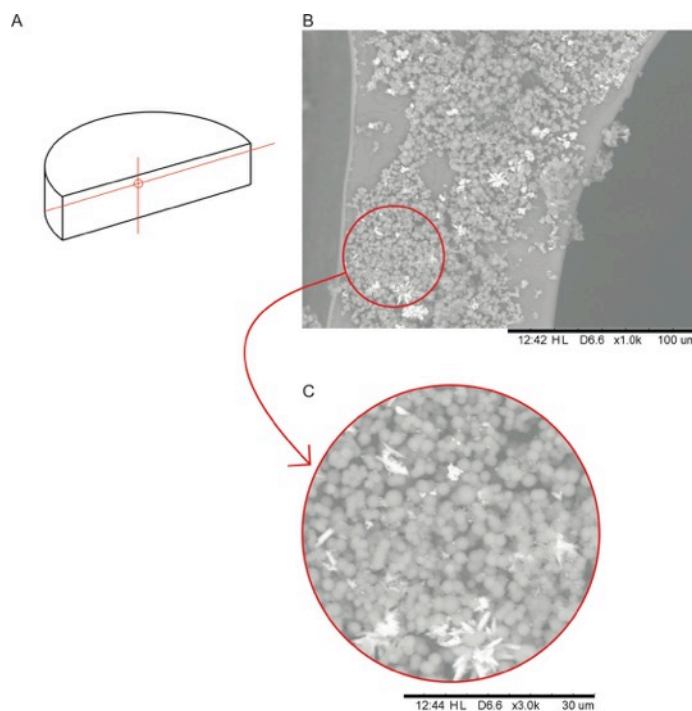
Na figura 56 pode-se visualizar a espuma com 8g de microcápsulas aplicadas bilateralmente. Nota-se um efeito similar da espuma com a inserção de 4g de microcápsulas em apenas um lado, o que era o esperado, já que os 8g foram aplicados divididos.

**Figura 56 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas aplicadas bilateralmente mostrando a distribuição pela espuma com o método de aerografia com aumento de 50X (B) e 100X (C)**



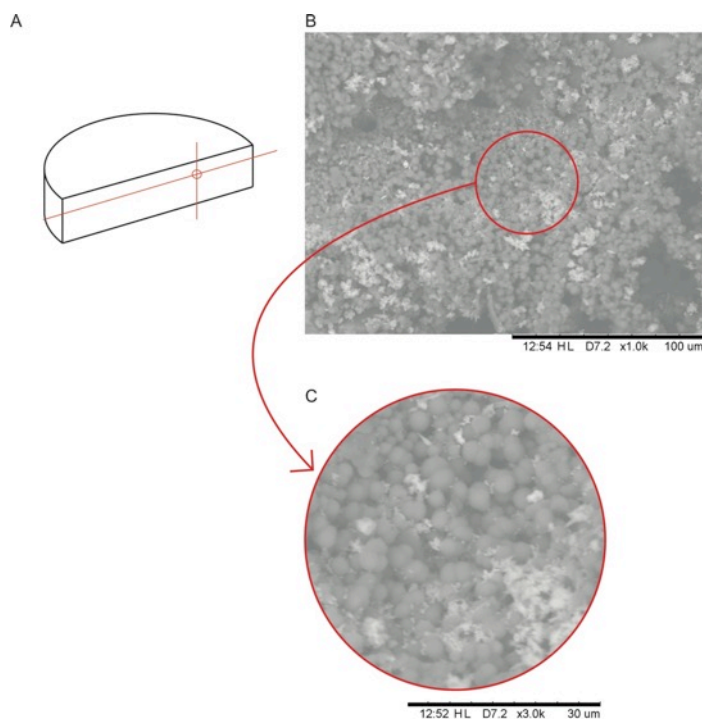
A figura 57 mostra a imagem gerada no MEV para a espuma de 4g com aplicação de aerógrafo. Na figura 57A pode-se visualizar a parede da espuma com as microcápsulas ancoradas na sua estrutura. Na figura 57C, pode-se ver com maior ampliação a resina entre as microcápsulas, representadas pelas pequenas estrias com tonalidade mais clara. Também é observado que a resina, mesmo espalhando-se pela a espuma como visto na imagem de MO, forma alguns grumos.

**Figura 57 – Microscopia da espuma com inserção de 4g de microcápsulas mostrando sua distribuição com aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



A figura 58 mostra a imagem gerada no MEV para a espuma com 8g de microcápsulas.

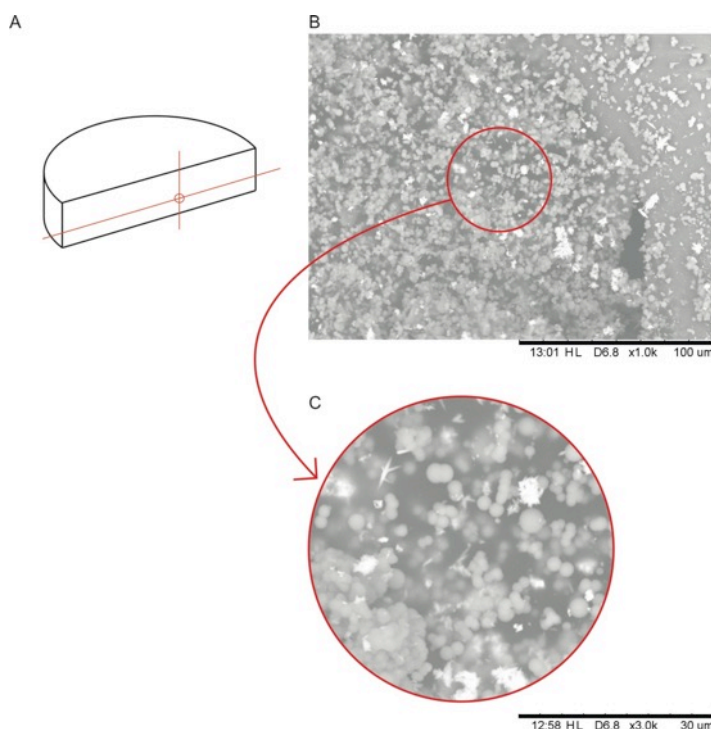
**Figura 58 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas mostrando sua distribuição com aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



Essa A figura 58A comprova o que foi visualizado na imagem de MO, que as microcápsulas estão em maior quantidade na espuma, sobrepondo-se. Esse efeito pode ser melhor observado na ampliação da imagem 58C.

A figura 59 apresenta a imagem gerada por MEV para a espuma com a aplicação bilateral das 8g de microcápsulas. Com uma maior ampliação comprova-se que a distribuição das microcápsulas está semelhante à aplicação de 4g de microcápsulas, porém, em ambos os lados da espuma (superior e inferior). No subitem 4.4, análise das termografias, o efeito termorregulador resultante dessa aplicação em comparação às outras será detalhado.

**Figura 59 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas aplicadas bilateralmente mostrando a distribuição pela estrutura da espuma com o método de aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



A aerografia mostrou uma redução do tempo de aplicação – menor do que um minuto – em comparação à filtração. Também, uma quantidade menor de material é desperdiçada, já que o jato é direcionado para a espuma. No entanto, há um desperdício de material, já que o leque da pistola é de 180-260mm, sendo ajustado para essas aplicações na proporção mínima (180mm), sendo ainda maior do que a amostra (100mm).



### 4.2.3 Inserção das microcápsulas da Rota D com o método de aerografia nas espumas de PU

Devido aos bons resultados da aerografia quanto ao tempo de aplicação e ao aproveitamento de material, combinado com os resultados positivos das termografias (que serão detalhados no item 4.4), apenas a técnica de aerografia foi selecionada para a inserção das microcápsulas da Rota D nas espumas.

As amostras de espuma de PU geradas foram pesadas antes e depois da inserção das microcápsulas (tabela 07). Pode-se dizer que os pesos vão ao encontro do que foi notado na primeira inserção feita com essa técnica ao ser comparada com a técnica de filtração, ou seja, há um ganho maior de massa nas amostras. No entanto, é observado que uma menor quantidade de material é retido na amostra. Este fato pode ser associado às microcápsulas da Rota D estarem acumuladas em grupos, o que dificulta sua inserção.

**Tabela 07 – Peso das amostras de PU antes e depois da inserção de microcápsulas obtidas na Rota D através de aerografia**

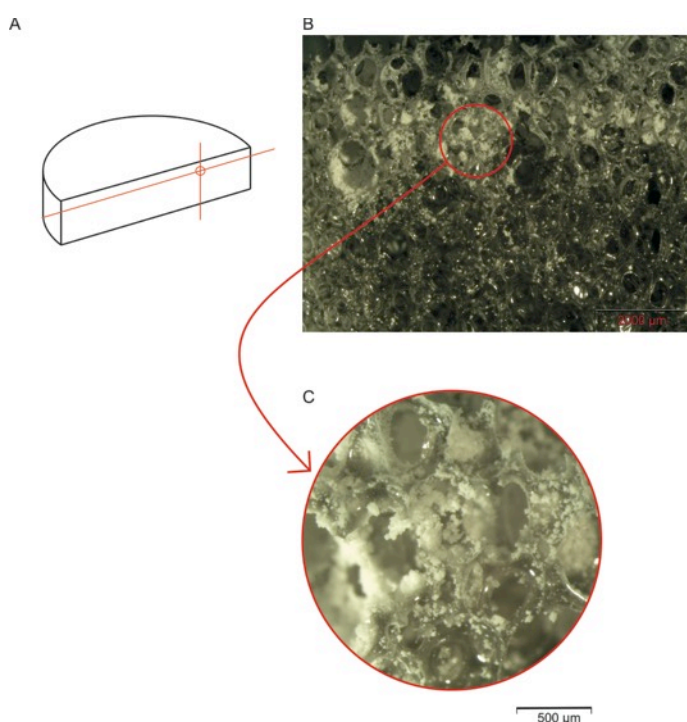
<b>Amostra</b>	<b>Peso antes da inserção (g)</b>	<b>Peso depois da inserção (g)</b>	<b><math>\Delta m</math></b>	<b>Retido (%)</b>
7 <i>Aplicação de 4g de microcápsulas com 2,5g resina</i>	6,016	9,047	3,031	46,6
8 <i>Aplicação de 8g de microcápsulas com 2,5g resina</i>	5,435	11,356	5,921	56,4
10 <i>Aplicação de 8g de microcápsulas, aplicadas bilateralmente, 4g em cada lado com 2,5g resina</i>	5,393	10,491	5,098	39,2

Durante as inserções com a aerografia, notou-se uma maior dificuldade de vasão do material pelo bico da pistola, que possui 1,4mm de diâmetro. Nas imagens geradas por MEV para as microcápsulas obtidas na Rota D notou-se grumos de partículas. Para as aplicações, essas microcápsulas foram peneiradas manualmente em uma peneira comum, justamente para tentar desfazer esses grumos. No entanto, considerou-se que, após as aplicações, essa peneiração não foi o suficiente. O resultado, em algumas amostras, foi o entupimento do bico do jato, que teve que ser

limpo e a aplicação reiniciada a partir do zero para não afetar a produção da amostra.

Para comparar com o efeito gerado com as microcápsulas obtidas na Rota A, todas amostras foram caracterizadas através de MO e MEV. A figura 60 mostra a inserção de 4g de microcápsulas obtidas na Rota D nas amostras das espumas de PU.

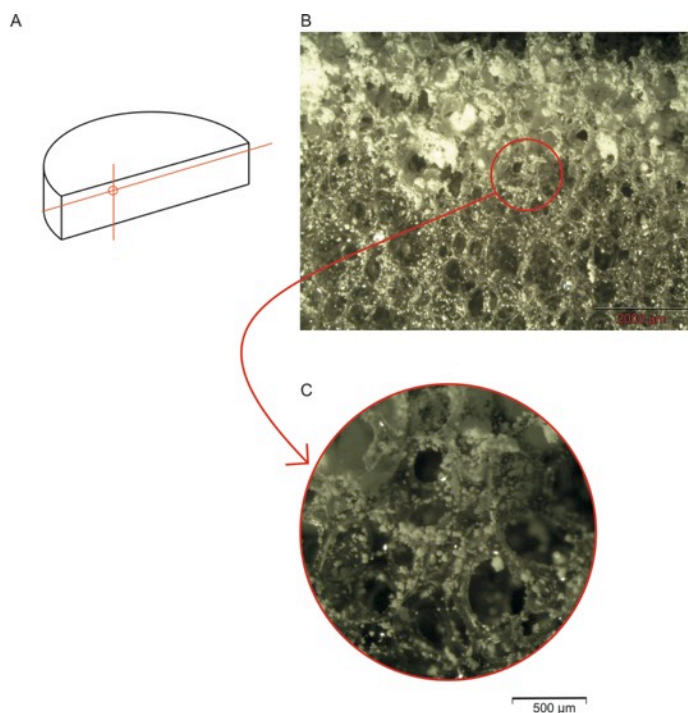
**Figura 60 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia a aumentos de 50X (B) e 100X (C)**



Como nas amostras com inserção de 4g de microcápsulas obtidas na Rota A, as microcápsulas da Rota D mantiveram-se na superfície. Assim, não importando o tipo de microcápsula, a distribuição permaneceu similar, concentrando-se na face na qual as partículas foram diretamente aplicadas.

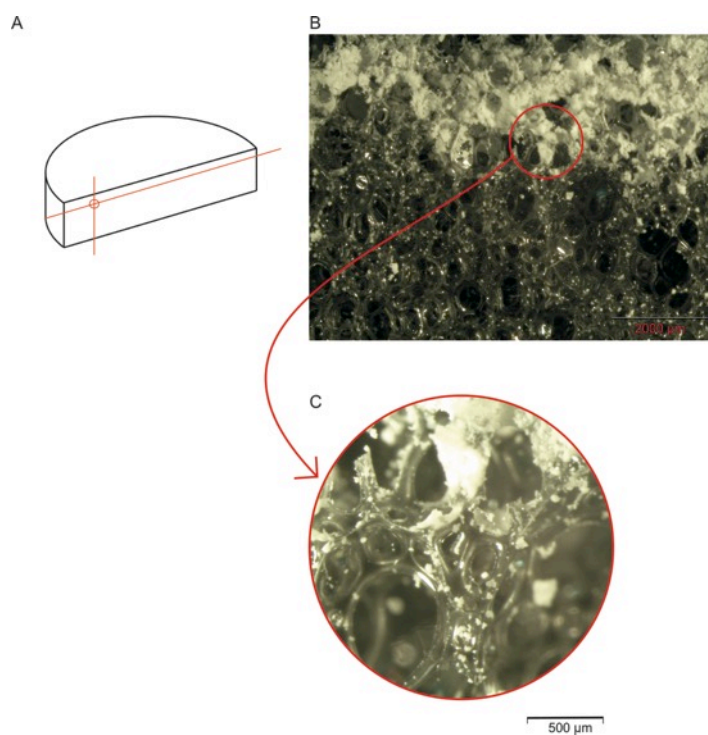
A figura 61 mostra a imagem gerada por MO da amostra com 8g de microcápsulas obtidas na Rota D. Mais uma vez, a imagem é muito similar ao efeito geral da espuma com microcápsulas obtidas na Rota A, também o que tange a distribuição da resina.

**Figura 61 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia a aumentos de 50X (B) e 100X (C)**



Foi obtida a imagem por MO da amostra de espuma com 8g de microcápsulas aplicadas bilateralmente na espuma, apresentado na figura 62.

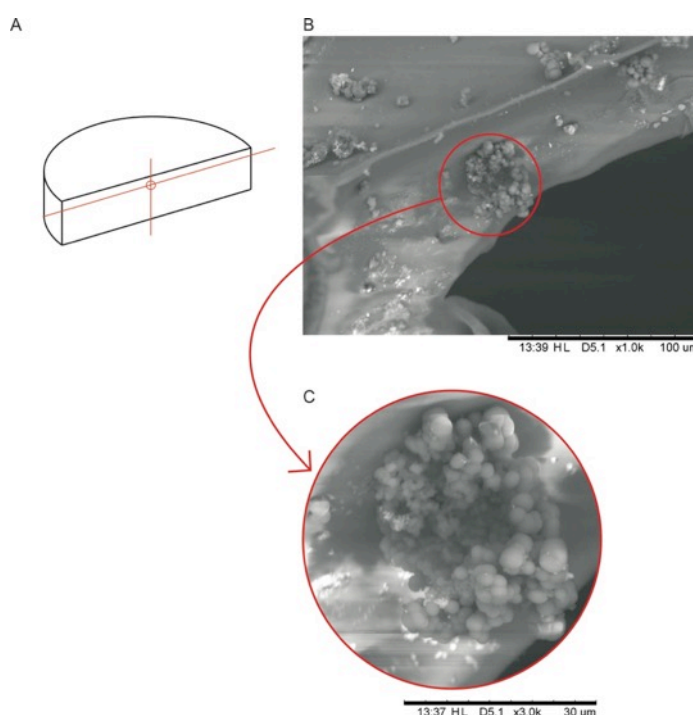
**Figura 62 – Microscopia óptica da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D aplicadas bilateralmente mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia a aumentos de 50X (B) e 100X (C)**



Mais uma vez é visto que o efeito geral de distribuição é bastante similar ao das aplicações das microcápsulas obtidas na Rota A. Com os aumentos disponíveis neste equipamento, não é possível visualizar grupos de microcápsulas, o que faz necessário realizar uma imagem de MEV com maior ampliação.

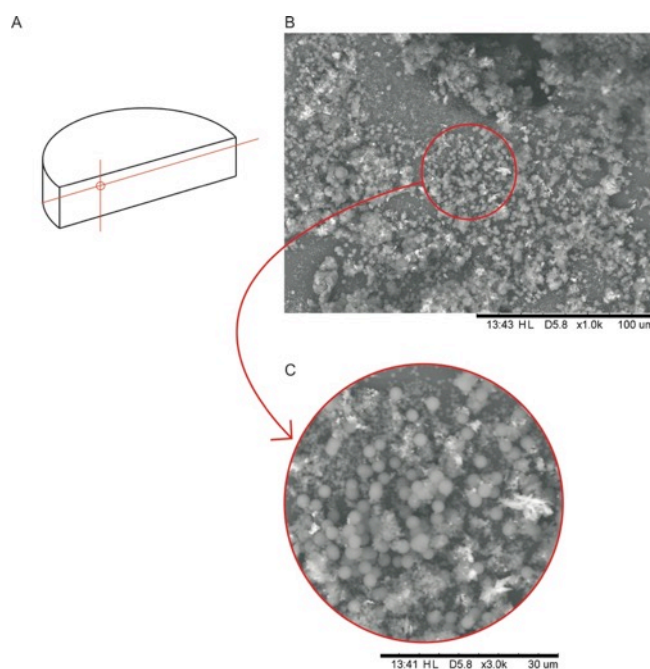
Na figura 63 pode-se visualizar a imagem gerada por MEV para a espuma com 4g de microcápsulas obtidas na Rota D. Pode-se observar um maior acúmulo das partículas, diferentemente das microcápsulas obtidas na Rota A, que se espalharam mais uniformemente pelo material.

**Figura 63 – Microscopia da espuma com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



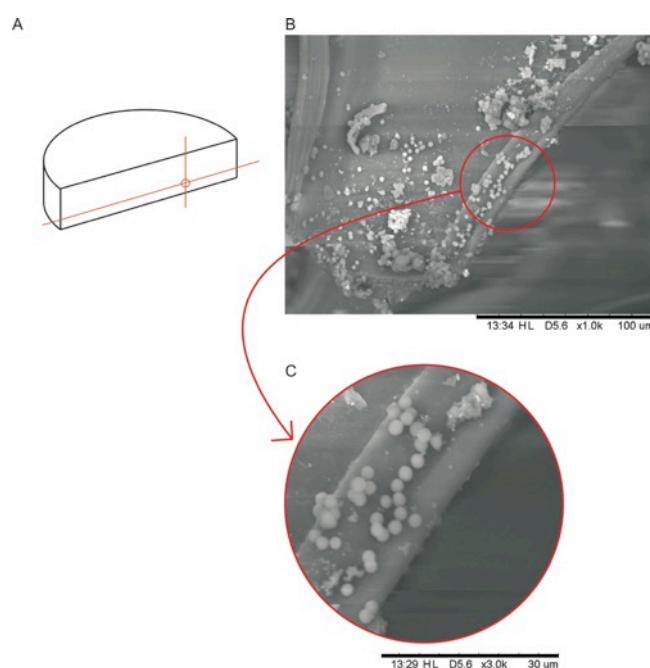
O aumento da quantidade de microcápsulas para 8g possui reflexo nas imagens obtidas por MEV, e este pode ser visualizado na figura 64. Mesmo com o aumento, ainda observa-se os grupos de microcápsulas acumulados nas paredes da estrutura da espuma (Figuras 64B e 64C).

**Figura 64 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



A figura 65 mostra a imagem gerada por MEV para a espuma com 8g de microcápsulas obtidas na Rota D aplicadas bilateralmente.

**Figura 65 – Microscopia da espuma com inserção de 8g de microcápsulas Rota D aplicadas bilateralmente mostrando sua distribuição pela espuma com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



A figura 65A e 65B mostram um efeito bastante similar ao observado nas outras imagens obtidas por MEV, nas quais as microcápsulas se acumulam em pequenos grupos na superfície. Pela divisão da quantidade de partículas em 4g em cada lado, o efeito é ainda mais similar, não mostrando as partículas tão acumuladas quanto na figura 64.

Quanto à distribuição, pode-se dizer que ambas as microcápsulas das Rotas A e D mostram resultados similares. A grande diferença, como dito anteriormente, foi a formação de grumos de microcápsulas na superfícies. O efeito desse aspecto na termorregulação do material é discutido no item 4.4, análise das termografias. Seguiu-se com a inserção das microcápsulas das Rotas A e D nos tecidos, detalhada no item 4.3.

#### 4.3 INSERÇÃO DAS MICROCÁPSULAS NOS TECIDOS

Ao início da pesquisa, as microcápsulas seriam aplicadas apenas na espuma do assento. No entanto, após a revisão de literatura, foi visto que um dos fatores determinantes no microclima do assento é a junção da espuma e do tecido. (FAZLOLLAHTABAR, 2010). Assim, o efeito termorregulador do assento depende da interação entre o tecido e a espuma. (KOLICH, 2008). Segundo Nicholson (1999), a superfície na qual o usuário está em contato possui um importante papel na dissipação do calor e da umidade para longe da pele e, também, para manter o microclima fisiológico da pele.

Cengiz e Balbalik (2009) afirmam que um dos principais determinantes do conforto térmico em assentos é material de cobertura. Um material que recobre o assento da cadeira de rodas deve ser resistente à degradação ultravioleta e abrasão, durável, e também ser respirável e umidade transporte. O material mais utilizado para a cobertura de assentos de cadeiras de rodas é o tecido 100% PET, com uma camada de 1mm de espuma de PU flexível. No entanto, ao levar em conta o conforto térmico, esses materiais não são ideais, pois devido as suas fibras sintéticas, dificultam a dissipação do calor. Por isso, foi escolhido um tecido que mistura o PET, para dar resistência, e algodão, que ajuda a dissipar o calor e absorver o suor.

Para os testes com os tecidos foi utilizada apenas a técnica de aerografia devido aos resultados anteriores quanto a sua boa eficiência em relação ao uso dos materiais e que, pela espessura dos tecidos, a camada aplicada é superficial. Foram inseridas microcápsulas obtidas nas Rotas A e D para verificar sua distribuição no tecido e se esta poderia afetar o efeito termorregulador do material. Também foi deixada uma amostra sem inserir microcápsulas para base de comparação. Todas as amostras foram aplicadas com uso de resinas fixadoras, assim como provado como eficaz para fixação em estudos anteriores. (ROSSI, 2012, CRUZ et al., 2011).

As microcápsulas foram dispersadas em 45 mL de água DI com 1,5 g de resina fixadora. Todas as amostras de tecidos foram pesadas antes e depois da inserção das microcápsulas e suas massas podem ser visualizadas na tabela 8. Nota-se que o material retido no caso dos tecidos foi influenciado pela quantidade de microcápsulas aplicadas.

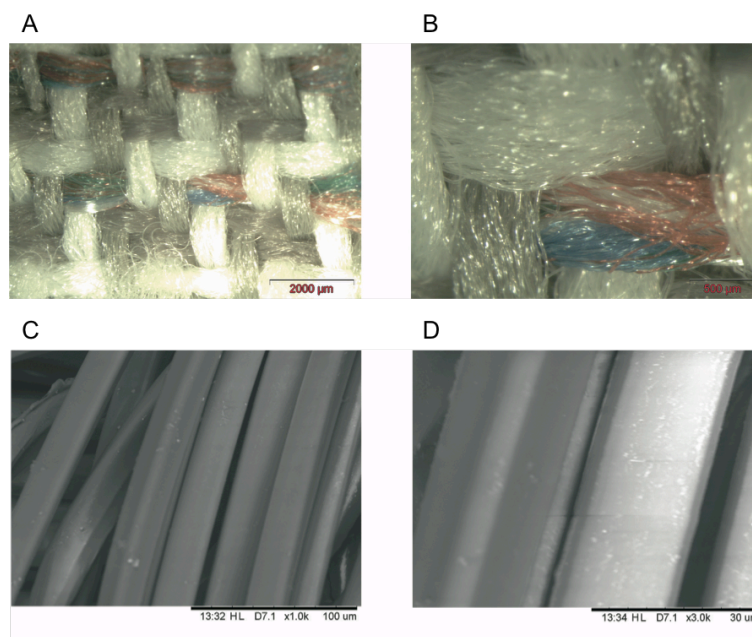
**Tabela 08 – Peso das amostras de tecidos antes e depois da inserção de microcápsulas obtidas na Rota A e D através de aerografia**

<b>Amostra</b>	<b>Peso antes da inserção (g)</b>	<b>Peso depois da inserção (g)</b>	<b><math>\Delta m</math></b>	<b>Retido (%)</b>
12 <i>Aplicação de 2g de microcápsulas obtidas na Rota A com 1,5g resina</i>	2,616	3,237	0,621	17,7
13 <i>Aplicação de 4g de microcápsulas obtidas na Rota A com 1,5g resina</i>	2,659	4,572	1,913	34,8
14 <i>Aplicação de 2g de microcápsulas obtidas na Rota D com 1,5g resina</i>	2,659	3,516	0,857	24,5
15 <i>Aplicação de 4g de microcápsulas obtidas na Rota D com 1,5g resina</i>	2,597	4,553	1,956	35,6

Todas as amostras foram analisadas através de imagens geradas através de MO e MEV. Para base de comparação, foram realizadas imagens com os mesmos equipamentos do tecido sem a inserção de microcápsulas. A figura 66 mostra os tecidos sem microcápsulas na sua estrutura, sendo as figuras 66A e 66B imagens geradas por MO, e as figuras 66C e 66D, imagens geradas por MEV.



**Figura 66 – Microscopia óptica e de varredura do tecido mostrando sua estrutura sem a inserção de microcápsulas**



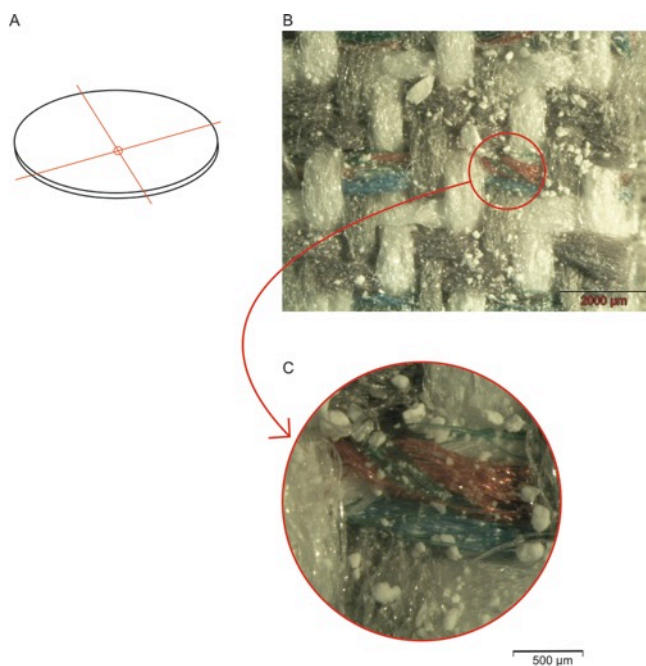
**Notas: (A) MO 50X; (B) MO 100X; (C) 1.000X com potencia 15kV; (D) 3.000X com potencia 15kV.**

As microcápsulas obtidas a Rota A foram inseridas nas amostras de tecido com 10cm de diâmetro e 1mm de espessura nas quantidades de 2g e 4g, devido à proporção da espessura em relação às amostras de espuma. Também devido à espessura das amostras, as imagens foram geradas da parte superior da trama, em diferentes locais da amostra. As figuras relativas a “A” mostram os locais onde foram geradas as imagens apresentadas.

A figura 67 mostra a imagem obtida por MO do tecido com 2g de microcápsulas inseridas. Com as ampliações geradas é possível notar o acúmulo da resina em certos pontos da trama do tecido.

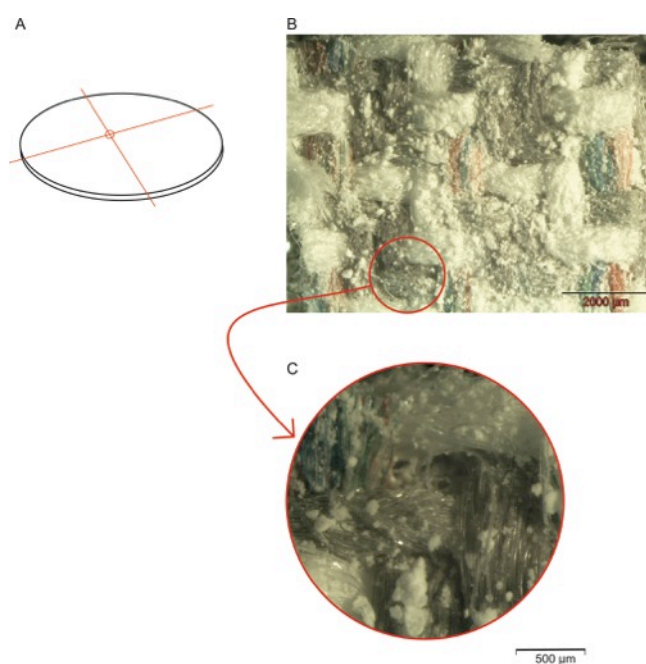


**Figura 67 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C)**



A figura 68 mostra a imagem obtida em MO para a inserção de 4g de microcápsulas obtidas na Rota a no tecido.

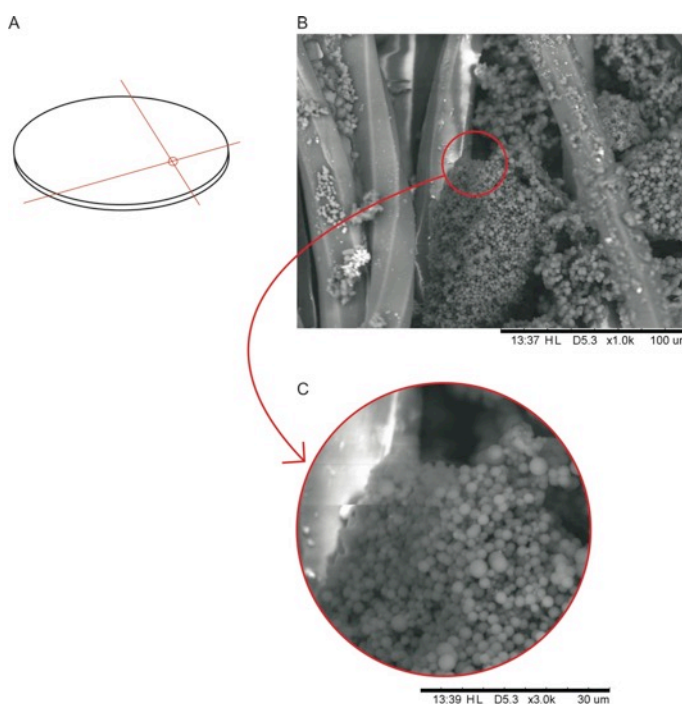
**Figura 68 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C)**



A aplicação de 4g de microcápsulas no tecido apresentou uma imagem gerada por MO bastante similar a de 2g, na qual é possível observar a resina distribuída pela superfície dos fios com pequenos acúmulos em locais específicos. Mesmo com isso, notou-se que o material foi distribuído igualmente pela superfície do tecido.

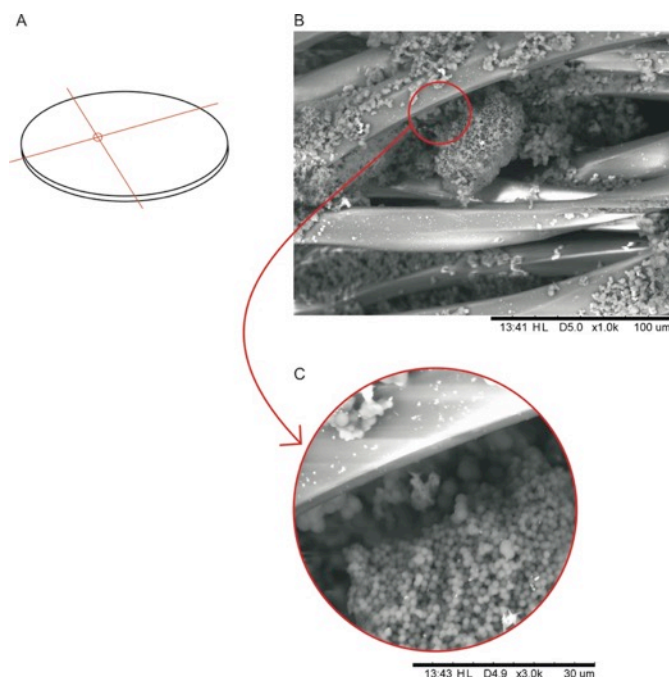
A imagem gerada através de MEV do tecido com 2g de microcápsulas aplicadas pode ser visualizada na figura 69. Nota-se que as partículas foram inseridas entre os fios da trama do tecido, acumulando-se em pequenos grupos, como é exemplificado na figura 67C.

**Figura 69 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



A figura 70 mostra a imagem gerada através de MEV para a aplicação de 4g de microcápsulas na superfície do tecido. Como para as 2g, as microcápsulas aderiram aos fios do tecido, inserindo-se entre eles. Também notou-se agrupamentos de microcápsulas, como na aplicação anterior, porém com um maior acúmulo de material entre a trama, sendo este esperado já que a quantidade de microcápsulas foi dobrada em volume e o meio dispersivo (água + resina) permaneceu o mesmo.

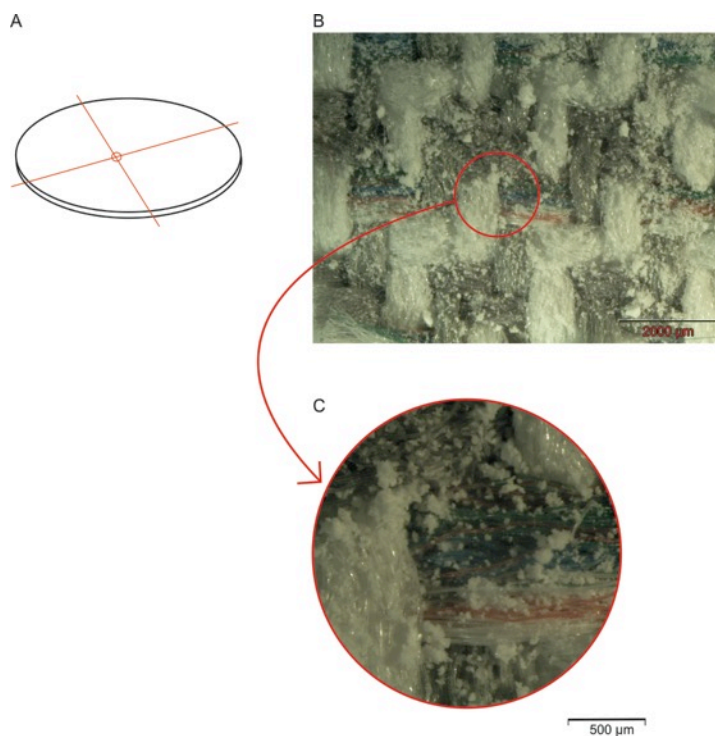
**Figura 70 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota A mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C) com potencia 15kV**



Com os testes de inserção das microcápsulas obtidas na Rota A foi possível observar que a pressão aplicada (40 psi) foi suficiente para inserir as partículas entre a trama do tecido, o que não é visto com outros tipos de aplicações superficiais, como a impressão por serigrafia. Diferentemente da espuma, notou-se pouco o efeito da resina nas imagens de MEVS, que parece estar menos aglomerada. Esse fato é atribuído à trama dos fios de PET e de algodão, que apresenta a tendência de absorção. As microcápsulas obtidas na Rota D foram então aplicadas no tecido e comparadas.

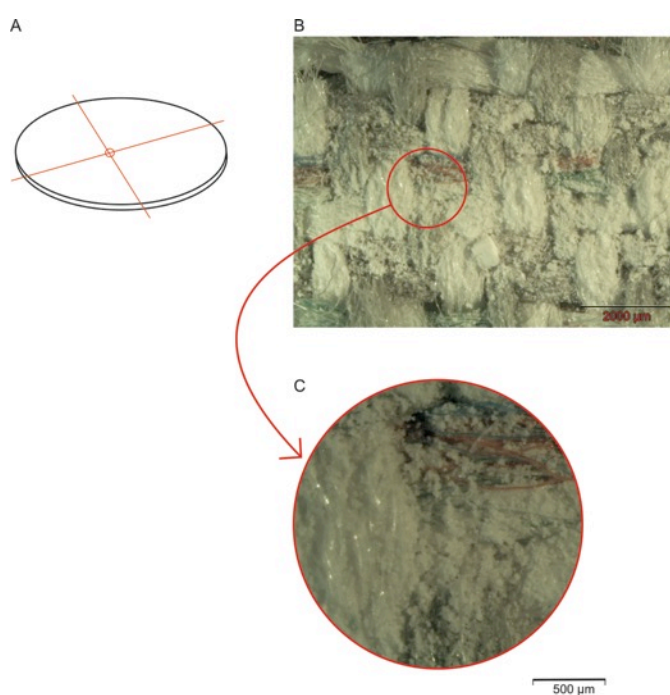
Como para as microcápsulas obtidas na Rota A, as da Rota D foram inseridas nos tecidos nas quantidades de 2g e 4g, e caracterizadas com MO e MEV. Na figura 71 pode-se visualizar a amostra de tecido com 2g de microcápsulas inseridas com aerografia. Nota-se que a aparência geral da trama é similar às amostras com microcápsulas da Rota A, com a resina distribuída por toda a trama e pequenos acúmulos.

**Figura 71 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C)**



O aspecto geral da trama do tecido com 4g de microcápsulas obtidas na Rota D pode ser visualizado Figura 72 (imagem gerada por MO).

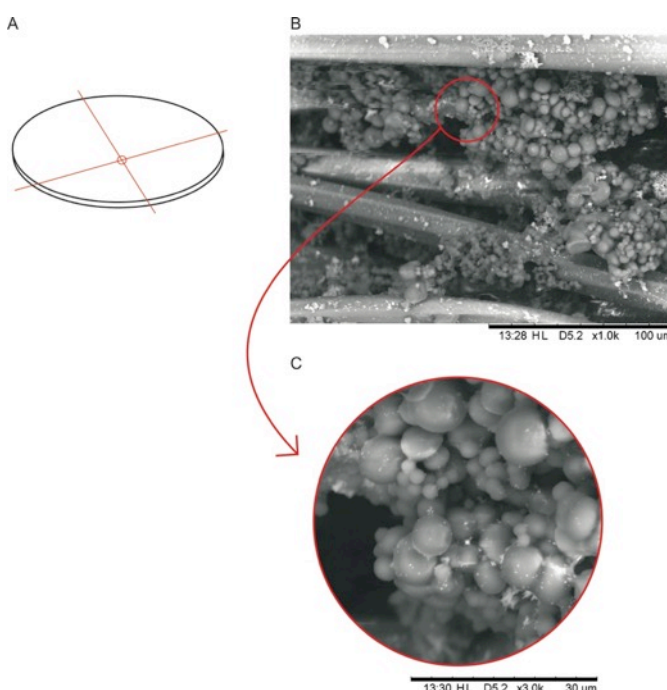
**Figura 72 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 50X (B) e 100X (C)**



Pode-se notar uma presença maior de material em comparação ao que foi observado para a espuma com as microcápsulas da rota A. Os acúmulos de resina também são identificados, assim como uma distribuição uniforme pela superfície da trama.

A figura 73 mostra a imagem gerada por MEV para o tecido com 4g de microcápsulas inseridas. Quanto à distribuição das partículas, pode-se afirmar que está bastante próxima das obtidas na Rota A. No entanto, nota-se com clareza a diferença de tamanho entre as microcápsulas obtidas na Rota D, com variação de tamanho das microcápsulas (entre 2,90  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ ). A variação de tamanho pode ser observada na figura 73C.

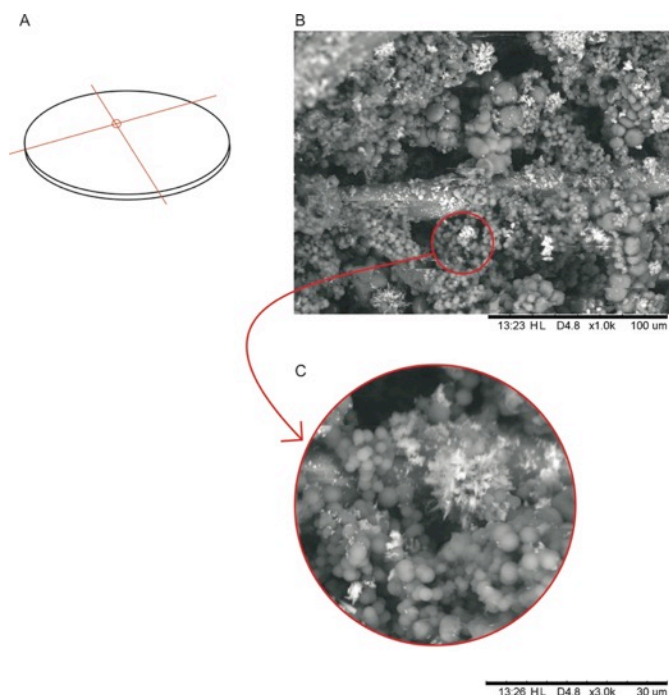
**Figura 73 – Microscopia do tecido com inserção de 2g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumentos de 1.000X(B) e 3.000X (C)**



Na figura 74 é mostrada a imagem gerada por MEV do tecido com 4g das microcápsulas obtidas na Rota D. Há uma maior quantidade de microcápsulas se comparadas a todas as amostras anteriores (o que foi notado em diferentes regiões onde a trama foi observada). Ao comparar com a mesma quantidade de microcápsulas da Rota A, pode-se afirmar que este fato é explicado pelo tamanho das partículas, que devido ao surfactante e ao tipo de agitação, tiveram seu tamanho aumentado na obtenção.



**Figura 74 – Microscopia do tecido com inserção de 4g de microcápsulas Rota D mostrando sua distribuição com aerografia com aumento de 1.000X(B) e 3.000X (C)**



Com as inserções de microcápsulas na trama dos tecidos é possível notar que as partículas obtidas na Rota A, pelo tamanho reduzido, conseguem penetrar mais entre os fios da trama do tecido. Já as microcápsulas obtidas na Rota D, por terem tamanhos variados (entre 2,90  $\mu\text{m}$  e 12  $\mu\text{m}$ ), penetram na trama mas também se instalam na superfície dos fios, em maior quantidade se comparadas com as da Rota A. Esses resultados vão ao encontro do que Rossi (2012) afirmou, que para uma melhor penetração em materiais têxteis, é preferível microcápsulas bastante diminutas.

Sánchez et al. (2008) afirma que não só o tamanho de partículas é importante, mas também sua uniformidade de tamanho para a incorporação de microcápsulas para materiais têxteis. As microcápsulas obtidas neste estudo, mesmo não apresentando tanta uniformidade, apresentaram uma boa penetração. Este fato pode ser relacionado à trama do tecido trabalhado ser mais aberta. Se o tecido fosse diferente, talvez os resultados não fossem tão positivos. Entretanto, Sánchez et al. (2008) também afirma que a capacidade térmica (calor latente), das microcápsulas de PCM depende do tamanho da partícula – quanto menor a microcápsula, menor o material em seu interior. Assim, partículas muito diminutas (menores que 1  $\mu\text{m}$ ) poderiam diminuir o efeito termorregulador requerido.

#### 4.4 ANÁLISES TERMOGRÁFICAS

O objetivo da análise termográfica foi comparar o efeito termorregulador após o resfriamento em temperatura ambiente por câmera de visão infravermelha. Foi utilizado como base os estudos de Sánchez et. al (2008) e Marcuzzo (2012), nos quais amostras de tecidos e espumas, respectivamente, com microcápsulas de PCMs foram analisadas verificando seu efeito termorregulador através da termografia infravermelha (IR). Os tecidos com e sem as microcápsulas (para comparação) foram aquecidos até uma temperatura mais elevada do que a da mudança de fase do PCM (45°C) encapsulada. Após, os materiais foram deixados a resfriar em um ambiente com temperatura controlada e as imagens foram geradas com um intervalo de tempo pré-determinado. No caso da presente pesquisa, foi utilizado o tempo pré-determinado de Marcuzzo (2012).

As amostras de PU e tecido foram inseridas em um forno à 45°C por 12 min. O ambiente possuía uma temperatura média de 20°C e umidade relativa de 40%. Foi utilizado uma base de papelão, por possuir difusividade térmica. Após serem retiradas do forno foi gerada a primeira imagem com o termógrafo. As imagens consecutivas tiveram um intervalo de 2 min entre elas. Com isso, foi possível notar a quantidade de perda de calor das amostras, além da temperatura média de cada amostra em cada medição.

Amostras apenas com resinas foram realizadas para verificar se esta possuiu implicações na termorregulação gerada. A resina à base d'água foi escolhida por já ter sido mostrada em estudos anteriores (ROSSI, 2011, CRUZ et al., 2011), que é um bom fixador de microcápsulas nos substratos. Essas pesquisas estudaram o efeito fixador da resina à base d'água em tecidos através de diferentes ciclos de lavagem (com água e agitação mecânica).

Cruz et al. (2011) verificou que a densidade de microcápsulas diminuiu mais significativamente nas primeiras 5 lavagens, sendo que da 5ª para a 15ª lavagens se verifica uma diminuição menos acentuada, para depois praticamente tornarem-se imperceptíveis após a 20ª lavagem. Os resultados obtidos permitem concluir que o acabamento de termorregulação permaneceu funcional até 10ª lavagem e com alguma eficiência até a 15ª lavagem. (Id.). A espuma não sofrerá o efeito da água, apenas de esforços mecânicos. Mesmo assim, esses estudos podem

ter tomados como base para o uso de resina como material fixador, já que foi verificado a durabilidade das microcápsulas no tecido.

Os estudos citados (*Opus citatum*), mesmo procurando verificar a eficiência da resina na fixação das microcápsulas, não testaram se esta afeta o efeito termorregulador do material. Assim, foi avaliado neste estudo amostras apenas com resina para a garantia do efeito estar sendo gerados apenas pelas microcápsulas.

#### **4.4.1 Termografias das espumas com microcápsulas da Rota A**

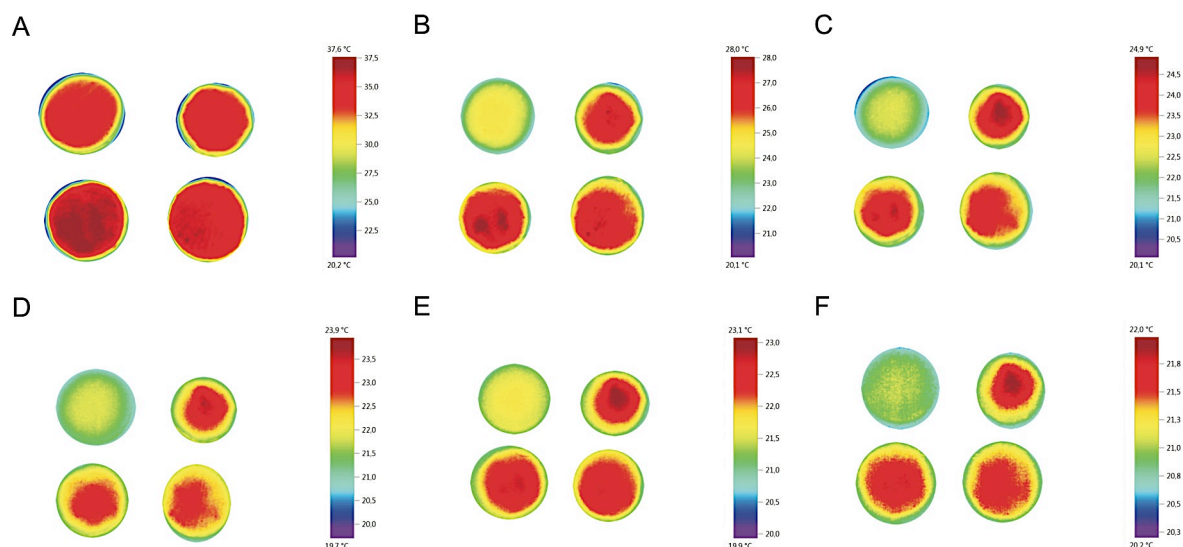
As primeiras amostras geradas, como dito anteriormente, foram com as microcápsulas obtidas na Rota A inseridas nas espumas com o método de filtração e também foram as primeiras a serem termografadas. Na figura 75 é possível visualizar as imagens geradas das amostras 00, 1, 2 e 3 (respectivamente, sem microcápsulas, apenas com resina inserida com filtração, 4 g de microcápsulas e 8 g de microcápsulas inseridas com o método de filtração). Optou-se por mostrar o resfriamento das amostras logo ao sair do forno, a 2 min de resfriamento, a 4 min de resfriamento, a 6 min de resfriamento, a 8 min de resfriamento e a 12 min de resfriamento (na sequência e na legenda da imagem, figuras 75A, 75B, 75C, 75D, 75E e 75F).

Um dos primeiros fatos que foi observado é que a resina influencia no efeito termorregulador do material. Também é possível observar com o resfriamento das amostras, que as espumas com as microcápsulas inseridas possuíam um efeito bastante similar àquele gerado pela resina.



**Figura 75 – Termografias da espuma com microcápsulas obtidas na Rota A aplicadas com o método de filtração.**

Legenda:



**Notas:** (A) logo a ser retirado do forno; (B) 2 min deixadas a resfriar; (C) 4 min deixadas a resfriar; (D) 6 min deixadas a resfriar; (E) 8 min deixadas a resfriar; (F) 12 min deixadas a resfriar.

As amostras saíram do forno à uma temperatura de 34,8°C para a amostra sem microcápsulas; 35,5°C para a amostra com resina; e 37,6°C para as amostras com 4 g e 8 g de microcápsulas. Após serem retirados do forno, foram observados os decaimentos de temperatura em 2, 4, 6, 8 e 12 minutos. Os declínios das temperaturas podem ser vistos na tabela 09.

**Tabela 09 – Decaimentos das temperaturas das amostras de PU com microcápsulas obtidas na Rota A com método de filtração**

Amostra	$\Delta T$ (°C) 2min	$\Delta T$ (°C) 4min	$\Delta T$ (°C) 6min	$\Delta T$ (°C) 8min	$\Delta T$ (°C) 12min
0g de microcápsulas	9,7	12,1	12,9	13,2	14,6
Só resina	7,7	11,2	12,1	12,4	13,7
4g de microcápsulas da Rota A	9,6	12,7	13,7	14,8	16,1
8g de microcápsulas da Rota A	9,5	12,6	13,6	14,4	15,5

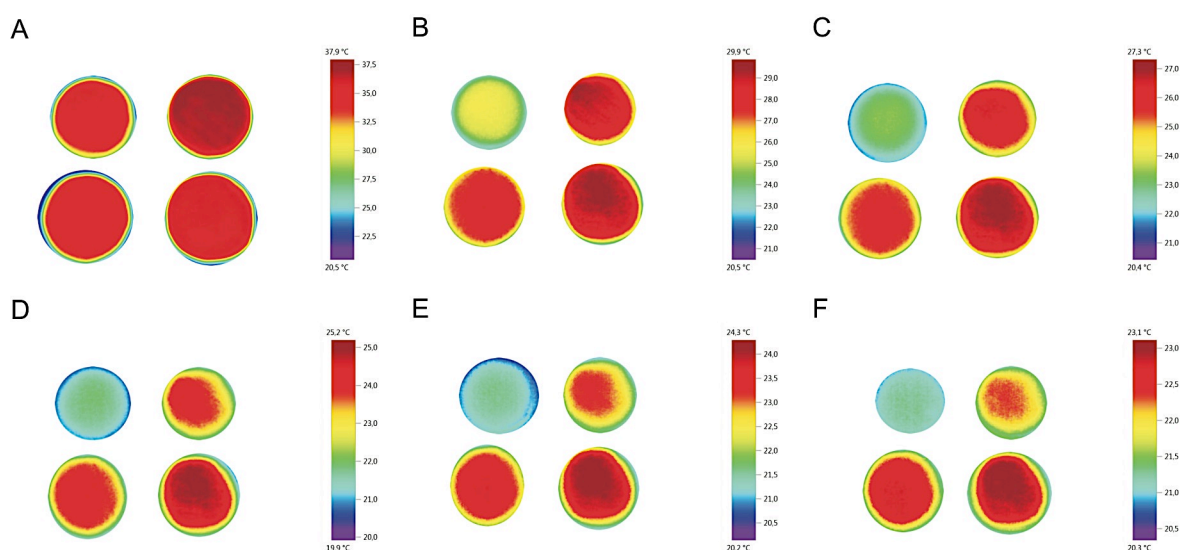
Pode-se ver que as amostras arrefeceram com uma perda de calor maior para a amostra sem microcápsulas, mas bastante próxima para as amostras com resina e com microcápsulas. Assim, é possível alegar que as diferenças de perda de calor entre as amostras com resina e microcápsulas foram praticamente as mesmas, diferenciando-se muito pouco.

Com isso, pode-se afirmar que a quantidade de microcápsulas inseridas com o processo de filtração se encontram em quantidade insuficiente para gerar um efeito termorregulador. As perdas do processo, além de representar um custo mais alto no produto final, refletem diretamente no efeito térmico gerado. Adicionalmente, a resina possui grande papel no efeito termorregulador, sendo necessária como amostra padrão além da espuma virgem.

Seguiu-se para a inserção das microcápsulas obtidas na Rota A com o método de aerografia. As imagens termográficas dessas espumas podem ser visualizadas na figura 76.

**Figura 76 – Termografias da espuma com microcápsulas obtidas na Rota A aplicadas com o método de aerografia.**

Legenda:



**Notas: (A) logo a ser retirado do forno; (B) 2 min deixadas a resfriar; (C) 4 min deixadas a resfriar; (D) 6 min deixadas a resfriar; (E) 8 min deixadas a resfriar; (F) 12 min deixadas a resfriar.**

As espumas foram geradas utilizando a mesma quantidade de microcápsulas da filtração como base de comparação do aproveitamento de material. Também foi gerada uma amostra apenas com resina, desta vez aplicada com o aerógrafo.

Nota-se que, em relação à aplicação com filtração, ocorreu uma diferenciação entre as amostras apenas com resina e àquelas com a inserção de microcápsulas. As imagens térmicas mostram que as espumas com aplicação de microcápsulas com o método de aerografia sofrem um processo de arrefecimento menos acentuado que a espuma sem microcápsula e a espuma apenas com a resina. Pode-se notar também que a perda de calor é mais lenta, principalmente na amostra com 8g de microcápsulas.

As amostras saíram do forno a temperaturas de 35,9°C, 37,9°C, 35,5°C e 36,2°C. O decaimento das temperaturas ao arrefecer podem ser visualizadas na tabela 10.

**Tabela 10 – Decaimentos das temperaturas das amostras de PU com microcápsulas obtidas na Rota A com método de aerografia**

<b>Amostra</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 2min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 4min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 6min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 8min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 12min</b>
0g de microcápsulas	9,9	12,4	13,9	15,0	15,7
Só resina	8,2	11,2	13,8	14,7	16,2
4g de microcápsulas da Rota A	6,8	9,2	11,0	11,6	12,7
8g de microcápsulas da Rota A	6,3	8,9	10,7	11,1	12,1

Ocorreu uma queda de temperatura proporcional para cada amostra, mas diferente entre elas, com maior perda para a amostra sem microcápsulas e com resina. A última medição, a 12 min, as amostras apresentaram temperaturas médias de 19,4°C; 21,9°C; 22,8°C e 23,9°C; o que comprova que as amostras com microcápsulas tiveram uma perda de calor menor do que a sem microcápsulas e aquela apenas com resina. A diferença com o efeito produzido com a resina é de 0,9°C para as amostras com 4g de microcápsulas e de 1,8°C para as amostras com 8g. A perda de calor é proporcional à quantidade de microcápsulas, atribuídas ao aumento da massa da amostra, como visto por Marcuzzo (2012).

Observa-se também que o calor não é espalhado igualmente por toda a superfície, com pequenas variações. O espalhamento do calor está ligado à distribuição das partículas na amostra. Principalmente para a amostra com 8 g de

microcápsulas, nota-se que as zonas de maior calor estão concentradas no centro da amostra, local onde, pelo que foi visto nas análises de MEV, as microcápsulas estão em maior quantidade.

Com esse teste, pode-se afirmar que a inserção com a aerografia é mais eficiente do que a filtração, a fixar boa parte de seu conteúdo nas amostras de espumas de PU. Com isso, ocorreu um acréscimo no efeito termorregulador observado, já que mais microcápsulas foram depositadas nas amostras. A amostra de 8g apresentou um melhor resultado, indo ao encontro do que You et al. (2010) observou, que quanto mais elevado é o conteúdo de microcápsulas com PCMs em um material, maior será a quantidade de energia térmica armazenada. Além da quantidade de microcápsulas, pode-se afirmar que este fato é atribuído à quantidade de calor absorvida pelo eicosano no seu processo de derretimento ( $7,6 \text{ J g}^{-1}$ ), é liberado na área circundante no início processo de resfriamento na temperatura de cristalização do PCM.

#### **4.4.2 Termografias das espumas com microcápsulas da Rota A e D**

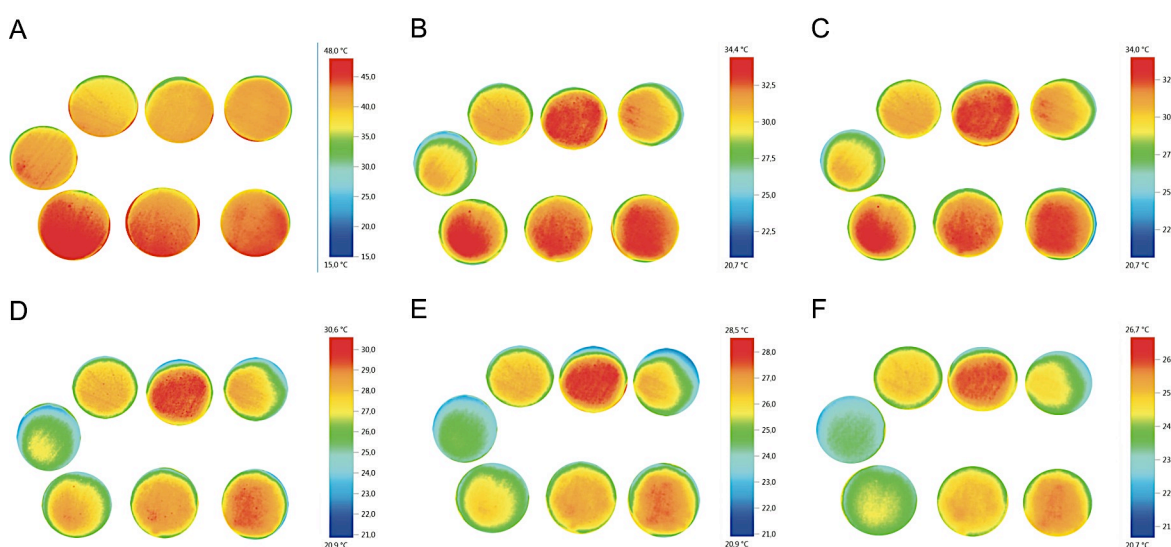
Após serem obtidas aplicadas as microcápsulas da Rota D, estas foram aplicadas nas espumas de PU. Para comparação, a análise térmica foi realizada juntamente com as amostras com microcápsulas da Rota A. Tendo já verificado o efeito da resina nas análises anteriores, esta não foi adicionada, apenas uma amostra sem microcápsulas como padrão. Para esta verificação, também foram realizadas amostras com 8 g de microcápsulas aplicadas bilateralmente (4g em cada lado, de ambas as Rotas A e D), verificando se a distribuição teria implicância no efeito termorregulador. As termografias para essas amostras podem ser visualizadas na figura 77. Os intervalos de tempo de arrefecimento apresentados são os mesmos das figuras 75 e 76.

As amostras com melhor desempenho térmico foram as com maior quantidade de microcápsulas, com 8 g. A aplicação bilateral teve influência no efeito térmico, ampliando-o para a amostra com microcápsulas da Rota A, que foi a que apresentou o melhor desempenho térmico. As diferenças podem estar relacionadas com a quantidade de microcápsulas nas amostras. Para a amostra com 8 g Rota A aplicadas bilateralmente, observou-se um ganho de massa proporcionalmente maior do que as outras (132% enquanto as outras amostras com 8 g de microcápsulas

apresentaram aumentos entre 95 e 108%). Considerando isso, avalia-se que as microcápsulas da Rota D apresentaram um melhor desempenho térmico geral.

**Figura 77 – Termografias da espuma com microcápsulas obtidas na Rota A e D aplicadas com o método de aerografia.**

Legenda:



**Notas: (A) logo a ser retirado do forno; (B) 2 min deixadas a resfriar; (C) 4 min deixadas a resfriar; (D) 6 min deixadas a resfriar; (E) 8 min deixadas a resfriar; (F) 12 min deixadas a resfriar.**

Também é possível observar que as microcápsulas geradas com a Rota D apresentaram uma absorção maior de calor ao sair do forno ao serem comparadas com as outras amostras, mas seu arrefecimento foi rápido em comparação com as microcápsulas obtidas na Rota A. O fato do rápido arrefecimento pode estar associado à casca de melamina-formaldeído gerada com o surfactante CTAB. Shin et al. (2005), em estudo com microcápsulas similares, também observaram um grande declínio na quantidade de calor trocado durante a fase de transição. Os autores assumiram que este fato é devido à baixa quantidade de eicosano e a um possível nível insuficiente na fase de homogeneização durante a obtenção.

Pode-se visualizar que as amostras possuem resfriamentos diferentes. Os decaimentos nas temperaturas podem ser vistos na tabela 11. Pode-se dizer que as

temperaturas médias iniciais ficaram acima das observadas nos testes anteriores (46,3°C, 45,8°C, 46,3°C, 46,4°C, 47,2°C, 47,6°C e 48°C) devido à pouca precisão da temperatura do forno, que oscilava entre 45°C e 50°C. Pode-se ver que, no geral, as amostras com microcápsulas apresentaram uma perda de calor mais lenta, com uma diferença de 3,6°C a 5,8°C ao ser comparada com a amostra sem microcápsulas. As amostras com melhor efeito termorregulador são aquelas que apresentaram maior retenção de material (entre 46,6 e 92%).

**Tabela 11 – Decaimentos das temperaturas das amostras de PU com microcápsulas obtidas nas Rotas A e D com método de aerografia**

<b>Amostra</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 2min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 4min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 6min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 8min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 12min</b>
Sem microcápsulas	14,1	16,1	18,9	19,9	25,4
4g de microcápsulas da Rota A	13,4	14,1	16,4	18,8	20,3
8g bilateral de microcápsulas da Rota A	12,5	13,1	15,7	17,8	19,6
8g de microcápsulas da Rota A	12,0	12,7	16,5	19,4	21,3
4g de microcápsulas da Rota D	13,9	14,8	17,9	20,6	22,7
8g bilateral de microcápsulas da Rota D	13,9	14,2	18,1	20,2	21,6
8g de microcápsulas da Rota D	13,6	14,3	17,3	20,3	21,7

É possível afirmar, baseado nas termografias anteriores (da Rota A), que por volta de 1°C é atribuído ao efeito da resina. Mesmo com isso, é possível observar que as microcápsulas possuem efeito termorregulador importante, o que sustenta o fato da microencapsulação do eicosano ter sido efetiva em ambos os processos de obtenção (Rotas A e D).

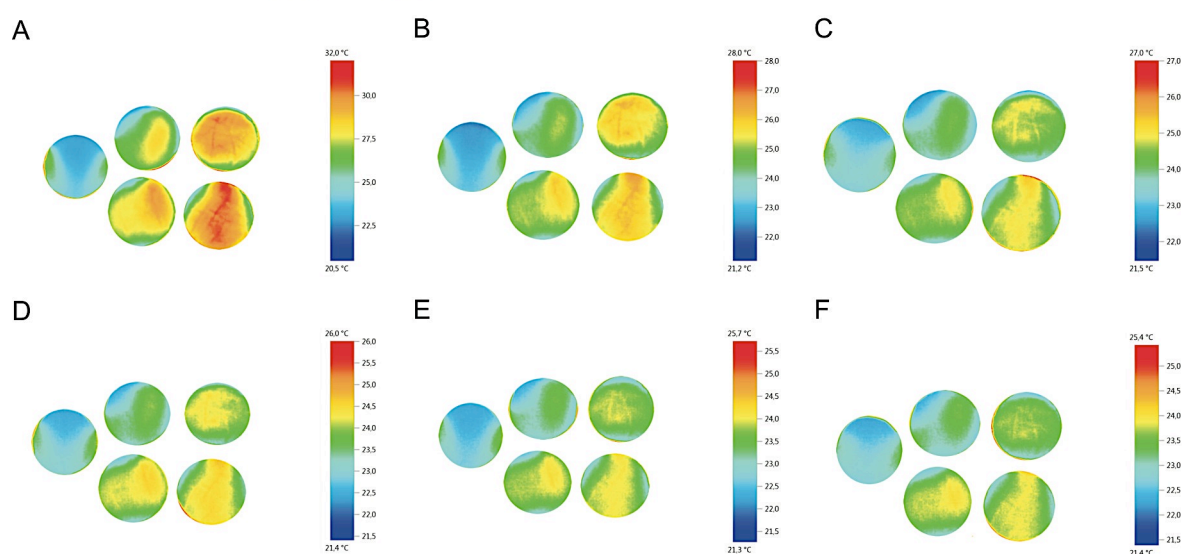
#### **4.4.3 Termografias dos tecidos**

Nos tecidos, pelas amostras terem sido produzidas depois das aplicações nas espumas, foram inseridas as partículas obtidas nas Rotas A e D, em quantidades iguais para ambas, de 2 g e 4 g. O resultado da termografia das amostras de tecido pode ser visto na figura 78. Os intervalos de tempos apresentados são os mesmos do que para as amostras de espumas. Também não foi gerada uma amostra apenas com resina por já se saber o efeito que esta causa e por já ter sido comprovado com

as amostras anteriores que as microcápsulas proporcionam um aumento do efeito termorregulador.

**Figura 78 – Termografias do tecido com microcápsulas obtidas na Rota A e D aplicadas com o método de aerografia.**

Legenda:



**Notas: (A) logo a ser retirado do forno; (B) 2 min deixadas a resfriar; (C) 4 min deixadas a resfriar; (D) 6 min deixadas a resfriar; (E) 8 min deixadas a resfriar; (F) 12 min deixadas a resfriar.**

As amostras de tecido apresentaram um resultado similar às espumas, na qual as amostras com maior quantidade de microcápsulas sofreram uma menor perda de calor. O decaimento nas temperaturas apresentadas nas medições, no mesmo intervalo mostrado nas imagens, podem ser visualizadas na tabela 12.

**Tabela 12 – Decaimentos das temperaturas das amostras de tecidos com microcápsulas obtidas na Rota A e D com método de aerografia**

<b>Amostra</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 2min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 4min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 6min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 8min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 12min</b>
0g de microcápsulas	5,2	6,6	7,9	8,3	9,2
2g de microcápsulas da Rota A	3,1	3,4	3,9	4,5	4,7
4g de microcápsulas da Rota A	5,7	6,5	6,0	7,6	7,8
2g de microcápsulas da Rota D	4,7	4,7	6,1	6,5	6,9
4g de microcápsulas da Rota D	3,0	4,0	5,3	6,0	6,5

As amostras tiveram uma diferença mínima de 3°C e máxima de 4°C em relação à amostra sem microcápsulas. O que pode ser visualizado com mais destaque nessas análises é que as amostras com microcápsulas com 4 g possuem temperatura mais elevada. Esse fato pode estar associado à maior quantidade de microcápsulas, relativa ao aumento da massa dessas amostras (entre 24 e 32% para as amostras com 4 g de microcápsulas, e entre 71 e 75% para as amostras com 8 g). Também é possível observar que entre as rotas, as microcápsulas obtidas na Rota D possuem temperatura mais elevada, comprovando o que foi observado nas espumas. Outro fato que pode ser atribuído é que as microcápsulas da Rota D são maiores, estando associadas com um efeito termorregulador maior. (SANCHÉZ et al., 2008).

#### **4.4.4 Termografias das combinações de espumas e tecidos**

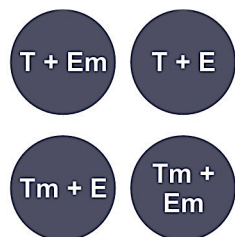
Para testar os efeitos térmicos gerados pela interação entre o tecido e a espuma foi realizado um aquecimento representando essa composição. Foram colocados para análise a combinação da espuma e o tecido sem microcápsulas como padrão, e feitas combinações de apenas espuma com microcápsulas e tecido sem microcápsulas; apenas tecido com microcápsulas e espuma sem microcápsulas; e ambos com inserção de microcápsulas.

Para esse teste, as microcápsulas obtidas na Rota D foram selecionadas. Para tanto, mais uma amostra com tecido com 4 g e mais uma amostra com 8 g de microcápsulas aplicadas em apenas um lado foram geradas. Assim, é possível obter um padrão de comparação entre as combinações. As análises térmicas dessas amostras podem ser visualizadas na figura 79.



**Figura 79 – Termografias das combinações de espumas e tecidos com e sem microcápsulas com o método de aerografia.**

Legenda:



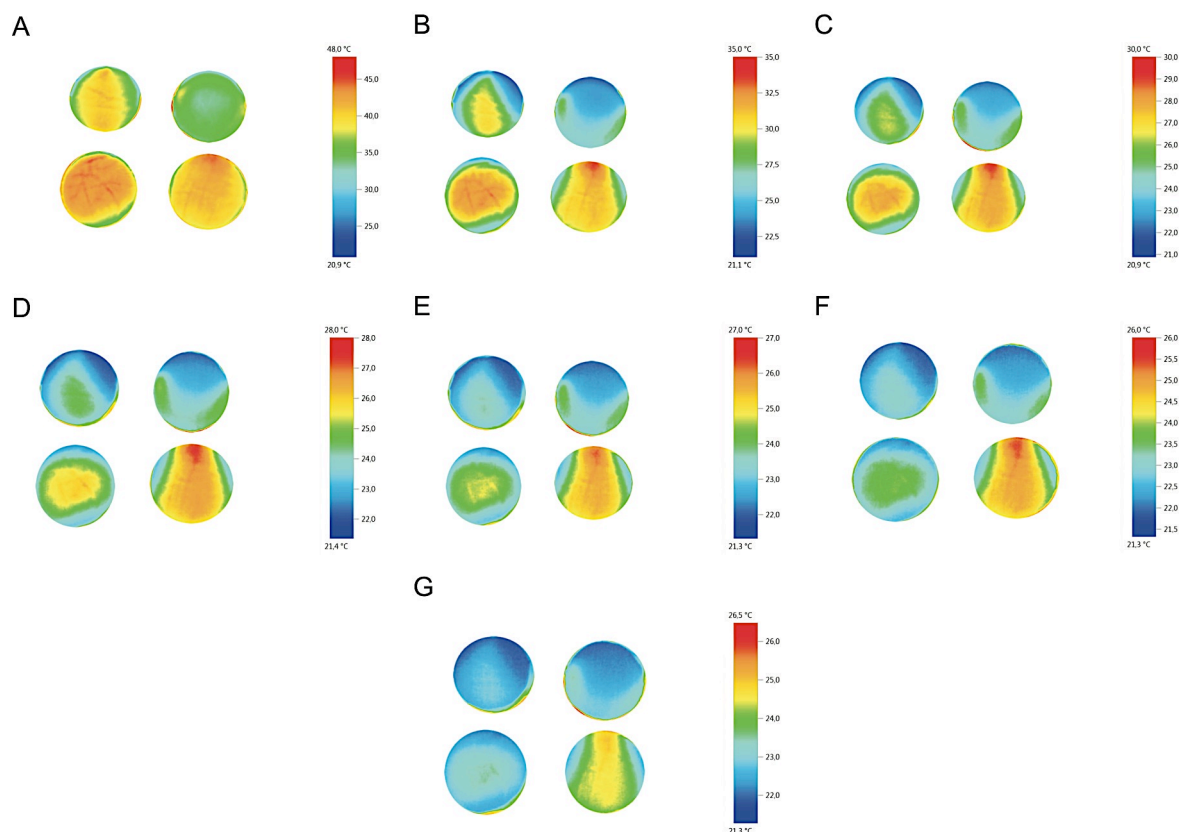
onde:

T = tecido sem microcápsulas

E = espuma sem microcápsulas

Tm = tecido com microcápsulas

Em = espuma com microcápsulas



**Notas: (A) logo a ser retirado do forno; (B) 2 min deixadas a resfriar; (C) 4 min deixadas a resfriar; (D) 6 min deixadas a resfriar; (E) 8 min deixadas a resfriar; (F) 12 min deixadas a resfriar; (G) 14 min deixadas a resfriar.**

Foi visto que a composição sem nenhuma microcápsula perdeu muito mais calor do que aquelas combinações que possuíam as partículas. É possível perceber que o tecido possui grande influência na temperatura, principalmente ao início. A espuma com o tecido sem microcápsulas não obteve bons resultados, comprovando que é necessário que o tecido também possua as partículas. No entanto, apenas o tecido, sem a espuma com microcápsulas também não foi eficaz e perdeu calor muito rapidamente. A melhor combinação é a de tecido e espuma com microcápsulas, mostrando que, transpondo para o assento, ambos são importantes para gerar o efeito termorregulador.

Durante o teste foi notado que a combinação de tecido e espuma com microcápsulas também gera uma perda menor de calor que quando analisados em separado (mostrado nas imagens térmicas anteriores do tecido e da espuma). Por isso, foi realizada uma termografia também a 14 min, demonstrando esse efeito prolongado. Com isso, pode-se dizer que a combinação entre tecido e espuma prorroga o efeito termorregulador que, para um assento, seria o ideal. Os decaimentos médios das temperaturas em cada amostra podem ser visualizados na tabela 13.

**Tabela 13 – Decaimentos das temperaturas das combinações das amostras de tecidos e de espumas com microcápsulas obtidas na Rota D com método de aerografia**

<b>Amostra</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 2min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 4min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 6min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 8min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 12min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 14min</b>
Tecido e espuma sem microcápsulas	14,9	19,3	20,7	21,9	22,5	23,7
Tecido sem microcápsulas e espuma com microcápsulas	6,2	12,4	12,5	13,7	14,5	14,8
Tecido com microcápsulas e espuma sem microcápsulas	13,1	17,8	19,5	21,2	22,5	22,2
Tecido e espuma com microcápsulas	9,2	13,5	15,5	16,5	17,0	18,3

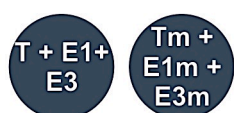
Pode-se visualizar que, ao sair do forno, boa parte das amostras estão com uma temperaturas de 45,4°C, 38,1°C, 46,1°C e 43,5°C. Aos 2 minutos se estabilizam na ordem crescente de tecido e espuma sem microcápsulas, tecido sem e espuma com microcápsulas, tecido com e espuma sem microcápsulas e, por último, tecido e espuma com microcápsulas. As perdas são proporcionais, ao passo que a temperatura do tecido e espuma com microcápsulas permanece mais elevada.

Como em um assento seria de alto custo colocar microcápsulas por toda a espuma, foi realizado um teste com a combinação de camadas de espumas com e sem microcápsulas. Essa combinação pretende simular o efeito “sanduiche” com camadas que possuem funções diferentes, como já é aplicado em colchões. Foi realizada uma combinação de uma amostra de espuma com 3cm de espessura sem microcápsulas, uma amostra de 1 cm de espessura com microcápsulas e o tecido que recobriria o assento com microcápsulas. A mesma combinação foi realizada com espuma de 1 cm e tecido sem microcápsula como base de comparação.

As combinações foram aquecidas em um forno a 45-50°C e deixadas a esfriar em ambiente com temperatura e umidade controladas (20°C e 40%). As termografias foram realizadas com os mesmos intervalos que para as outras amostras. As imagens térmicas geradas são apresentadas na figura 80.

**Figura 80 – Termografias das camadas de espumas com 1 e 3 cm e tecidos com e sem microcápsulas com o método de aerografia.**

Legenda:



onde:

T = tecido sem microcápsulas

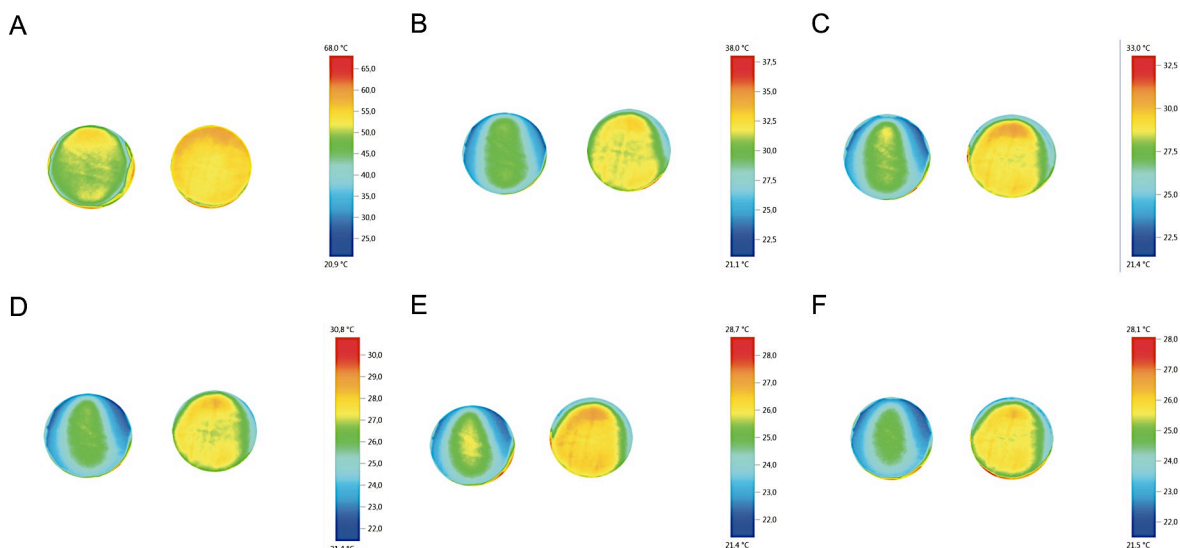
E1 = espuma de 1cm sem microcápsulas

E3 = espuma de 3cm sem microcápsulas

Tm = tecido com microcápsulas

E1m = espuma de 1cm com microcápsulas

E3m = espuma de 1cm com microcápsulas



**Notas: (A) logo a ser retirado do forno; (B) 2 min deixadas a resfriar; (C) 4 min deixadas a resfriar; (D) 6 min deixadas a resfriar; (E) 8 min deixadas a resfriar; (F) 12 min deixadas a resfriar**

É possível notar que há uma diferença entre a perda de calor da combinação com microcápsulas e aquela sem, sendo maior para as camadas que não possuem micropartículas. É possível notar que as combinações geraram um aumento não apenas na absorção de calor, mas também na sua retenção. As amostras saíram do forno à temperaturas de 53,3°C e 59,1°C. A tabela 14 mostra os valores numéricos para os decaimentos nas temperaturas durante as medições que corroboram o que é visto nas imagens térmicas.

**Tabela 14 – Decaimentos das temperaturas das amostras dos tecidos com camadas de espumas com e sem microcápsulas**

<b>Amostra</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 2min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 4min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 6min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 8min</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C) 12min</b>
Espumas e tecidos sem microcápsulas	23,3	26,0	27,8	29,3	31,1
Espuma de 1cm e tecido com microcápsulas; espuma de 3cm sem microcápsulas	22,1	27,1	29,1	30,7	32,2

Com esses resultados, é possível dizer que o efeito termorregulador é obtido pela combinação do tipo de microcápsulas, a quantidade inserida no substrato e a distribuição das partículas. É considerado o tipo de microcápsulas, pois foi observado que as microcápsulas com tamanhos maiores geraram um efeito térmico maior. Já a quantidade inserida foi visto que, quanto mais a quantidade de microcápsulas, maior o efeito térmico gerado, corroborando o que You et al. (2010) observaram em seus estudos.

Adicionalmente, pode-se dizer com a última análise termográfica, das camadas de espumas e tecido, que não é necessário que a espuma possua microcápsulas por toda a sua espessura, como afirmado por Marcuzzo et al. (2012). É possível colocar uma camada com grande concentração de microcápsulas. O importante é que essa camada seja a primeira, ficando próxima com o corpo humano, viabilizando a termorregulação.

Para explicar o efeito da distribuição, foram realizadas microtomografias de espumas com inserção de microcápsulas, gerando um panorama de como as micropartículas ficam distribuídas na amostra.

#### 4.5 MICROTOMOGRAFIAS

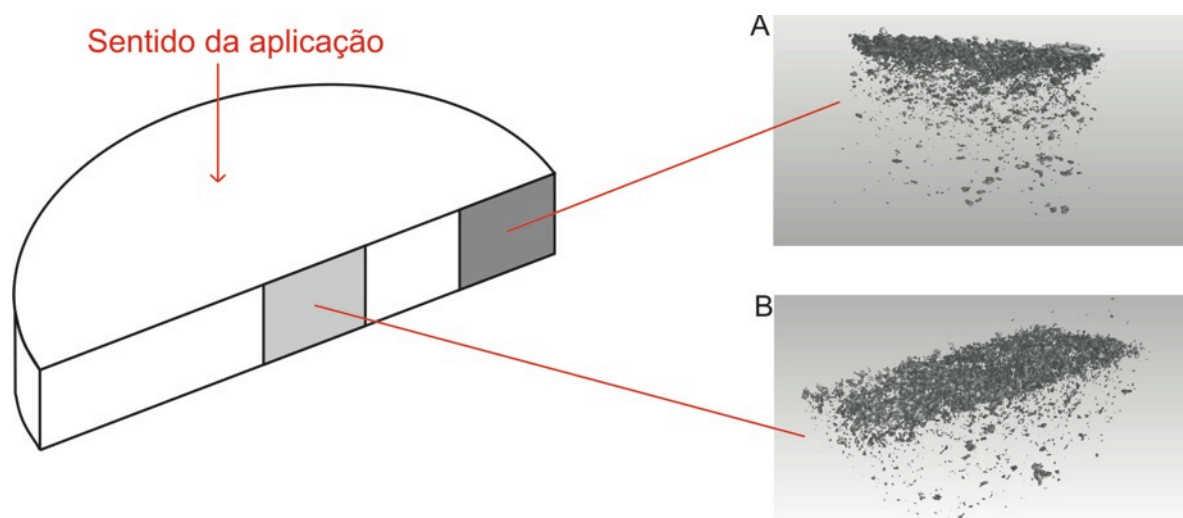
Retomando o que foi explicado no capítulo 3, para realizar as microtomografias, foram geradas microcápsulas com material luminescente, a Rodamina-B. Esse fato se deve a restrições do equipamento (microtomógrafo), pois essa técnica gera imagens medindo as diferentes densidades do material. Como as microcápsulas com casca de melamina-formaldeído são também poliméricas como a espuma, optou-se por um material de núcleo com chances de poder ser visualizado nas imagens a serem geradas. Essas microcápsulas também foram escolhidas por

já terem sido produzidas com êxito em estudos anteriores realizados pela equipe do LdSM.

Como limitação do equipamento, as amostras tiveram que ser cortadas, como explicado no capítulo 3. Foi possível gerar uma imagem que mostra a disposição das partículas. As condições de uso que se mostraram mais eficientes para a geração das imagens foram de 70kV e 110uA, com captura de 600 vistas. As amostras geradas foram aplicadas nas mesmas proporções de água e resina que as amostras com microcápsulas de eicosano.

A amostra com 8g de microcápsulas inseridas com a técnica de filtração pode ser visualizada a figura 81. Os pontos mais escuros são relativos às microcápsulas de rodamina. Pode-se notar que as microcápsulas se concentram em seu topo, onde a solução com as partículas foi diretamente despejada, espalhando-se sutilmente pela amostra.

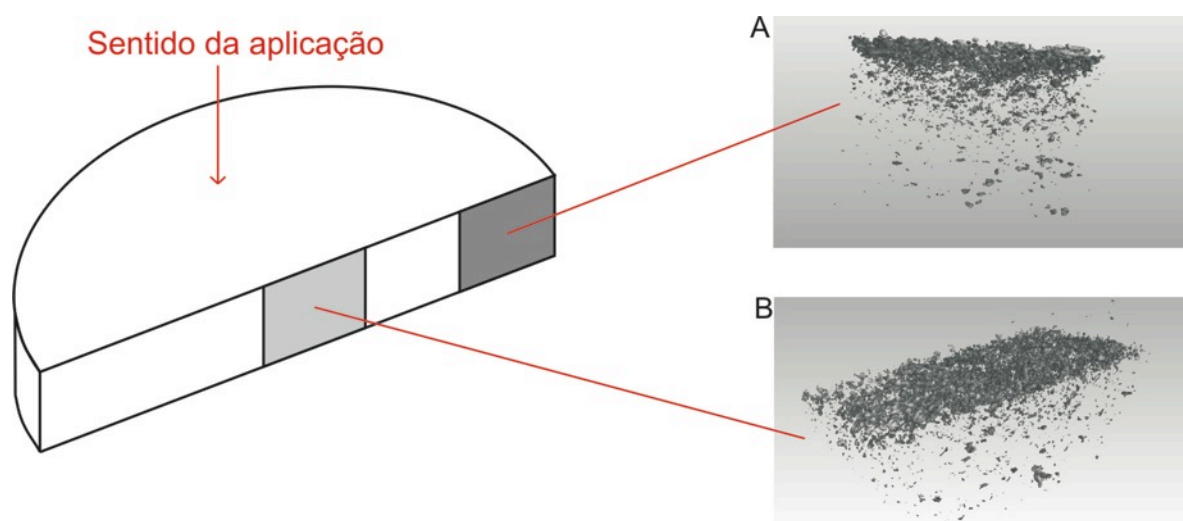
**Figura 81 – Microtomografias das espumas com microcápsulas de material luminescente com o método de filtração.**



As microcápsulas de rodamina são um pouco maiores do que as de eicosano geradas nesse estudo, com tamanhos entre 15  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ . Este fato pode ter prejudicado que as microcápsulas fossem mais igualmente distribuídas pela estrutura da espuma, como observado nas imagens de MEV para as microcápsulas obtidas na Rota A.

Já na aplicação de 8 g de microcápsulas com o método de aerografia (figura 82), visualiza-se que toda a quantidade de microcápsulas está situada na porção superior da espuma, na qual as microcápsulas foram aplicadas diretamente. As amostras foram feitas em subsequência. Assim, podem ser notadas microcápsulas na parte inferior, que são atribuídas ao contato da espuma com a parede da câmara em que as microcápsulas são aplicadas. Isso mais uma vez demonstra a facilidade de inserção das microcápsulas na espuma.

**Figura 82 – Microtomografias das espumas com microcápsulas de material luminescente com o método de aerografia.**



Ao ser relacionado com o efeito termorregulador analisado nas imagens térmicas, pode-se dizer que o acúmulo de microcápsulas na superfície gera um aumento na absorção térmica. A sobreposição das partículas na parte superior do substrato aumenta a absorção do calor e o retém por mais tempo. Assim, pode-se dizer que a distribuição é um fator determinante para o efeito termorregulador.

Adicionalmente, pode-se visualizar que as microcápsulas se concentram na porção central da espuma (figura 81B e 82B), sendo que as partículas penetram menos nas porções laterais (figura 81A e 82A). Este fato pode explicar a distribuição do calor nas amostras, vista nas imagens térmicas, ser desigual, e estando concentrada no meio das amostras com um declínio para sua borda.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo geral da pesquisa foi obter, aplicar e caracterizar microcápsulas com núcleo de material de mudança de fase, mais especificamente o eicosano, em espumas de PU flexível após sua expansão, ampliando o efeito termorregulador desse material, reduzindo o tempo de aplicação e desperdício das microcápsulas. Pode-se dizer que o objetivo foi atendido, pois foram geradas microcápsulas de eicosano, que pelos testes, ampliaram o efeito térmico das espumas de PU. A técnica de aerografia permitiu uma redução no tempo de aplicação e no desperdício, observado na técnica de impregnação em emulsão.

Como objetivos específicos, foi clarificado em revisão de literatura, o que é TA e levantado alguns dos principais problemas gerados pela cadeira de rodas, além das variáveis que influenciam o conforto térmico. Essa parte foi importante, já que ao início, pensava-se que só a inserção de microcápsulas na espuma seria suficiente para melhorar a troca térmica dos assentos. Também em revisão de literatura verificou-se métodos de obtenção e aplicação das microcápsulas em diferentes substratos, que serviram como base para os testes que foram realizados. Por fim, o efeito térmico gerado foi verificado com imagens térmicas e explicado através de microtomografias.

Foi concluído que:

- as microcápsulas de eicosano, que possuem temperatura de mudança de fase similar ao corpo humano, podem aumentar o efeito termorregulatório quando incorporadas em outros substratos;
- resina possui influência no efeito térmico, sendo atribuído, pelo que foi observado nos testes, 1°C para a resina, na quantidade de 2,5g utilizada;
- a inserção de microcápsulas através do método de aerografia é mais eficiente em termos de tempo de aplicação e aproveitamento de material do que o método de filtração;
- a pressão aplicada no método de aerografia (43 psi) preencheu em média 3/4 do volume da espuma, não sendo suficiente para penetrar por todo o material;
- em termos de termorregulação, é interessante que as microcápsulas sejam aderidas às paredes da espuma, pois os poros ajudam na dissipação do calor e influenciam positivamente no efeito térmico;

- para um efeito termorregulador, é necessário que o tecido e a espuma contenham microcápsulas;
- o efeito térmico depende do tipo de microcápsula utilizada, da quantidade e da distribuição das partículas;
- partículas maiores proveem um efeito termorregulador maior, já que possuem mais PCM em seu interior;
- quanto maior a quantidade de microcápsulas com núcleo de PCM; maior será o efeito térmico gerado;
- para uma possível aplicação deste estudo de doutorado em uma planta piloto sugere-se iniciar com a inserção de 165,44g de microcápsulas com o método de aerografia para um assento com 44 X 47 X 10 cm (profundidade X largura X espessura).

As microcápsulas da Rota D apresentaram um maior tamanho, no entanto, as microcápsulas da Rota A apresentaram uma casca mais resistente segundo as caracterizações realizadas. Adicionalmente, as microcápsulas da Rota A, quando aplicadas com o método de aerografia, mostraram-se com maior retenção nas amostras, o que amplia o efeito térmico do material.

Assim, o problema de pesquisa “é possível obter microcápsulas com material de mudança de fase e incorporá-las após a expansão das espumas flexíveis de PU, ampliando o seu efeito termorregulador e reduzindo o tempo de incorporação e desperdício das microcápsulas?”, foi respondido com a comprovação das hipóteses. Foi possível gerar microcápsulas com eicosano como núcleo, ampliando o efeito termorregulador das espumas, e o tempo de inserção foi diminuído, assim como o aproveitamento de material com a técnica de aerografia.

Pode-se dizer que as microcápsulas de eicosano podem diminuir o efeito do assento da cadeira de rodas na temperatura da pele especificamente em termos da termorregulação provida pelas espumas e tecidos. Estas podem melhorar o microclima entre a superfície do assento e o usuário, diminuindo as consequências do calor em excesso como o suor e fragilização da pele.

A resina fixadora à base d'água é importante para promover a fixação das microcápsulas nas paredes da estrutura celular da espuma. As limitações quanto à quantidade de microcápsulas obtidas em cada processo permitiu o estudo em nível experimental. Em cada processo eram obtidas por volta de 2 g de microcápsulas.



Foi possível dobrar os parâmetros, obtendo-se 4 g em cada processo. No entanto, ao triplicar os parâmetros, as microcápsulas apresentaram o eicosano como material sobrenadante no processo de centrifugação. Com isso, faz-se necessário o estudo da obtenção das microcápsulas em grande escala (planta piloto), para que possam ser efetivamente aplicadas em um assento.

Adicionalmente, é possível estudar outros tipos de obtenção de microcápsulas contendo PCMs. Em um dos últimos estudos encontrados de Al-Shannaq et al. (2015), foi visto a obtenção de microcápsulas de PCM utilizando polimerização por suspensão. Além disso, utilizaram uma mistura de surfactantes, o que induziu uma emulsão com estabilidade prolongada. Foi observado por Shin et al. (2005), que o surfactante era uma das principais razões pelas quais há uma rápida perda de calor das microcápsulas. Al-Shannaq et al. (2015), observaram que essa mistura aumentou as propriedades térmicas das microcápsulas.

Mesmo gerando novas microcápsulas, é desejável que em certo ponto seja verificada a eficiência do efeito térmico gerado com os usuários e sua influência no conforto. No entanto, o conforto é algo difícil de medir. Mesmo que tenha sido verificado que a junção da espuma e do tecido é um dos fatores determinantes do microclima, segundo Fazlollahtabar (2010), há pouca literatura publicada sobre o assunto que pode ser utilizada para saber o que considerar em um microclima confortável. (Id.).

Além disso, os estudos quanto à temperatura entre a interface corpo-assento têm sido submetidos a pesquisas limitadas. Liu et al. (2011) afirmam que as publicações possuem métodos de coleta considerados subjetivos, com dados coletados através de questionários com os usuários. No entanto, o conforto térmico não é apenas constituído por elementos subjetivos. Segundo Hänel, Dartman e Shishoo (1997), também são influenciados pelas propriedades físicas na interface da superfície com o corpo humano. Para Frota e Schiffer (2003), há ainda as variáveis pessoais, que variam para cada indivíduo.

Para futuros estudos, ainda deve-se levar em consideração que o conforto térmico de pessoas com deficiência pode ser diferente da população considerada saudável. Este fato se deve a natureza da deficiência, que pode afetar a termofisiologia, a sensação térmica, o metabolismo, o fluxo de sangue, a resposta do sistema regulatório, como o controle vasomotor da temperatura da pele ou a habilidade de transpirar. Dependendo do tipo de deficiência e o estado de saúde, a

oportunidade de adaptação ao meio pode ser restrita, limitando a gama de condições térmicas ambientais que proporcionam conforto. (VERHEYEN, 2011).

Os requisitos para o conforto térmico para pessoas com deficiência devem ser concebidos de forma individual, para cada cadeirante. Este fato é confirmado pelo padrão internacional de conforto térmico para pessoas com requerimentos especiais (ISO 14415, 2005), declarando que a consideração dos requisitos individuais pode ser ainda mais necessária para as pessoas com deficiência do que para as pessoas sem restrições. Além disso, é sugerido que a pessoa tenha a possibilidade do controle térmico individual. Esse conforto térmico individual pode ser gerado com as microcápsulas de eicosano, já que o PCM absorve e libera energia, adaptando-se às variações do corpo humano.

Adiante, é possível utilizar equipamentos que fazem medições objetivas para tentar verificar o conforto térmico, como é o caso do termógrafo utilizado para as imagens térmicas das amostras. Esse tipo de medição é muito útil quando o usuário possui restrições de sensibilidade, o que influencia em uma resposta clara do que está sentindo na interface assento-corpo humano, e/ou não pode se comunicar. Também podem ser utilizados sensores que medem a umidade gerada. Como exemplo, é possível tomar como base os estudos realizados por Hill et al. (2000), Webb e Parsons (1997), e Verheyen et al. (2011).

Portanto, mesmo que a produção atinja um nível suficiente em nível experimental para inserção das microcápsulas em um assento, ainda faz-se necessário a correta avaliação e seleção do conforto. É importante considerar valores subjetivos e objetivos, tendo como foco o usuário que será avaliado e sua condição pessoal.

Como sugestão para continuação da pesquisa, é necessário estudar a quantia necessária de microcápsulas para um assento ser efetivo em termos de termorregulação. Para tanto, é necessário aumentar os meios de produção das partículas para que sua aplicação seja viável. Também é possível realizar estudos com outros tipos de microcápsulas, verificando a eficiência de volume de produção. Também é interessante explorar mais o efeito fixador da resina. Mais adiante, um estudo de caso pode ser realizado com cadeirantes, observando o efeito termorregulador com os usuários. Para tanto, métodos de coleta de dados objetivos e subjetivos terão que ser considerados, cruzando os dados, e verificando a eficiência de ambos os métodos.

## REFERÊNCIAS

AGYENIM, Francis; HEWITT, Neil; EAMES, Philip; SMYTH, Mervyn. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. N. 14, 2010, p. 615–628.

AL-SHANNAQ, Refat; FARID, Mohammed; AL-MUHTASEB, Shaheen; KURDI, Jamal. Emulsion stability and cross-linking of PMMA microcapsules containing phase change materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Volume 132, January 2015, Pages 311–318.

ALAHMER, Ali; ABDELHAMID, Mahmoud; OMAR, Mohammed. Design for thermal sensation and comfort states in vehicles cabins. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 36, 2012, p. 126 – 140.

ALKAN, Cemil; SARI, Ahmet; KARAIPEKLI, Ali. Preparation, thermal properties and thermal reliability of microencapsulated n-eicosane as novel phase change material for thermal energy storage. **Energy Conversion and Management** Vol. 52, 2011, p. 687 – 692.

A.S.H.R.A.E. – **HVAC Systems and Applications**. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1991.

AZIZI, Nedra; CHEVALIER, Yves; MAJDOUB, Mustapha. Isosorbide-based microcapsules for cosmeto-textiles. **Industrial Crops and Products**. N. 52, 2014, p. 150–157.

BAETENS, Ruben; JELLE, Bjorn Petter; GUSTAVSEN, Arild. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings** Vol. 42, 2010, p. 1361 – 1368.

BARTELS, Volkmar T. Thermal comfort of aeroplane seats: influence of different seat materials and the use of laboratory test methods. **Applied Ergonomics** Vol. 34, 2003, p. 393 – 399.

BAJAJ, Pushpa. Thermally sensitive materials. In: TAO, X.M. (Ed.). **Smart Fibres, Fabrics and Clothing**. Cambridge, England: Woodhead publishing Ltd, 2001, p. 58–82.

BAYES-GARCIA, L.; VENTOLA, L.; CORDOBILLA, R.; BENAGES, R.; CALVET, T.; CUEVAS-DIARTE, M.A. Phase Change Materials (PCM) microcapsules with different shell compositions: Preparation, characterization and thermal stability. **Solar Energy Materials & Solar Cells** Vol. 94, 2010, p. 1235–1240.

BERCH, Rita. **Introdução à Tecnologia Assistiva**. CEDI - Centro Especializado em Desenvolvimento Infantil. Porto Alegre - RS, 2008. Disponível em: <http://proeja.com/portal/images/semana-quimica/2011-10-19/tec-assistiva.pdf>, acesso a 08/02/2013.

BORREGUERO, Ana M.; VALVERDE, José L.; PEIJS, Ton; RODRÍGUEZ, Juan F.; CARMONA, Manuel. Characterization of rigid polyurethane foams containing microencapsulated Rubitherm RT27 Part I. **Journal Materials Science**. N. 45, 2010, p. 4462 – 4469.

BROUGHTON, G.; DILABIO, M.; COOPER, D. Custom contoured seating - The next step. In: 17th **International Seating Symposium**, Orlando, USA, 2001.

BRIENZA, David M.; GEYER, Mary Jo; KARG, Patricia; JAN, Yih-Kuen. State of the science white paper on tissue integrity management. In: **Wheelchair Seating: A State-of-the-Science Conference**. Orlando, Florida. Fevereiro, 2001, p. 1 – 8.

BRIENZA, David; KELSEY, Sheryl, KARG, Patricia; ALLEGRETTI, Ana; OLSON, Marian; SCHMELER, Mark; ZANCA, Jeanne; JO GEYER, Mary; KUSTURISS, Marybeth; HOLM, Margo. A Randomized Clinical Trial on Preventing Pressure Ulcers

with Wheelchair Seat Cushions. **Journal of the American Geriatrics Society**. 2010 Vol. 58, n. 12, 2011, p. 2308–2314.

BULCAO, Christian F.; FRANK, Steven M.; RAJAB, Srinivasa N.; TRANC, Kha M.; GOLDSTEIN, David S. Relative contribution of core and skin temperatures to thermal comfort in humans. **Journal of Thermal Biology**. Vol. 25, 2000, p. 147 – 150.

BURNS, Stephen; BETZ, Kendra L. Seating Pressures With Conventional and Dynamic Wheelchair Cushions in Tetraplegia. **Arch Phys Med Rehabil** Vol 80, 1999, p. 566 – 571.

CAO; Xia, LEE, L. James; WIDYA, Tomy; MACOSKO, Christopher. Polyurethane/clay nanocomposites foams: processing, structure and properties. **Polymer** Vol. 46, 2005, p. 775–783.

CARCONEA, Steven M.; KEIR, Peter J. Effects of backrest design on biomechanics and comfort during seated work. **Applied Ergonomics** 38, 2007, p. 755 – 764.

CASTELL, A.; SOLÉ, C. Design of latent heat storage systems using phase change materials (PCMs), In: CABEZA, Luisa F. (ed.) **Woodhead Publishing Series in Energy**. Woodhead Publishing, Advances in Thermal Energy Storage Systems, 2015, p. 285-305.

CENGİZ, Tülin Gündüz; BALBALIK, Fatih C. The effects of ramie blended car seat covers on thermal comfort during road trials. **International Journal of Industrial Ergonomics** Vol. 39, 2009, p. 287 – 294.

COLVIN, D. P.; BRYANT, Y. G. Protective clothing containing encapsulated phase change materials. Advances in heat and mass transfer in biotechnology (HTD). **Asme Imece Proceedings**. 1998, p. 362 – 123.

COOPER, R., GONZALEZ, J., LAWRENCE, B., RENSCHLER, A., BONINGER, M., & VANSICKLE, D. Performance of selected lightweight wheelchairs on ANSI/RESNA

tests. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation** Vol 78, N. 10, 1997, p. 1138-1144.

COOPER, R.A. **Wheelchair Selection and Configuration**. Demos Medical Publishing Inc., New York: 1998.

CRUZ, J.; FANGUEIRO, R.; ARAÚJO, P.; ARAÚJO, F. Estudo da durabilidade do efeito de termoregulação em malhas com materiais de mudança de fase.

**International Conference on Engineering UBI2011**. University of Beira Interior. Covilhã, Portugal, 28-30 Nov 2011.

DA SILVA, Nelson Tiago Dias Ferreira. Incorporação de materiais de mudança de fase em materiais de construção. **Dissertação de Mestrado**. Engenharia Civil / Materiais, Reabilitação e Sustentabilidade das Construções. Universidade do Minho, Portugal: 2009.

DA SILVEIRA, Isolva Pereira. Teoria do conforto para promoção da saúde no cuidado de enfermagem à parturiente. **Doutorado** (tese). Universidade Federal do Ceará: Fortaleza, Ceará, 2010.

DAO, Trung Dung; JEONG, Han Mo. Novel stearic acid/graphene core-shell composite microcapsule as a phase change material exhibiting high shape stability and performance. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol 137, 2015, p. 227–234.

DE LOOZE, Michiel P.; KUIJT-EVERS, Lottief. M.; DIEËN, Jaap Van. Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures. **Ergonomics**, Vol. 46, n. 10, 2003, p. 985 – 997.

DEALEY, C.; LINDHOLM, C. Pressure Ulcer Classification. **Science and Practice of Pressure Ulcer Management**, 2006, p. 37 – 41.

DITTMAR, André; MEFFRE, Richard; DE OLIVEIRA, Fabrice; GEHIN, Claudine; DELHOMME, Georges. Wearable Medical Devices Using Textile and Flexible Technologies for Ambulatory Monitoring. In: **Proceedings of the 2005 IEEE - Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference**. Shanghai, China, September 1 - 4, 2005.

ERKAN, Gökhan. Enhancing The Thermal Properties of Textiles With Phase Change Materials. **RJTA** Vol. 8, No. 2, 2004, p. 57 - 64.

ESCOBAR, Camila F.; ROCHA, Tatiana L. A. C.; ROLDO, Liane; KINDLEIN JR, Wilson. Influence of molar ratio melamine-formaldehyde and types of surfactants used in interfacial polymerization microencapsulation of fragrant oil. In: **VI Congresso Internacional de Materiales – CIM**, Bogotá, 2011.

FARID, Mohammed M.; KHUDAJIR, Amar M.; RAZACK, Siddique Ali K.; AL-HALLAJ, Said. A review on phase change energy storage: materials and applications. **Energy Conversion and Management**. Vol. 45, 2004, p. 1597–1615.

FAZLOLLAHTABAR, Hamed. A subjective framework for seat comfort based on a heuristic multi criteria decision making technique and anthropometry. **Applied Ergonomics**. Vol 42, 2010, p. 16 – 28.

FERREIRA, Fátima Teresinha Rampelotti; VENDRAMIM, José Djair; FORIM, Moacir Rossi. Bioatividade de nanoformulações de nim sobre a traça-do-tomateiro. **Ciência Rural**. V. 42, n. 8, 2012, p. 1347-1353.

FOK, Sai Cheong; TAN, Fock Lai; SUA, Chong Chai. Experimental investigations on the cooling of a motorcycle helmet with phase change material. **Thermal Science**. Vol. 15, No. 3, 2011, p. 807-816.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

GALVÃO FILHO, Teófilo Alves. A Tecnologia Assistiva: de que se trata? In: MACHADO, G. J. C.; SOBRAL, M. N. (Orgs.). **Conexões: educação, comunicação, inclusão e interculturalidade**. 1 ed. Porto Alegre: Redes Editora, p. 207-235, 2009.

GAN, Yiming; CHENG, Ling; DING, Xin; PAN, Ning. Blood flow fluctuation underneath human forearm skin caused by local thermal stimuli of different fabrics. **Journal of Thermal Biology** Vol. 35, 2010, p. 372 – 377.

GARCÍA, J. C. D.; GALVÃO FILHO, T. A. **Pesquisa Nacional de Tecnologia Assistiva**. São Paulo: ITS BraSII/MCTI-SECIS, 2012.

GEYER, M.J.; BRIENZA, D.M.; KARG, P.; TREFLER, E.; KELSEY, S. A Randomized Control Trial to Evaluate Pressure-Reducing Seat Cushions for Elderly Wheelchair Users. **Advances in Skin and Wound Care**. Vol 14, 2001, p. 120-132.

GHOSH, S. K. **Functional Coatings by Polymer Microencapsulation**. Wiley-VCH: Weinheim, 2006.

GIL, S.; JIMÉNEZ-BORJA, C.; MARTIN-CAMPO, J.; ROMERO, A.; VALVERDE, J. L.; SÁNCHEZ-SILVA, L. Stabilizer effects on the synthesis of gold-containing microparticles. Application to the liquid phase oxidation of glycerol. **Journal of Colloid and Interface Science**. N. 431, 2014, p. 105–111.

GIRO-PALOMA, J.; KONUKLU, Y.; FERNÁNDEZ, A.I. Preparation and exhaustive characterization of paraffin or palmitic acid microcapsules as novel phase change material. **Solar Energy**, vol. 112, 2015, p. 300-309.

GROENESTEIJN, Liesbeth; ELLEGAST, Rolf P.; KELLER, Kathrin; KRAUSE, Frank; BERGER, Helmut; DE LOOZE, Michiel P. Office task effects on comfort and body dynamics in five dynamic office chairs. **Applied Ergonomics** Vol. 43, 2012, p. 320 – 328.



HÄNEL, Sven-Erik; DARTMAN, Torbjörn; SHISHOO, Roshan. Measuring methods for comfort rating of seats and beds. **International Journal of Industrial Ergonomics** Vol. 20, 1997, p. 163- 172.

HAWLADERA, M.N.A.; UDDINA, M.S.; KHIN, M. M. Microencapsulated PCM thermal-energy storage system. **Applied Energy** Vol. 74, 2003, p. 195 – 202.

HERTZBERG, H. T. E. Seat comfort. In: HANSEN, R.; CNRNOG, D. R.; HERTZBERG, H. T. E. (eds). **Annotated Bibliography of Applied Physical Anthropology in Human Engineering**. WADC Technical report. Wright-Patterson Airforce Base: Dayton, OH, 1958, p. 297 – 300.

HOBSON, Douglas; CRANE, Barbara. State of the science white paper on wheelchair seating comfort. In: **Wheelchair Seating: A State-of-the-Science Conference**. Orlando, Florida. Fevereiro, 2001, p. 27 – 33.

HOOLINGTON, James; HILLMAN, Susan J.; TORRES-SANCHEZ, Carmen; BOECKX, Jens; CROSSAN, Neil. ISO 16840-2:2007: load deflection and hysteresis measurements for a sample of wheelchair seating cushions. **Medical Engineering & Physics** 36, 2014, 509–515.

HOOFF, J. Van. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? **Indoor Air**, Vol. 18, 2008, p. 182–201.

HUNT, Peter Cody; BONINGER, Michael L.; COOPER, Rory A.; ZAFONTE, Ross D.; FITZGERALD, Shirley G.; SCHMELER, Mark R. Schmeler. Demographic and Socioeconomic Factors Associated With Disparity in Wheelchair Customizability Among People With Traumatic Spinal Cord Injury. **Arch Phys Med Rehabil**. Vol 85, 2004.

IIDA, Itiro. **Ergonomia: projeto e produção**. São Paulo: Edgard Blucher, 1993.

JIANG, Mengjin; SONG, Xiaoqing; YE, Guangdou; XU, Jianjun. Preparation of PVA/paraffin thermal regulating fiber by in situ microencapsulation. **Composites Science and Technology** Vol. 68, 2008, p. 2231–2237.

JOHNSTON, M.; BONETTI, D. Disability: Psychological and Social Aspects. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences**, 2004, P. 3704-3710.

JUNG, Hwa S.; PARK, Gemus; KIM, Young-Shim; JUNG, Hyung-Shik. Development and evaluation of one-hand drivable manual wheelchair device for hemiplegic patients. **Applied Ergonomics** 48, 2015, p. 11-21.

KOLICH, Mike. A conceptual framework proposed to formalize the scientific investigation of automobile seat comfort. **Applied Ergonomics** Vol. 39, 2008, p. 15–27.

KYUNG, Gyouhyung; NUSSBAUMA, Maury A.; BABSKI-REEVES, Kari. Driver sitting comfort and discomfort (part I): Use of subjective ratings in discriminating car seats and correspondence among ratings. **International Journal of Industrial Ergonomics** Vol. 38, 2008, p. 516–525.

\_\_\_\_\_. Driver sitting comfort and discomfort (part II): Relationships with and prediction from interface pressure. **International Journal of Industrial Ergonomics** Vol. 38, 2008, p. 526–538.

LAMBERTS, Roberto; XAVIER, Antônio Augusto de Paula. Conforto Térmico e Stress Térmico. **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

LEE, L. James; ZENG, Changchun; CAO, Xia; HAN, Xiangming; SHEN, Jiong Shen, Guojun Xu. Polymer nanocomposite foams. **Composites Science and Technology** Vol. 65, 2005, p. 2344–2363.

LINDEN, Júlio Carlos de Souza van der; GUIMARÃES, Lia Buarque de Macedo; TABASNIK, Rafael. **Conforto e desconforto são construtos opostos?** In: III Congresso Internacional de Pesquisa em Design, Rio de Janeiro: Anped (Associação Nacional de Pesquisa em Design), 2005.

LIU, Zhuofu; CASCIOLI, Vincenzo; HEUSCH, Andrew I.; MCCARTHY, Peter W. Studying thermal characteristics of seating materials by recording temperature from 3 positions at the seat-subject interface. **Journal of Tissue Viability** Vol. 20, 2011, p. 73 – 80.

MADENE, A.; JACQUOT, M.; SCHER, J. DESOBRY, S. Flavour encapsulation and controlled release: a review. **International Journal of Food Science and Technology**, n°. 41, 2006, p.1-21.

MÄKINEN, M. Introduction to phase change materials. In: MATTILA, H. R. (ed.). **Intelligent Textiles and Clothing**. Woodhead Publishing Limited: Cambridge, England, 2006, p. 19 – 32.

MARCUZZO, Leciane Cristina. Obtenção, caracterização e aplicação de microcápsulas em espumas de poliuretano visando o conforto térmico para potencial uso na Tecnologia Assistiva. **Dissertação** (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre, 2012.

MCCULLOUGH, E. A.; SHIM, H. The use of phase change materials in outdoor clothing. In: MATTILA, H. R. (ed.). **Intelligent Textiles and Clothing**. Woodhead Publishing Limited: Cambridge, England, 2006, p. 63 – 81.

MIRANTE, Fátima Isabel Cordeiro. Caracterização por cromatografia gasosa de óleos vegetais e ceras parafínicas. **Dissertação** (mestrado). Universidade de Aveiro, 2007.

MOHADDES; F.; ISLAM, S. ; SHANKS, R.; FERGUSON, M. ; WANG, L.; PADHYE, R. Modification and evaluation of thermal properties of melamine- formaldehyde/n-

eicosane microcapsules for thermo-regulation applications. **Applied Thermal Engineering**. N 71, 2014, p. 11-15.

MONDAL, S. Phase change materials for smart textiles – An overview. **Applied Thermal Engineering**, N. 28, 2008, p. 1536 – 1550.

MONLLOR, P; BONET, M. A; CASES, F. Characterization of the behaviour of flavour microcapsules in cotton fabrics. **European Polymer Journal**, vol. 43, 2007, 2481–2490.

MORAES, Helton Scheer de. Projeto conceitual de sistemas de assento para cadeira de rodas: uma abordagem sistemática. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia e Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

NEJMAN, Alicja; GOETZENDORF-GRABOWSKA, Bogna. Heat balance of textile materials modified with the mixtures of PCM microcapsules. **Thermochimica Acta** Vol. 569, 2013, p. 144 – 150.

NEJMAN, A.; CIESLAK, M.; GAJDZICKI, B.; GOETZENDORF-GRABOWSKA, B.; KARASZEWSKA, A. Methods of PCM microcapsules application and the thermal properties of modified knitted fabric. **Thermochimica Acta**, 589, 2014, 158–163.

NELSON, Gordon. Microencapsulation in textile finishing. **Review of Progress in Coloration**. Vol. 31, 2001, p. 57 – 64.

\_\_\_\_\_. Application of microencapsulation in textiles. **International Journal of Pharmaceutics** Vol 242, 2002, p. 55 – 62.

NICHOLSON, Graham P.; SCALES, John T.; CLARK, Raymond P.; CALCINAGOFF, Mervyn L. de. A method for determining the heat transfer and water vapour permeability of patient support systems. **Medical Engineering & Physics** Vol. 21, 1999, p. 701–712.

NOMURA, Takahiro; OKINAKA, Noriyuki; AKIYAMA, Tomohiro. Impregnation of porous material with phase change material for thermal energy storage. **Materials Chemistry and Physics** Vol 115, 2009, p. 846 – 850.

OI, Hajime; TABATA, Koji; NAKA, Yasuhito; TAKEDA, Akira; TOCHIHARA, Yutaka. Effects of heated seats in vehicles on thermal comfort during the initial warm-up period. **Applied Ergonomics** Vol. 43, 2012, p. 360 – 367.

PARSONS, Ken C. An International Thermal Comfort Standard for People with Special Requirements. **Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting**, 2000, p. 440 - 720.

PAUSE, Barbara. Phase change materials show potential for medical applications. **Technical Textiles International**. September, 1999, p. 23 – 26.

\_\_\_\_\_. Interactive thermal insulating system having a layer treated with a coating of energy absorbing phase change material adjacent a layer of fibres containing energy absorbing phase change material. **Patente** USP 6217993, 2001.

\_\_\_\_\_. Driving more comfortably with phase change materials. **Technical Textiles International**. Vol. 11, N. 2, 2002, p. 24 – 27.

\_\_\_\_\_. The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort. **Energy and Buildings** Vol. 34, 2002, p. 593 – 599.

\_\_\_\_\_. Nonwoven protective garments with thermo-regulating properties. **Journal of Industrial Textiles**. 2003, p. 33 – 93.

TOMARIA, Mohd Razali; KOBAYASHI, Yoshinori; KUNO, Yoshinori. Development of Smart Wheelchair System for a User with Severe Motor Impairment. **Procedia Engineering** Vol. 41, 2012, p. 538 – 546.

TREFLER, Elaine; SCHMELER, Mark. State of the science white paper on seating for postural control. In: **Wheelchair Seating: A State-of-the-Science Conference**. Orlando, Florida. Fevereiro, 2001, p. 19 – 25.

RATLIFFE, K. T. **Fisioterapia clínica pediátrica**. São Paulo: Santos, 1999.

RICHARDS, L. G. On the psychology of passenger comfort. In: OBORNE, D. J.; LEVIS, J. A (eds), **Human Factors in Transport Research**. Academic Press: London 1980, Vol. 2, p. 15–23.

ROCHA, A. N. D. C.; DELIBERATO, D. Tecnologia Assistiva para a criança com paralisia cerebral na escola: identificação das necessidades. **Revista Brasileira de Educação Especial**, v.18, n.1, p. 71-92, Jan.-Mar., 2012.

ROSSI, Wagner Soares. Estudo de aplicações e testes de durabilidade de microcápsulas em tecidos. **Dissertação** (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

RUPP, J. Interactive textiles regulate body temperature. **International Textile Bulletin**. Vol. 45, N. 1, 1999, p. 58 – 59.

SAHA, M.C.; KABIR, Md.E.; JEELANI, S. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles. **Materials Science and Engineering** Vol. 479, 2008, p. 213 – 222.

SAFAVI, A.; AMANI-REHRAN, M.; LATIFI, M. A new approach to theoretical modeling of heat transfer through fibrous layers incorporated with microcapsules of phase change materials, **Thermochimica Acta**, vol. 604, n° 20, 2015, p. 24-32.

SAKOIA, Tomonori; TSUZUKIA, Kazuyo; KATOB, Shinsuke; OOKAB, Ryoza; SONG, Doosam; ZHU, Shengwei. Thermal comfort, skin temperature distribution, and sensible heat loss distribution in the sitting posture in various asymmetric radiant fields. **Building and Environment** Vol. 42, 2007, p. 3984 – 3999.

SALAÜN, F.; DEVAUX, E.; BOURBIGOT, S.; RUMEAU, P. Thermoregulating response of cotton fabric containing microencapsulated phase change materials. **Thermochimica Acta** Vol. 506, 2010, p. 82 – 93.

SALAÜN, F.; VROMAN, I.; ELMAJID, I. A novel approach to synthesize and to fix microparticles on cotton fabric. **Chemical Engineering Journal**, Vol. 213, 2012, p. 78–87.

SÁNCHEZ, Luz; LACASA, Engracia; CARMONA, Manuel; RODRÍGUEZ, Juan F.; SÁNCHEZ, Paula. Applying an Experimental Design to Improve the Characteristics of Microcapsules Containing Phase Change Materials for Fabric Uses. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. Vol. 47, N. 23, 2008, p. 9783 – 9790.

SARIER, N.; ONDER, E. Thermal characteristics of polyurethane foams incorporated with phase change materials. **Thermochimica Acta**. 2007, p. 452 – 459.

SAWADA, N.; HATTA, T. Hatta; KISHIGAMI, H.; SHIMIZU, M. Shimizu; YODA, T. Yoda; GODA, H. The effect of a newly developed wheelchair with thoracic and pelvic support on cervical movement and muscle activity in healthy elderly women. **European Geriatric Medicine**, xxx, 2014, xxx–xxx. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurger.2014.11.001>, acesso em: 03 de fevereiro de 2015.

SCHADE, Hans R.; BAGGERLY, Patricia A.; WOODS, David R. Frosted coating for sweetened foods. US 4079151 A. Depósito em 29 maio 1975, publicado em 14 março 1978.

SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Vol. 13, 2009, p. 318 – 345.

SHAW, C. G. Seat Cushion Comparison for Nursing Home Wheelchair Users. **Assistive Technology**. Vol. 5, N.2, 1993, p. 92-105.

\_\_\_\_\_. Nursing Home Wheelchair Users: Seat Comfort and Peak Pressure. **Bioengineering**. Glasgow, Scotland, University of Strathclyde, 1996, p. 249.

SHEN, Wenqi; PARSONS, Kenneth C. Validity and reliability of rating scales for seated pressure discomfort. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Vol. 20, 1997, p. 441 – 461.

SHIN, Y.; YOO, D.; SON, K. Development of Thermoregulating Textile Materials with Microencapsulated Phase Change Materials (PCM). **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 97, No. 3, 2005, pp. 910-915.

SLATER, Keith. **Human Comfort**. Springfield (Illinois): Charles C. Thomas, 1985.

SMITH, J. Well-being and health from age 70 to 100: findings from the Berlin Aging Study. **European Review**. Vol. 9, 2001, p. 461-77.

SMITH, D.R.; ANDREWS, D.M.; WAWROW, P.T. Development and evaluation of the automotive seating discomfort questionnaire (ASDQ). **International Journal Industrial Ergonomics**. Vol. 36, 2006, p. 141 – 9.

SONNENSCHNEIN, Mark; WENDT, Benjamin L.; SCHROCK, Alan K.; SONNEY, Jean-Marie; RYAN, Anthony J. Ryan. The relationship between polyurethane foam microstructure and foam aging. **Polymer** Vol. 49, 2008, p. 934 – 942.

STOCKTON, Lesley; RITHALIA, Shyam. Pressure-reducing cushions: Perceptions of comfort from the wheelchair users' perspective using interface pressure, temperature and humidity measurements. **Journal of Tissue Viability** Vol. 18, 2009, p. 28 – 35.

SU, Jun-Feng; HUANG, Zhen; REN, Li. High compact melamine-formaldehyde microPCMs containing n-octadecane fabricated by a two-step coacervation method. **Colloid Polymer Science**, vol. 285, 2007, p. 1581 – 1591.

SUN, G; ZHANG, Z. Mechanical properties of Melamine-Formaldehyde Microcapsules. **Journal of Microencapsulation**, Vol. 18, N. 5, 2001, p. 593 - 602.



- VERGARA, Margarita; PAGE, Álvaro. Relationship between comfort and back posture and mobility in sitting-posture. **Applied Ergonomics** Vol. 33, 2002, p. 1 – 8.
- VERHEYEN, Jan; THEYS, Nele; ALLONSIUS, Luk; DESCAMPS, Filip. Thermal comfort of patients: Objective and subjective measurements in patient rooms of a Belgian healthcare facility. **Building and Environment**. Vol. 46, 2011, p. 1195 – 1204.
- VINK, Peter; DE LOOZE, Michiel P. Crucial elements of designing for comfort. **Product Experience** Vol. 1, 2008, p. 441 – 460.
- WADA, A.; TEIXEIRA NETO, N.; FERREIRA; M. C. Úlceras por pressão. **Revista de Medicina**. São Paulo, 2010, jul.-dez.; Vol 89(3/4), p.170-7.
- WEBB, Lynda H.; PARSONS, Ken C. Thermal comfort requirements for people with physical disabilities, sustainable building, in: **Proceedings of the BEPAC and EPSRC Mini Conference**, Oxford, UK, February 1997.
- YING, Bo-an; KWOK, Yi-lin; LI, Yi; ZHU, Qing-yong; YEUNG, Chap-yung. Assessing the performance of textiles incorporating phase change materials. **Polymer Testing** Vol. 23, 2004, p. 541 – 549.
- YOU, M.; ZHANG, X.X.; LI, W.; WANG, X.C. Effects of MicroPCMs on the fabrication of MicroPCMs/polyurethane composite foams. **Thermochimica Acta** Vol. 472, 2008, p. 20 – 24.
- YOU, Ming; ZHANG, Xing-xiang; WANG, Xue-chen; ZHANG, Li; WEN, Wen. Effects of type and contents of microencapsuled n-alkanes on properties of soft polyurethane foams. **Thermochimica Acta** Vol. 500, 2010 p. 69 – 75.
- ZHANG, Huanzhi; WANG, Xiaodong. Fabrication and performances of microencapsulated phase change materials based on n-octadecane core and

resorcinol-modified melamine–formaldehyde shell. **Colloids and Surfaces A: Physicochemistry and Engineering Aspects** Vol. 332, 2009, p. 129 – 138.

ZHANG, L., HELANDER, M.G., DRURY, C.G. Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human Factors*. Vol. 38, 1996, p. 377 – 389.

ZHANG, Yufeng; ZHAO, Rongyi. Overall thermal sensation, acceptability and comfort. **Building and Environment**. Vol. 43, 2008, p. 44 – 50.

ZHANG, Ying; WANG, Xiaodong; WU, Dezhen. Design and fabrication of dual-functional microcapsules containing phase change material core and zirconium oxide shell with fluorescent characteristics. **Solar Energy Materials & Solar Cells**. N. 133, 2015, p. 56–68.