



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JOEL AUGUSTO LIMA DO NASCIMENTO

**CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA NA REESTRUTURAÇÃO DE UMA SALA DE
DESGASEIFICAÇÃO DE RESINA EPÓXI**

FORTALEZA

2018

JOEL AUGUSTO LIMA DO NASCIMENTO

CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA NA REESTRUTURAÇÃO DE UMA SALA DE
DESGASEIFICAÇÃO DE RESINA EPÓXI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira
Carvalho Filho.

FORTALEZA

2018

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

N195c Nascimento, Joel Augusto Lima do.
Cálculo da Carga Térmica na Reestruturação de uma Sala de Desgaseificação de Resina Epóxi / Joel Augusto Lima do Nascimento. – 2018.
56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho.

1. Carga Térmica. 2. Desgaseificação. 3. Resina epóxi. 4. Pá eólica. I. Título.

CDD 620.1

JOEL AUGUSTO LIMA DO NASCIMENTO

CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA NA REESTRUTURAÇÃO DE UMA SALA DE
DESGASEIFICAÇÃO DE RESINA EPÓXI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Maria Alexandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Valente Bueno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, a quem sempre me confio.

Aos meus pais Augusto e Luiza, à minha irmã
Mariane e aos meus avós Maria Rocha, Rozália,
Luiz e Vicente (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em minha fé, sempre me deu forças e me conduziu pelos melhores caminhos, colocando nele as pessoas certas e as melhores oportunidades que nem eu poderia imaginar para mim.

Ao Prof. Dr. Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho, que dedicou de seu tempo e compartilhou seus conhecimentos comigo, orientando e auxiliando na elaboração deste trabalho de forma excelente e aos professores doutores Maria Alexsandra de Sousa Rios e André Valente Bueno por se disporem em participar desta banca examinadora e contribuírem com seus conhecimentos.

À minha família, em especial aos meus pais José Augusto e Luiza por todo esforço e dedicação dados a mim, durante toda minha vida e por serem meu maior exemplo de respeito, honestidade e força de vontade, sempre me apoiando e nunca deixando me faltar nada; à minha irmã Mariane e aos meus avós Maria Rocha, Rozália, Luiz e Vicente (in memoriam), por todo amor e por tornarem as dificuldades do dia a dia mais leves.

Aos amigos e colaboradores da empresa Aeris Energy, em especial aos membros da equipe de Engenharia AW/GE/WEG, ao engenheiro Vinicius e meu coordenador Bruno pelas dicas e auxílio no planejamento e desenvolvimento deste trabalho; à líder Érica e ao colaborador Adílio, que muito contribuíram com os testes na sala de desgaseificação.

Aos amigos que a graduação me presenteou: Igor, Mônica, Germano, Isabela, Tales, Ítalo, Caio, Lucas, Bruno, Diego e Eugênio, por dividirem comigo seus conhecimentos, angústias, alegrias e por fazerem parte da minha graduação e, também, da minha vida.

À minha namorada Amanda por toda compreensão, conselho, consolo e carinho dados a mim todo esse período. Aos meus amigos, presentes de Deus para mim: Carol, Bruno, Talita, Larissa, Marina, Fábio, Victor e Aninha, que sempre estiveram comigo, que muito me ajudaram e que espero sempre tê-los em minha vida.

Aos amigos da época de CEFET: Pâmela, Gabriela, Nayara, Adriana, Alexandre e Victor, que foram os primeiros a compartilhar comigo momentos tão especiais e de formação acadêmica e que, até hoje, estão comigo de forma tão especial e significativa, não importando a distância.

A todos meus familiares e amigos de infância que sempre acreditaram em mim e que compartilho os melhores momentos da vida, em especial aos meus tios Francisca e Assis e seus filhos; aos tios da família Lima, aos meus padrinhos Lucas e Luiza e seus filhos; aos

amigos Felipe e Tiago pelo companheirismo de vida e à Raimunda e família, que são vizinhos que considero parte da família.

“Obedecei mais aos que ensinam, do que aos
que mandam.”

(Santo Agostinho)

RESUMO

A fabricação de pás eólicas por infusão de resina epóxi é precedida pelo processo de desgaseificação da resina, a fim de que esse polímero seja utilizado na linha de produção com uma quantidade mínima de ar em seu conteúdo líquido. Ao sair da máquina desgaseificadora, a resina está a uma temperatura de, aproximadamente, 41 °C, devendo ser enviada à produção a uma temperatura de cerca de 25 °C, além disso, a temperatura do ar da sala deve ser cerca de 19 °C, ambos dados determinados experimentalmente. Para esse controle, a resina permanece armazenada 24 h na sala. Com o intuito de garantir essas condições térmicas, foram feitos experimentos para verificar a eficácia de um condicionador de ar para refrigerar o recinto. Os resultados desses testes não foram satisfatórios, havendo a necessidade de calcular a carga térmica de resfriamento da sala, com base nas normas ABNT NBR 16401 e o Handbook ASHRAE, com o objetivo de selecionar adequadamente a quantidade ideal de condicionadores de ar. A carga é calculada e a quantidade de condicionadores definida. Novos testes foram realizados, com a finalidade de verificar a eficácia da nova quantidade de condicionadores, e seus resultados foram satisfatórios, reforçando a importância do cálculo da carga térmica para uma adequada seleção e dimensionamento dos equipamentos necessários para obtenção das condições requeridas. Além disso, esse estudo permitiu identificar pontos de melhorias, possíveis problemas e soluções que envolvem o armazenamento e arrefecimento de resinas epóxi, como também, discutir sobre os impactos que o não atendimento das condições de temperatura podem gerar na fabricação da pá eólica.

Palavras-chave: Carga Térmica. Desgaseificação. Resina epóxi. Pá eólica.

ABSTRACT

The infusion process of epoxy resin during the rotor blades manufacturing is preceded by resin deaeration process, to ensure that the polymer is used on production line with a minimum quantity of air in its liquid content. As the resin comes out of the deaerator, its temperature is at 41 °C, approximately, and should be send to the production line at 25 °C, furthermore, the room's air temperature should be around 19 °C. Both values were obtained experimentally. For temperature control, the resin must be stored during 24 hours inside the deaeration room. In order to guarantee these thermal conditions, tests were made to verify the effectiveness when just one air conditioner is cooling the room. The tests results were unsatisfactory, and thus there was need to calculate the cooling load of the room, based on current standard ABNT NBR 16401 and Handbook ASHRAE , with an aim to select the optimum quantity of air conditioners. New tests were made with the purpose to verify the effectiveness of the new quantity of conditioners, reinforcing the significance of cooling load calculation for appropriate selection and dimensioning of necessary equipments to obtain the required temperature conditions. Furthermore, this study allows to identify areas for improvement, potential problems and solutions that involve epoxy resins storing and cooling, and, discuss about the impacts on rotor blades manufacturing, in case of temperature condition is non-compliance.

Keywords: Cooling Load. Deaeration. Epoxy resin. Rotor blade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Esquema representativo de uma desgaseificadora de resina com preaquecimento	19
Figura 2	– Estrutura química da resina epóxi e do agente de cura (endurecedor).....	21
Figura 3	– Transferência de calor unidimensional por condução.....	22
Figura 4	– Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção..	23
Figura 5	– Fatores que afetam as cargas térmicas.....	27
Figura 6	– Fluxo da metodologia utilizada.....	28
Figura 7	– Datalogger utilizado para coleta de dados de temperatura.....	32
Figura 8	– Esquema de organização da sala de desgaseificação após reestruturação.....	34
Figura 9	– Interface do CoolPack para obtenção do valor de umidade absoluta ambiente	36
Figura 10	– Modelo de tijolo de concreto utilizado.....	37
Figura 11	– Área onde ocorre o processo de desgaseificação da resina epóxi.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Viscosidade da mistura resina + endurecedor versus temperatura.....	15
Gráfico 2 – Variação de temperatura da sala em 24h com apenas um condicionador de ar em funcionamento.....	44
Gráfico 3 – Variação de temperatura da resina com um condicionador de ar em funcionamento.....	45
Gráfico 4 – Variação adimensional de temperatura da resina para um condicionador de ar em funcionamento.....	46
Gráfico 5 – Variação de temperatura da sala em 24h com dois condicionadores de ar em funcionamento.....	48
Gráfico 6 – Variação de temperatura da resina com dois condicionadores de ar em funcionamento.....	49
Gráfico 7 – Variação adimensional de temperatura da resina com dois condicionadores de ar em funcionamento.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comportamento mecânico de compósitos de epóxi de alto desempenho com vários tipos de fibra.....	20
Tabela 2 – Dados geográficos da sala.....	33
Tabela 3 – Tabela de dados de temperatura média para a cidade de Fortaleza.....	35
Tabela 4 – Coeficientes de convecção para paredes exteriores e interiores.....	38
Tabela 5 – Intensidade de radiação solar durante o ano para latitude de 4° Sul.....	38
Tabela 6 – Absorção de radiação solar por cor de superfície.....	39
Tabela 7 – Modelo básico de coeficiente de empilhamento.....	39
Tabela 8 – Modelo básico de coeficiente de vento.....	40
Tabela 9 – Taxa de metabolismo por tipo de atividade.....	41
Tabela 10 – Quantidades de calor calculadas para a sala de desgaseificação.....	46
Tabela 11 – Carga Térmica total calculada.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
IBC	Intermediate Bulk Container
NBR	Norma Brasileira
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Ploricloreto de Vinila
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície
A_s	Área onde ocorre convecção
$c_{p,ar}$	Calor específico do ar
c_{PEAD}	Calor específico do PEAD
c_r	Calor específico da resina
CO_2	Dióxido de carbono
C_s	Coefficiente de empilhamento
C_w	Coefficiente de vento
G	Irradiação
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
$h_{a,e}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção no lado externo
$h_{a,i}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção no lado interno
h_e	Coefficiente de transferência de calor por convecção externo
h_i	Coefficiente de transferência de calor por convecção interno
I_g	Intensidade de radiação solar incidente global para uma dada região
k	Condutividade térmica
L	Comprimento linear
m_{IBC}	Massa do IBC
m_r	Massa de resina
n	Número de pessoas que circulam na sala
n_L	Número de lâmpadas do recinto
n_p	Número médio de horas que cada pessoa permanece na sala
P	Potência nominal
P_L	Potência de cada lâmpada
q	Taxa de transferência de calor
q_p	Calor metabólico gerado por pessoa
\dot{Q}_{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção
Q_e	Calor que adentra na zona através de sua estrutura
Q_l	Calor latente
Q_m	Calor gerado por motor elétrico

Q_p	Calor gerado pelos ocupantes
Q_r	Calor gerado pela resina
Q_s	Calor sensível
Q_{IBC}	Calor gerado pela embalagem do IBC
Q_L	Calor dissipado pelas lâmpadas
r	Porcentagem de calor dissipado pelos reatores da lâmpada
R	Resistência dos modos de transferência que compõem as seções do sistema
t	Média das temperaturas
$t_{a,e}$	Temperatura ambiente externa
$t_{a,i}$	Temperatura ambiente interna
t_e	Temperatura externa
t_i	Temperatura interna
T	Temperatura
T_∞	Temperatura do fluido distante da superfície
T_r	Temperatura inicial da resina
T_s	Temperatura na superfície
T_{sr}	Temperatura final desejada para a resina
T_{IBC}	Temperatura inicial do IBC
U	Coefficiente Global de Transferência de Calor
U	Velocidade média do vento
V	Volume de ar que é infiltrado no ambiente
w	Razão de umidade
α	Absortividade ou coeficiente de absorção de radiação
Δt	Gradiente de temperatura
ΔT	Gradiente de temperatura entre o meio externo e o interno
Δ_w	Diferença de razão de umidade entre dentro e fora da zona
η	Rendimento
θ_i	Diferença entre a temperatura inicial da resina e a do ar sala
θ_t	Diferença entre a temperatura da resina em um instante de tempo e a do ar sala
ρ_{ar}	Massa específica do ar
τ	Transmissividade do material

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivos.....	17
1.3 Objetivos específicos.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Processo de Desgaseificação da Resina	18
2.2 Resina Epóxi.....	19
2.3 Transferência de calor em paredes e superfícies planas	21
2.3.1 <i>Condução</i>	21
2.3.2 <i>Convecção</i>	23
2.3.3 <i>Radiação Térmica</i>	24
2.3.4 <i>Coefficiente Global de Transferência de Calor</i>	25
2.4. Carga Térmica	26
3 METODOLOGIA	28
3.1 Cálculo da Transmissão de Calor.....	28
3.2 Cálculo de Insolação	29
3.3 Cálculo de Infiltração.....	29
3.4 Cálculo da Geração Interna de Calor.....	30
3.4.1 <i>Pessoas</i>	30
3.4.2 <i>Iluminação</i>	31
3.4.3 <i>Motor Elétrico</i>	31
3.4.4 <i>Equipamentos de escritório e outras fontes de calor</i>	31
3.5 Análise de resfriamento da resina	32
4 ESTUDO DE CASO	33
4.1 Parâmetros da sala	33
4.2 Uso de apenas um condicionador de ar na sala	35
4.3 Dados climáticos	35
4.3 Memorial de cálculo	37
4.4 Análise de arrefecimento da resina epóxi	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
6 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A energia dos ventos tem se tornado uma das principais alternativas para a geração de eletricidade, pois possui baixo impacto ambiental e os parques eólicos não oferecem riscos diretos à saúde humana ou qualquer outro impacto potencial aos humanos (NHMRC, 2010). Além disso, o vento é um recurso renovável e o impacto de implantação das usinas eólicas é baixo, em relação à emissão de CO₂. Em 2017, a fonte eólica fez com que 20,97 milhões de toneladas de CO₂ não fossem emitidas para a atmosfera, como também se apresentou como um dos melhores custo-benefício na tarifa de energia, nos leilões nacionais realizados (ABEEÓLICA, 2017).

Ainda nesse mesmo ano, a produção de energia elétrica brasileira, obtida a partir de fontes eólicas, cresceu 26,5% em relação ao produzido no ano de 2016 (CCEE, 2017). Esse aumento pode ser associado a um maior investimento dado a esse setor. Até o fim do ano de 2017, no Brasil, estavam contabilizados 508 parques eólicos, gerando mais de 30 mil postos de trabalho, com um investimento de R\$ 11,4 bilhões (ABEEÓLICA, 2017). Paralelamente a esse aumento na oferta de energia limpa, está a indústria de fabricação de componentes, que age suprindo a demanda das peças e equipamentos necessários para a montagem das turbinas eólicas, que constituem os campos eólicos (JACOB et al., 2009).

Há basicamente dois tipos de turbinas disponíveis no mercado, que são diferenciadas pelo posicionamento do eixo de rotação do rotor. São elas: turbina eólica de eixo horizontal e turbina eólica de eixo vertical, sendo a primeira a mais moderna e a mais encontrada atualmente nos principais campos eólicos europeus e americanos. Os principais componentes que constituem um aerogerador de turbinas eólicas de eixo horizontal são a torre, a gôndola (nacele) e o rotor. Este último é composto por três subsistemas: hub, sistema de controle de pitch e, estando em maior destaque, a pá eólica, que converte a energia cinética do vento em energia mecânica (HAU, 2013).

Neste contexto, as pás eólicas são os componentes que possuem maior importância em termos de performance e custos relacionados à geração de energia elétrica pela força dos ventos. Isso porque seu perfil aerodinâmico influencia de forma direta na eficiência de conversão da energia mecânica, além do mais, seu custo de fabricação possui valor significativo e certa complexidade de produção (BERG, MUYEEN, 2016).

A pá eólica pode ser fabricada com materiais como o alumínio, aço, titânio, madeira ou materiais compósitos de matriz polimérica, onde a fibra de vidro e/ou a fibra de carbono atuam como reforços. Dentre essas opções, a fabricação por utilização de fibras de vidro é a que possui

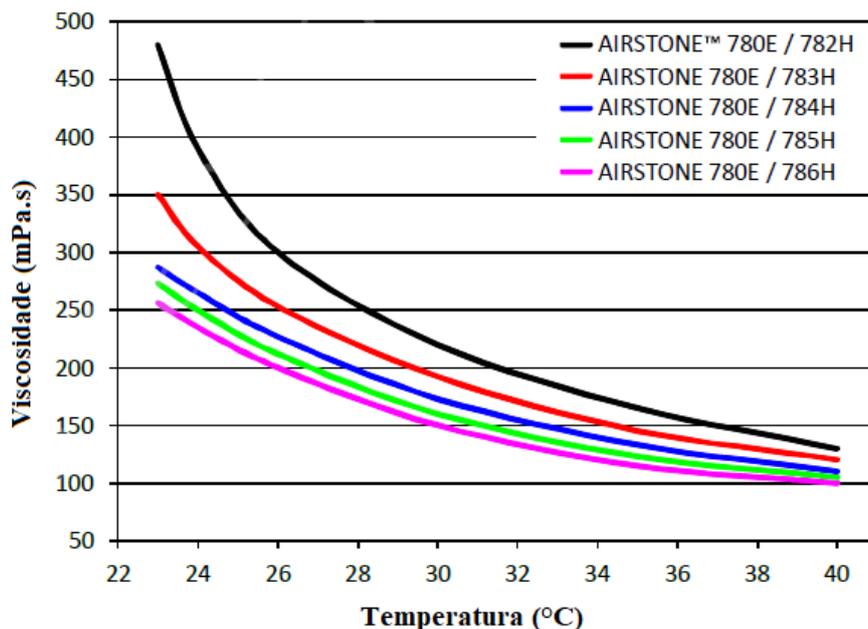
maior destaque, estando presente na maioria dos processos de fabricação de pás, que são produzidas no mercado atual (HAU, 2016).

A matriz polimérica utilizada nos processos de manufatura é a resina sintética. A resina influencia em algumas propriedades, como aumento da rigidez, devido ao bom módulo de elasticidade do material, além disso, distribui de forma eficiente, entre a matriz e as fibras de vidro, os esforços sofridos pela pá (JACOB et al., 2009). Há dois tipos de resina que podem ser utilizadas na combinação com a fibra de vidro, que são as resinas poliéster e as resinas epóxi. Esta última é largamente utilizada na fabricação de pás, devido à qualidade final e boa resistência à fadiga e a altas concentrações de carga. (HAU, 2016).

Antes de chegar à linha de produção, a resina deve passar um processo de desgaseificação prévio. Esse tratamento garante que a resina seja utilizada com uma quantidade mínima aceitável de ar em seu conteúdo líquido. Isso evita que surjam falhas na matriz polimérica, durante o processo de infusão e cura da resina no processo de fabricação. Ao sofrer o processo de desgaseificação, a resina sai da máquina desgaseificadora a uma temperatura de, aproximadamente, 41 °C (AERIS, 2018).

Sabe-se que, quando a mistura resina + endurecedor está em temperatura superior a 33 °C, há um aumento nos defeitos durante o processo de fabricação, como surgimento de microbolhas na matriz polimérica curada. Isso porque, quanto mais quente, menos viscosa a mistura (Gráfico 1), o que prejudica sua impregnação nas fibras de vidro.

Gráfico 1 – Viscosidade da mistura resina + endurecedor versus temperatura



Fonte: Adaptado de Dow Chemical Company (2018).

Nesse contexto, testes foram feitos e comprovou-se que, para garantir um melhor padrão de fabricação, com menor ocorrência de defeitos, a resina epóxi deve ser utilizada na linha de produção a uma temperatura de 25 °C, para que, ao ser misturada com o endurecedor, a temperatura da mistura, que tende a aumentar de forma instantânea, não interfira em sua impregnação nas fibras de vidro (AERIS, 2017).

Ainda segundo Aeris (2017), é necessário criar um local ou dispositivo que garanta que a resina desgaseificada chegue à linha de produção a uma temperatura próxima de 25°C, uma vez que essa temperatura garante uma margem de segurança de 6 °C, para que a resina, ou a sua mistura com o endurecedor, não atinja o valor crítico de 33 °C, diminuindo, assim, as chances de que microbolhas surjam durante o processo de fabricação. Uma das alternativas para alcançar os valores descritos acima é resfriar a resina em uma temperatura ambiente de cerca de 19 °C por um período de 24 h e em local fechado.

Segundo DOW (2014), nas informações contidas na Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) da resina, esse material possui baixa volatilidade, liberando uma quantidade mínima de vapores à temperatura ambiente. A resina libera vapores e/ou névoas contendo compostos fenólicos, monóxido de carbono e água durante reação exotérmica incontrolável, que ocorre somente quando ela é misturada com seu respectivo endurecedor.

Nesse contexto, o ambiente onde a resina é armazenada não está sujeito à incidência desses compostos citados acima, uma vez que a mistura de resina com o endurecedor ocorre somente no momento da fabricação da pá. Assim, os funcionários que realizam as movimentações dos tambores contendo resina, bem como a preparação da desgaseificação, estão suscetíveis apenas às quantidades mínimas dos vapores liberados devido alguma abertura dos tambores contendo o polímero e, por isso, utilizam máscaras semifaciais com filtro ao realizar suas atividades dentro do recinto, apenas como medida preventiva, com o intuito de diminuir consideravelmente, ou mesmo extinguir, a possível inalação direta desses gases.

Além disso, todos os contêineres, exceto o que contém a resina que será desgaseificada, permanecem fechados na sala e os funcionários ficam apenas o tempo necessário para realizar as atividades previstas, não estando por muito tempo dentro do recinto. Por fim, como condição principal, o ambiente de armazenamento deve permanecer entre 2 °C e 43 °C e, mesmo não sendo um produto inflamável, mantê-lo longe de chamas ou fontes de ignição (DOW, 2014).

1.1 Justificativa

Com a necessidade de garantir as condições descritas, para que a desgaseificação ocorra de forma adequada e o armazenamento da resina desgaseificada atenda aos requisitos de fabricação, houve a necessidade de reestruturar a sala onde o processo de desgaseificação ocorre, em que, a partir de sua nova organização, foi possível analisar as situações de armazenamento e arrefecimento da resina, como também calcular a carga necessária para garantir os critérios de uso da resina em linha de produção e selecionar a quantidade de condicionadores de ar necessários para garantir as condições ambientes desejadas.

1.2 Objetivos

Este trabalho expõe o cálculo da carga térmica realizado durante a reestruturação de uma sala de desgaseificação de resina, a fim de selecionar condicionadores de ar que atendam às necessidades do ambiente de desgaseificação e armazenamento, baseados nas condições de uso da resina utilizada na fabricação de pás eólicas.

1.3 Objetivos específicos

- Levantar dados e requisitos técnicos de temperatura, de fabricação e das condições de armazenamento que devem ser atendidas pelo sistema de condicionamento de ar;
- Determinar a Carga Térmica de resfriamento do ambiente, com base nos parâmetros e condições ambientais locais;
- Selecionar condicionadores de ar que supram a demanda da carga térmica ambiente;
- Avaliar o comportamento de resfriamento da resina, observando sua variação de temperatura durante o tempo que permanece armazenada na sala.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho apresenta o cálculo da carga térmica após a reestruturação de uma sala de desgaseificação de resina epóxi, como também a análise da variação de temperatura da resina dentro de seu reservatório plástico. Para que esse estudo possa ser entendido de forma mais clara, é necessário conceituar alguns pontos, que servem como base teórica para o desenvolvimento dos cálculos e experimentos realizados.

Dentre esses pontos, podemos destacar o processo de desgaseificação de resina, as características da resina epóxi, os conceitos que envolvem o estudo da Transferência de Calor e os fundamentos dos cálculos da Carga Térmica utilizados como referência para obter os parâmetros desejados para a sala de desgaseificação.

2.1 Processo de Desgaseificação da Resina

O processo de desgaseificação ocorre mais comumente nas indústrias do setor metalúrgico, em que há a necessidade de se retirar gases como hidrogênio, oxigênio e nitrogênio do conteúdo líquido dos metais durante o processo de fundição (TÂMEGA, 2017). O processo de remoção de gases ocorre, também, em outros materiais capazes de incorporar gases em seu conteúdo líquido. A resina é um exemplo desses materiais.

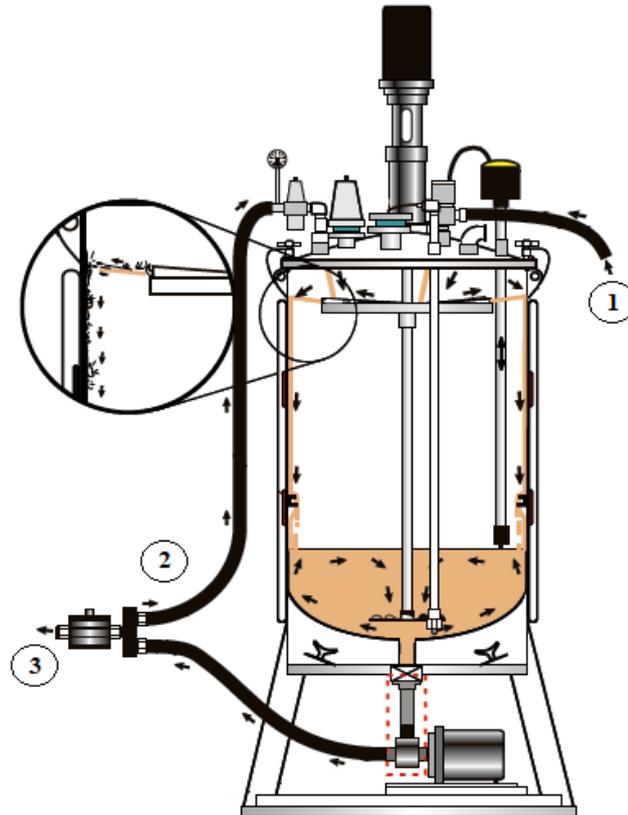
Uma das formas de desgaseificação, utilizada para retirada do ar do conteúdo líquido da resina, se dá através da máquina de desgaseificação, também chamada de desgaseificadora. O processo ocorre da seguinte maneira: a resina é sugada de seu recipiente e lançada para dentro da máquina desgaseificadora. Isso acontece com o auxílio de uma bomba de vácuo, que é conectada ao tanque onde ocorre a desgaseificação, gerando vácuo no sistema, fazendo com que haja a admissão de resina no tanque (APT, 2009).

A resina entra na parte superior, escorrendo em um prato rotatório dotado de aletas. A rotação faz com que o polímero seja lançado pulverizado para as paredes do tanque, fazendo com que as bolhas de ar eclodam ao se chocarem e escorrerem pela parede da desgaseificadora. A resina é então acumulada até certo volume, que é estipulado no início do processo. Esse volume acumulado é aquecido e recirculado no sistema, para melhorar a eficiência da desgaseificação (APT, 2009).

Por fim, a resina desgaseificada é lançada em um reservatório vazio, por ação de uma bomba de vácuo de deslocamento positivo situada embaixo do tanque. A temperatura média da resina, ao sair da máquina, é de 41°C. Um esquema representativo da máquina de

desgaseificação é demonstrado na Figura 1, onde 1 representa a entrada de resina, 2 a recirculação e 3 a ejeção de resina da máquina.

Figura 1 – Esquema representativo de uma desgaseificadora de resina com preaquecimento



Fonte: Adaptado de APT Inc. (2009).

2.2 Resina Epóxi

Usualmente, a resina epóxi constitui um sistema de mistura de componentes, que são combinados em quantidades proporcionais, de acordo com suas aplicações e especificações. Os principais componentes dessa mistura são a resina epóxi e o agente de cura, também chamado de endurecedor. Além disso, é possível acrescentar solventes, aditivos e outras substâncias, a fim de aprimorar as propriedades da mistura (HUNTSMAN, 2010).

A resina epóxi é um tipo de polímero – macromolécula constituída por uma série de pequenas moléculas unidas através de ligações covalentes – que possui variadas aplicações em diferentes setores no mercado. Estudos envolvendo a síntese de resina epóxi datam desde o ano de 1936, em que o pesquisador suíço Pierre Castan utilizou esse polímero para fins de uso odontológico (SILVEIRA, 2009).

Atualmente, as resinas epóxi constituem $\frac{1}{4}$ dos materiais compósitos e laminados, que utilizam fibras para constituírem a matriz polimérica. As fibras mais usuais são as de tecido, de carbono e de aramida (FINK, 2018). Essa resina possui grande procura devido às suas boas propriedades mecânicas e baixa viscosidade, o que facilita sua impregnação nas fibras que constituem o compósito. Devido a isso, a indústria aeroespacial e eólica a utilizam de forma majoritária (JACOB *et al.*, 2009). A Tabela 1 demonstra algumas propriedades da resina e de compósitos que a contém.

Tabela 1 – Comportamento mecânico de compósitos de epóxi de alto desempenho com vários tipos de fibra

Fibra Compósito*	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Densidade (g/cm³)
Resina Epóxi	3,5	0,09	1,20
Fibra de vidro tipo E	72,4	2,4	2,54
Compósito de epóxi	45	1,1	2,10
Fibra de vidro tipo S	85,5	4,5	2,49
Compósito de epóxi	55	2,0	2,00
Fibra de boro	400	3,5	2,45
Compósito de epóxi	207	1,6	2,10
Fibra de grafite de alta resistência	253	4,5	1,80
Compósito de epóxi	145	2,3	1,60
Fibra de grafite de alto módulo	520	2,4	1,85
Compósito de epóxi	290	1,0	1,63
Fibra aramida (Kevlar)	124	3,6	1,44
Compósito de epóxi	80	2,0	1,38

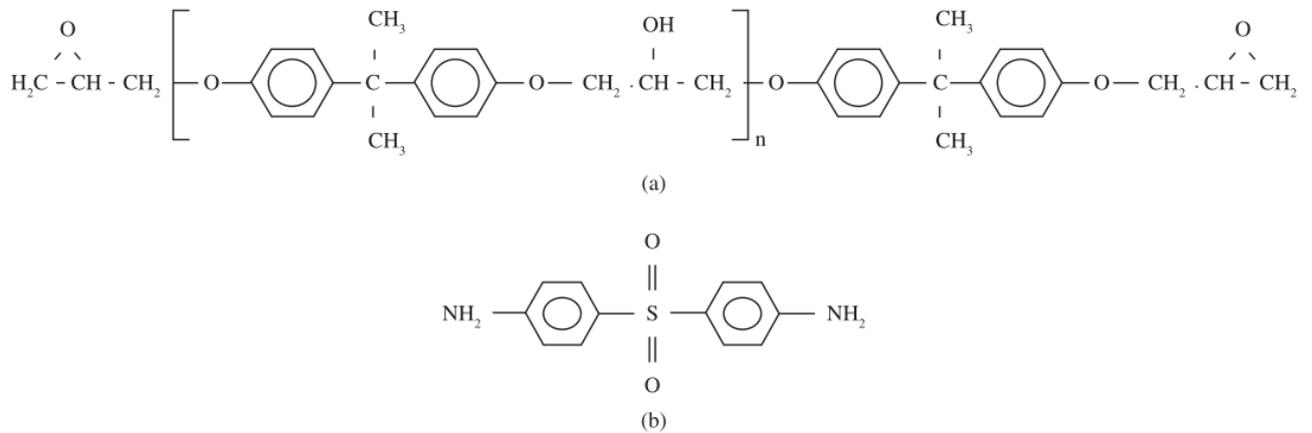
Fonte: Adaptado de Canevarolo Júnior (2002).

*Compósito com 33,3% de fibra unidirecional.

A resina epóxi é comercializada, geralmente, em estado líquido e deve ser misturada a um endurecedor, para que haja um processo de cura e ela se torne rígida. Além de um agente catalizador, essa cura necessita de calor, para que o processo de obtenção da matriz polimérica desejada ocorra de forma mais rápida e eficiente (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

A composição química mais comum para resinas epóxi é a formada a partir da reação de epícloridrina com bisfenol A ou bisfenol F. Esses polímeros pertencem ao grupo de resinas sintéticas, que podem ser encontradas no estado líquido ou sólido (HUNTSMAN, 2010). A Figura 2 representa a molécula formada pela reação da epícloridrina com bisfenol A, item (a), e o seu respectivo endurecedor, item (b).

Figura 2 – Estrutura química da resina epóxi e do agente de cura (endurecedor)



Fonte: Adaptado de Leal, Silva e Araújo (2012).

2.3 Transferência de calor em paredes e superfícies planas

Segundo Incropera *et al.* (2008), “calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”. Já Çengel e Ghajal (2012) definem o calor como “a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles”.

A transferência de calor pode ocorrer de diferentes modos, que são diferenciados pela maneira em que o processo de transmissão de energia térmica se comporta. Esses modos são classificados como condução, convecção e radiação térmica. O primeiro e o último modo dependem apenas da diferença de temperatura, para que ocorra troca de energia térmica no sistema. Já o segundo modo depende, também, do transporte mecânico de massa, além da diferença de temperatura (KREITH, BOHN, 2003).

2.3.1 Condução

Nesse modo, a transmissão de energia térmica ocorre através de meios sólidos ou fluidos, quando estes apresentam gradiente de temperatura. Analisando de forma atômica, a energia flui no sentido das partículas de maior energia para as menos energéticas (MORAN *et al.* 2005). Essa transferência de energia pode ser explicada pelo movimento aleatório das moléculas, onde as de maior temperatura, e por consequência as mais agitadas, se chocam com as de menor temperatura, transferindo a energia para moléculas de menor energia. Esse processo de transmissão energética através do movimento aleatório das partículas é conhecido como

difusão (ÇENGEL, GHAJAL, 2012).

Tomando como base um meio homogêneo, é possível calcular a taxa de transferência de calor do meio, que é dada pela Equação 2.1:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

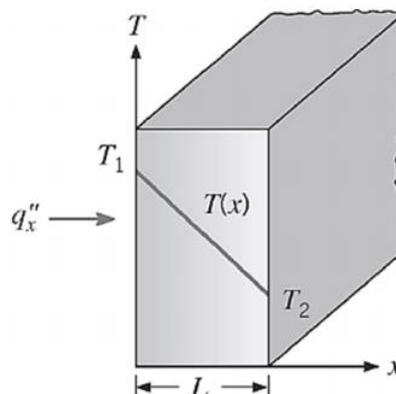
Esta equação é conhecida também como Lei de Fourier. A constante k indica a condutividade térmica, que depende das propriedades do material que constitui o meio por onde ocorre a transferência de calor em um determinado período. Sua unidade de medida é expressa por $W/m \cdot K$, no Sistema Internacional (SI). Além disso, a taxa de transferência q_x é dada em watts (W), a área A em metros quadrados (m^2), a temperatura T em Kelvin (K) e a distância na direção x , por onde ocorre a transferência, em metros (m) (KREITH, BOHN, 2003).

Considerando um regime estacionário, onde o fluxo térmico não varia com o tempo, e considerando que a distribuição de temperatura é linear, podemos simplificar a Equação 2.1 como:

$$q_x = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

A Equação 2.2 serve para demonstrar o fluxo de calor através de uma parede plana, como pode ser visto na figura abaixo, por exemplo (MORAN *et al.* 2005).

Figura 3 – Transferência de calor unidimensional por condução



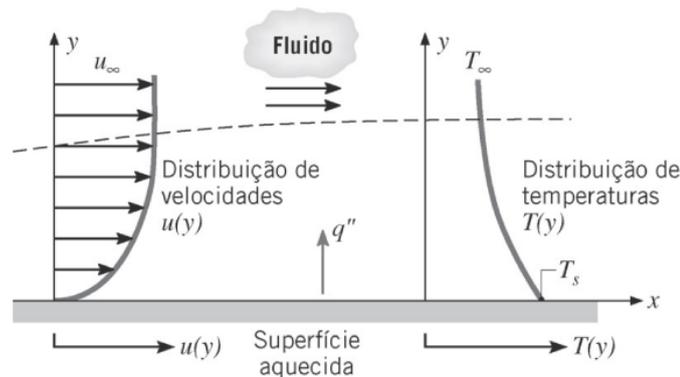
Fonte: Moran *et al.* (2005).

2.3.2 Convecção

A convecção é o modo de transferência de energia que combina a condução e o deslocamento de fluidos na vizinhança do sistema. Geralmente, esse modo ocorre quando há um gradiente de temperatura entre uma superfície sólida e um meio líquido ou gasoso. A velocidade de deslocamento do fluido influencia diretamente na transferência de calor, fazendo com que haja uma maior troca de energia térmica, quanto maior for o movimento do fluido (ÇENGEL, GHAJAL, 2012).

Segundo Incropera *et al.* (2008), o movimento global do fluido gera uma região onde a velocidade varia de zero ao infinito, partindo do contato da superfície. Além disso, a temperatura acompanha esse comportamento, variando de uma temperatura T_s , referente à superfície, até uma temperatura T_∞ , que indica a temperatura no escoamento a uma distância afastada da superfície. A figura abaixo representa a região descrita acima, que é conhecida como camada limite térmica.

Figura 4 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção



Fonte: Incropera et al. (2008).

A convecção pode ocorrer de duas maneiras: de forma forçada ou natural. Na convecção forçada, o escoamento do fluido acontece por ação de um fator externo, que pode ser induzido pela diferença de pressão gerada por uma bomba, pelo uso de um ventilador, ou mesmo, pela ação do vento atmosférico, por exemplo. Já na convecção natural, a troca de calor ocorre devido à diferença de densidade do fluido gerada pelo gradiente de temperatura, fazendo com que haja deslocamento entre as massas mais densas e as mais leves, por ação da gravidade (KREITH, BOHN, 2003).

É possível calcular a taxa de transferência de calor por convecção, em watts (W),

tomando como base a lei de Newton do resfriamento. Dessa forma, tem-se:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Em que A_s representa a área da face onde ocorre convecção, T_s a temperatura na superfície, T_∞ a temperatura do fluido distante o bastante da superfície e h o coeficiente de transferência de calor por convecção. Esse coeficiente é obtido experimentalmente e é dependente de fatores como geometria da superfície, velocidade do fluxo de fluido e suas propriedades, e se a convecção é forçada ou natural, por isso, h não é considerado uma propriedade do fluido (ÇENGEL, GHAJAL, 2012).

O valor da taxa de transferência por convecção pode ser negativo ou positivo, dependendo do sentido de transmissão da energia. Quando a transmissão de energia térmica ocorre da face sólida para o meio líquido ou gasoso ($T_s > T_\infty$), a taxa é positiva. No caso de negativa, o calor é transferido do meio para a superfície ($T_\infty > T_s$) (INCROPERA *et al.* 2008).

2.3.3 Radiação Térmica

Moran *et al.* (2005) afirmam que a radiação térmica é o modo de transferência de calor que ocorre através da emissão de energia por superfícies, que possuem temperatura diferente de zero, e que, mesmo não havendo um meio sólido ou fluido entre elas, trocam calor entre si. Dessa forma, toda matéria, que possui temperatura diferente de zero absoluto, emite energia na forma de radiação térmica.

A principal fonte de radiação térmica é o Sol. A energia radiante que incide sobre as superfícies é denominada de irradiação (G) e, apenas parte dela é absorvida pelos corpos, a outra parte é refletida ou transmitida para o meio.

Os corpos também possuem uma propriedade que influencia na eficiência da absorção de irradiação. Essa propriedade é a absorvidade (α) e, combinada com a irradiação, é possível estimar a taxa de energia térmica absorvida, como mostrado na Equação 2.4 (MORAN *et al.*, 2005).

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.4)$$

2.3.4 Coeficiente Global de Transferência de Calor

É comum a transferência de calor ocorrer quando há uma parede sólida que separa dois meios fluidos, que podem ser líquidos ou gasosos, havendo convecção na parte externa da parede, condução de calor através dela e convecção na superfície interna. Dessa forma, o fluxo de calor pode ser analisado de forma global, que pode ser expresso tomando como base as variações de temperatura e as características individuais da transmissão de energia térmica nos diferentes modos de transferência (KREITH, BOHN, 2003).

Segundo Stoecker e Jarbado (2002), é possível simplificar a equação de convecção de calor, tanto para o lado externo, quanto para o interno da parede, com a equação de transferência por condução, como mostrado na Equação 2.5.

$$q = \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{a,e}A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_{a,i}A}} \right) t_{a,e} - t_{a,i} \quad (2.5)$$

Em que $h_{a,e}$ e $h_{a,i}$ representam o coeficiente de transferência de calor por convecção no lado externo e interno, respectivamente; L representa a espessura da parede; $t_{a,e}$ e $t_{a,i}$ as temperaturas ambiente externa e interna, respectivamente.

Essa combinação de modos de transferência de calor costuma ocorrer quando o fluido está escoando no ambiente. Para situações em que o fluido, que constitui o meio, está parado, o calor poderá ser transmitido principalmente por radiação e condução (ÇENGEL, GHAJAL, 2012). A Equação 2.5 pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$q = UA (t_{a,e} - t_{a,i}) \quad (2.6)$$

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{R_{total}} \quad (2.7)$$

Onde U representa o Coeficiente Global de Transferência de Calor e R é a representação de cada resistência dos modos de transferência que compõem as seções do sistema. Nesse contexto, essa simplificação do fluxo de calor facilita a identificação do modo de transmissão de energia térmica que mais contribui no coeficiente global de transferência (KREITH, BOHN, 2003).

2.4. Carga Térmica

O projeto climático estipulado para um ambiente é calculado de acordo com as condições climáticas locais, que o afetam diretamente. Os equipamentos e sistemas são dimensionados de acordo com a carga térmica calculada. Essa carga pode ser de aquecimento ou de resfriamento, em que a primeira representa a perda de calor de um ambiente e a segunda representa o ganho de calor que flui para dentro do ambiente, ou que é gerado internamente. Esse ganho de calor afeta diretamente na temperatura do ar local, fazendo com que a maioria dos sistemas de condicionamento de ar baseiem-se na carga de resfriamento calculada (ASHRAE, 2007).

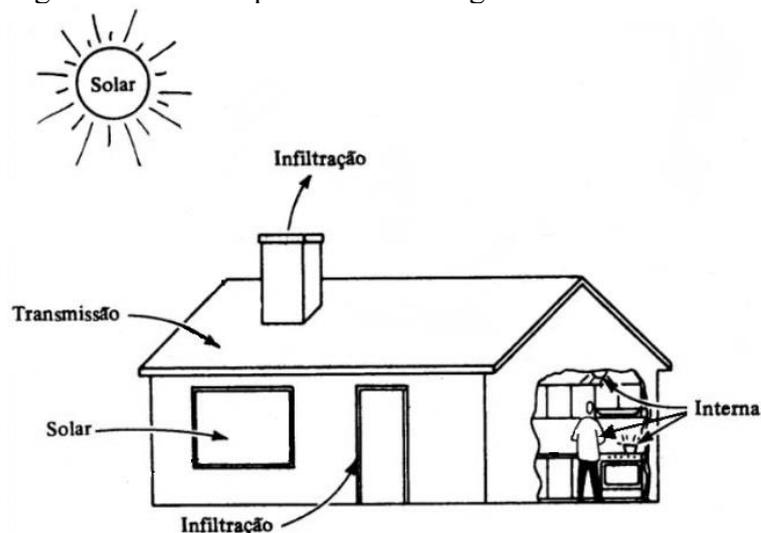
Com isso, os cálculos para a determinação da Carga Térmica de um determinado ambiente são baseados nos conceitos de Transferência de Calor, que servem como base para identificar os aspectos que influenciam diretamente na carga, tanto de aquecimento, como de resfriamento. Essa análise é feita a partir do conceito dos três modos de transferência citados anteriormente: condução, convecção e radiação térmica, que combinados ou separados, interferem na forma como o calor flui no meio, seja para dentro ou para fora (DOWN, 1969).

Nesse contexto, a carga térmica é útil para a definição dos parâmetros de condicionamento do ar, que é quando se pretende controlar a temperatura e umidade de um ambiente, bem como sua renovação e qualidade do ar. O ambiente em que se pretende realizar esse controle é chamado de zona térmica, onde as condições requeridas são alcançadas utilizando-se um equipamento condicionador que atenda à carga térmica calculada para o regime de uso local (ABNT, 2008).

Segundo Stocker e Jones (1985), apesar de haver uma série de métodos que foram desenvolvidos para calcular a carga térmica de uma zona, todos convergem para a determinação dos fatores determinantes desse cálculo. Esses fatores estão distribuídos em quatro grupos, que são eles:

1. Transmissão, que é a transferência de calor que ocorre por conta do gradiente de temperatura entre o meio e a zona térmica em estudo;
2. Solar, que é devido à transferência de calor, irradiado pelo Sol, que adentra no recinto através de superfícies transparentes ou opacas, que absorvem essa energia;
3. Infiltração, que é ocasionada pela entrada do ar externo na zona, fazendo que haja perda ou ganho de calor;
4. Geração Interna, que é a energia gerada no interior da zona térmica, seja pelos ocupantes, iluminação, equipamentos, motores, entre outros.

Figura 5 - Fatores que afetam as cargas térmicas



Fonte: Stoecker e Jones (1985).

Segundo a norma ABNT NBR 16401 (2008), as zonas térmicas devem ser definidas, para poder calcular as cargas térmicas de resfriamento e desumidificação ou de aquecimento e umidificação, dependendo do intuito do projeto. No caso de resfriamento, as cargas de cada zona devem ser estimadas, bem como na unidade de tratamento de ar e condicionamento e no sistema central – conjunto de unidades de tratamento – que refrigera o recinto.

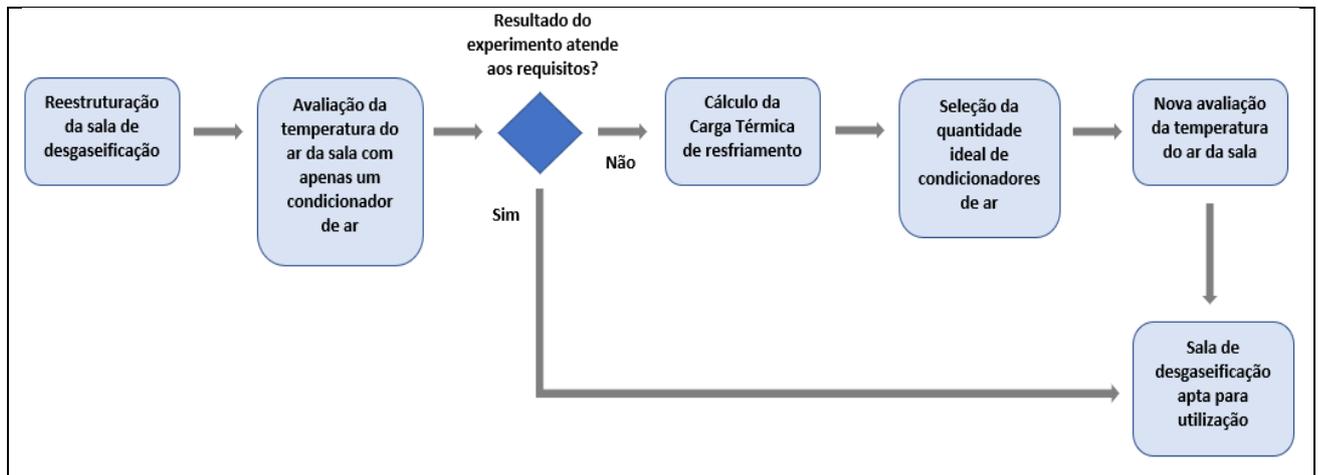
Para projetos de refrigeração, a carga térmica é dependente de fatores como a localização geográfica e a orientação da zona onde se pretende analisar. Além disso, deve-se definir a temperatura de bulbo seco, umidade e a incidência solar do local. É necessário, também, considerar o período do dia, ou ano, em que a carga térmica de refrigeração é máxima, ocasionando extremos de temperatura e irradiação solar. Essa observância garante com que os picos de carga térmica sejam previstos e supridos de maneira mais eficaz (STOECKER, JONES, 1985).

Em resumo, para situações ou problemas mais simples, em que não seja necessário o uso de computadores ou softwares que realizem análises de transferência de calor mais complexas, é possível calcular a carga térmica de resfriamento de um ambiente utilizando como base os conceitos apresentados por Stoecker e Jones (1985) e que são complementados com as especificações da norma ABNT NBR 16401 - Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários, Parte 1: Projeto das instalações (2008), a nível nacional, e do Handbook ASHRAE a nível internacional, ambos voltados para o dimensionamento, concepção e/ou seleção de sistemas de condicionadores de ar de um local específico ou edificação.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu, primeiramente, em verificar a eficiência de condicionamento da temperatura do ar ambiente e arrefecimento da resina em estudo, utilizando apenas um condicionador de ar para a refrigeração da sala de desgaseificação. Após analisada essa primeira situação, foi feito o cálculo da carga térmica de resfriamento, de acordo com as condições locais, para selecionar a quantidade de condicionadores que atendessem aos quesitos de armazenamento. Por fim, foi feita nova análise de temperatura da sala, bem como do arrefecimento da resina. O fluxo sequencial utilizado para estruturar a metodologia utilizada neste trabalho está representado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxo da metodologia utilizada



Fonte: Autor.

A seguir, é descrita a sequência do cálculo, utilizado para determinar a carga térmica, proposto por Stoecker e Jones (1985), com base, também, nas normas descritas pela ASHRAE e pela ABNT NBR 16401.

3.1 Cálculo da Transmissão de Calor

Assumindo um primeiro fator para o início do cálculo da carga térmica, pode-se determinar o calor, que adentra na zona através de sua estrutura, pela Equação 3.1.

$$Q_e = \frac{\Delta T}{\sum R \cdot A} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Em que $\sum R$ é o somatório das resistências dos modos de transferência de calor que constituem o sistema, ΔT é o gradiente de temperatura entre o meio externo e o interno, U é o Coeficiente Global de Transferência de Calor e A é a área da superfície onde ocorre o fluxo de calor (STOECKER, JONES, 1985).

3.2 Cálculo de Insolação

A radiação solar contribui em maior parte para a carga térmica, pois o ganho de calor na zona através de janelas, tetos e portas é variável e depende das condições de tempo e orientação geográfica do local (ASHRAE, 2007). Segundo Stoecker e Jones (1985) é possível calcular o fluxo de calor (q) através de superfícies transparentes, no ambiente, através da Equação 3.2.

$$q = \left[\left(\frac{\alpha U}{h_e} + \tau \right) I_g + U(t_e - t_i) \right] \quad (3.2)$$

Em que α é o coeficiente de absorção de radiação térmica do material, τ é a transmissividade do material, I_g é a intensidade de radiação solar incidente global para uma dada região, h_e é o coeficiente de transferência de calor externo, t_e e t_i são as temperaturas externas e internas, respectivamente, e q é expresso em W. Para o caso de superfícies opacas, em que apenas uma parte da energia radiante é absorvida, o cálculo se dá como mostrado na Equação 3.3.

$$q = UA \left(\frac{\alpha I_g}{h_e} + t_e - t_i \right) \quad (3.3)$$

3.3 Cálculo de Infiltração

Segundo a ABNT NBR 16401 (2008), infiltração é a entrada de ar para dentro da zona, que ocorre através de aberturas em janelas, portas e outras frestas, em que a entrada de ar não é ocasional e que se dá, normalmente, pela ação dos ventos ou pela diferença de pressão entre o ar ambiente e o interno da zona. Segundo Stoecker e Jones (1985), a infiltração de ar atua na temperatura e umidade da zona térmica na forma de calor sensível e calor latente, respectivamente.

Para calcular as cargas térmicas de calor sensível e latente, respectivamente, em uma zona, devido à infiltração de ar externo, a ASHRAE (2005) indica as Equações 3.4 e 3.5.

$$Q_s = V \cdot \rho_{ar} \cdot c_{p,ar} \cdot (t_e - t_i) \quad (3.4)$$

$$Q_l = V \cdot \rho_{ar} \cdot \Delta_w \cdot (2501 + 1,805t) \quad (3.5)$$

A letra V representa a vazão volumétrica de ar que é infiltrado no ambiente, em m^3/s ; ρ_{ar} é a massa específica do ar, em kg/m^3 ; $c_{p,ar}$ é o calor específico do ar, em J/kgK ; Δ_w é a diferença de razão de umidade entre dentro e fora da zona; t é a média das temperaturas, em Kelvin e $t_e - t_i$ é a diferença entre as temperaturas externas e internas. Ainda segundo a ASHRAE (2005), o volume de ar infiltrado na zona pode ser calculado da seguinte forma:

$$V = \frac{A}{1000} \sqrt{C_s \Delta t + C_w U^2} \quad (3.6)$$

Em que A é a área de abertura por onde entra o ar, em cm^2 ; C_s é o coeficiente de empilhamento; Δt o gradiente de temperatura em Kelvin; C_w é o coeficiente de vento e U é a velocidade média do vento, medida na estação meteorológica local, em m/s .

3.4 Cálculo da Geração Interna de Calor

A norma ABNT NBR 16401 apresenta alguns fatores que são responsáveis por gerar calor internamente a um recinto. Eles podem ser pessoas, iluminação, equipamentos de escritório, motores elétricos e outras fontes que dissipam calor, como equipamentos de cozinha, laboratórios, restaurantes, entre outros.

3.4.1 Pessoas

A presença dos ocupantes de uma determinada zona é responsável por contribuir em grande parte da fração de calor gerado e que afeta à carga térmica local (ASHRAE, 2009). Segundo a ABNT NBR 16401, deve ser considerado a quantidade de ocupantes do recinto, bem como a frequência e horários de ocupação. É possível calcular o calor gerado pelos ocupantes a partir da Equação 3.7.

$$Q_p = n \cdot q_p \cdot n_p \quad (3.7)$$

Em que n é o número de pessoas que circulam na sala; q_p é o calor metabólico gerado por pessoa (esse calor está relacionado ao calor sensível e latente gerado por cada pessoa e depende da atividade que ela realiza no recinto) e n_p representa o número médio de horas que cada pessoa permanece na sala, em h/24h.

3.4.2 Iluminação

As lâmpadas, que estão instaladas na zona térmica, dissipam uma potência de iluminação que contribuem com o montante de calor gerado. Esse calor pode ser calculado através da Equação 3.8 (STOECKER, JONES, 1985).

$$Q_L = n_L (1 + r) P_L \quad (3.8)$$

A letra n_L representa o número de lâmpadas do recinto; r é a porcentagem de calor dissipado pelos reatores da lâmpada; P_L é a potência de cada lâmpada.

3.4.3 Motor Elétrico

As cargas afetadas pelo calor gerado por equipamentos elétricos dependem do local onde o equipamento está operando, se dentro ou fora da zona. Para motores elétricos que operam dentro do ambiente que se deseja calcular a carga térmica, é possível calcular o calor liberado de acordo com a ASHRAE (2009), utilizando a Equação 3.9, onde P é a potência nominal do motor e η o rendimento especificado pelo fabricante.

$$Q_m = P \cdot \eta \quad (3.9)$$

3.4.4 Equipamentos de escritório e outras fontes de calor

Para equipamentos de escritório, de cozinha, laboratórios, hospitais, lanchonetes ou qualquer outra fonte geradora de calor, os valores de dissipação de energia, geralmente, são fornecidos pelos fabricantes do equipamento (ABNT, 2008).

3.5 Análise de resfriamento da resina

A fim de analisar o comportamento de resfriamento da resina, durante o período de 24 h em que ela permanece estocada na sala de desgaseificação, foi colocado um termopar, que captou os dados de temperatura durante o período de um dia completo. A ponta desse termopar, que é a região onde os dados de temperatura são sentidos, foi posicionada o mais próximo possível do centro do reservatório da resina, pois é a região em que resfriará por último. O termopar foi conectado a um datalogger, que é um aparelho que coleta e armazena dados durante determinado período de tempo.

Figura 7 – Datalogger utilizado para coleta de dados de temperatura



Fonte: CAS Dataloggers (2018).

4 ESTUDO DE CASO

Este trabalho desenvolveu-se a partir da reestruturação de uma sala de desgaseificação de resina epóxi, localizada na empresa Aeris Energy, com o objetivo de melhorar uma das etapas que precedem a fabricação de pás eólicas por infusão de resina, buscando selecionar a quantidade adequada de condicionadores de ar, fazendo com que a sala, onde ocorre o processo de desgaseificação, atenda às necessidades de produção de forma econômica e eficaz.

4.1 Parâmetros da sala

- A empresa está localizada no município de Caucaia e possui as seguintes características geográficas:

Tabela 2 – Dados geográficos da sala

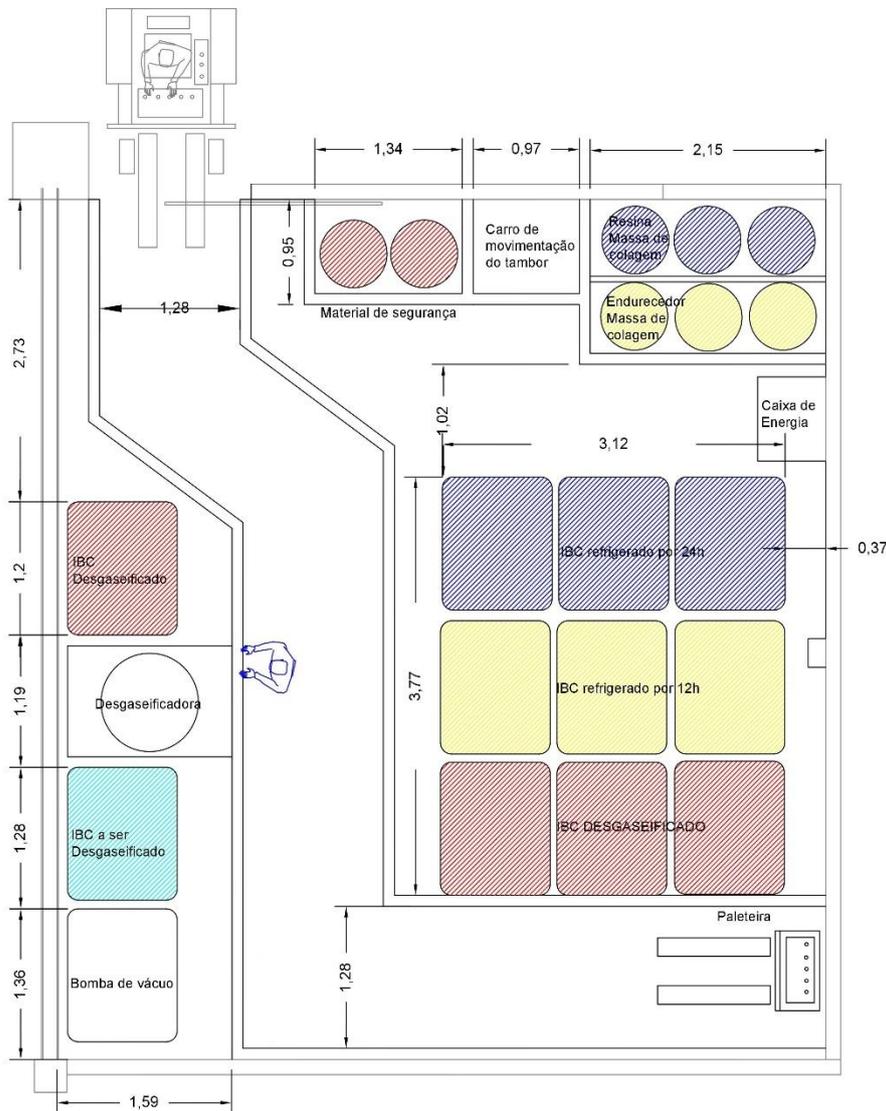
Latitude Sul	Longitude Oeste	Elevação em relação ao nível do mar	Pressão atmosférica
3° 68'	38° 85'	25 m	101,25 kPa

Fonte: Autor.

- As atividades desenvolvidas na sala envolvem o manuseio de IBCs – Intermediate Bulk Container – também chamado de bambona, contendo resina epóxi para desgaseificação e estocagem, manuseio e estocagem de tambores contendo resina para colagem e estocagem de tambores contendo lascas de madeira. O IBC possui 1045 mm de altura, 1200 mm de comprimento e 1000 mm de largura e possui capacidade de 1000 litros;
- A sala está localizada dentro de um galpão climatizado, com temperatura ambiente de cerca de 25 °C e umidade relativa do ar de 60% e com pouco ou quase nenhum deslocamento de massas de ar internamente. As superfícies externas das paredes, voltadas para o nordeste e noroeste da sala, localizam-se dentro do galpão. A parede sudeste tem sua superfície externa voltada para um dos banheiros do galpão, que possui temperatura ambiente. A parede sudoeste está voltada para o lado externo, tendo contato direto com a radiação solar, principalmente entre 13 h e 17 h, que é o período em que o sol incide diretamente na parede;
- As dimensões da sala são de 7,76 x 7,15 m, pé direito de 3,5 m, área das paredes nordeste e sudoeste de 25,025 m² e 27,16 m² das paredes noroeste e sudeste, área do piso de 55,055 m² e volume de 192,693 m³. O teto é de forro PVC de 5 mm, montado sob o teto do galpão, não havendo incidência solar direta e pouco deslocamento de ar. Há apenas

uma abertura na sala com 2,6 m de altura por 2 m de comprimento, dando uma área de 5,2 m². Nessa abertura, é utilizado um portão deslizante de alumínio. Entre o portão e a abertura da porta, há uma fresta de 2 cm, fazendo com que o ar seja infiltrado para a sala mesmo estando fechada. Fora isso, não há nenhuma janela ou qualquer outro tipo de abertura na sala. Foi desenhado um esquema de organização da sala, após sua reestruturação, como mostrado na figura a seguir.

Figura 8 – Esquema de organização da sala de desgaseificação após reestruturação



Fonte: Aeris (2018).

- A iluminação é do tipo fluorescente, com 6 lâmpadas de 32 watts cada.

Como padrão de armazenamento, foi definido que os containers contendo a resina desgaseificada deverão permanecer em estoque na sala por um período de 24 h até serem

enviados para a linha de produção. Além disso, a sala permanece boa parte do dia sem a ocupação de pessoas. Em geral, apenas o operador responsável desse setor tem acesso à sala, permanecendo cerca de 30 minutos no local, para cada IBC de resina que deverá ser desgaseificado. Em média, são feitas 2 desgaseificações por dia, em turnos diferentes e por funcionários diferentes. Cada colaborador realiza algum tipo de trabalho dentro da sala, permanecendo em um total de 1h30min a 2 h por dia.

4.2 Uso de apenas um condicionador de ar na sala

Após a sala de desgaseificação ter sido reestruturada, foi necessário avaliar suas condições de armazenamento da resina, uma vez que seu intuito principal é manter a resina em estoque e resfriá-la por 24h, até que atinja a temperatura mais adequada para ser utilizada na linha de produção, durante a fabricação da pá eólica.

Como medida inicial, foi feito um experimento para a averiguar a possibilidade de utilizar apenas um condicionador de ar para refrigerar a sala. Os resultados para esse teste não foram satisfatórios, fazendo com que fosse necessário prosseguir com o procedimento de calcular a carga térmica de resfriamento para a sala. Os resultados detalhados dos experimentos encontram-se no tópico de Resultados e Discussão.

4.3 Dados climáticos

Como o intuito é calcular a carga de resfriamento, em que se pretende resfriar e desumidificar o ambiente, os dados para a temperatura de bulbo seco (TBS) – requerida para cálculos de carga de resfriamento – foram retirados da tabela a seguir.

Tabela 3 - Tabela de dados de temperatura média para a cidade de Fortaleza

CE	Fortaleza						Extrem.	TBU	TBSmx	s	TBSmn	s		
	Latitude	Longit.	Altitude	Pr. Atm	Período	Anuais								
	3,78S	38,53W	25m	101,03	82/01		32,6	35,0	2,3	20,6	1,5			
Mês>Qt	Freq.	Resfriamento e desumidificação				Baixa umidade			Mês>Fr	Freq.	Aquec.	Umidificação		
Jan	Annual	TBS	TBUc	TBU	TBSc	TPO	w	TBSc	Ago	Annual	TBS	TPO	w	TBSc
	0,4%	32,2	25,3	26,7	30,0	26,1	21,6	27,6		99,6%	22,8	17,2	12,3	29,3
ΔT_{md}	1%	32,1	25,3	26,5	29,7	25,8	21,2	27,7	99%	23,0	18,6	13,5	28,9	
5,9	2%	31,9	25,2	26,2	29,4	25,2	20,4	27,5						

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16401-1 (2008).

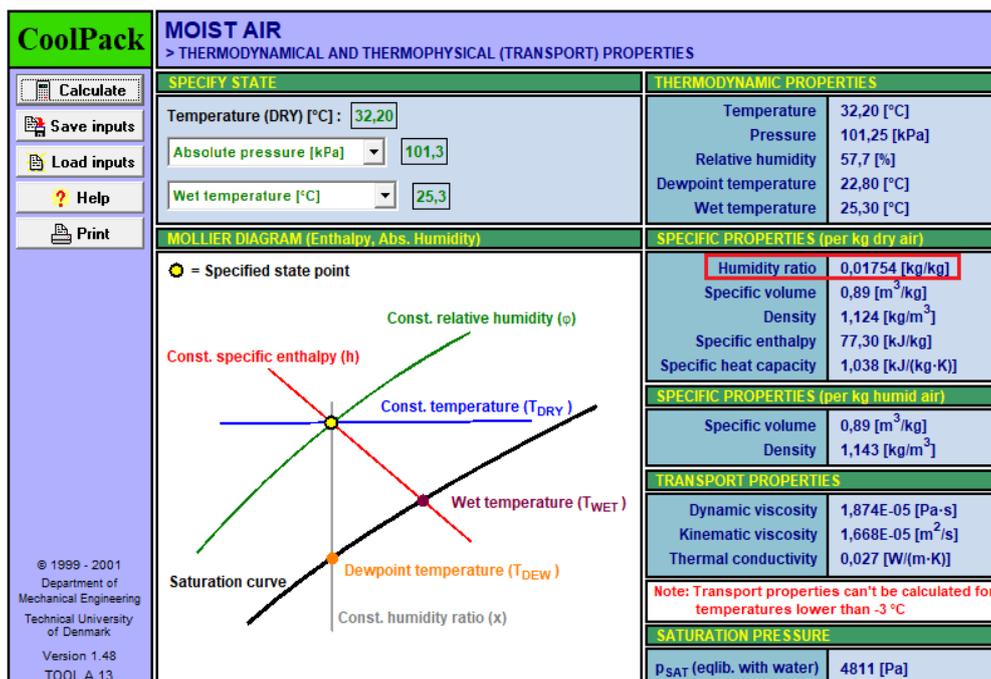
Os dados se referem à cidade de Fortaleza, pois pela norma ABNT NBR 16401 utilizada como referência, esses tipos de dados são fornecidos apenas para as capitais dos estados e, nesse caso, Fortaleza é a capital de referência mais próxima da empresa onde é realizado esse estudo.

Os valores de TBS e TBUc escolhidos para o cálculo foram os de frequência anual de 0,4%, pois segundo a ABNT NBR 16401-1 (2008), esses valores são utilizados quando se quer admitir uma pequena probabilidade de a carga calculada estar abaixo do necessário para garantir as condições de refrigeração. Apesar de a refrigeração da resina, para esse processo, não ser de alta exigência, como em projetos de refrigeração de alimentos, por exemplo, escolheu-se a frequência de 0,4% para que as chances, de a resina chegar à linha de produção a uma temperatura não adequada para uso, sejam poucas.

Dessa forma, adota-se $TBS = 32,2\text{ °C}$ e $TBUc = 25,3\text{ °C}$. Além disso, para esses valores de temperatura e uma pressão de 101,25 kPa, é possível obter o valor da razão de umidade (w), para essas condições. O valor de w encontrado foi de 0,01753 kgv/kg. A razão de umidade foi obtida através do programa Cool Pack[®], que é destinado a cálculos e dimensionamentos de sistemas de Refrigeração.

A Figura 9 demonstra a interface desse programa e as propriedades obtidas, através da inserção dos dados de temperatura e pressão desejados. O valor de w está destacado no retângulo vermelho da imagem.

Figura 9 – Interface do Cool Pack para obtenção do valor de umidade absoluta ambiente



Fonte: Autor.

4.3 Memorial de cálculo

Com base nos dados colhidos, as quantidades de calor foram calculadas. Para o cálculo do calor que entra na sala através das paredes e do teto, a Equação 3.1 foi utilizada como referência. As características da parede e do PVC são as seguintes:

- Parede de tijolo de concreto 14x19x29 cm coberta por tinta branca e com argamassa aplicada apenas nas bordas do tijolo, não havendo nenhum tipo de reboco;
- O tijolo é vazado com dois furos passantes, fazendo com que a espessura efetiva da parede seja de 6,2 cm;
- Teto de forro PVC de 5mm de espessura e montado sob o teto do galpão;
- Coeficiente de condutividade térmica do concreto: $k = 1,4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$;
- Coeficiente de condutividade térmica do PVC: $k = 0,33 \text{ W/m} \cdot \text{K}$;

Para o cálculo da eficiência global, além da espessura das paredes, também foram considerados os coeficientes de convecção referentes à superfície externa e interna da parede. Os dados desses coeficientes foram retirados da Tabela 4. As paredes nordeste, noroeste e sudeste são verticais e internas, pois estão dentro galpão onde a sala de desgaseificação está localizada. A parede sudoeste é vertical e externa, por estar com uma de suas superfícies voltadas para o ar externo. O teto é considerado como parede horizontal com fluxo de calor descendente, uma vez que o calor externo entra por cima e desce em direção à sala.

Figura 10 – Modelo de tijolo de concreto utilizado



Fonte: Leroy Merlin (2018).

Tabela 4 – Coeficientes de convecção para paredes exteriores e interiores

Posição das Paredes/Sentido do fluxo de calor	Paredes exteriores		Paredes interiores		Paredes exteriores sujeitas a vento		
	h_i $W/m^2 \cdot K$	h_e $W/m^2 \cdot K$	h_i $W/m^2 \cdot K$	h_e $W/m^2 \cdot K$	Tipo de vento	Velocidade m/s	h_e $W/m^2 \cdot K$
Parede Vertical	8	20	8	8	Fraco	1	13
Parede Horiz. / ascendente	11	20	10	10	Médio	3	21
Parede Horiz. / descendente	6	20	6	6	Forte	9	35

Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2001).

A área considerada para as paredes noroeste e sudeste foi 27,16 m², para as paredes nordeste e sudoeste foi 25,025 m² e a área do teto 55,055 m². O gradiente de temperatura teve como base a temperatura de bulbo seco de 32,2 °C (325,2 K) do ambiente externo e 19 °C (312 K), que é o esperado para a temperatura interna da sala.

Como não há janelas, o calor que entra na sala devido à incidência solar é considerado apenas para a parede sudoeste, que é a única da sala que está em contato com o ambiente externo. Dessa forma, utilizando a Equação 3.2, que é para a quantidade de calor radiado absorvido por superfícies opacas, foi calculada a quantidade de calor por insolação. A intensidade de radiação solar incidente global (I_g) foi retirada da Tabela 5 a seguir. O valor de intensidade considerado para a parede sudoeste foi o maior, devido a irradiação acumular-se na parede durante o decorrer do dia. Nesse caso, $I_g = 691 \text{ W/m}^2$.

Tabela 5 – Intensidade de radiação solar durante o ano para latitude de 4° Sul

	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	
S	26	222	321	365	386	402	400	402	386	365	321	222	26	22 de dezembro
SE	57	480	664	691	598	476	303	129	60	55	48	33	5	
L	57	476	647	626	495	311	68	65	60	55	48	33	5	
NE	25	207	278	239	137	65	68	65	60	55	48	33	5	
N	5	33	48	55	60	65	68	65	60	55	48	33	5	
NO	5	33	48	55	60	65	68	65	137	239	278	207	25	
O	5	33	48	55	60	65	68	311	495	626	647	476	57	
SO	5	33	48	55	60	129	303	476	598	691	664	480	57	
H	13	203	462	704	902	1018	1072	1018	902	704	462	203	13	

Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2001).

Tabela 6 – Absorção de radiação solar por cor de superfície

Cor	Absorção para radiação solar (α)
Branca	0,20 a 0,30
Amarela, laranja, vermelha clara	0,30 a 0,50
Vermelha escura, verde clara, azul clara	0,50 a 0,70
Marrom clara, verde escura, azul escura	0,50 a 0,90
Marrom escura, preta	0,90 a 1,00

Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2001).

O coeficiente de absorção de radiação solar (α) foi retirado da Tabela 6 e depende da coloração da parede, que no caso é de cor branca. O valor escolhido foi o maior, para que a carga térmica seja calculada para condições máximas, como sugerido por Stoecker e Jones (1985). Assim, o coeficiente utilizado foi de $\alpha = 0,3$.

Os valores de temperatura externa e interna, coeficiente de convecção externa e coeficiente global da parede foram os mesmos utilizados para o cálculo da transmissão de calor calculada pela Equação 3.1.

Para o calor ganho com a infiltração, utilizou-se, primeiramente, a Equação 3.6 para calcular o volume de ar que é infiltrado na sala, toda vez que a porta é totalmente aberta. A área da porta é de 5,2 m². A porta está voltada para dentro do galpão de produção da pá, onde há pouco ou nenhum deslocamento de massas de ar. Com isso, a velocidade do vento é considerada fraca, ou seja, de 1 m/s. O coeficiente de empilhamento C_s e o coeficiente de vento C_w , ambos da Equação 3.6, foram retirados das Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7 – Modelo básico de coeficiente de empilhamento

	Altura da casa (Andares)		
	Um andar	Dois andares	Três andares
Coeficiente de empilhamento	0,000145	0,000290	0,000435

Fonte: ASHRAE (2005).

Tabela 8 – Modelo básico de coeficiente de vento

Classe de abrigo	Altura da casa (Andares)		
	Um andar	Dois andares	Três andares
1	0,000319	0,000420	0,000494
2	0,000246	0,000325	0,000382
3	0,000174	0,000231	0,000271
4	0,000104	0,000137	0,000161
5	0,000032	0,000042	0,000049

Fonte: ASHRAE (2005).

A sala de desgaseificação se assemelha a um cômodo de uma casa, por isso é possível utilizar C_s e C_w para calcular a vazão de ar que entra na sala. O coeficiente de empilhamento é de $0,000145 \text{ (L/s)}^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{K})$, pois a sala possui apenas um andar. O coeficiente de vento escolhido é para a classe de abrigo 1, que segundo ASHRAE (2005), é utilizado quando não há nenhum tipo de proteção ou sombra, que incidam sobre a sala, senão o próprio teto da construção. Dessa forma, $C_w = 0,000319 \text{ (L/s)}^2/[\text{cm}^4 \cdot (\text{m/s})^2]$. O gradiente de temperatura é de $\Delta t = 6 \text{ K}$ ($\Delta t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$), que é a diferença entre a temperatura média do galpão de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e a desejada para a sala ($19 \text{ }^\circ\text{C}$).

A partir desses valores, a vazão de ar insuflado foi calculada. Então, a partir das Equações 3.4 e 3.5 e da vazão de insuflamento, o calor sensível e latente gerado por essa infiltração pôde ser calculado. O valor da massa específica do ar e de seu calor específico são $1,2 \text{ kg/m}^3$ e $1009 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, respectivamente. Para o calor sensível, a variação de temperatura também é de 6 K , como o calculado na vazão de insuflação. Para a diferença de razão de umidade entre dentro e fora da sala, o programa Cool Pack[©] foi novamente utilizado.

A temperatura do galpão onde a sala está localizada possui temperatura média de 25°C e 60% de umidade relativa. O desejado para a sala de desgaseificação é de 19°C e 60% de umidade. Dessa forma, as umidades relativas encontradas foram $0,0119 \text{ kgv/kg}$ e $0,008204 \text{ kgv/kg}$. Logo, $\Delta_w = 0,003696 \text{ kgv/kg}$. A temperatura média, em Kelvin, das temperaturas de dentro da sala e do galpão, é de $t = 315 \text{ K}$.

Para o calor gerado pelos ocupantes da sala, a carga térmica foi calculada utilizando a Equação 3.7. A quantidade de tempo que o operador passa dentro da sala, para preparar a desgaseificação, é cerca de 30 minutos e ocorre, geralmente duas vezes por dia. Além disso, ele necessita realizar outras atividades de movimentação dentro da sala. A quantidade de horas em

que a sala permanece ocupada é de no máximo 5 h. Em algumas situações, cerca de cinco operadores devem realizar atividades como manuseio de IBC ou manutenção de equipamentos.

A movimentação ocorre com o uso de paleteiras elétricas – conhecido como patinhas - dessa forma, o operador apenas anda pela sala, empurrando a patinha. O calor metabólico gerado por essa operação pode ser obtido pela Tabela 9.

Tabela 9 – Taxa de metabolismo por tipo de atividade

Atividade	Calor metabólico (W)
Sentado, em repouso	116,3
Sentado, trabalho manual	145,4
De pé, trabalho leve em máquina ou bancada	174,5
De pé, trabalho moderado em máquina ou bancada	255,9
Em movimento, trabalho moderado de levantar ou empurrar	348,9
Trabalho intermitente de levantar, empurrar ou arrastar	511,7
Trabalho fatigante	639,7

Fonte: Adaptado de Szabó Júnior (2017).

O calor gerado pela dissipação de potência das lâmpadas foi calculado pela Equação 3.8. As lâmpadas possuem potência de 32 W e somam um total de 6 lâmpadas. A porcentagem de calor dissipado pelos reatores das lâmpadas fluorescentes (r) é de 25%, segundo Frota e Schiffer (2001).

Dentro da sala há, também, uma bomba de vácuo que joga o calor para dentro da sala. Essa quantidade de energia térmica foi calculada utilizando-se a Equação 3.9. A potência nominal do motor é de 2,7 kW. Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2005), o rendimento de um motor elétrico, para uma bomba de 2,2 kW de potência nominal, é de 87%, dessa forma, considerou-se esse mesmo valor de rendimento para o motor da bomba utilizada na sala.

Ainda nesse contexto, a resina que sai da desgaseificadora está a uma temperatura média de 41 °C. Essa resina interage com o ambiente, liberando calor para sala, até atingir a temperatura desejada. Essa troca contribui com a Carga Térmica da seguinte forma:

$$Q_r = m_r \cdot c_r \cdot (T_r - T_{sr}) \quad (4.1)$$

A massa de resina utilizada (m_r) é de 1093,45 kg. Esse valor é obtido, pois são conhecidos a densidade da resina epóxi, que é de 1,151 kg/cm³, e o volume de resina ocupado no IBC, que é de 950 litros (950000 cm³). O calor específico (c_r) é de 1883 J/kg·K. O gradiente de temperatura é conhecido, pois T_r é a temperatura inicial da resina, que é de aproximadamente 41 °C, ao sair

da desgaseificadora, e T_{sr} é a temperatura final desejada para a resina, que é 25 °C. Dessa forma, em Kelvin, $T_r - T_{sr} = 16$ K. São comportados, no máximo, 10 IBCs cheios por 24 h, na sala.

Da mesma forma, as embalagens onde a resina é transportada, que são os IBCs, também contribuem com a liberação de calor, pois estão em contato direto com o líquido aquecido. De forma semelhante à Equação 4.1, o calor gerado pelo IBC foi calculado utilizando a Equação 4.2.

$$Q_{IBC} = m_{IBC} \cdot c_{PEAD} \cdot (T_{IBC} - T_{sr}) \quad (4.2)$$

O IBC possui massa de 16,8 kg. Ele é produzido a partir do PEAD (Polietileno de Alta Densidade), cujo calor específico é de 1900 J/kg·K. O gradiente de temperatura é o mesmo considerado para a geração de calor da resina (16 K).

Por fim, todos os valores de calor calculados foram somados, onde o total corresponde à Carga Térmica que deve ser retirada da sala, para que ocorra a refrigeração da resina. A partir desse valor total calculado, foi possível escolher a quantidade de condicionadores de ar para o recinto. O valor da Carga Térmica é dado em watts (W), porém os condicionadores de ar possuem sua potência dada em Btu/h, em que 1 W equivale a, aproximadamente, 3,4121 Btu/h.

4.4 Análise de arrefecimento da resina epóxi

O teste foi realizado na resina epóxi Airstone 780E, da marca DOW. A coleta de dados iniciou a partir do momento em que a resina, que saía desgaseificada da máquina, começou a preencher o IBC. O processo de desgaseificação, que inicia no momento em que a resina entra na máquina até o momento em que o reservatório (IBC) é preenchido até o nível desejado com a resina desgaseificada, durou duas horas e trinta minutos (2h30min).

O procedimento experimental que analisou o comportamento da temperatura, tanto da resina como da sala de desgaseificação, foi o mesmo para ambas situações – com um condicionador de ar em funcionamento e para a nova quantidade de condicionadores de ar em funcionamento, de acordo com o calculado pela carga térmica. Isso porque a sequência de desgaseificação e armazenamento das resinas dentro da sala de desgaseificação seguem uma sequência pré-definida e que devem ser obedecidas.

Figura 11 – Área onde ocorre o processo de desgaseificação da resina epóxi



Fonte: Autor.

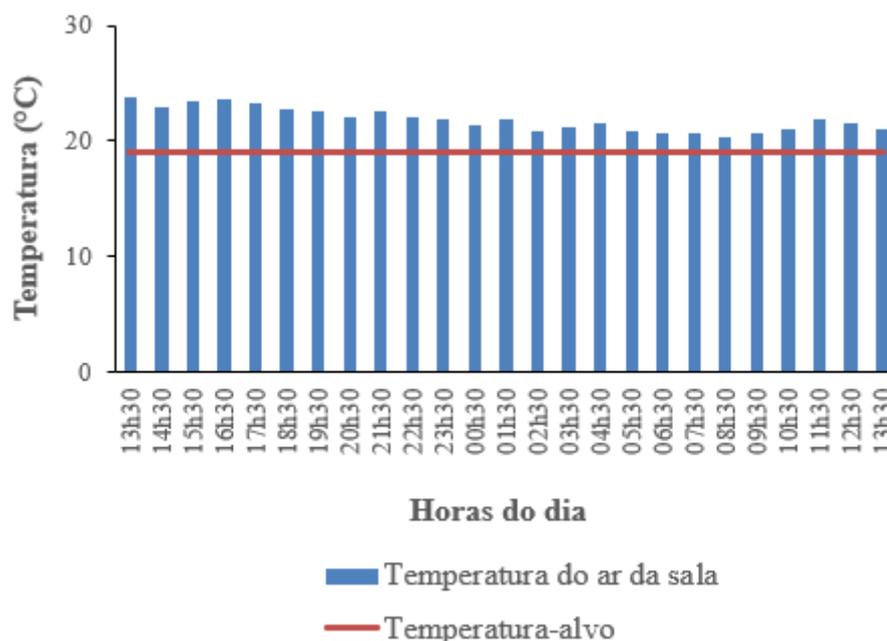
A Figura 11 apresenta os componentes do processo de desgaseificação que são, da esquerda para a direita: a bomba de vácuo, o IBC contendo a resina que será desgaseificada, a máquina desgaseificadora e o IBC vazio que receberá a resina desgaseificada.

Após a desgaseificação, o IBC contendo a resina desgaseificada foi movimentado até o local da sala demarcado para o armazenamento, durante o período que ele é refrigerado. Então, após de completado um dia do início do processo, o termopar foi retirado de dentro do IBC cheio de resina e os dados da variação de temperatura, coletados pelo datalogger, foram exportados para uma planilha Excel, para que a análise dessa variação fosse melhor observada através da visualização dos dados compilados em gráficos de temperatura versus tempo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do teste inicial, feito com a sala resfriando com apenas um condicionador de ar em funcionamento, pode ser visto no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Variação de temperatura da sala em 24 h com apenas um condicionador de ar em funcionamento

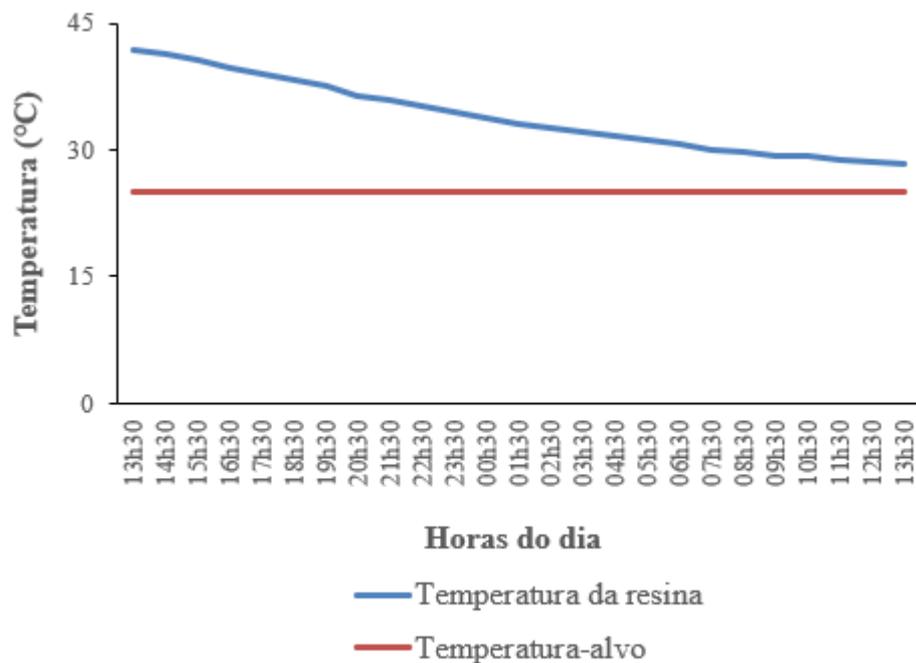


Fonte: Autor.

É possível observar que apenas um condicionador de ar não atende à carga térmica de resfriamento, uma vez que a média de temperatura do ar da sala oscilou com valores acima do estimado. Durante as 24 h de duração do teste, a temperatura média foi de 21,86 °C. Os dados de comportamento do arrefecimento da resina também foram obtidos com apenas um condicionador de ar em funcionamento. Os valores de temperatura são armazenados a cada minuto pelo datalogger, com isso foi possível observar que a resina epóxi demora cerca de 1h30min (uma hora e meia) a 2 h (duas horas) para variar 1 °C de sua temperatura.

O Gráfico 3 demonstra o comportamento de resfriamento durante o período de armazenagem da resina desgaseificada. Vale observar que, no momento dos testes, a sala estava com sua ocupação máxima de dez IBCs contendo resina. A temperatura da resina ao término do teste era de 28,4 °C.

Gráfico 3 – Variação de temperatura da resina com um condicionador de ar em funcionamento



Fonte: Autor.

A fim de representar a variação de temperatura da resina, demonstrada acima, de forma mais coerente, o Gráfico 4 abaixo apresenta, de maneira adimensional, a variação de temperatura, considerando que a transferência de calor ocorre em função da diferença de temperatura entre a resina e sua vizinhança (temperatura ambiente + superfícies vizinhas). Dessa forma, foram consideradas as seguintes equações para representar a temperatura de forma adimensional:

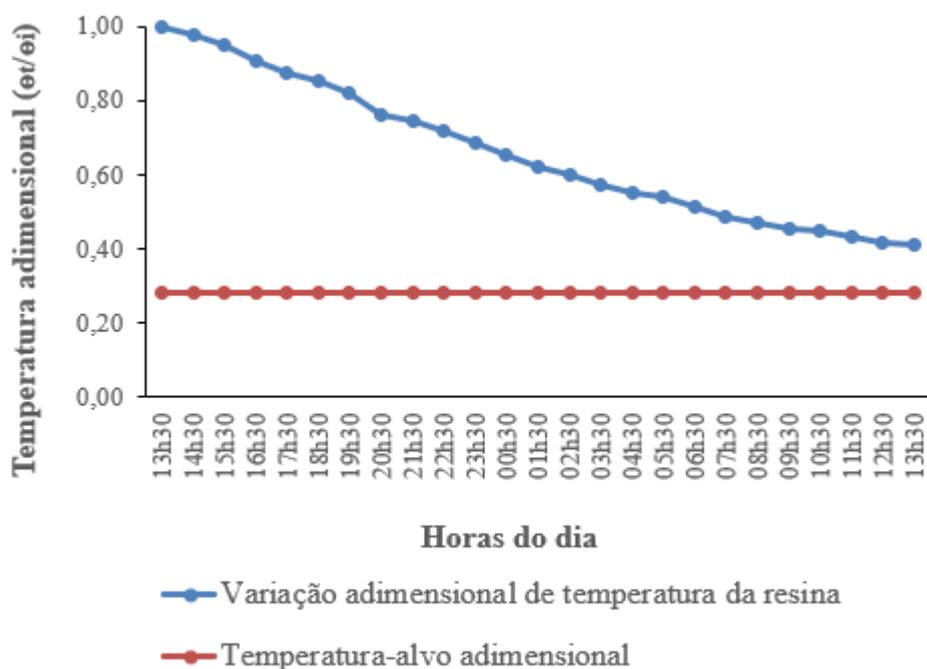
$$\text{Temperatura adimensional} = \frac{\theta_t}{\theta_i} \quad (4.1)$$

$$\theta_t = T_{resina}(t) - T_{ar} \quad (4.2)$$

$$\theta_i = T_{resina}(0) - T_{ar} \quad (4.3)$$

Onde $T_{resina}(t)$ é a temperatura da resina para cada instante de tempo, $T_{resina}(0)$ é a temperatura da resina ao sair da degaseificadora, que é a temperatura que contribui com a carga térmica instantânea máxima e T_{ar} é a temperatura estimada do ar da sala. A partir dessas considerações, foi obtido o seguinte Gráfico 4.

Gráfico 4 – Variação adimensional de temperatura da resina para um condicionador de ar em funcionamento



Fonte: Autor.

É possível observar, pelo Gráfico 3 e Gráfico 4, que de forma semelhante à temperatura da sala, a temperatura da resina também não atingiu o valor estimado, que no caso é de 25 °C, levando a concluir que apenas uma central de condicionar de ar não atende à demanda da sala. Nesse contexto, foi necessário calcular a carga térmica de resfriamento, a fim de selecionar a quantidade adequada de condicionadores de ar e, então, proporcionar as condições necessárias para atingir a temperatura-alvo de 19 °C esperada para a sala, como também garantir o arrefecimento da resina no tempo desejado e atingindo sua temperatura-alvo.

Com isso, seguindo os cálculos apresentados na metodologia, as quantidades de calor foram calculadas. A Tabela 10 apresenta todas as fontes de calor e seus valores calculados. O programa Excel foi utilizado para o cálculo dessas variáveis. Importante ressaltar que todos esses valores foram calculados para condições ambiente extremas (valores anuais máximos), a fim de garantir resultados desejáveis durante o ano.

Tabela 10 – Quantidades de calor calculadas para a sala de desgaseificação

Calor que adentra na sala – Parede Nordeste	$Q_{eNE} = 404,20 \text{ W}$
Calor que adentra na sala – Parede Noroeste	$Q_{eNO} = 553,75 \text{ W}$
Calor que adentra na sala – Parede Sudeste	$Q_{eSE} = 1218,24 \text{ W}$

Calor que adentra na sala – Parede Sudoeste	$Q_{eSO} = 1522,93 \text{ W}$
Calor que adentra na sala – Teto	$Q_{et} = 2101,64 \text{ W}$
Calor que adentra na sala devido à Insolação	$Q_{ins} = 2661,82 \text{ W}$
Carga Térmica gerada por pessoa	$Q_p = 363,44 \text{ W}$
Carga Térmica gerada pela iluminação	$Q_{ilm} = 240,00 \text{ W}$
Carga Térmica gerada pelo motor da bomba de vácuo	$Q_{mot} = 2349 \text{ W}$
Carga Térmica gerada pela resina	$Q_{res} = 3812,90 \text{ W}$
Carga Térmica gerada pelo IBC	$Q_{IBC} = 59,11 \text{ W}$
Calor sensível gerado pela infiltração de ar	$Q_{sen} = 343,44 \text{ W}$
Calor latente gerado pela infiltração de ar	$Q_{lat} = 643,60 \text{ W}$

Fonte: Autor.

A partir dos resultados obtidos, a Carga Térmica da sala de desgaseificação pôde ser calculada. Seu resultado é a soma de todas as quantidades de calor, demonstradas na Tabela 10, e pode ser visto a seguir.

Tabela 11 – Carga Térmica total calculada

Carga Térmica total em W	$Q = 16274,08 \text{ W}$
Carga Térmica total em BTU/h	$Q = 55529,45 \text{ BTU/h}$

Fonte: Autor.

Importante lembrar que a carga térmica é calculada em regime estacionário, enquanto que o arrefecimento da resina ocorre em regime transiente. Logo, no instante inicial, com $t = 0$, há uma máxima taxa de remoção de calor, que diminui à medida que a temperatura da resina decresce, tendendo à temperatura do ar da sala, quando o tempo t tende ao infinito (período de tempo suficientemente longo).

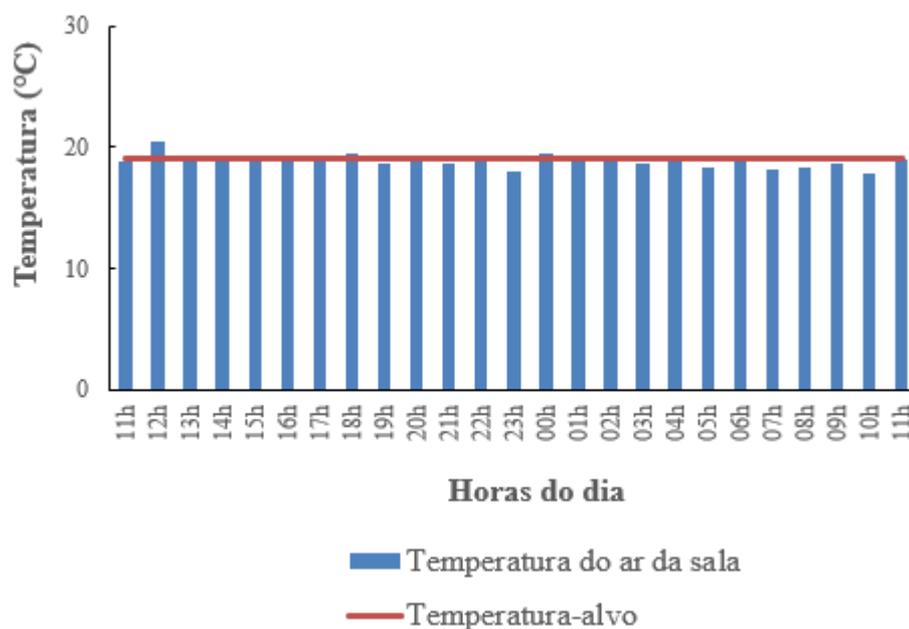
Então, de acordo com o descrito acima, a carga térmica indicada na Tabela 11 representa a carga térmica instantânea necessária para suprir o valor da taxa máxima de calor gerado pelo arrefecimento da resina no instante em que a temperatura é máxima, ou seja, ao término do processo de desgaseificação e início do período de armazenamento da resina desgaseificada.

A partir do valor de BTU/h, demonstrado na Tabela 11, foi possível selecionar os condicionadores de ar, cujas potências somadas são suficientes para atender às condições de

resfriamento. Os equipamentos disponíveis na empresa, para utilização da climatização de salas como essas, que são destinadas à continuidade da produção, possuem potência de 42000 BTU/h.

Dessa forma, a partir dos valores de Carga Térmica de resfriamento encontrados, decidiu-se selecionar dois desses condicionadores, com o intuito de que as condições de refrigeração fossem atendidas. O gráfico a seguir demonstra o comportamento de temperatura da sala durante o período de um dia, com temperatura-alvo de 19 °C, em que os dois condicionadores refrigeraram a sala simultaneamente. Os dados foram colhidos por um termopar instalado próximo aos IBCs contendo resina desgaseificada.

Gráfico 5 – Variação de temperatura da sala em 24h com dois condicionadores de ar em funcionamento



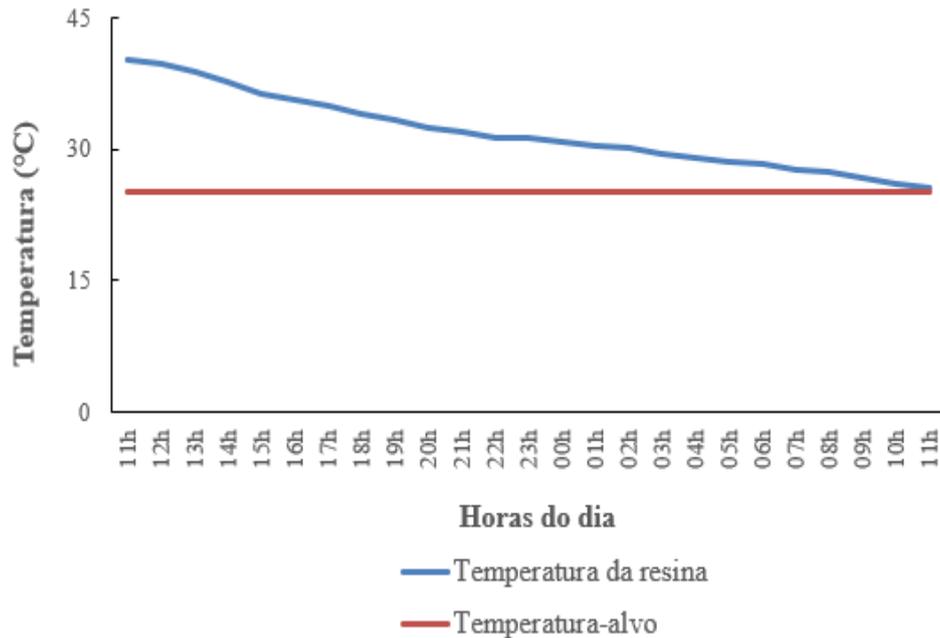
Fonte: Autor.

A média de temperatura neste teste foi de 18,8 °C. Lembrando que a sala, no momento do teste, estava com sua capacidade máxima de armazenamento de materiais. Esse resultado é satisfatório, visto que a média de variação da temperatura está bem próxima do valor estimado de 19 °C, havendo poucos momentos em que a temperatura excedeu o limite estabelecido, como observado nos horários de 13 h e 00 h.

De forma semelhante à análise da variação de temperatura da resina para a condição de apenas um condicionador de ar refrigerando o ambiente, testes com dois condicionadores de ar

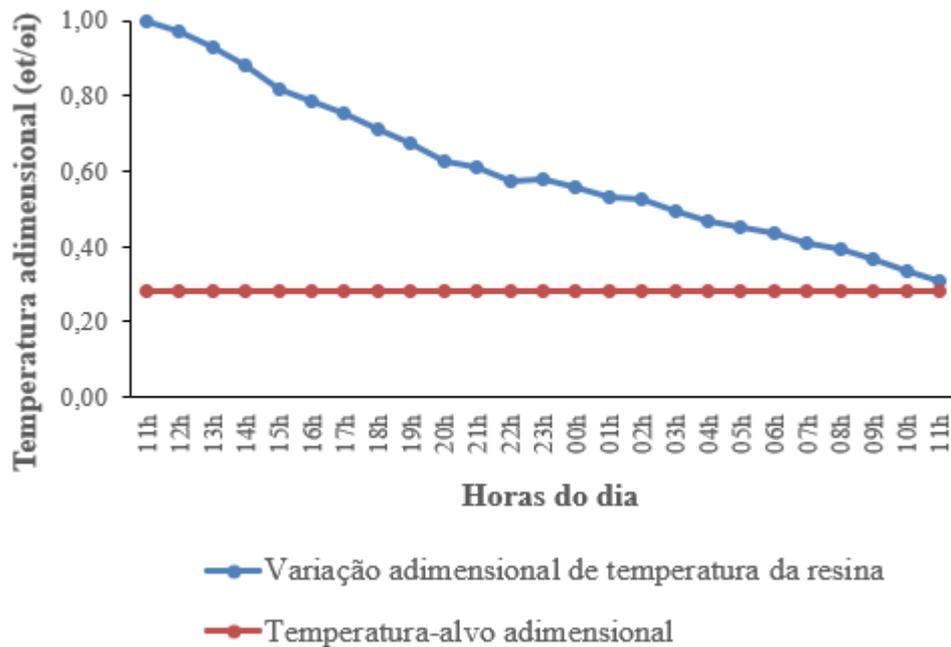
foram realizados e os resultados da variação de temperatura, para esse experimento, podem ser vistos nos gráficos a seguir.

Gráfico 6 – Variação de temperatura da resina com dois condicionadores de ar em funcionamento



Fonte: Autor.

Gráfico 7 – Variação adimensional de temperatura da resina com dois condicionadores de ar em funcionamento



Fonte: Autor.

Para a situação descrita no Gráfico 6 e Gráfico 7, observou-se que a resina resfriou até bem próximo da temperatura-alvo estipulada de 25 °C. No final do teste, a resina estava a 25,5 °C. Esse valor é satisfatório e é possível utilizar a resina a essa temperatura de forma segura, garantindo que a incidência do defeito de microbolhas caia consideravelmente, fazendo com que o processo de desgaseificação não contribua mais, de forma significativa, com o surgimento de microbolhas na matriz polimérica, além disso, isso garante que a recorrência desse defeito esteja relacionado apenas as outras etapas do processo de fabricação, o que facilita sua identificação e sua respectiva tratativa de falha.

Como observado na Tabela 10, o fator que mais contribui para a carga térmica da sala é a resina, que possui carga térmica instantânea máxima de 3812,90 W, no momento em que a desgaseificação é concluída – temperatura inicial da resina após a desgaseificação é de 41 °C. Como, durante os testes, a sala estava ocupada com o número máximo de IBCs contendo resina desgaseificada, é possível reduzir a carga térmica local, diminuindo o número de IBCs dentro da sala – redução de um ou dois IBCs. Essa medida pode ser tomada em ocasiões em que seja necessário utilizar apenas um condicionador de ar, caso algum dos dois condicionadores instalados falhe ou deixe de funcionar, pois a sala não possui uma terceira central de ar como backup.

Como constatado nos experimentos com apenas um condicionador de ar em funcionamento, a temperatura do ar da sala e a temperatura final da resina não alcançaram valores distantes da temperatura-alvo e para ocasiões pontuais, a utilização do polímero para essas condições, com uma temperatura cerca de 2 °C a 3 °C acima do desejado, não trará grandes impactos na cadeia produtiva, contanto que ela seja utilizada de pronto, logo que retirada da sala.

Vale lembrar que, o que garante, majoritariamente, que os defeitos de microbolha não ocorram durante o processo de fabricação da pá é a desgaseificação da resina. A sua utilização a uma temperatura adequada colabora de forma impactante na qualidade final do produto e, por isso, deve ser tratada e controlada. Com isso, é desejável utilizá-la sempre na temperatura-alvo determinada e, em situações pontuais, seu uso a temperaturas até 3 °C acima do desejado, não impactará significativamente no processo de fabricação da pá. Além disso, essas ocasiões pontuais podem ser evitadas, reduzindo a quantidade de IBCs contendo resina na sala.

6 CONCLUSÃO

Com os resultados dos testes de monitoramento de temperatura do ar da sala e da resina, é possível constatar que o cálculo da Carga Térmica para a sala de desgaseificação serviu para o dimensionamento adequado do número de condicionadores de ar necessários para resfriar o ambiente, atendendo ao propósito de manter a temperatura ideal para a sala e resfriar a resina até o ponto favorável para o seu envio para produção e que, possíveis falhas em algum dos condicionadores de ar não interferem expressivamente na sequência de produção.

Em complemento ao descrito acima, mesmo que a temperatura final da resina não tenha atingido o valor estipulado, é possível utilizá-la sem que haja o risco de prejudicar o processo, pois foi observado que sua troca de calor ocorre de forma lenta e gradual, garantindo que sua temperatura não varie significativamente ao sair da sala de desgaseificação. Além disso, é possível contornar situações não esperadas, que destoem das condições de temperatura determinadas para a resina epóxi e para o ar da sala, não necessitando de grandes intervenções para tal ação.

Vale lembrar que, a partir do estudo deste trabalho, foi possível analisar melhor o comportamento da resina, bem como do seu ambiente de armazenamento, focando nos pontos de maior atenção e que influenciam na obtenção de resultados satisfatórios. Além do mais, o não surgimento de defeitos de microbolhas nas matrizes poliméricas que constituem a pá eólica, por consequência da definição e melhoria do processo inicial, que ocorre na sala de desgaseificação, gera ganhos com economia de energia, material, tempo de processo e, principalmente, redução dos gastos com os reparos das microbolhas.

Por ser um mercado relativamente recente e em desenvolvimento, ainda não há muitas pesquisas que abordem o estudo mais a fundo da transferência de calor em resinas epóxi, antes de sua mistura com seu respectivo endurecedor. Isso contribuiu para que não houvesse uma análise mais técnica e precisa do comportamento e perda de calor da resina e, também, de como a vizinhança em que ela está inserida, e o tempo de permanência nela, impactam, tanto na temperatura-alvo desejada, quanto na carga térmica ambiente, isso por haver escassas opções de literaturas que abordem esse assunto específico.

Por fim, conclui-se que o trabalho atingiu o objetivo de, a partir dos dados e informações técnicas coletadas, calcular a carga térmica de resfriamento e o resultado desse cálculo servir como base para a seleção de condicionadores de ar que garantem que as condições esperadas para a fabricação de pás eólicas e armazenamento de resina epóxi sejam cumpridas.

REFERÊNCIAS

- ABEEólica. **Boletim Anual de Geração Eólica**. Associação Brasileira de Energia Eólica, 2017. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2018.
- ABNT. **NBR 16401-1**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários, Parte 1: Projeto das instalações. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT. **NBR 16401-3**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários, Parte 3: Qualidade do ar interior. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.
- AERIS. **Análise de desempenho de resina na linha de produção**. Caucaia, 2017.
- AERIS. **Processo de reestruturação da sala de degaseificação de resina**. Caucaia, 2018.
- ANSI/ASHRAE 62.1. **Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- APT INC. **Xair™ Thin-Film Deaerator**. Degas preheated unfilled resin, on-the-fly. New Jersey, 2009.
- ASHRAE. **Air Conditioning System Design Manual**. 2. ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2009.
- ASHRAE. **Handbook – Fundamentals (SI)**. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2005.
- BEIG, A. R.; MUYEEN, S. M. **Electric Renewable Energy Systems**. Wind Energy. Abu Dhabi: Elsevier, 2016.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 2005.
- CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos Polímeros**. Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2002.
- CAS DATALOGGERS. **Dataloggers for all applications**. Novus FieldLogger, 2018. Disponível em: <<https://www.dataloggerinc.com/product/fieldlogger-data-logger/>>. Acesso em: 27 out. 2018.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor de Massa**. Uma abordagem prática. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- DOW CHEMICAL COMPANY. **Airstone™ Infusion System**. 2018
- DOWN, P. G. **Heating and Cooling Load Calculations**. 1. ed. London: Pergamon Press, 1969.
- FROTA, A. B; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

HAU, ERICH. **Wind Turbines**. Fundamentals, Technologies, Application, Economics, v. 3. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.

HUNTSMAN QUÍMICA BRASIL LTDA. **Sistema Resina Epóxi**. Guia de Manuseio Seguro. São Paulo, 2010.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JACOB, G. C. *et al.* **Technical Advances in Epoxy Technology for Wind Turbine Blade Composite Fabrication**. Freeport, 2009.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor**. 6. ed. São Paulo: Thomson, 2003.

LEAL, A. S. C.; SILVA, S. M. L.; ARAÚJO, C. J. **Comportamento Termomecânico de Compósitos Ativos Preparados com Nanocompósitos Epóxi/Argila Organofílica e Fios de Liga Ni-Ti com Memória de Forma**. Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

LEROY MERLIN. **Bloco de Concreto Vedação Vazado 19x14x39cm Blojaf**. Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/bloco-de-concreto-vedacao-vazado-19x14x39cm-blojaf_87707613>. Acesso em: 06 nov. 2018.

MORAN, M. J. *et al.* **Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos**. Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

NHMRC. **Wind Turbines and Health**. National Health and Medical Research Council, Australia 2010. Disponível em: <https://www.nhmrc.gov.au/_files_nhmrc/publications/attachments/new0048_evidence_review_wind_turbines_and_health.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2018

SØRENSEN, BENT. **Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage**. Roskilde: Academic Press, 2007.

SZABÓ JÚNIOR, A. M. **Manual de Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho**. 11. ed. São Paulo: Rideel, 2017.

SILVEIRA, J. B. **Preparação e caracterização de resina epóxi transparente dopada com nanoestruturas semicondutoras de CdS**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Departamento de Física e Química, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

TÂMEGA, F. **Fundição de Processos Siderúrgicos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.