



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

BRENO LUCENA COSTA

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 8D PARA RESOLUÇÃO DE DEFEITOS EM
COMPONENTES PARA PÁS EÓLICAS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A
FABRICAÇÃO DE *SPAR CAPS*

FORTALEZA

2022

BRENO LUCENA COSTA

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 8D PARA RESOLUÇÃO DE DEFEITOS EM
COMPONENTES PARA PÁS EÓLICAS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A
FABRICAÇÃO DE *SPAR CAPS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus

FORTALEZA

2022

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)

- C87a Costa, Breno Lucena.
Aplicação da metodologia 8D para resolução de defeitos em componentes para pás eólicas : um estudo de caso sobre a fabricação de SPAR CAPS / Breno Lucena Costa. – 2022.
81 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus.
1. Pás eólicas. 2. Spar Caps. 3. Metodologia 8D. I. Título.

CDD 669

BRENO LUCENA COSTA

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 8D PARA RESOLUÇÃO DE DEFEITOS EM
COMPONENTES PARA PÁS EÓLICAS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE A
FABRICAÇÃO DE *SPAR CAPS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 06/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Washington Luiz Rodrigues de Queiroz
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Flávio Lopes e Maria da Paz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Aos meus pais, Flávio Lopes da Costa e Maria da Paz Lucena Costa, pelo carinho e ajuda em todos os momentos da minha vida, principalmente na minha educação. Espero honrar todo o cuidado e dedicação repassado.

Aos grandes amigos do Centro Acadêmico, que estiveram ao meu lado durante toda a jornada, dentre os quais destaco: Daniel Aquer, Saymon Ariel, Lucas Moraes, Bruno Linhares, Leandro Rodrigues, Beatriz Sousa e Emerson Santana.

Aos grandes amigos do Programa de Educação Tutorial (PET), pela ajuda durante a caminhada acadêmica, dos quais destaco: Dylan Santos, Francisco William, Francisco Carlos e Vitor Dantas.

À Instituição Universidade Federal do Ceará, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de iniciação científica durante minha graduação.

Ao Prof. Dr. Enio Pontes de Deus, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora, Dr. Jorge Luiz Cardoso e Dr. Washington Luiz Rodrigues de Queiroz pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas de trabalho que ajudaram nas coletas de dados e resolução do problema.

“Boa sorte é o que acontece quando a oportunidade encontra o planejamento.”
(THOMAS EDISON).

RESUMO

A sociedade vivencia a tendência de ampliar o uso de fontes de energia limpa, em detrimento da utilização de combustíveis fósseis, a fim de reduzir os impactos ambientais. No Brasil, atualmente o ramo eólico representa 11,46% da matriz energética. Dado o crescimento das usinas eólicas, cada vez mais são exigidas melhorias no processo de fabricação dos componentes que constituem as pás eólicas; aperfeiçoamentos os quais devem levar em consideração o formato aerodinâmico mais eficiente para a operação das pás e que, geralmente, consistem em mudanças processuais implementadas em um curto intervalo de tempo nas indústrias. A detecção de defeitos na fabricação de componentes eólicos muitas vezes pode ser prejudicada pela falta de dados de problemas ocorridos anteriormente. Assim sendo, é necessário o desenvolvimento de pesquisas que tratem de estudos de casos relacionados a esse assunto. À vista disso, o presente trabalho objetiva analisar defeitos de areado presentes em *spar caps*, um dos componentes estruturais mais importantes de uma pá eólica, por meio da aplicação da metodologia 8D de resolução de problemas. Visou-se determinar as causas dos defeitos, bem como propor um conjunto de ações efetivas capazes de conter a ocorrência destes. Ademais, pretendeu-se revisar o processo de produção das *spar caps*, para compreender e avaliar as variáveis relevantes. Foram realizadas análises visuais, dimensionais e, em alguns casos, microestruturais, além de ensaios de *pull off* e acompanhamento periódico da temperatura e da umidade das peças e do ambiente. A partir do estudo dos resultados, a metodologia 8D mostrou-se uma ferramenta bastante eficaz, tendo seu uso sido bem sucedido para solucionar os problemas detectados no processo de fabricação de *spar caps*. O plano de ação elaborado pela equipe de trabalho foi efetivo. Após sua implementação, produziram-se peças com zero defeitos, aprovadas pelos critérios de inspeção visual e ultrassônica. As principais ações para a resolução do problema foram a mudança do plano de infusão, visando o retardo no fluxo de resina em determinadas regiões, e o estudo das curvas de aquecimento ao longo de toda a extensão do molde. A realização de ensaios de *pull off* e de análises microestruturais, ao todo, resultaram na aprovação de 14 das 21 peças atingidas pelo defeito aerado, o que, em valores comerciais, representa uma economia de R\$ 1.800.000,00 em material, aproximadamente, ignorando custos secundários inerentes à produção.

Palavras-chave: *Spar caps*; defeito aerado; metodologia 8D.

ABSTRACT

Nowadays, society experiences the tendency to expand the application of renewable resources energy, instead of using fossil fuels, in order to reduce environmental impacts. In Brazil, the wind energy currently represents 11.46% of the energy matrix. Given the growth of wind power plants, improvements in the manufacturing process of the components that make up wind blades are increasingly required; improvements which should consider the most efficient aerodynamic format of the blades and which generally consist of procedural changes implemented in industries in a short period of time. The detection of defects in the manufacture of wind components can often be harmed by the lack of data from problems that occurred previously. Therefore, it is necessary to develop research that deals with case studies related to this subject. In view of this, the present work aims to analyze aerated defects in spar caps, one of the most important structural components of a wind blade, through the application of the 8D management. The objective was to determine the causes of the defects, as well as propose a set of effective actions capable of containing the occurrence of these. Furthermore, the intention was to review the production process of spar caps, to understand and evaluate the relevant parameters. Visual, dimensional and, in some cases, microstructural analyses were performed, as well as pull-off tests and periodic monitoring of temperature and humidity of the pieces and environment. From the analysis of the results, the 8D management proved to be a very effective tool, and its use was successful to solve the problems detected in the process of manufacturing spar caps. The action plan elaborated was very effective. After the implementation, zero-defect parts were produced and approved by the visual and ultrasonic inspection criteria. The main actions to solve the problem were the change of the infusion plan, which allowed the delay in the resin flow in certain regions, and the study of the heating curves along the entire length of the mold. The pull-off tests and microstructural analyses provided the approval of 14 of the 21 spar caps affected by the defects, which represent a saving of approximately R\$ 1,800,000.00 in materials, ignoring secondary costs inherent to production.

Keywords: Spar caps; aerated defects; 8D management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação esquemática de um material compósito	20
Figura 2	– Representação dos tipos de tecidos de fibra de vidro	24
Figura 3	– Representação gráfica de um pré-fabricado de alma	25
Figura 4	– Representação gráfica da aba adicionada ao pré-fabricado de alma	25
Figura 5	– Representação gráfica do pré-fabricado de raiz	26
Figura 6	– Representação esquemática das tensões exercidas pelo vento contra uma pá eólica	27
Figura 7	– Perfil transversal de uma pá eólica	27
Figura 8	– Representação gráfica das regiões de uma pá eólica	28
Figura 9	– Esquema do fluxo macro de um processo de fabricação de pás eólicas	29
Figura 10	– Processo VARTM	30
Figura 11	– Representação de um corpo estranho inserido nas camadas de uma pá eólica ...	32
Figura 12	– Medição de ruga utilizando pente de ruga	33
Figura 13	– Spot de luz interrompido	34
Figura 14	– Representação esquemática do ensaio de <i>pull off</i>	37
Figura 15	– Dispositivo de carregamento do ensaio de <i>pull off</i>	37
Figura 16	– Atuador hidráulico acoplado ao <i>dolly</i>	38
Figura 17	– Disciplinas da metodologia 8D	41
Figura 18	– Representação gráfica do molde de <i>spar cap</i> pressão	42
Figura 19	– Evidências das inspeções visuais realizadas nas <i>spar caps</i> : a) defeito ameno e b) defeito grave	45
Figura 20	– a) Canaletas de infusão obstruídas, b) bolhas nas entradas de resina e c) aspirais com bolhas	46
Figura 21	– Diagrama de Ishikawa	56
Figura 22	– Evidência de temperatura alta	59

Figura 23 – Desenho técnico das zonas	64
Figura 24 – Região a) no sentido da corda e b) lateral da peça	73
Figura 25 – Esquema de mudança do plano de infusão	74
Figura 26 – Representação do esquema de escalonamento de camadas	74
Figura 27 – Imagens da fabricação de uma <i>spar cap</i> após a mudança do plano de infusão ...	75
Figura 28 – <i>Spar cap</i> não defeituosa	75
Figura 29 – Micrografias da amostra PS 74	78
Figura 30 – Micrografias da amostra PS 70	78
Figura 31 – Micrografias da amostra PS 84.....	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva padrão de temperatura	62
Gráfico 2 – Curva de temperatura das peças analisadas	63
Gráfico 3 – Temperatura do ambiente no primeiro dia de análise	65
Gráfico 4 – Temperatura do ambiente no segundo dia de análise	65
Gráfico 5 – Temperatura do ambiente no terceiro dia de análise	65
Gráfico 6 – Temperatura do ambiente no quarto dia de análise	66
Gráfico 7 – Temperatura do ambiente no quinto dia de análise	66
Gráfico 8 – Temperatura do ambiente no sexto dia de análise	66
Gráfico 9 – Umidade do ambiente no primeiro dia de análise	69
Gráfico 10 – Umidade do ambiente no segundo dia de análise	69
Gráfico 11 – Umidade do ambiente no terceiro dia de análise	69
Gráfico 12 – Umidade do ambiente no quarto dia de análise	68
Gráfico 13 – Umidade do ambiente no quinto dia de análise	68
Gráfico 14 – Umidade do ambiente no sexto dia de análise	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Critérios de aprovação de alguns defeitos analisados durante as inspeções visual e dimensional	35
Tabela 2	– Peças defeituosas	45
Tabela 3	– Plano de ação de contenção proposto pela equipe	52
Tabela 4	– Dados das spar caps fabricadas após implementação do plano de ações de contenção	54
Tabela 5	– Plano de ação para validação de ações	56
Tabela 6	– Dados das spar caps fabricadas após implementação do plano de ações de contenção	58
Tabela 7	– Dados das amostras analisadas	69
Tabela 8	– Plano de ações corretivas	71
Tabela 9	– Dados de inspeção de defeitos das spar caps produzidas após mudança no plano de infusão	72
Tabela 10	– Resultados de inspeção após ações corretivas	75
Tabela 11	– Resultados do ensaio de <i>pull off</i>	76
Tabela 12	– Resultados de inspeção	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIAX	Bidirecional
CFM	Manta de Filamento Contínuo
PDCA	Planejar, Fazer, Checar, Agir
PET	Polietileno Tereftalato
PS	Cascas de Pressão
PVC	Policloreto de Vinila
SEB	Salários, encargos e benefícios
SS	Cascas de Sucção
TRIAx	Tridirecional
UD	Unidirecional
VARTM	Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$	Reais
%	Porcentagem
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Materiais compósitos	20
3.1.1	<i>Matrizes poliméricas</i>	21
3.1.1.1	<i>Resinas de epóxico</i>	22
3.1.2	Reforços	22
3.1.2.1	<i>Fibras de vidro</i>	23
3.2	Estrutura de uma pá eólica	24
3.2.1	<i>Pré-fabricados</i>	24
3.2.1.1	<i>Almas</i>	24
3.2.1.2	<i>Raízes</i>	26
3.2.1.2	<i>Spar Caps</i>	26
3.2.2	<i>Casca</i>	27
3.3	Processo de fabricação de uma pá eólica	28
3.4	Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM)	29
3.5	Defeitos em materiais compósitos	31
3.5.1	<i>Identificação de defeitos em materiais compósitos</i>	33
3.5.1.1	<i>Ensaio de pull off</i>	36
3.6	Metodologia 8D para resolução de problemas	38
4	METODOLOGIA	42
4.1	Processo de fabricação de uma <i>spar cap</i>	42
4.2	Constatação do problema	43
4.3	Implementação da metodologia 8D	44
4.3.1	<i>Definição do time de trabalho</i>	44
4.3.2	<i>Definição do problema</i>	44
4.3.3	<i>Definição das ações de contenção</i>	47
4.3.4	<i>Identificação das causas raízes</i>	47
4.3.4.1	<i>Validação das hipóteses e definição de ações corretivas</i>	47

4.3.4.1.1	Medição	47
4.3.4.1.2	Método	47
4.3.4.1.3	Mão de obra	47
4.3.4.1.4	Máquinas	48
4.3.4.1.5	Meio ambiente	48
4.3.4.1.6	Materiais	49
4.3.5	<i>Definição de ações corretivas</i>	49
4.3.6	<i>Implementação das ações corretivas</i>	49
4.3.7	<i>Ações complementares</i>	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	Ações de contenção	51
5.2	Causas raízes do problema	55
5.2.1	<i>Medidas de temperatura</i>	58
5.2.2	<i>Condições do ambiente</i>	59
5.2.3	<i>Mão de obra</i>	59
5.2.4	<i>Teste de bolha</i>	60
5.2.5	<i>Temperatura e umidade do ambiente</i>	64
5.2.6	<i>Umidade percentual da resina</i>	69
5.3	Ações corretivas	70
5.4	Implementação das ações corretivas	71
6	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a sociedade vivencia a tendência de ampliar o uso de fontes de energia limpa, em detrimento da utilização de combustíveis fósseis, a fim de reduzir os impactos ambientais. A crescente relevância da geração de energia por meio de fontes renováveis é um fato; há diversas produções científicas e tecnológicas que estudam inovações nesta área. Existe também um forte desenvolvimento das indústrias que atuam nesse ramo, tais como as indústrias fabricantes de painéis solares e as indústrias fabricantes de pás eólicas.

No Brasil, o ramo eólico representa 11,46% da matriz energética, o que totaliza 20,8 gigawatts de potência instalada. Na prática, esses números representam os investimentos para otimizar a geração de energia com menos poluentes e garantir uma maior segurança energética; além disso, retratam a criação de empregos para milhares de brasileiros (BERNARDINO, 2022).

Em 2021, as usinas hidrelétricas do Brasil foram extremamente prejudicadas pela escassez hídrica — a maior registrada em 91 anos. Neste mesmo contexto, houve a ampliação da geração de energia eólica: a capacidade instalada em usinas eólicas correspondeu a 48,85% do acréscimo total de potência do período (BERNARDINO, 2022).

Dado o crescimento das usinas eólicas, portanto, torna-se evidente que a fabricação de pás eólicas atualmente é uma das aplicações mais importantes dos materiais compósitos poliméricos. Cada vez mais são exigidas melhorias no processo de fabricação dos componentes que constituem as pás eólicas, pois, com o aumento do comprimento, estes componentes estão sujeitos a maiores esforços estruturais. Em relação às questões de projeto, isso faz surgir a necessidade de aumentar a espessura e a largura das peças, além de impulsionar o desenvolvimento e aplicação de novos materiais nesse ramo, como a madeira balsa. É válido ressaltar que quaisquer aperfeiçoamentos devem levar em consideração o formato aerodinâmico mais eficiente para a operação das pás e que, geralmente, consistem em mudanças processuais implementadas em um curto intervalo de tempo (REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011).

Mediante os fatos expostos e considerando que são aplicados processos novos em projetos industriais, entende-se que a detecção de defeitos na fabricação de componentes eólicos muitas vezes é prejudicada pela falta de dados anteriores, coletados no estudo de problemas semelhantes ocorridos anteriormente. Assim sendo, é necessário o

desenvolvimento de pesquisas que tratem de estudos de casos relacionados a esse assunto.

Portanto, por meio da aplicação da metodologia 8D de resolução de problemas, o presente trabalho tem como principal objetivo analisar defeitos de areado presentes em *spar caps*, um dos componentes estruturais mais importantes de uma pá eólica. A razão do desenvolvimento desta pesquisa se encontra na necessidade da indústria em satisfazer os critérios de aceitação de defeitos do cliente — parâmetros e especificações que as peças devem atender a rigor. Esse trabalho ainda é de extrema relevância para resguardar as usinas eólicas de futuros sinistros em campo, eventos que ocasionam acidentes no trabalho, reparos no parque eólico e gastos com garantia estendida.

Em busca de fundamentar as discussões e as soluções planejadas, foram realizadas análises visuais e dimensionais, além de ensaios de *pull off* e acompanhamento periódico da temperatura e da umidade tanto dos ambientes onde as peças e materiais são alocados quanto das matérias-primas. Também ouviram-se os relatos dos profissionais diretamente envolvidos com o processo de fabricação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Portanto, por meio da aplicação da metodologia 8D de resolução de problemas, o presente trabalho tem como principal objetivo analisar defeitos de areado presentes em *spar caps*.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as causas dos defeitos;
- Propor um conjunto de ações efetivas capazes de conter a ocorrência dos defeitos;
- Revisar o processo de produção das *spar caps*, para compreender e avaliar todas as variáveis relevantes;
- Propor aprovações no estado das peças já afetadas pelo defeito.

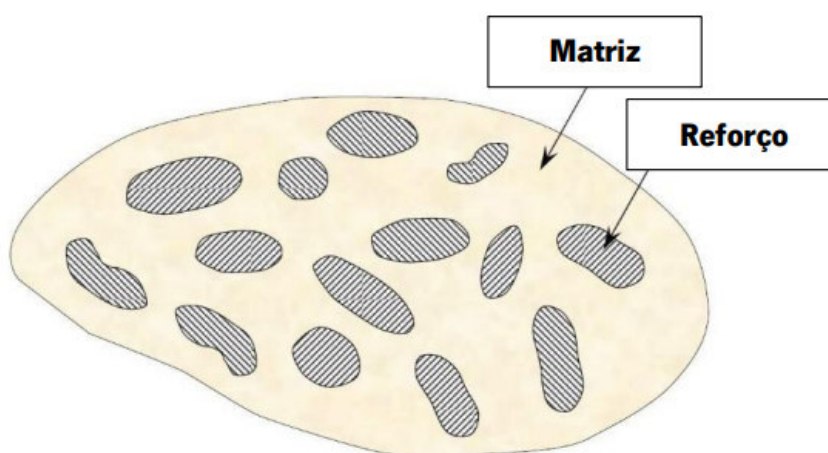
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais compósitos

Os materiais compósitos são comumente definidos como estruturas com duas ou mais fases macroscópicas, as quais, juntas, apresentam melhores propriedades mecânicas do que se avaliadas isoladamente. Em um compósito, há uma fase contínua denominada matriz e uma fase descontínua chamada de reforço, que pode possuir uma característica filamentar, particulada ou fibrosa (BERTHELOT, 1999).

Na Figura 1, apresenta-se uma representação esquemática de um material compósito hipotético, evidenciando as duas fases presentes.

Figura 1 — Representação esquemática de um material compósito



Fonte: Berthelot (1999, com adaptações).

As propriedades finais dos materiais compósitos são determinadas pela geometria das fibras, razão volumétrica entre reforço/matriz e pelas propriedades da fibra e da matriz. O material de reforço é tipicamente mais rígido e resistente do que o material da matriz (ALMACO, 2020).

Segundo a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO), em compósitos estruturais, cerca de 70 a 90% das cargas mecânicas são absorvidas pelos reforços, pois esses componentes garantem melhores propriedades de rigidez, resistência mecânica à tração e à compressão e resistência ao impacto desses materiais.

Ainda assim, o material da matriz é fundamental, porque é responsável por definir a forma da peça e unir fisicamente os reforços — envolvendo e isolando os filamentos de modo que cada um possa atuar separadamente e, assim, interromper a propagação de trincas e fissuras.

Na indústria, os reforços costumam ser fibras de vidro, carbono ou aramida. Em algumas aplicações, pode haver mais de um tipo de reforço inserido em uma mesma matriz; esses materiais são denominados compósitos híbridos.

3.1.1 Matrizes poliméricas

Os compósitos podem possuir matriz metálica, cerâmica ou polimérica. As matrizes poliméricas são as mais utilizadas industrialmente, devido à capacidade desses materiais de serem processados em baixas temperaturas e baixas pressões.

Os polímeros podem ser classificados como termoplásticos, termoendurecíveis e elastômeros. Os polímeros termoplásticos amolecem no aquecimento e endurecem no resfriamento; além disso, podem ser aquecidos e resfriados repetidas vezes. Os termoendurecíveis, devido às ligações cruzadas covalentes formadas entre as cadeias moleculares adjacentes — as quais tornam as cadeias resistentes aos movimentos vibracionais —, tornam-se permanente endurecidos ao serem submetidos a um aquecimento. Por sua vez, os elastômeros são polímeros cuja principal característica é a elevada elasticidade, ou seja, em condições normais, podem ser deformados e rapidamente retornar ao estado inicial; essa capacidade lhes é conferida pelo processo de vulcanização, quando compostos de enxofre são adicionados ao polímero, formando ligações cruzadas (CALLISTER, 2012).

Para materiais compósitos, os termoendurecíveis e os termoplásticos são as opções mais viáveis. Na produção de pás eólicas, âmbito de estudo do presente trabalho, é preferível o uso de polímeros termoendurecíveis. Uma das etapas do processamento destes polímeros é a reação química denominada de cura, que corresponde ao momento em que ocorre a reticulação das cadeias moleculares, permitindo a obtenção de um produto rígido e infusível. Além disso, os termoendurecíveis apresentam menor viscosidade em relação aos polímeros termoplásticos. Sobretudo para materiais compósitos cujo reforço é constituído por fibras longas, a baixa viscosidade é fundamental para um bom fluxo de resina durante a infusão; é,

portanto, essencial para diminuir a geração de defeitos, que será melhor abordada nos próximos tópicos (JOHNSON, 2020).

Apesar da ampla oferta de diferentes tipos de polímeros termoendurecíveis, os mais usados atualmente no mercado são os poliésteres insaturados, os vinilésteres e as resinas de epóxido (JOHNSON, 2020).

3.1.1.1 Resinas de epóxido

Utilizadas nos laminados analisados no presente trabalho, as resinas de epóxido são consideradas as detentoras das melhores propriedades mecânicas quando comparadas às demais resinas, principalmente pela sua boa resistência (MOURA, MORAIS, MAGALHÃES, 2011).

Dentre as principais vantagens do seu uso, estão: a excelente adesão às fibras dos reforços, a baixa contração durante a cura e a facilidade operacional em temperaturas e pressões não tão elevadas. Contudo, esse material possui algumas limitações mercadológicas e processuais, tais como elevado custo, sensibilidade à absorção de umidade e um processo de cura lento (MOURA, MORAIS, MAGALHÃES, 2011).

A sensibilidade à absorção de umidade é a desvantagem mais relevante para o desenvolvimento do presente trabalho, pois a umidade afeta prejudica as propriedades físicas das peças produzidas com esse material.

3.1.2 Reforços

Como mencionado anteriormente, em materiais compósitos, os reforços podem estar presentes na forma de partículas ou fibras. Comercialmente, é mais comum a aplicação de reforços em fibras, podendo estas serem descontínuas (fibras curtas) ou contínuas (fibras longas), caracterizadas por filamentos de pequenos diâmetros e grandes comprimentos, oferecendo mais rigidez e resistência mecânica (ALMACO, 2020).

Os reforços mais comuns para fabricação de pás eólicas são as fibras de carbono e de vidro. Neste trabalho, as peças analisadas foram completamente fabricadas em laminados de fibra de vidro.

3.1.2.1 Fibras de vidro

As fibras de vidro são um material empregado em muitas aplicações devido às suas características amorfas, que oferecem boa resistência à tração, ao impacto, e à agentes químicos em diversas direções. Além disso, possuem um custo de mercado inferior em relação à fibra de carbono (MANWELL, MCGOWAN, ROGERS, 2009).

Apesar disso, ainda quando comparadas às fibras de carbono, as fibras de vidro possuem desvantagens, tais como maior densidade e menor módulo de elasticidade (MANWELL, MCGOWAN, ROGERS, 2009).

De acordo com ALMACO (2020), as fibras de vidro podem ser classificadas genericamente em relação à filamentação como sendo:

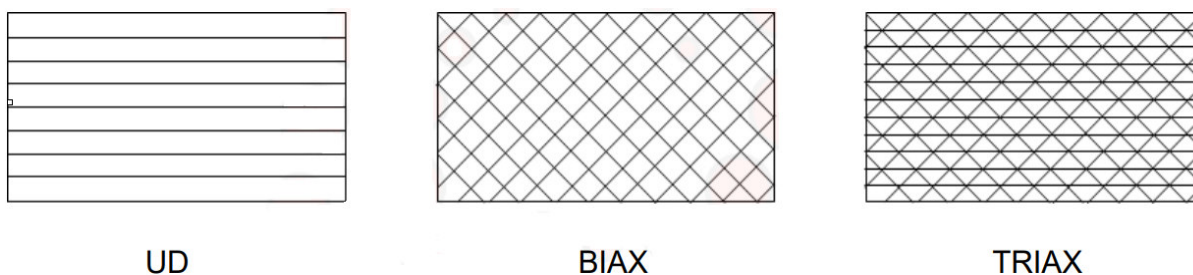
- **Vidro E (*Electrical*)**: provinda do dióxido de silício e com alcalinidade menor que 2%. Possuem boa relação entre o custo e as propriedades mecânicas;
- **Vidro S (*Strength*)**: provinda do dióxido de silício e óxido de magnésio, e com elevados módulo de elasticidade e resistência à tração se comparada à Vidro E, porém, possui custo mais elevado, sendo comumente mais utilizada em componentes que requerem melhores propriedades mecânicas;
- **Vidro AR (*Alkalis Resistant*)**: resistente a álcalis, adequada para aplicação como reforço de concreto.

As fibras de vidro são obtidas de forma contínua a partir da fusão da massa de vidro e da extrusão na filamentação. Em seguida, são adicionados agentes que promovem aderência à matriz orgânica, normalmente silanos. Segundo a ALMACO (2020), essas fibras são um material comercializado para indústria eólica na forma de:

- **Roving**: fios contínuos enrolados em formato de bobinas;
- **Mantas**: fios picotados e unidos quimicamente, que são normalmente usados para laminação manual (*hand lay up*);
- **Tecidos**: fios trançados em diferentes angulações e gramaturas, cujo formato depende da necessidade estrutural. Existem os tecidos unidirecionais (UD), nos quais os fios possuem uma única orientação de 0° entre si; os bidirecionais

(BIAX), onde os fios são orientados de 45° entre si e, por fim, os tridirecionais (TRIAX), cuja estrutura é apresentada na Figura 2.

Figura 2 — Representação dos tipos de tecidos de fibra de vidro



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Estrutura de uma pá eólica

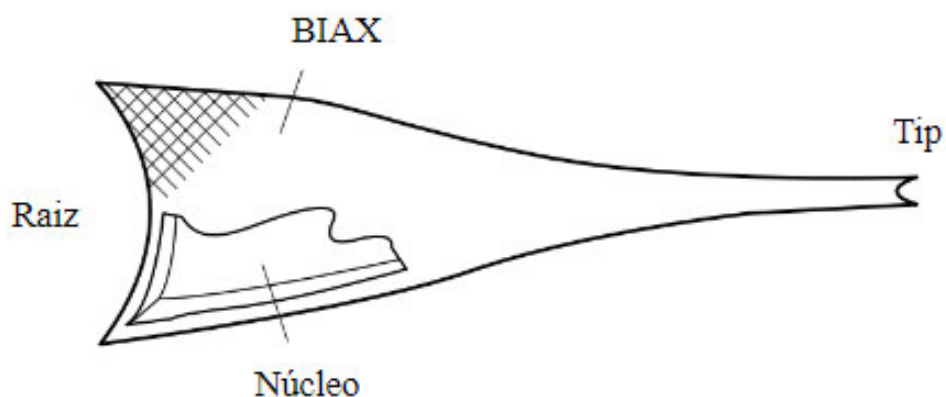
Segundo Cortir (2019), as pás eólicas atuais são produzidas por meio de duas linhas de produção: as cascas constituídas de sucção (SS) e pressão (PS) e os pré-fabricados. Os pré-fabricados mais comuns são as almas, as raízes e as *spar caps*, cujas definições serão tratadas adiante.

3.2.1 Pré-fabricados

3.2.1.1 Almas

As almas das pás eólicas são componentes razoavelmente fáceis de produzir. Possuem a função de funcionar como pilares, recebendo as tensões de cisalhamento, não permitindo que as cascas ovalizem ou empenem. Na Figura 3, encontra-se uma representação gráfica desse pré-fabricado. Para constituir as almas, comumente, utilizam-se de duas a oito camadas de BIAX +/- 45° e um núcleo (*core*) polimérico de baixa densidade — que pode ser de policloreto de vinila (PVC), madeira balsa ou polietileno tereftalato (PET) —, conferindo à peça a espessura mínima definida em projeto e, assim, melhorando a resistência a flambagem da pá (CORTIR, 2019).

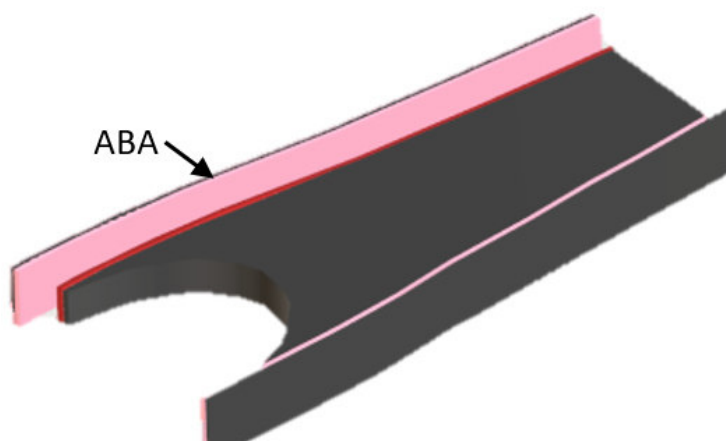
Figura 3 — Representação gráfica de um pré-fabricado de alma



Fonte: Cortir (2019).

É válido ressaltar que esse componente é fundamental no processo de colagem, que consiste na etapa de produção de pás eólicas com mais variáveis; frequentemente, é nesse processo onde há gargalos operacionais onde unimos o pré-fabricado de alma e *spar cap* por meio de uma resina epóxi de alta densidade normalmente chamada de massa de colagem. Considerando isso, em busca de garantir a qualidade do produto final, é aplicada a seguinte técnica: uma aba é laminada na lateral da peça, elevando sua altura e proporcionando uma boa área de contato entre a casca e a massa de colagem, assim como ilustrado na Figura 4 (STIESDAL, 1999).

Figura 4 — Representação gráfica da aba adicionada ao pré-fabricado de alma

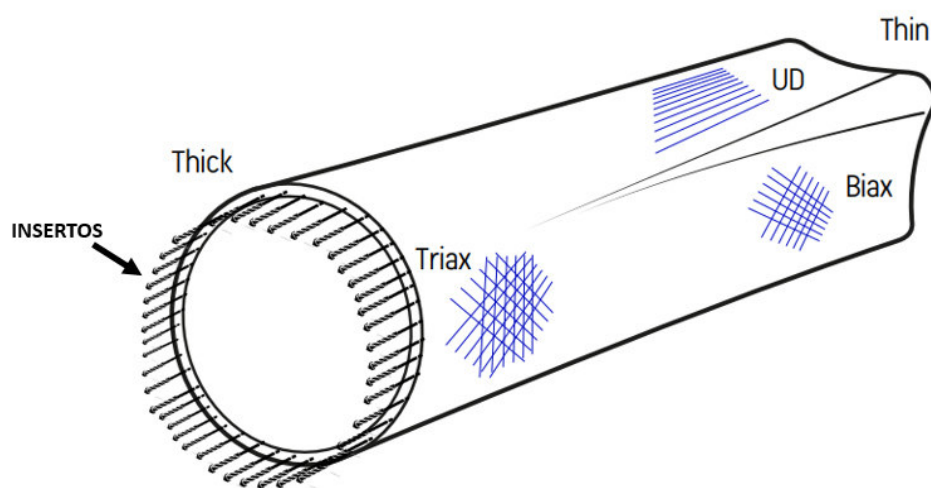


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1.2 Raízes

A função primária do pré-fabricado de raiz, mostrado na Figura 5, é receber o momento fletor da pá eólica da maneira mais uniforme possível, sem danificá-la. Geralmente, a raiz é laminada com UD, BIAx e TRIAX, sendo a região mais próxima da raiz da pá a mais espessa, devido à necessidade da instalação de insertos, os quais conectam a raiz da pá a nacele onde se encontra o gerador, transferindo a carga da pá para esse componente (CORTIR, 2019).

Figura 5 — Representação gráfica do pré-fabricado de raiz



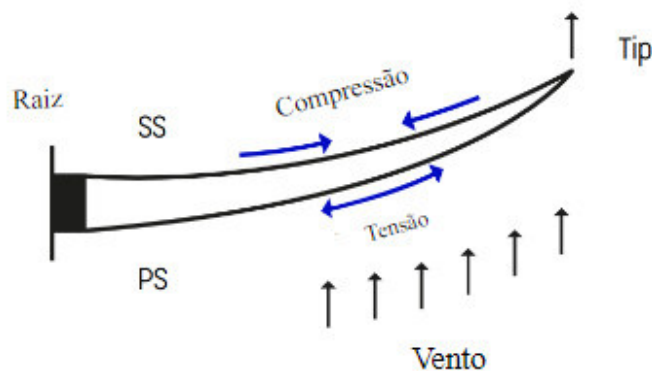
Fonte: Cortir (2019).

3.2.1.3 Spar Caps

Também chamadas longarinas, as *spar caps* são componentes cruciais para a estrutura de uma pá eólica. As *spar caps* são comumente laminadas com fibras de UD, tanto de vidro como de carbono (pultrudado), e são fundamentais para suportar a ação do vento na deflexão da pá contra a torre quando em campo, conforme o esquema mostrado na Figura 6 — haja visto que esse tipo de orientação de fibra oferece forte resistência longitudinal e baixa resistência transversal (MOURA, MORAIS, MAGALHÃES, 2011).

Atualmente, estão sendo realizados testes de *spar caps* fabricadas com o uso de camadas de BIAx em algumas regiões, visando melhorar a resistência transversal e, também, facilitar o fluxo de resina, dada à capacidade de absorção desse tipo de material (STAAB, 1999).

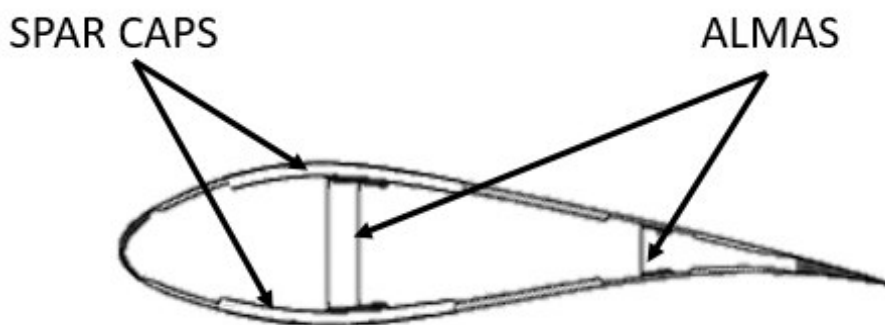
Figura 6 — Representação esquemática das tensões exercidas pelo vento contra uma pá eólica



Fonte: Cortir (2019).

Na Figura 7, é possível observar que a união entre as *spar caps* e almas formam um perfil em “T”. Esse tipo de perfil é bastante importante para a engenharia estrutural e, normalmente, é encontrado em estruturas fabricadas em aço.

Figura 7 — Perfil transversal de uma pá eólica



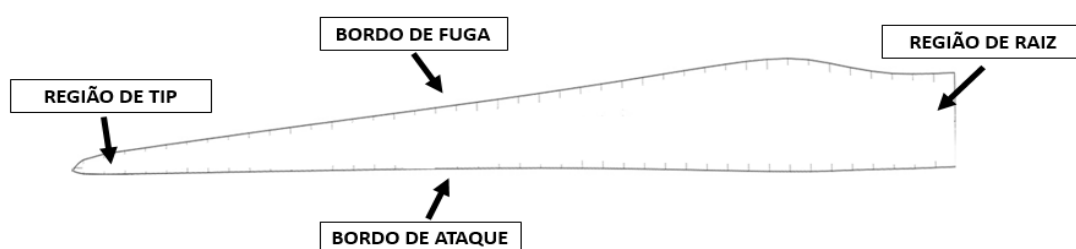
Fonte: Cortir (2019, com adaptações).

3.2.2 Casca

A casca é o componente mais importante de uma pá eólica nos quesitos aerodinâmica e produção, pois é onde são anexados todos os pré-fabricados. Ademais, é na estrutura da casca que os engenheiros focam seus trabalhos e estudos aerodinâmicos para melhorar eficiência energética com fluxo de fluidos quando a pá está em operação (THOMAZ JUNIOR, 2012).

Na Figura 8, é apresentada uma representação das regiões de uma pá eólica, evidenciando algumas das quais foram discutidas anteriormente.

Figura 8 — Representação gráfica das regiões de uma pá eólica



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Processo de fabricação de uma pá eólica

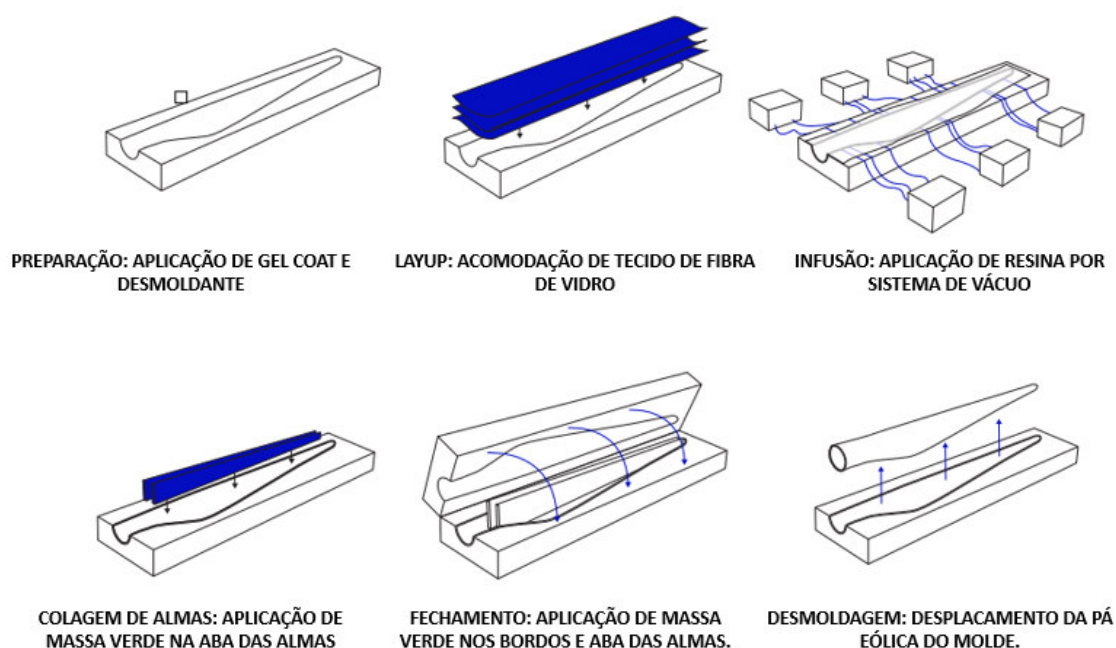
Segundo Cortir (2019), o fluxo macro de processos de laminação mais comum na fabricação de pás eólicas consiste em:

- **Preparação:** é aplicado um desmoldante para evitar delaminações no molde ou na peça e, também, um gel *coat*, que visa dar um acabamento mais uniforme à região externa da pá;
- **Lay up:** etapa na qual se começa a acomodação das camadas de fibra de vidro, as quais devem ser dispostas seguindo uma sequência e uma orientação bem definida. Além disso, ocorre o posicionamento do núcleo, que consiste, normalmente, nas *spar caps*, madeira balsa na região de raiz e PVC ou PET na região do *tip*;
- **Infusão:** é iniciada pela montagem do plano que visa fornecer maior facilidade ao movimento do fluxo de resina, assim garantindo que todas as camadas sejam molhadas uniformemente e com a velocidade necessária. Depois, é feita a bolsa de vácuo e o vácuo propriamente dito, com o auxílio de bombas. Então, começa o processo de infusão, dado pela variação de pressão, que força a resina a ser direcionada para dentro da peça (SONG, 2003). Após isso, há a cura do laminado, quando se retiram os consumíveis (sobras do plano de infusão);

- **Colagem das almas:** é quando se aplica a resina de colagem na linha de colagem da casca ou diretamente na aba do pré-fabricado de alma;
- **Fechamento:** consiste na aplicação da massa de colagem na aba do lado oposto das almas e, também, nos bordos de ataque e fuga. Então, o molde é fechado e uma turbina o aquece para garantir uma boa cura de todos os químicos utilizados no processo;
- **Desmoldagem:** o molde é aberto e a pá é içada com a ajuda de uma ponte rolante. Depois, a pá eólica segue para os processos de acabamento e pintura.

Na Figura 9, são ilustradas as etapas abordadas anteriormente.

Figura 9 — Esquema do fluxo macro de um processo de fabricação de pás eólicas



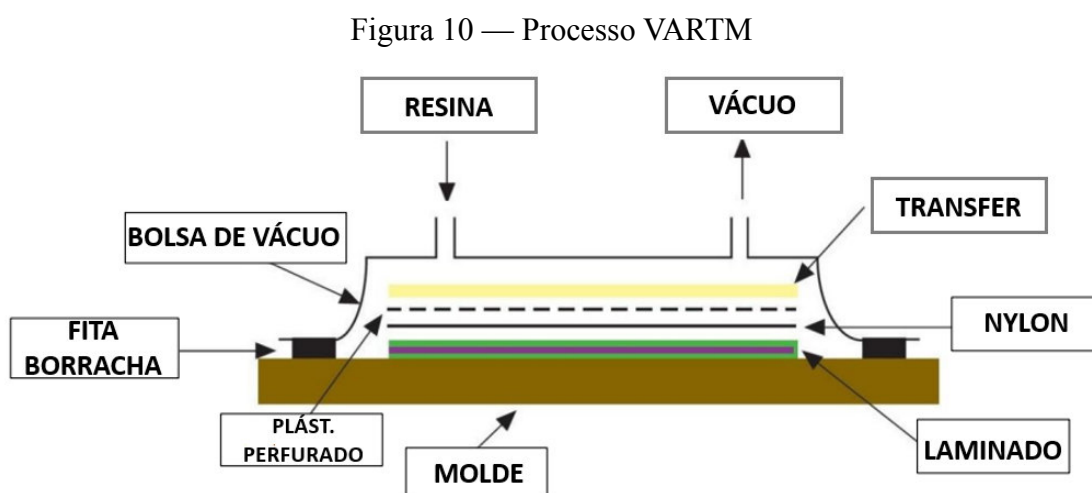
Fonte: Cortir (2019, com adaptações).

3.4 Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM)

A Moldagem por Transferência de Resina Assistida por Vácuo (VARTM) consiste no processo de injeção de resina de viscosidade baixa para dentro de uma bolsa de vácuo, molhando toda a área do reforço. É uma ótima solução para a fabricação de peças de grandes

dimensões e que têm um elevado grau de complexidade, como as pás eólicas (CAMPOS, 2013).

De maneira geral, o processo de VARTM é mostrado na Figura 10. Esse processo se inicia com a colocação do material de reforço no interior do molde, e, então, é acomodado todo o plano de infusão com nylon (para oferecer rugosidade à superfície do laminado), plástico perfurado e transfer, que ajudam no fluxo de resina e evitam defeitos por falta de molhabilidade do tecido. Assim, são colocadas a fita borracha e a bolsa de vácuo e, depois, devido o gradiente de pressão entre o interior da bolsa de vácuo e o exterior, é introduzida a resina. A cura da resina é realizada com o auxílio de mantas térmicas. O plano de infusão é chamado de consumível, pois é totalmente retirado e não é reaproveitável (SONG, 2003).



Fonte: Gurit (2022).

O processo de infusão à vácuo possui dificuldades, sobretudo por se tratar de uma atividade manual. Sendo assim, é necessário avaliar alguns aspectos, como, por exemplo, a alocação dos pontos de entrada de resina, que devem ser estrategicamente colocados de modo a diminuir o tempo total de infusão e a proporcionar o preenchimento de todos os espaços sem que haja confronto de fluxos de resina no interior da peça (GRIFFIN, 2004).

Outros fatores podem prejudicar a infusão, como a ocorrência de vazamentos na bolsa de vácuo, o que diminui o delta de pressão e, também, permite a entrada de ar na peça. A temperatura da resina também é um fator crucial, pois pode oferecer picos de exotermia e que influencia na umidade da resina e do ambiente. Há, ainda, os possíveis problemas de processo, tais o mau posicionamento do plano de infusão, que faz com que a resina atinja

certos pontos da peça antes do previsto em projeto, ocorrendo, assim, uma defasagem na progressão e na solidificação antes do processo ser concluído (CAMPOS, 2013).

Mesmo levando em consideração todos os pontos abordados anteriormente, o processo de VARTM é extremamente melhor do que os processos anteriores de *hand lay up*, devido à possibilidade de colocação dos insertos na região de raiz junto à infusão, à menor incidência de bolhas de ar e à sua capacidade de proporcionar melhor segurança e higiene para os funcionários responsáveis pela produção e operação (GRIFFIN, 2004).

3.5 Defeitos em materiais compósitos

Os laminados são genuinamente propícios a vários defeitos ou danos em suas estruturas, devido à complexidade da produção e dos critérios de projeto, os quais costumam ser bem restritos (CAMPOS, 2013).

A presença de defeitos compromete as propriedades mecânicas dos componentes de uma pá eólica, como a resistência à fadiga, e, portanto, limita o seu tempo de serviço. Sendo assim, é evidente a necessidade de um rigoroso acompanhamento e controle de qualidade tanto no processo de fabricação quanto no parque eólico, com as pás em operação (STAAB, 1999).

Existem defeitos que podem ser causados pela inexperiência das pessoas envolvidas na fabricação das peças, como contaminação, preparação inadequada ou a realização de um processo fora do padrão estabelecido. Entre os defeitos mais comuns, estão os vazios, porosidades, rugas, corpo estranho, tecido semi-seco e seco, trinca e delaminação, *gap* entre núcleo, *overbite*, ausência de massa de colagem, etc (MCGOWAN, ROGERS, 2009).

Neste trabalho, será dada ênfase aos defeitos provenientes principalmente do processo de *lay up* e infusão, como vazios e microbolhas.

Os vazios e porosidades recebem nomes diferentes dependendo do tamanho e da quantidade. Vazios esporádicos são denominados bolhas ou microbolhas, ao passo que a porosidade costuma ser distribuída de maneira uniforme e é comumente denominada no meio fabril como aerado. Esses defeitos são geralmente formados por compostos voláteis liberados pela resina durante o processo de cura, ou que permanecem enclausurados entre as camadas de reforço. Na literatura, as principais causas previstas são: vazamento na bolsa de vácuo, ar

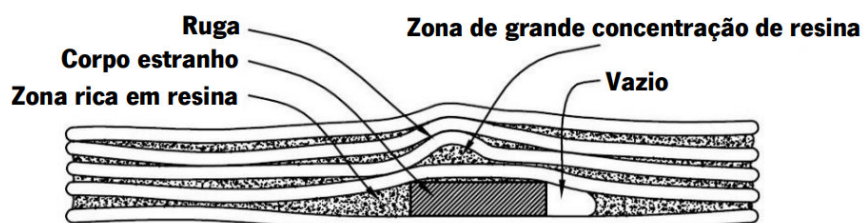
dissolvido no interior da resina e liberação de compostos voláteis devido à exotermia (CAMPOS, 2013).

Os vazios e porosidades podem atuar como pontos de concentração de tensões, além de diminuir a resistência ao corte, flexão e compressão. Logo, se a incidência for alta ou se o tamanho do vazio for considerável, pode haver delaminação, o que prejudica a resistência ao cisalhamento. Em relação à porosidade, tem-se que, para não influenciar negativamente as propriedades dos componentes da pá eólica, esta não pode ultrapassar 2% do volume do compósito (AGARWAL, BROUTMAN, CHANDRASHEKHARA, 2015).

As rugas são caracterizadas por ondulações no reforço do laminado. Isso ocorre normalmente porque certas regiões são difíceis de serem acomodadas e, uma vez que uma camada possui alguma saliência, as próximas também terão. Esse defeito geralmente provoca outro defeito denominado excesso de resina, e, juntos, originam uma zona de concentração de tensão, prejudicando propriedades como resistência à fadiga (BERTHELOT, 1999).

Também durante o *lay up*, a equipe de operação pode deixar ou esquecer corpos estranhos na pá eólica, tais como resquícios de nylon, ferramentas e materiais secundários (fitas, spray adesivo, etc). É comum categorizar esse defeito em dois tipos: corpos estranhos impregnáveis e corpos estranhos não-impregnáveis. É sabido que pode haver uma concentração de tensões ao redor desses corpos estranhos, o que também afeta negativamente as propriedades mecânicas das pás (FAHR, KANDEIL, 1992). Observe a Figura 11.

Figura 11 — Representação de um corpo estranho inserido nas camadas de uma pá eólica



Fonte: Unnthórsson, Jonsson, Runarsson (2014, com adaptações).

Também é importante ressaltar que existem defeitos padrões pelas empresas fabricantes e pelos seus clientes, defeitos estes capazes de serem resolvidos com reparos. Para a realização de determinados tipos de reparos, é necessária a aprovação do cliente e, caso haja

a recusa, a peça é direcionada para o descarte. Os critérios para categorizar um defeito como padrão ou não são: a criticidade da peça estruturalmente, a quantidade de defeitos por metro quadrado, a região da pá em que se encontra o defeito e, por fim, o defeito propriamente dito. Para as *spar caps*, que são os objetos de estudo deste trabalho, todos os reparos precisam de aprovação do cliente. A partir daí, entende-se a importância de fabricar uma peça com zero defeitos (STIESDAL, 1999).

3.5.1 Identificação de defeitos em materiais compósitos

Existem vários métodos de inspeção em componentes eólicos, como, por exemplo, a termografia, ensaio por líquidos penetrantes, ultrassom, inspeção visual e dimensional, etc. Em relação ao componente *spar cap*, comumente se realizam a inspeção visual, dimensional e o ensaio por ultrassom.

A inspeção visual consiste na análise superficial da peça, seguindo as orientações de treinamentos práticos redigidos pela empresa e pelo cliente. Esse é o método mais subjetivo de todos e, para aplicá-lo, é feito um compilado de fotos de materiais defeituosos fornecidos pelo cliente; esse compilado serve de parâmetro para as futuras inspeções. Logo após, é feita a inspeção dimensional, com o auxílio de uma trena, um paquímetro, um pente de ruga e, principalmente, de uma lanterna de 800 lúmens, pelo menos. Na Figura 12, é mostrada uma medição de ruga por meio de um pente de ruga.

Figura 12 — Medição de ruga utilizando pente de ruga



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na análise por luz visível, é utilizada uma fonte luminosa convergente, a qual é direcionada para o laminado. Na avaliação visual, caso a luz não ultrapasse o laminado que, teoricamente, é feito apenas de resina epoxi e fibra de vidro, é detectado um defeito que precisa ser melhor analisado. A Figura 13 apresenta um spot de luz interrompido, indicando a presença de um defeito naquela região.

Figura 13 — Spot de luz interrompido



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, é feita uma inspeção por meio de ultrassom. Essa inspeção avalia, pela análise comparativa de picos de ultrassom característicos apenas da resina e da fibra com os picos de ultrassom formados durante o ensaio da peça fabricada; caso haja algum defeito, outros picos são detectados e, então, mostrados no painel do equipamento. Dessa forma, pode-se constatar a presença de corpos estranhos e, inclusive, de tecidos secos ou vazios (FAHR, KANDEIL, 1992).

Em alguns casos, o tipo de defeito pode ser aferido visualmente, contudo, é comum no meio produtivo realizar lixamentos investigativos. Na Tabela 1, é possível observar um exemplo de critérios de aprovação de alguns defeitos analisados durante as inspeções visual e dimensional, estabelecidos de acordo com os parâmetros do cliente.

Tabela 1 — Critérios de aprovação de alguns defeitos analisados durante as inspeções visual e dimensional

Defeito	Peça	Orientação	Critério de aceitação																						
Rugas	Sparcap	Longitudinal	1) Critério 1: Altura até 2 mm 2) Critério 2: Caso altura maior que 2 mm, $AR \leq 0,05$ ($AR = H/L_{min}$) (No sentido da fibra)																						
Rugas	Sparcap	Corda	1) Critério 1: Altura até 2 mm 2) Critério 2: Caso altura maior que 2 mm, $AR \leq 0,1$ ($AR = H/L_{min}$) (perpendicular ao sentido da fibra)																						
Bolhas	Sparcap	-	Até 25 mm ²																						
Delaminado	Sparcap	Todas	Não aceitável																						
Trincas	Sparcap	Todas	Não aceitável																						
Tecido seco	Sparcap	Todas	Não aceitável																						
Tecido semi-seco	Sparcap	Todas	Comprimento ≤ 1000 mm e largura ≤ 15 mm																						
Microbolhas	Sparcap	Todas	Até 1 m ² <table border="1"> <thead> <tr> <th>Z</th> <th>Tolerância (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9</td> <td>5,1</td> </tr> <tr> <td>12,47</td> <td>4,8</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>2,1</td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>1,6</td> </tr> <tr> <td>49,25</td> <td>1,6</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>1,6</td> </tr> <tr> <td>71,3</td> <td>1,6</td> </tr> </tbody> </table>	Z	Tolerância (mm)	9	5,1	12,47	4,8	20	4	30	3	35	2,5	40	2,1	45	1,6	49,25	1,6	60	1,6	71,3	1,6
Z	Tolerância (mm)																								
9	5,1																								
12,47	4,8																								
20	4																								
30	3																								
35	2,5																								
40	2,1																								
45	1,6																								
49,25	1,6																								
60	1,6																								
71,3	1,6																								
Corpo estranho de material impregnável	Sparcap	Todas	1) Área < 900 mm ² , caso largura ou comprimento sejam menores que 50 mm 2) Caso alguma dimensão exceda 50 mm, a área máximo é 400 mm ² 2) São permitidos no máximo 3 corpos estranhos numa área de 1 m ²																						
Corpo estranho de material não impregnável	Sparcap	Todas	1) Área máxima = 100 mm ² 2) Não é permitido mais do que 1 corpo estranho numa área de 1 m ²																						
Camadas ausentes	Sparcap	Todas	Não aceitável																						
Camadas posicionadas erradas	Sparcap	Todas	Não aceitável																						
Camadas escorregadas	Sparcap	Todas	Não aceitável																						
Camadas mal acomodadas	Sparcap	Todas	Não aceitável																						

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na prática, uma vez que o defeito não é aprovado nos critérios de aprovação, é realizado o fluxo explicado anteriormente, com a ressalva de que, mesmo a peça sendo aprovada, devido à criticidade estrutural da *spar cap*, o cliente deve estar ciente e aprovar todos os defeitos. Ainda é válido ressaltar que tanto os critérios de aprovação quanto os métodos de inspeção podem variar dependendo das diretrizes repassadas pelos clientes, e que, portanto, o procedimento explicado anteriormente pode sofrer alterações.

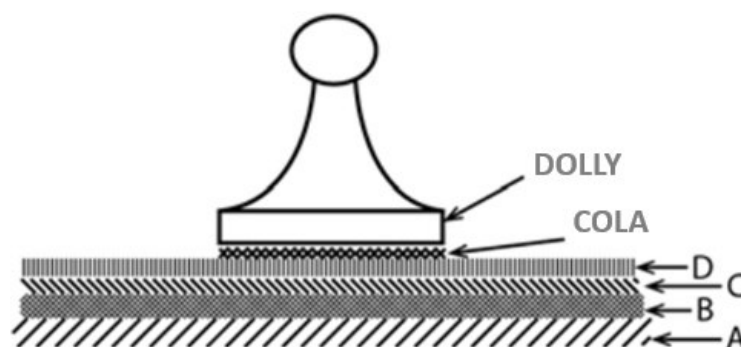
3.5.1.1 Ensaio de *pull off*

O ensaio de *pull off*, frequentemente chamado de teste de aderência à tração, é um dos meios mais comuns de se analisar e aprovar ou não defeitos junto ao cliente, assim como de analisar a gravidade de certos defeitos levando em consideração os danos às propriedades mecânicas do material. Trata-se de um ensaio amplamente difundido no setor de construção civil, geralmente aplicado em concreto, cerâmicos e aço (ASTM, 2017).

O teste no geral é realizado de acordo com a representação mostrada na Figura 14. Com uma cola especial, fixa-se um *dolly* ou *stud* perpendicularmente à superfície do substrato — resalta-se que é necessário se atentar à limpeza da superfície e à garantia de uma área suficiente para o teste. Finalizada a cura da cola, é colocado um aparelho que exerce um esforço de tração normal à superfície da peça e, então, a carga aplicada pelo dispositivo é aumentada gradualmente e monitorada pelo próprio aparelho. O teste é finalizado quando se chega no especificado previamente ou quando o material trinca ou rompe (ASTM, 2016).

Conforme a norma ASTM D4541-17, os resultados obtidos só devem ser comparados sob os mesmos parâmetros, como instrumentação, condições ambientais e cola utilizada. No caso do presente trabalho, torna-se necessário analisar a peça no mesmo sentido corda — isto é, no mesmo *Z* —, pois assim garante-se que, durante a infusão, foi produzida uma peça cuja extensão tem a mesma espessura, número de camadas e condições.

Figura 14 — Representação esquemática do ensaio de *pull off*



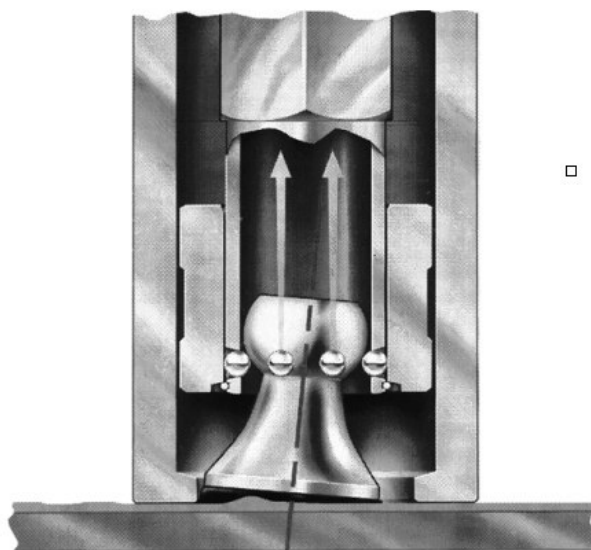
Fonte: ASTM (2017, com adaptações).

Uma representação do dispositivo de carregamento é mostrada na Figura 15. É nele onde fica a tela de acompanhamento e onde se determinam os parâmetros iniciais do ensaio. Além disso, há o atuador hidráulico, que é acoplado ao *dolly*, conforme indica a Figura 16, e é no *dolly* onde efetivamente a carga é aplicada. O parâmetro mais importante, conforme a norma, é a taxa de carga uniforme, que não deve ser superior a 1 MPa/s. Ademais, é necessário verificar se há algum espaçamento entre o atuador e o *dolly*, sendo imprescindível fazer um ajuste caso houver.

Figura 15 — Dispositivo de carregamento do ensaio de *pull off*



Fonte: ASTM (2017, com adaptações).

Figura 16 — Atuador hidráulico acoplado ao *dolly*

Fonte: ASTM (2017, com adaptações).

3.6 Metodologia 8D para resolução de problemas

Em busca de uma melhor gestão de qualidade voltada para o cliente, as indústrias cada vez mais investem em melhoria contínua. Uma das ferramentas mais utilizadas para otimizar a relação das indústrias com os clientes é a metodologia 8D, que, segundo Rambaud (2006), objetiva identificar e corrigir problemas, além de evitar sua recorrência, assim oferecendo maior confiabilidade do serviço a todos envolvidos. Dessa forma, a aplicação dessa metodologia também finda evitando gastos de recursos como tempo, dinheiro e mão de obra. Para Carvalho e Paladini (2012), a metodologia 8D é de grande utilidade, pois estabelece uma prática padrão de análise com base em fatos e dados e com foco na causa raiz do problema a ser solucionado.

Essa metodologia consiste em um conjunto de passos que se baseiam em outras metodologias anteriormente formuladas, como o PDCA — que tem como escopo as etapas *Plan* (planejar), *Do* (fazer), *Check* (checar), *Act* (agir) —, além de englobar procedimentos gráficos, numéricos e analíticos, mecanismos de operação, etc (RAMBAUD, 2006).

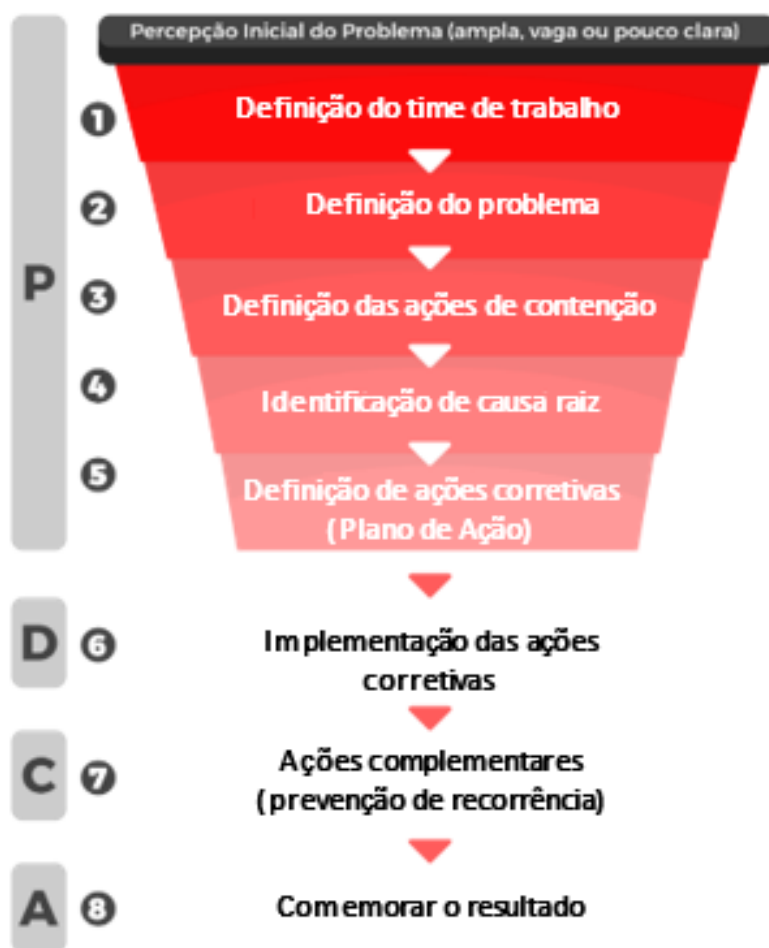
Conforme Marchini (2022), o compilado bem sequenciado dos passos da metodologia 8D foi desenvolvido primeiramente na Ford Motor Company e lançado no manual *Global 8D Participant's Guide*, que ocorreu em 1996. Segundo esse manual, a partir da constatação do problema, essa metodologia se divide em oito disciplinas, as quais são:

- **D1 – Definição do time de trabalho:** Inicialmente, é formada uma equipe de pessoas com habilidades variadas e com conhecimento, autoridade e competência para resolver o problema em questão, e o ideal é que o grupo escolha um líder que faça um levantamento rotineiro do status das ações propostas;
- **D2 – Definição do problema:** Neste passo, busca-se estratificar o problema de forma mais detalhada, levantando todas as opiniões de todos os envolvidos no processo sem qualquer tipo de censura, ato esse que é conhecido como *brainstorming* (tempestade de ideias). Também é importante mapear a frequência do problema e, para isso, comumente é utilizado o Diagrama de Pareto, que ordena a recorrência dos problemas, pois, por meio de sua análise, a equipe pode focar seus esforços nos campos que mais geram resultados (CARPINETTI, 2010);
- **D3 – Definição das ações de contenção:** Nesta etapa, são definidas as ações que irão solucionar, a curto o prazo, os problemas levantados, para, assim, proteger o cliente enquanto as ações que realmente efetivas são implantadas. Para um bom mapeamento de ações, é utilizado a ferramenta 5W2H, que levanta os aspectos de como o que será feito o que se pretende, onde, quando, por quem será feito, o porquê e qual será o custo (CARVALHO, PALADINI, 2012);
- **D4 – Identificação de causa raiz:** Nesse passo, são levantadas todas as possíveis causas que originaram os problemas. Sendo assim, é comum que as primeiras ações sejam investigativas, para que o time não corra o risco de gastar energia com ações ineficazes. Para isso, é utilizada novamente a metodologia de *brainstorming*, além do Diagrama de Ishikawa, que visa analisar os possíveis problemas sob 6 aspectos, sendo estes a mão de obra, o material, o método, a máquina, a medida e o meio ambiente (CARVALHO, PALADINI, 2012). Uma forma de evitar os problemas apenas superficialmente é a prática dos 5 porquês, que consiste em perguntas elaboradas a respeito das causas propostas, até que se culmine no fator número 1 que causa as não-conformidades;

- **D5 – Definição de ações corretivas:** Após todas as possibilidades de causa raiz identificadas, é o momento de avaliar quais ações realmente retornarão os efeitos desejados, de observar a possibilidade de efeitos colaterais indesejados, além de analisar se há, naquele momento, a real possibilidade de implementação da ação, levando em conta os recursos necessários e os recursos disponibilizados pela empresa. Para isso, é comumente utilizado a matriz de Impacto *versus* Esforço para as ações que serão efetivamente realizadas;
- **D6 – Implementação das ações corretivas:** Neste momento, são executadas as ações acordadas pela equipe, com prazo e retorno bem definidos. Normalmente, o plano de ação é monitorado pelo líder do projeto, que também fica à disposição para auxiliar com o que for preciso;
- **D7 – Ações complementares (prevenção de recorrência):** Este passo irá garantir que esses problemas ou outros de causa similar ocorram com menor frequência. Sendo assim, é feito um plano de ação focado em alterações de especificação, formação de pessoas e revisão de procedimentos padrões de processo. Também é necessário verificar se as ações do passo anterior possuem condições de serem mantidas com o passar do tempo e permanecem eficazes (CARPINETTI, 2010);
- **D8 – Comemorar resultados (registrar todos os procedimentos):** Por fim, os esforços devem ser celebrados junto à equipe, para reconhecimento e prestígio. Além disso, é importante registrar todos os passos do projeto e divulgar o conhecimento de metodologia com os demais membros da corporação.

A seguir, a Figura 17 apresenta um esquema sequencial que ilustra as disciplinas da metodologia 8D.

Figura 17 — Disciplinas da metodologia 8D



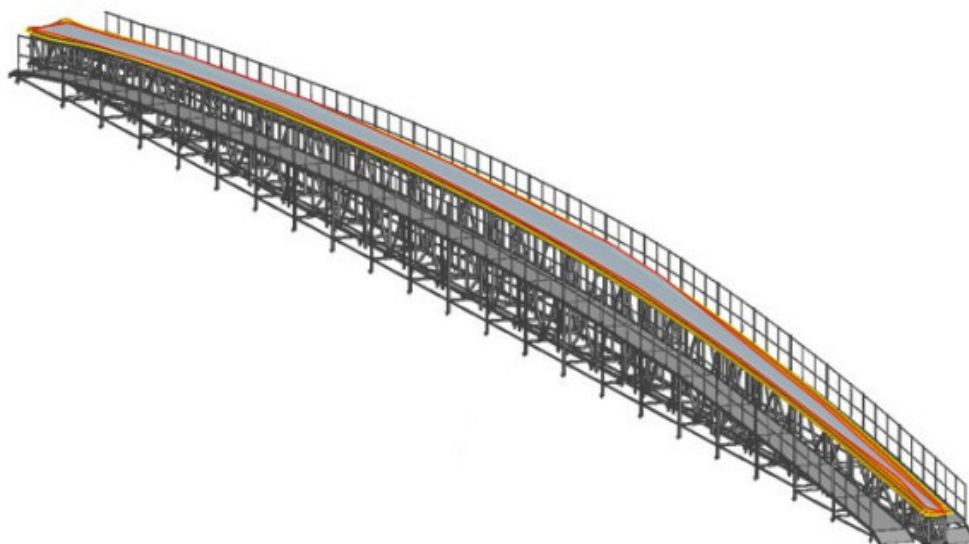
Fonte: Nortegubisian (2016).

4 METODOLOGIA

4.1 Processo de fabricação de uma *spar cap*

Os pré-fabricados de *spar cap* do estudo de caso do presente trabalho são fabricados aos pares, sendo um *spar cap* para a casca pressão (PS), conforme mostrado na Figura 18, e outro para a casca sucção (SS). Estas *spar caps* se diferenciam basicamente pela concavidade, a qual é para baixo nos destinados a PS e para cima nos destinados a SS. Contudo, em termos de parâmetros de fabricação, possuem distribuição e número de camadas (57) idênticos, assim como plano de infusão e processo de infusão propriamente dito.

Figura 18 — Representação gráfica do molde de *spar cap* pressão



Fonte: Elaborada pelo autor.

No ambiente fabril, geralmente seccionam-se as peças em Z's, sendo o Z0 o início e o Z2000 o fim da peça; o número é dado em milímetros e a medição é feita no sentido da raiz para a ponta. Outras especificações das *spar caps* são o comprimento, o qual deve ser de 72 m, e a largura, que começa a diminuir a partir Z45000, quando é 830 mm, até o Z72000, sendo a largura final 220 mm.

A confecção desta peça segue os passos comuns da produção de um laminado. Há a preparação, com aplicação de desmoldante a cada duas peças fabricadas, seguindo com posicionamento de nylon, transfer e plástico perfurado. Após isso, inicia-se o *lay up*: as 10 primeiras camadas devem ser escalonadas com defasagem de 200 mm; em seguida, até a

trigésima camada, essa defasagem é de 100 mm, e, depois, cai para 50 mm. Finalizado o *lay up*, são colocados novamente o plástico perfurado, transfer, nylon, canaleta, fita borracha, plástico de vácuo e mangueiras de entrada de resina nos Z14000, Z28000, Z42000 e Z56000.

Posteriormente, é dado início ao teste de vácuo, que consiste em ligar a bomba de 300Ra por 30 minutos e, então, desligá-la durante 10 minutos, com todas as válvulas fechadas. A pressão não deve variar mais que 20 mbar para que a peça seja aprovada nesse teste. Com o teste validado, começa-se o processo de infusão, com a abertura das válvulas de entrada de resina, iniciando pelo menor até o maior.

Quando a peça está totalmente molhada e com, no mínimo, 965 kg de resina, é iniciada a cura do laminado, que é acionada por um software conectado aos resistores elétricos que se encontram abaixo do molde. Durante a cura, a peça deve ser mantida em 70 °C por 2 horas e em 80 °C por mais 2 horas. É válido ressaltar que o molde deve permanecer aquecido na temperatura de 45 °C desde o início do *lay up* até o fim da infusão.

Ao fim da infusão, deve-se retirar todos os consumíveis da peça, com exceção do nylon. Então, a peça é içada com auxílio de uma ponte rolante, que a leva do molde até a cabine de rebarbação.

As demais especificações de produção relevantes para o estudo de caso serão mencionadas em momentos oportunos no decorrer do trabalho.

4.2 Constatação do problema

Durante a fabricação de algumas *spar caps*, uma anomalia foi detectada: após a movimentação dos moldes para um galpão anexo ao original, o time de qualidade constatou manchas brancas por toda a extensão das peças. Assim, essas peças foram reprovadas nas inspeções visuais e por ultrassom.

Esse defeito foi detectado inicialmente na peça SS 60, e, devido à falta de tempo hábil para aguardar os resultados de outras análises, ou até mesmo as disposições do cliente quanto às remotas possibilidades de reparo, optou-se por fabricar peças novas. Enquanto isso, tornou-se necessário fazer uma análise de causa raiz e de resolução de defeito mais aprofundada. Para isso, escolheu-se a metodologia 8D, a qual é a adotada como padrão pela companhia e muito bem aceita pelos clientes.

4.3 Implementação da metodologia 8D

4.3.1 Definição do time de trabalho

Para estudar a resolução do problema contextualizado no tópico anterior, foi formada uma equipe composta pelos seguintes colaboradores:

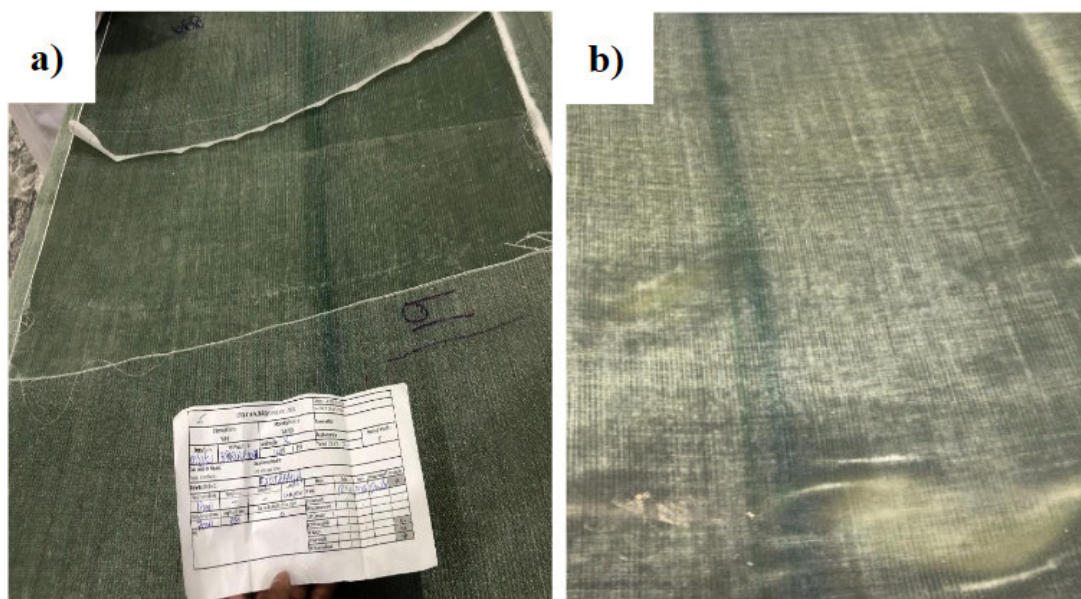
- Analista de Qualidade;
- Analista de Engenharia de Processo;
- Analista de Engenharia de Produção;
- Líder de Produção;
- Líder de Equipe de Químicos;
- Líder de Almoxarifado;
- Líder de Manutenção e Infraestrutura;
- Especialista de Engenharia de Materiais;
- Líder de Logística;
- Operadores de Produção.

A posição de líder do projeto foi ocupada pelo líder de produção, visto que este acompanhou o processo desde a fabricação da primeira peça da companhia. Ademais, foram convocados membros de setores de apoio, tais como Logística e Manutenção, os quais, a priori, não possuíam relação direta com o problema em questão, mas que poderiam contribuir fornecendo uma visão mais ampla e menos tendenciosa da rotina de processo diário.

4.3.2 Definição do problema

Realizou-se uma reunião para discutir o problema, com o objetivo de que todos os membros da equipe iniciassem as atividades cientes das mesmas informações, inclusive aqueles que não eram tão familiarizados com o processo de fabricação. Nesse momento, foram mostradas as evidências das inspeções visuais realizadas pelo time de qualidade, presentes na Figura 19. Além disso, foi realizado um *brainstorming*, visto que, até aquele momento, a companhia não havia registrado nenhum defeito semelhante e com propagação tão severa; já haviam sido detectados apenas defeitos pontuais, causados por vazamento no plástico de vácuo no momento da infusão.

Figura 19 — Evidências das inspeções visuais realizadas nas *spars caps*: a) defeito ameno e b) defeito grave



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 2, constam as numerações das peças defeituosas identificadas até o início do projeto.

Tabela 2 — Peças defeituosas

SPAR CAP			
SS	INSPEÇÃO	PS	INSPEÇÃO
60	✘	61	✘
61	✘	62	✔
62	✘	63	✔
63	✔	64	✘
64	✘	65	✘
65	✘	66	✔
66	✔	67	✔
67	✔	68	✘
68	✘	69	✘
69	✘		

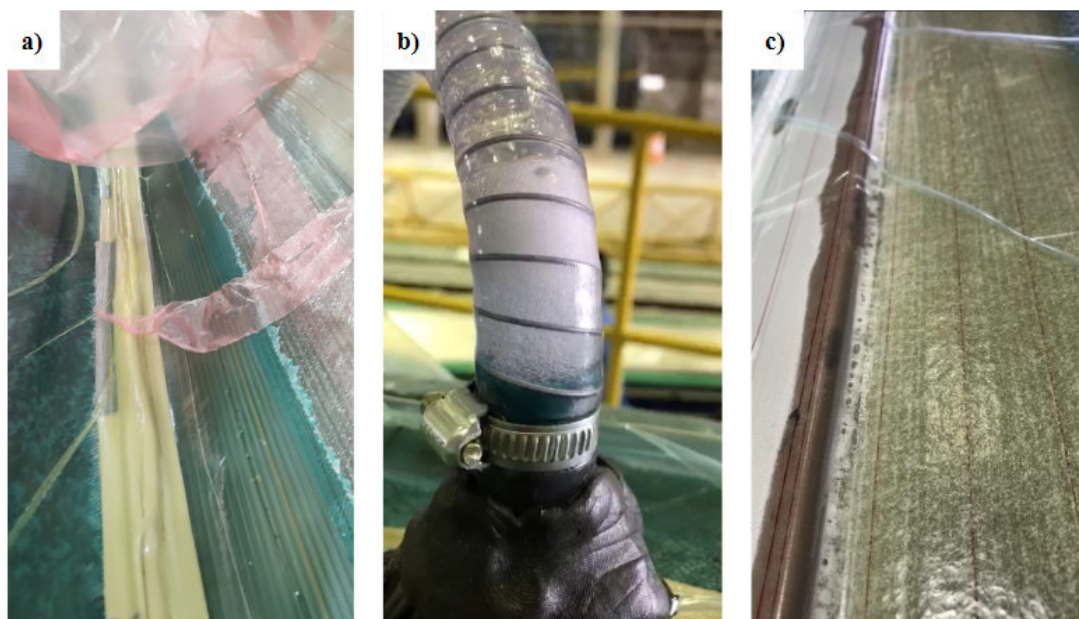
Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante a discussão da equipe, foram levadas em consideração todas as mudanças de ambiente que as peças sofreram, como a troca de galpão onde ocorria o armazenamento de materiais do almoxarifado — materiais esses que também precisam estar com os parâmetros validados, pois são mais críticos, como plástico de vácuo, tecido de fibra de vidro, resina base e catalisador. Além disso, foi levado em conta a chegada de novos operadores a partir da produção da peça SS 60 e PS 61; esses novos colaboradores em período de adaptação não possuíam tempo suficiente para desenvolver os aprendizados antes de realizarem suas devidas funções.

O time de produção relatou dificuldades no controle dos principais parâmetros da infusão, como a temperatura e a umidade, pois o novo galpão não possui a refrigeração adequada devido a uma ampliação do setor fabril.

Ademais, outra evidência importante para a investigação do problema foi a obstrução das canaletas de infusão, como é mostrado na Figura 20a. Isso levou a equipe a concluir que a resina estava atingindo picos de exotermia — que, por especificação do projeto, não poderiam ultrapassar 32 °C. Bolhas foram visivelmente detectadas enclausuradas nas mangueiras e aspirais localizadas nos bordos da peça, conforme apresentam as Figuras 20b e 20c.

Figura 20 — a) Canaletas de infusão obstruídas, b) bolhas nas entradas de resina e c) aspirais com bolhas



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.3 Definição das ações de contenção

Ainda que não se soubessem quais as causas raízes do problema, precisou-se tomar ações imediatas para preservar o cliente e a situação atual de produção. Para isso, a equipe levantou uma série de ações que, apesar de não resolverem o problema completamente, serem onerosas ou até mesmo resolverem problemas que não estavam diretamente relacionadas com o defeito em questão, eram capazes de garantir o controle do processo de forma mais aproximada, o que foi fundamental para a posterior identificação da causa raiz.

4.3.4 Identificação das causas raízes

Para investigar as causas raízes, a equipe utilizou o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como espinha de peixe ou 6M, para levantar as hipóteses de causa raiz.

4.3.4.1 Validação das hipóteses

4.3.4.1.1 Medição

Foi realizada a coleta de dados de temperatura do ambiente e dos materiais.

4.3.4.1.2 Método

O almoxarifado foi analisado para averiguar se as condições às quais os materiais estavam submetidos eram ideais ou não. Também avaliou-se o material recebido do fornecedor, em busca de detectar alguma anomalia.

4.3.4.1.3 Mão de obra

A equipe estudou a distribuição de funcionários ao longo dos turnos de operação da companhia e a distribuição das atividades, objetivando perceber se havia colaboradores com o conhecimento adequado presentes durante todo o processo de fabricação das spar caps, bem como identificar funcionários sobrecarregados.

4.3.4.1.4 Máquinas

Em busca de verificar a eficiência do componente desgaseificador da máquina graco, que mistura os componentes A (base) e B (endurecedor), foi proposto um teste de bolha, onde foram colocadas sob prova 3 amostras de 1 kg da mistura para as máquinas Graco e Hendrich.

Esse procedimento consiste em colocar cada amostra em um recipiente e, então, esse recipiente é colocado em um sistema de vácuo durante 2 minutos, até que a resina atinja seu pico exotérmico por meio da reação espontânea. Uma vez que subam mais de 5 bolhas exclusivamente do meio do fluido, o teste é reprovado; bolhas que subam na lateral do recipiente não são consideradas em nenhuma análise.

4.3.4.1.5 Meio ambiente

Ao estudar os fatores ambientais que podem influenciar na qualidade das peças fabricadas, a equipe reuniu algumas conclusões. Primeiro, averiguou-se que um dos fatores que podem causar o aparecimento de vazamentos é o mau condicionamento do plástico de vácuo, seja pela umidade acima de 70% ou por danos físicos causados à sua superfície. Há também a possibilidade de acontecerem problemas no armazenamento dos IBC's de resina, os quais podem estar propícios à contaminação das mais diversas formas.

Ao verificar os fatores mencionados acima, o líder de almoxarifado constatou que os materiais estavam com a umidade dentro do especificado. Além disso, os IBC's se encontravam totalmente vedados pelo fornecedor.

Quanto à temperatura e à umidade do galpão, foi realizada uma análise durante 6 dias, a partir dos dados fornecidos pelas máquinas de abastecimento de resina, que possuem termo-higrômetros internos. Conforme a especificação passada pelo cliente, a temperatura ambiente deveria ser de, no mínimo, 21 °C e, no máximo, 35 °C. E se requeria uma umidade de, no mínimo, 20% e, no máximo, de 80%. É válido ressaltar que o galpão possui teto de aço e que, como já mencionado, os portões se encontravam abertos devido às obras de infraestrutura que ocorriam no momento da análise.

4.3.4.1.6 Materiais

Por fim, ocorreu a análise da umidade dos materiais vindos do fornecedor para o almoxarifado. Isso porque, mesmo que houvesse um controle no galpão, se a umidade do material nas próprias bambonas fosse alta, sempre existiria um potencial risco no momento da infusão; a medida de contenção de instalação de sílica proposta pelo time de químicos não seria suficiente para garantir a boa qualidade do material, uma vez que a sílica apenas funciona como material de sacrifício, resgatando a umidade do ar para si, e não a retirando do interior do material.

O time de engenharia de materiais realizou um teste de umidade em amostras de 5 kg retiradas de 5 bambonas diferentes, localizadas no interior do almoxarifado. Considerando o peso inicial (P_i) e o peso final medido após um dado aquecimento (P_f), fez-se o cálculo da umidade percentual da resina para as cinco amostras de acordo com a Equação 1. O aquecimento em questão foi de 110 °C (± 5 °C) e controlado por um termostato até que o peso final permanecesse constante (o que foi aferido por meio de uma balança de precisão).

$$\frac{P_f - P_i}{P_i} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

4.3.5 Definição de ações corretivas

Para a construção de resultados eficazes, foram pautadas todas as possíveis causas validadas no tópico anterior. Dessa forma, elaborou-se um plano de ação.

4.3.6 Implementação das ações corretivas

Neste trabalho, não estão em enfoque as ações mais simples e autoexplicativas, tais como serviços de manutenção, alteração de checklist ou infraestrutura. Ao invés disso, será analisada uma importantíssima ação que foi levantada já no fim do projeto, que é a alteração no plano de infusão da peça. Essa ação foi inicialmente proposta para dar robustez ao processo, mas se provou bastante eficaz na solução definitiva da anomalia, dado o resultado satisfatório. Porém, sozinha, não foi suficiente para erradicar esse defeito em todas as peças.

4.3.7 Ações complementares

Para finalizar, foi instituído um cronograma de auditorias para checks padrões dos processos realizados quinzenalmente, para garantir que todas as ações do projeto aconteçam de forma perene, além de verificar se os documentos presentes na linha de processos estão atualizados e carimbados como cópia controlada.

Ainda foram adicionadas como ações complementares as análises dos resultados dos ensaios de *pull off* para solicitações de aprovação de peças defeituosas, de preferência sem a necessidade de garantia estendida. Para isso, foi realizado o teste em 6 laminados perfeitos, com zero defeito, para obtenção de uma média padrão, que serviria para comparar com as medidas de peças defeituosas.

Todos os testes foram realizados conforme a norma ASTM D4541 – 17, já mencionada no presente trabalho, utilizando a taxa de carga de 0,3 MPa/s. É válido ressaltar que ainda, em caso de dúvidas ou divergências entre a análise in loco do time técnico da empresa e as análises do cliente, foi solicitado uma análise microscópica. Para esta análise, o critério de aceitação não é definido de forma global e, assim, a decisão fica à mercê do aval do próprio cliente, o qual pode ou não aprovar os resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ações de contenção

O plano de ações de contenção elaborado pela equipe do projeto é apresentado na Tabela 3. Essas ações foram implementadas na peça de corte SS e PS de número 70.

Tabela 3 — Plano de ação de contenção proposto pela equipe

PLANO DE AÇÃO DE CONTENÇÃO						
ID	SETOR	AÇÃO	RESPONSÁVEL	INÍCIO PLAN	FINAL PLAN	FINAL REAL
1	ENGENHARIA E AUMOXARIFADO	AVERIGUAR SITUAÇÃO DOS TECIDOS UTILIZADOS NO PROCESSO E GARANTIR SEU CORRETO ARMAZENAMENTO	ESPECIALISTA DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E LÍDER DE ALMOXARIFADO	02/12/2021	05/12/2021	05/12/2021
2	QUIMICOS	UTILIZAR SILICA NO GALPÃO DE ARMAZENAMENTO E NA TAMPA DAS BAMBONAS DE RESINA	LÍDER DE QUIMICOS	02/12/2021	05/12/2021	08/12/2021
3	QUIMICOS	UTILIZAR MANGUEIRAS PARA ABASTECER OS TACHOS NA MÁQUINA GRACO	LÍDER DE QUIMICOS	09/12/2021	18/12/2021	18/12/2021
4	PRODUÇÃO	MEDIR E REGISTRAR A TEMPERATURA DE RESINA NO TACHO ANTES DE ENTRAR NA PEÇA	LÍDER DE PRODUÇÃO	09/12/2021	18/12/2021	18/12/2021
5	PRODUÇÃO	MEDIR E REGISTRAR A UMIDADE RELATIVA DO AR NO GALPÃO UTILIZANDO HIGRÔMETRO	LÍDER DE PRODUÇÃO	09/12/2021	18/12/2021	18/12/2021
6	PRODUÇÃO	UTILIZAR PURGA NO Z70.000 E EXPURGAR NO MÍNIMO 40 KG.	LÍDER DE PRODUÇÃO	09/12/2021	18/12/2021	18/12/2021
7	ENGENHARIA DE PROCESSO E PRODUÇÃO	DEFINIR E EXECUTAR PROCEDIMENTO DE APLICAÇÃO DE BOLSA DE VÁCUO NAS ENTRADAS DE RESINA E VÁCUO	ANALISTA DE ENGENHARIA DE PROCESSO E LÍDER DE PRODUÇÃO	09/12/2021	18/12/2021	18/12/2021
8	PRODUÇÃO	UTILIZAR UM 2º PLÁSTICO NO VÁCUO PARA GARANTIR A ESTANQUEIDADE	LÍDER DE PRODUÇÃO	09/12/2021	18/12/2021	18/12/2021

Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir, é detalhada cada uma das oito ações propostas pelo plano:







- A primeira ação consistiu em averiguar a situação dos tecidos utilizados no processo. Escolheu-se essa ação como ponto inicial porque tecidos contaminados causaram tecidos não molhados em outras peças do mesmo projeto (é comum que a umidade do ar ou poeira se alojem nos fios do tecido). Portanto, foi colocado um filme plástico sobre os pallets de tecidos, os quais foram mantidos longe das calhas de desvio pluvial;
- No galpão de armazenamento de resinas, implementou-se o uso de sílica para controlar a umidade. Pacotes de sílica foram distribuídos sobre as tampas das bambonas e, também, conferiu-se a vedação destas bambonas;
- Detectou-se que, visando economizar a resina gasta nas mangueiras de infusão, o time de químicos estava abastecendo os tachos diretamente na máquina graco, assim havendo uma queda de 90 cm do bico de máquina até o fundo do reservatório. Isso causava uma turbulência no material e propiciava a formação de muitas bolhas, além de uma espuma com aspecto branco. Dessa forma, uma das ações foi extinguir essa prática. Passou-se a encher os tachos a partir de mangueiras, as quais eram acopladas no bico da máquina até o tacho ao lado da peça e, então, levadas até a entrada de resina na peça;
- As ações quatro e cinco também foram desdobradas para garantir algumas variáveis processuais, pois a temperatura e a umidade externa são fatores determinantes na infusão, principalmente em um galpão sem refrigeração condicionada. Logo, a produção passou a registrar os dados de temperatura de umidade ao longo dos dias, para coletar dados, como, por exemplo, qual seria o momento ideal para infusão, ou até mesmo optar pela paralisação da produção em caso de persistência dos problemas;
- A purga consiste na instalação de uma mangueira na região onde a resina chega por último no processo de infusão. O objetivo principal é deixar entrar pelo menos 40 kg de resina, para que as bolhas sejam expurgadas ao invés de irem para a peça. Esta ação é bastante onerosa, dado o valor de mercado do quilograma de resina epóxi. Contudo, levando em consideração o valor geral da peça e sua

criticidade para o projeto, realizar a purga foi considerada uma ação válida para evitar defeitos;

- A ação número sete foi utilizar uma bolsa de vácuo na região de entrada de resina. Esse é um viés interessante para ações de contenção, visto que as maiores incidências de vazamentos ocorrem no orifício onde são colocadas as mangueiras de vácuo e a fita borracha. Portanto, em caso de qualquer esbarro ou dilatação da fita, o que causaria a entrada de ar, a bolsa de vácuo era responsável por controlar a situação, evitando, assim, danos à peça;
- A última ação foi análoga à anterior, contudo, visou propor um mecanismo de segurança redundante não só nas entradas, que são críticas, mas na peça como um todo. Tratou-se da utilização de um segundo plástico no vácuo para garantir a estanqueidade. Levando em consideração o valor monetário que isso adiciona ao processo e ao tempo necessário para sua realização, essa ação foi bem radical.

Após a implementação das ações de contenção, os resultados após a inspeção das novas peças fabricadas foram satisfatórios, como comprovam os dados presentes na Tabela 4. Porém, como esperado, os problemas não foram solucionados por completo, pois ainda foram encontrados defeitos. Ainda assim, houve um grande avanço: a partir dali, a equipe tinha dados e conhecimento suficiente para tomar decisões posteriores a respeito de mudanças definitivas no processo e de ações realmente eficazes.

Tabela 4 — Dados das spar caps fabricadas após implementação do plano de ações de contenção

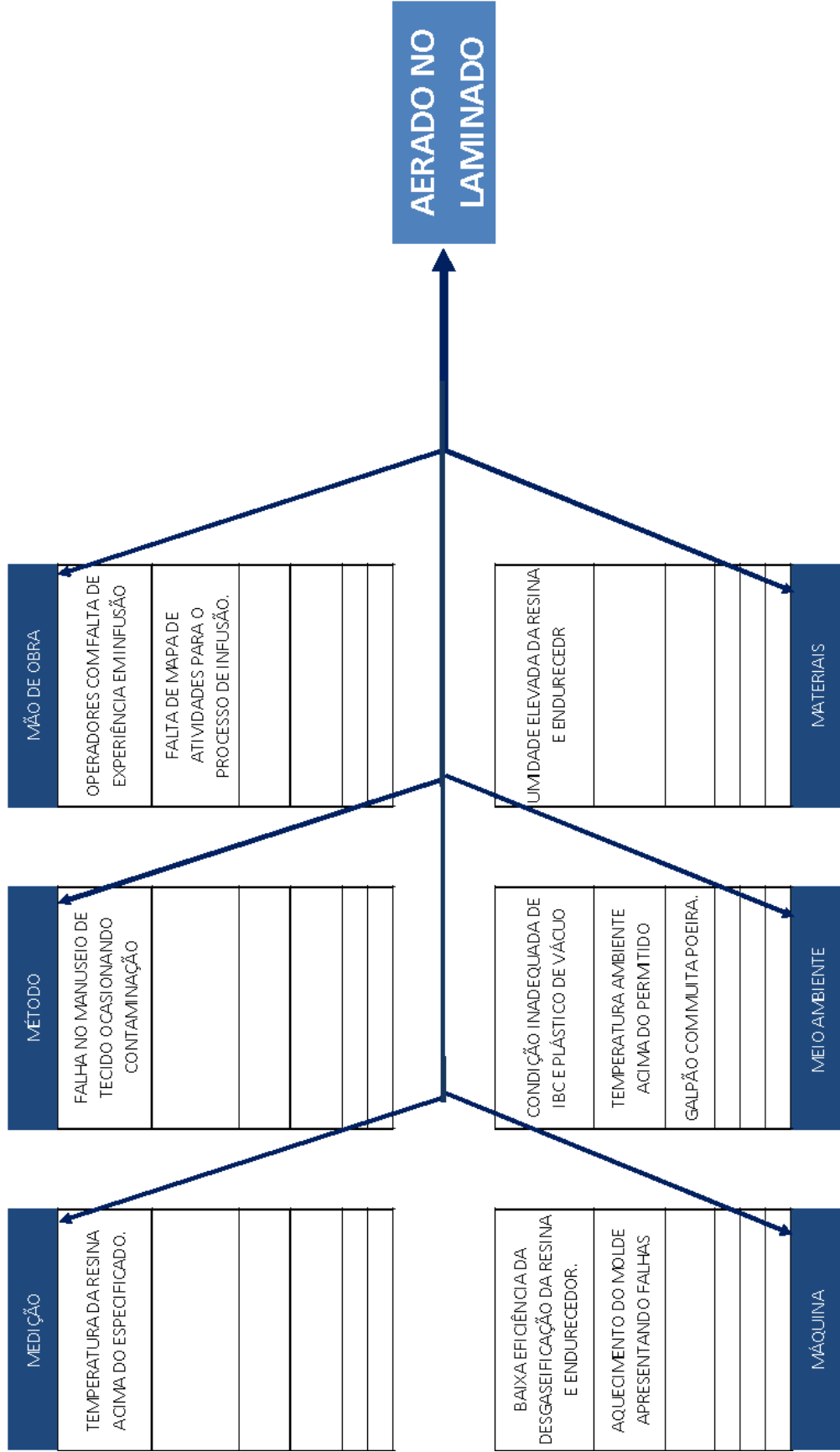
SPAR CAP			
SS	INSPEÇÃO	PS	INSPEÇÃO
70		70	
71		71	
72		72	
73		73	
74		74	
75		75	
76		76	

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Causas raízes do problema

O diagrama elaborado é mostrado na Figura 21. Depois, foi levantado um plano de ação para validação de ações, o qual é apresentado na Tabela 5.

Figura 21 — Diagrama de Ishikawa



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 — Plano ação para validação de ações

Hipótese	Ação	Responsável	Data	Status	Possível causa?
MEDIÇÃO	VERIFICAR OS CHECKLISTS A PARTIR DAS PEÇAS DE CORTE DO GALPÃO ANEXO (SS 60 E PS 61)	ANALISTA DE QUALIDADE	22/dez	CONCLUÍDO	SIM
MÉTODOS	VERIFICAR POSSIBILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DE TECIDO POR ÁGUA POR GOTEIRA OU DESVIO PLUVIAL DESAJUSTADO.	LÍDER DE ALMOXARIFADO	23/dez	CONCLUÍDO	SIM
FALHA NO MANUSEIO DE TECIDO OCASIONANDO CONTAMINAÇÃO	VERIFICAR O LOTE DO MATERIAL ABASTECIDO DOS ÚLTIMOS 2 MESES PARA AFERIR ALGUMA ANORMALIDADE	ESPECIALISTA DE ENGENHARIA DE MATERIAIS	22/dez	CONCLUÍDO	NÃO
FALHA NO MANUSEIO DE TECIDO OCASIONANDO CONTAMINAÇÃO	VERIFICAR MATRIZ DE CERTIFICAÇÃO E AUDITAR OPERADORES QUE ESTÃO FAZENDO O PROCESSO	ANALISTA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO	22/dez	CONCLUÍDO	SIM
MÃO DE OBRA	VERIFICAR ALGUMA FALHA OU AUSÊNCIA DE INFORMAÇÃO NO PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO	ANALISTA DE ENGENHARIA DE PROCESSO	22/dez	CONCLUÍDO	SIM
MÁQUINAS	IMPLEMENTAR TESTE DE BOLHA PARA AFERIR ALGUMA ANOMALIA NA MÁQUINA GRACO E HEDRICH N O PROCESSO DE DEGASEIFICAÇÃO	LÍDER DE QUÍMICOS	21/dez	CONCLUÍDO	SIM
AQUECIMENTO DO MOLDE APRESENTANDO FALHAS	VERIFICAR O DATALOG DAS MÁQUINAS DE AQUECIMENTO DE MOLDE PARA IDENTIFICAR FALHAS NA CURVA DE TEMPERATURA	LÍDER DE MANUTENÇÃO	23/dez	CONCLUÍDO	SIM
AMBIENTE	VERIFICAR CONDIÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE PLÁSTICO DE VÁCUO E IBC.	LÍDER DE ALMOXARIFADO	22/dez	CONCLUÍDO	NÃO
TEMPERATURA AMBIENTE ACIMA DO PERMITIDO	ANALISAR TEMPERATURA DO GALPÃO DURANTE AS PEÇAS FABRICADAS DURANTE AS AÇÕES DE CONTENÇÃO	ANALISTA DE ENGENHARIA DE PROCESSO	22/dez	CONCLUÍDO	SIM
GALPÃO COM MUITA POEIRA.	AVALIAR SE O POSTO DE REBARBAÇÃO ESTÁ MUITO PRÓXIMO AO MOLDE E QUAIS OS POSSÍVEIS DANOS AO PROCESSO	ANALISTA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO	22/dez	CONCLUÍDO	SIM
MATERIAIS	VERIFICAR A UNIDADE DOS MATERIAIS QUE CHEGAM DO FORNECEDOR SE ESTÃO CONFORME AS ESPECIFICAÇÕES NECESSÁRIAS.	ESPECIALISTA DE ENGENHARIA DE MATERIAIS	22/dez	CONCLUÍDO	NÃO

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.1 Medidas de temperatura

A Tabela 6 contém os dados das medições de temperatura realizadas por meio de sua análise, foi constatado que, nas *spar caps* para SS, ultrapassou-se o limite de temperatura em 77,7% das peças que apresentaram defeitos e em 25% nas de boa qualidade. Nas *spar caps* para PS, esse excesso de temperatura foi de 71% e 22%, respectivamente. Dessa forma, comprovou-se que controlar a temperatura é um fator fundamental para um bom processo.

Tabela 6 — Dados das *spar caps* fabricadas após implementação do plano de ações de contenção

SPAR CAP					
SS	INSPEÇÃO	EXORTEMIA?	PS	INSPEÇÃO	EXORTEMIA?
60	✗	SIM	61	✗	SIM
61	✗	SIM	62	✓	NÃO
62	✗	NÃO	63	✓	SIM
63	✓	NÃO	64	✗	SIM
64	✗	SIM	65	✗	SIM
65	✗	SIM	66	✓	NÃO
66	✓	NÃO	67	✓	NÃO
67	✓	NÃO	68	✗	SIM
68	✗	SIM	69	✗	NÃO
69	✗	NÃO	70	✗	NÃO
70	✗	SIM	71	✓	NÃO
71	✓	NÃO	72	✓	SIM
72	✗	SIM	73	✓	NÃO
73	✓	SIM	74	✗	SIM
74	✓	SIM	75	✓	NÃO
75	✓	NÃO	76	✓	NÃO
76	✓	NÃO			

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 22 mostra a medição da temperatura da resina, que foi realizada utilizando um pirômetro, onde é possível verificar que a temperatura aferida é alta.

Figura 22 — Evidência de temperatura alta



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.2 Condições do ambiente

Durante as análises, foi constatado que o almoxarifado tinha uma condição não-favorável, pois o plástico filme era constantemente rasgado para retirada de rolos, o que acabava expondo os demais à umidade do ar. Além disso, os operadores manuseavam o material sem o uso de luvas de proteção e abasteciam o meio produtivo muito próximo ao posto de rebarbação. Assim, o material ficava sujeito à poeira excessiva.

Não se encontrou nenhuma anomalia na parte de recebimento de material do fornecedor. O material chegava apropriadamente, revestido por plástico filme e dentro de uma caixa de madeira. Inclusive, os lotes vindos do fornecedor passaram por uma validação de qualidade e todos estavam dentro dos conformes da checagem padrão.

5.2.3 Mão de obra

Em relação à mão de obra, identificou-se que a matriz de certificação dos operadores de *spar cap* não estava balanceada. Apenas o primeiro turno de operadores tinha profissionais suficientes com expertise no processo de infusão. No segundo turno, havia apenas duas

peças com conhecimento mais aprofundado neste processo, e, no terceiro turno, esse número caiu para um.

Não foi possível avaliar os horários em que se realizou a infusão das peças defeituosas devido à falta de informação confiável. Contudo, segundo os líderes de produção, para um bom atendimento da programação do processo de fabricação e para garantir a quantidade mínima de operadores certificados no momento da entrega, é comum, no primeiro turno, as peças passarem pelo processo de preparação, *lay up* e montagem de plano de infusão; no segundo turno, pelo vácuo, infusão, e, por fim, é no terceiro turno, que ocorre a desmoldagem e rebarbação.

A equipe ainda percebeu que não havia um mapa com a distribuição das atividades específico para o processo de infusão, que explicasse a atividade e como deveria ser o andamento ideal desse processo. A equipe de engenharia considerou que, na infusão, são necessários, no mínimo, cinco operadores — um para cada tacho de entrada de resina e um averiguando, com auxílio de uma termocâmara, eventuais vazamentos na bolsa de vácuo.

5.2.4 Teste de bolha

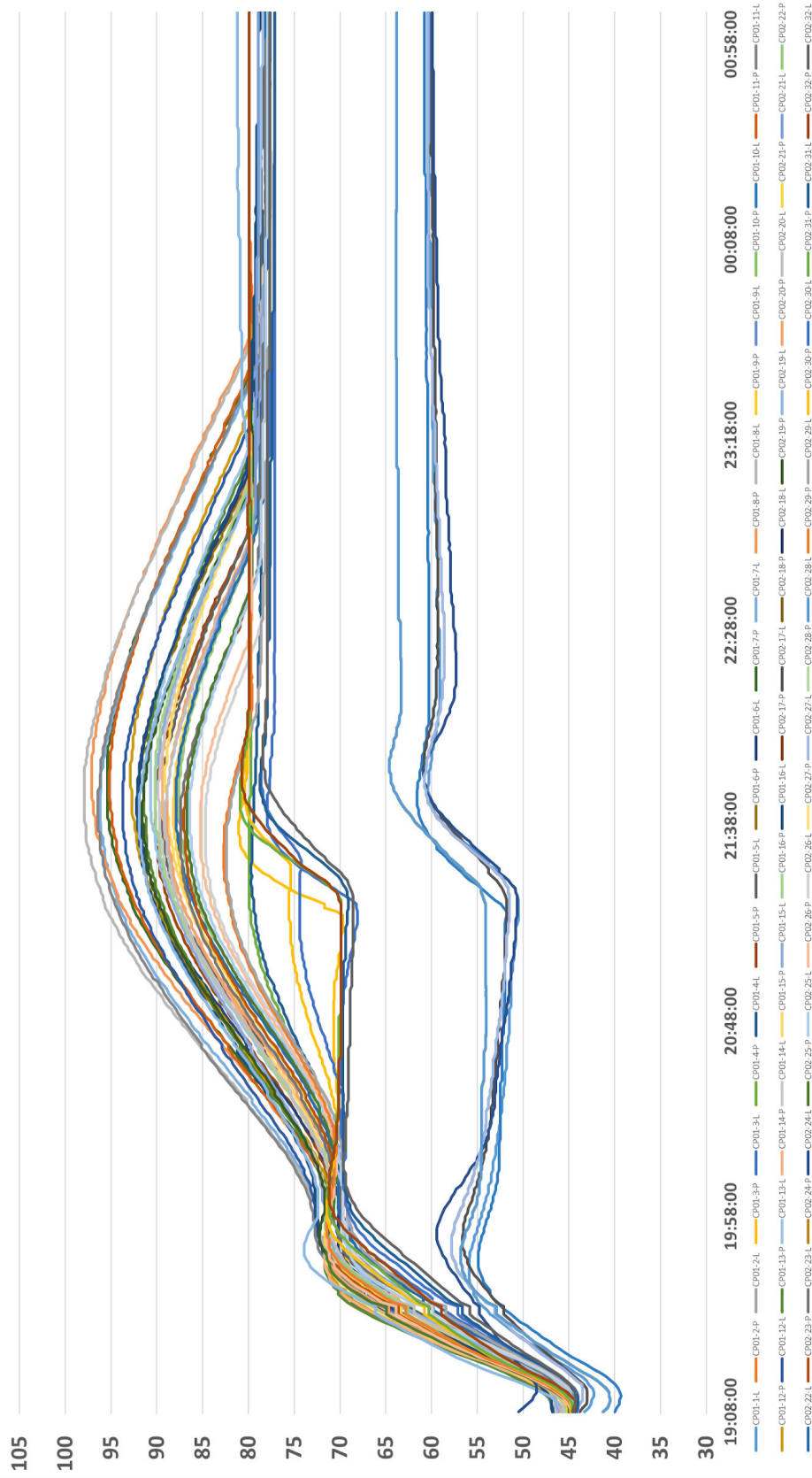
Acerca da análise do componente desgaseificador da máquina Graco, o teste de bolha, para a máquina Hendrich, foi aprovado segundo os critérios levantados pelo corpo técnico. Entretanto, foi verificado que o reservatório do componente B da Graco não estava desgaseificando com a eficiência necessária, e, assim, 2 amostras foram reprovadas pelo critério e 1 chegou muito próxima ao limite estabelecido.

Por sua vez, o líder de manutenção verificou os dados presentes no datalog do PLC dos moldes para analisar os gráficos de temperatura e, assim, analisar se a curva no momento da infusão e na cura estava se comportando como o esperado em todas as zonas do molde. Isso porque, se o aquecimento não seguir a receita proposta pelo time de engenharia de processo — a qual leva em conta todo o plano de infusão e as regiões com maior número de camadas —, a resina poderá gelatinar antes do momento ideal em algumas regiões, além de dilatar a fita borracha e causar vazamentos se o aquecimento na zona lateral ocorrer fora do padrão.

A seguir, o Gráfico 1 apresenta a curva padrão conforme a receita elaborada pelos profissionais do time de engenharia. Por sua vez, o Gráfico 2 mostra o gráfico plotado para as peças analisadas no presente trabalho, o qual evidencia as não-conformidades nas zonas laterais do molde; o que pode ser melhor observado com a análise complementar da Figura 23, que contém o desenho técnico esquemático das zonas.

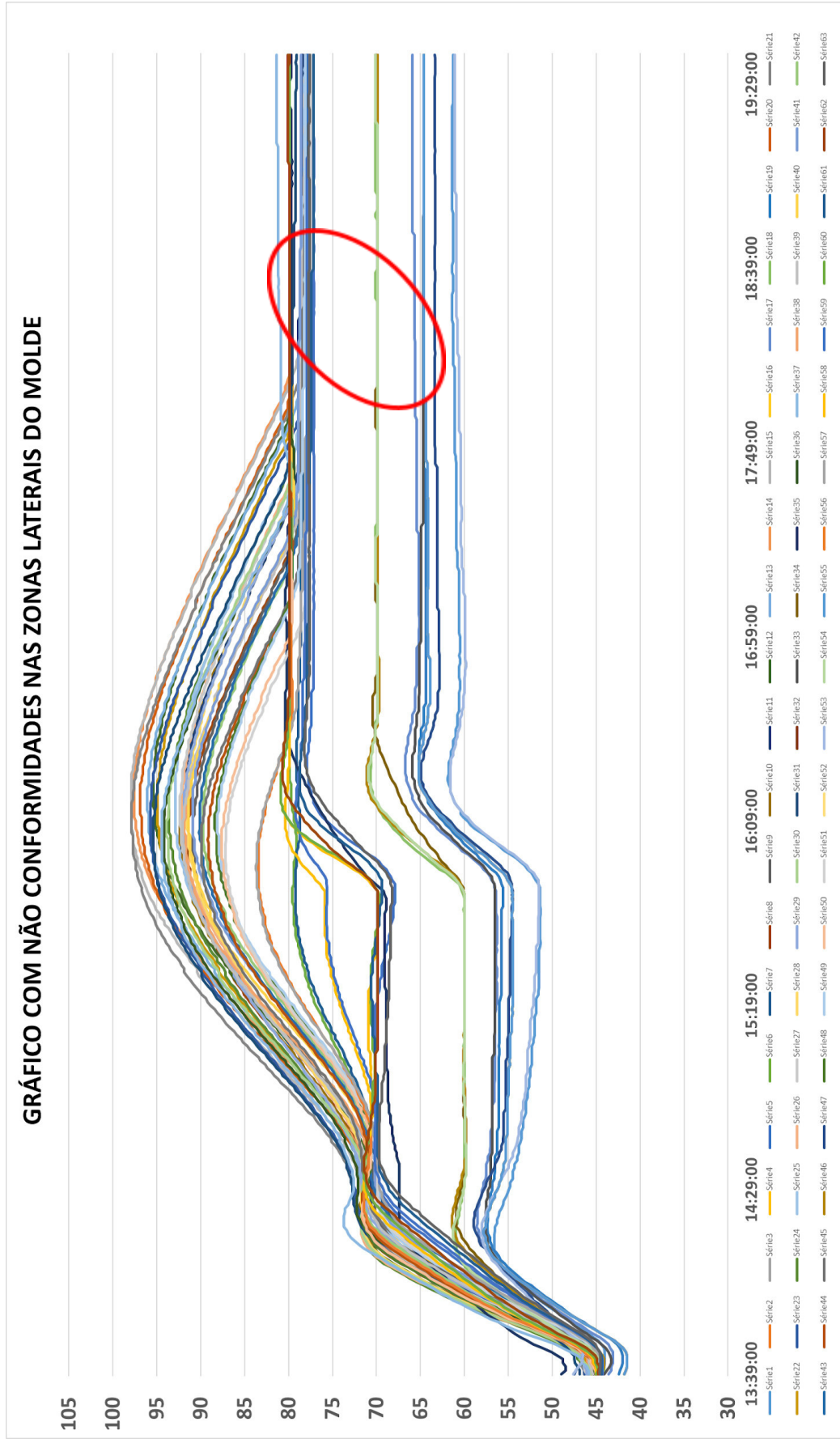
Gráfico 1 — Curva padrão de temperatura

GRÁFICO PADRÃO CONFORME RECEITA DA ENGENHARIA



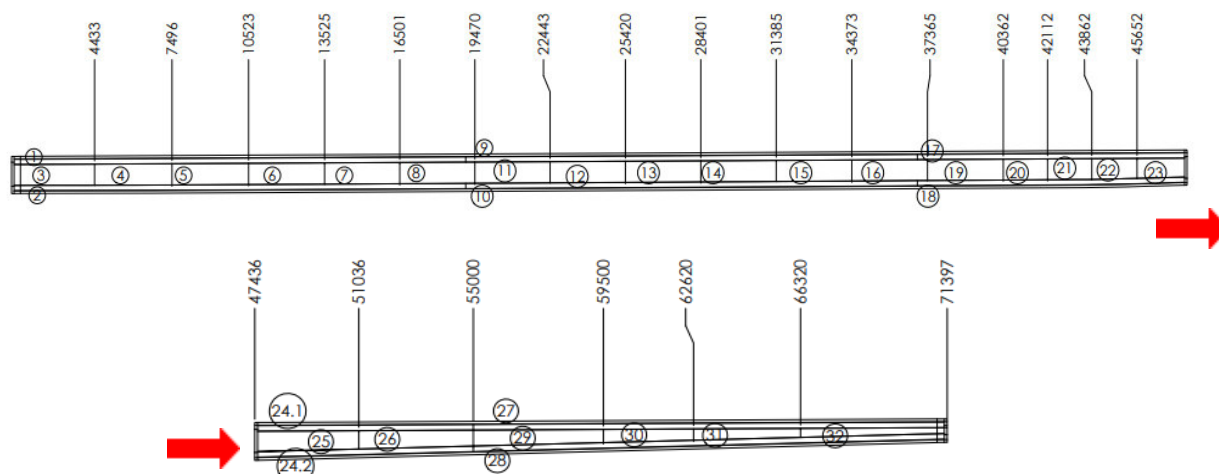
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 — Curva de temperatura das peças analisadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 — Desenho técnico das zonas



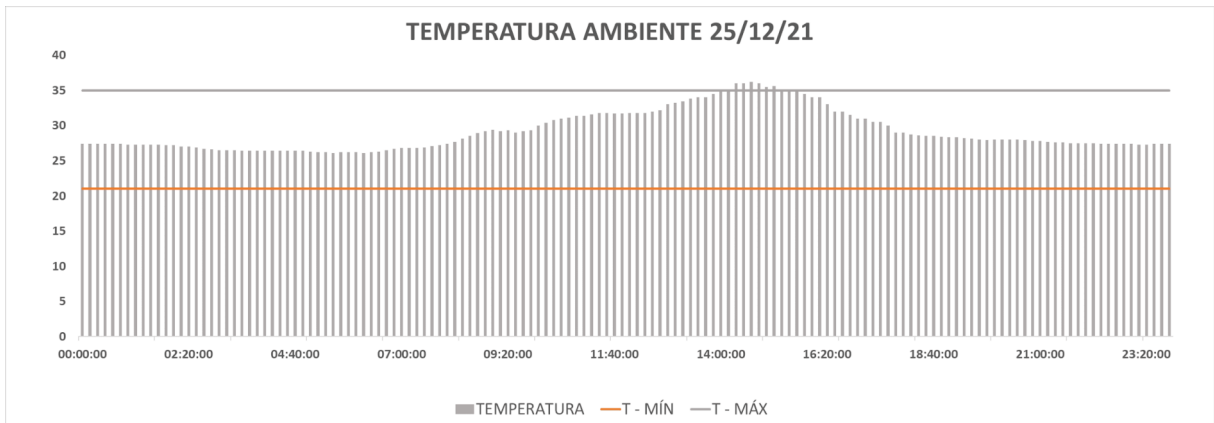
Fonte: Elaborada pelo autor.

Mediante os gráficos e desenhos de zonas expostos, é possível concluir que o molde realmente era aquecido em uma temperatura acima da especificada, principalmente nas zonas laterais (indicadas como 2, 9, 10, 17, 18, 24 na Figura 23), atingindo até 70 °C no pico exotérmico. Esse provavelmente era um dos fatores que favoreciam a entrada de ar por baixo do bambam devido à sua dilatação.

5.2.5 Temperatura e umidade do ambiente

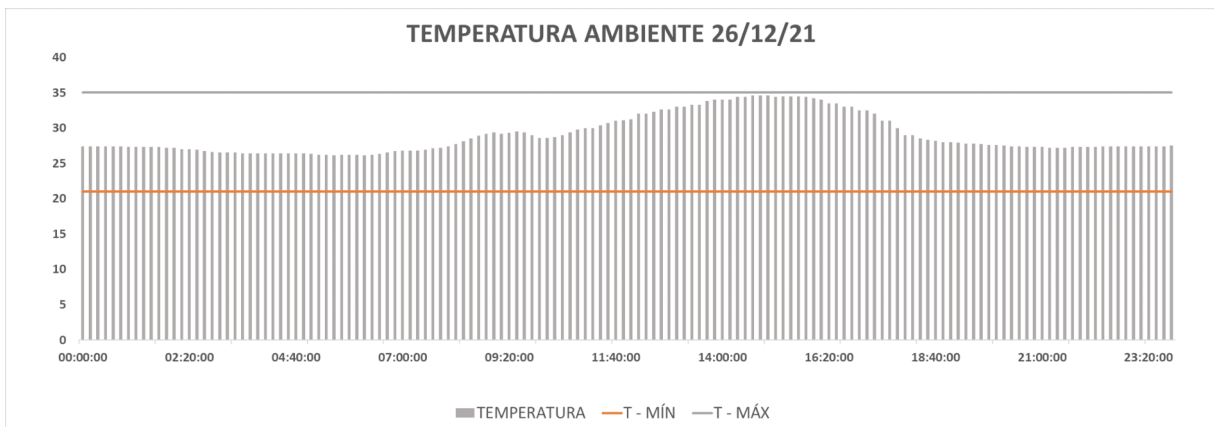
Em relação à temperatura e à umidade do ambiente, como foi mencionado anteriormente, realizou-se o acompanhamento dessas variáveis durante seis dias consecutivos. Nos Gráficos 3, 4, 5, 6, 7 e 8, são mostradas as medidas de temperatura no ambiente do primeiro ao sexto dia do período de análise, respectivamente.

Gráfico 3 — Temperatura do ambiente no primeiro dia de análise



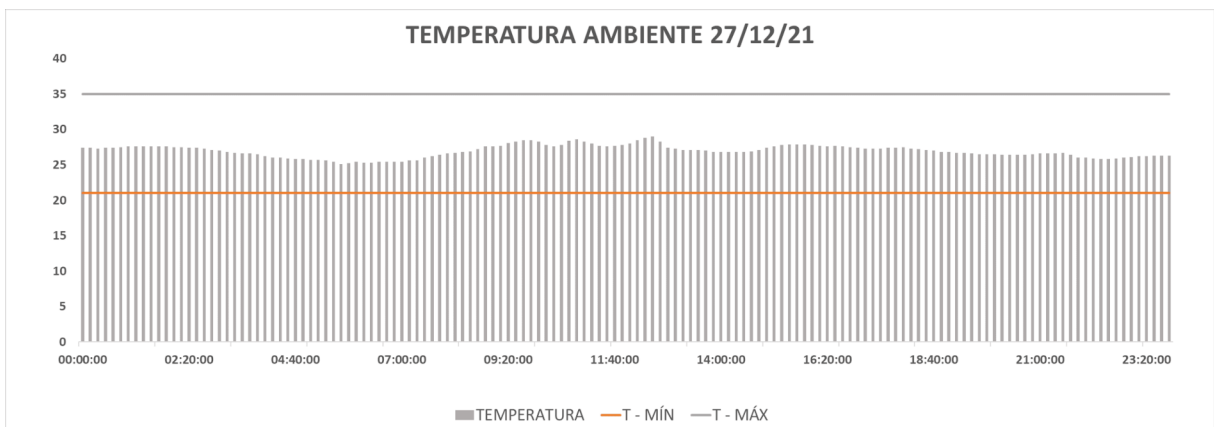
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 — Temperatura do ambiente no segundo dia de análise



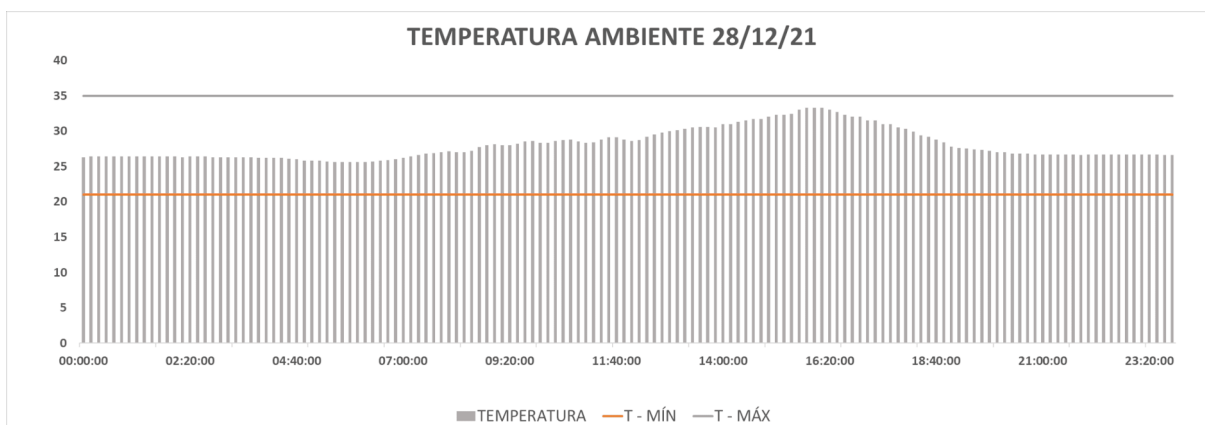
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 — Temperatura do ambiente no terceiro dia de análise



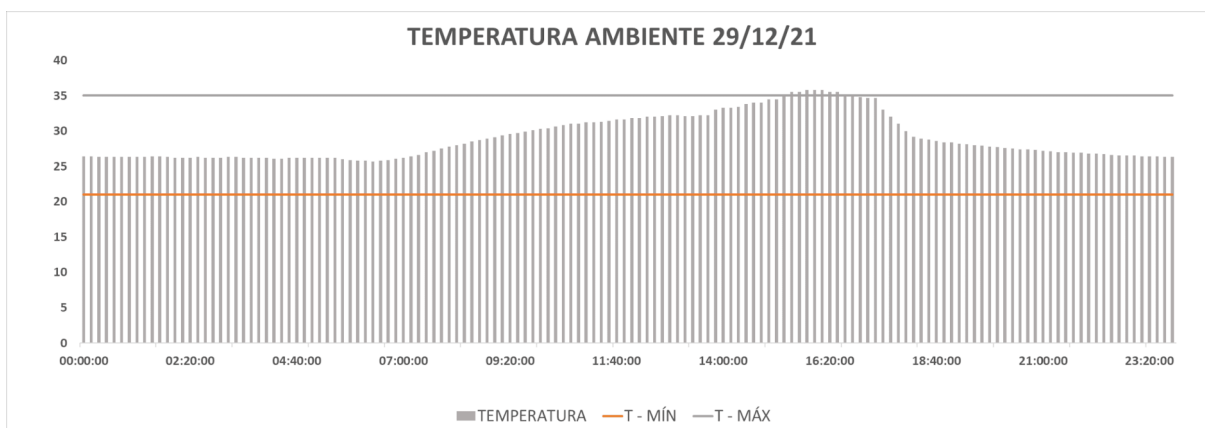
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 — Temperatura do ambiente no quarto dia de análise



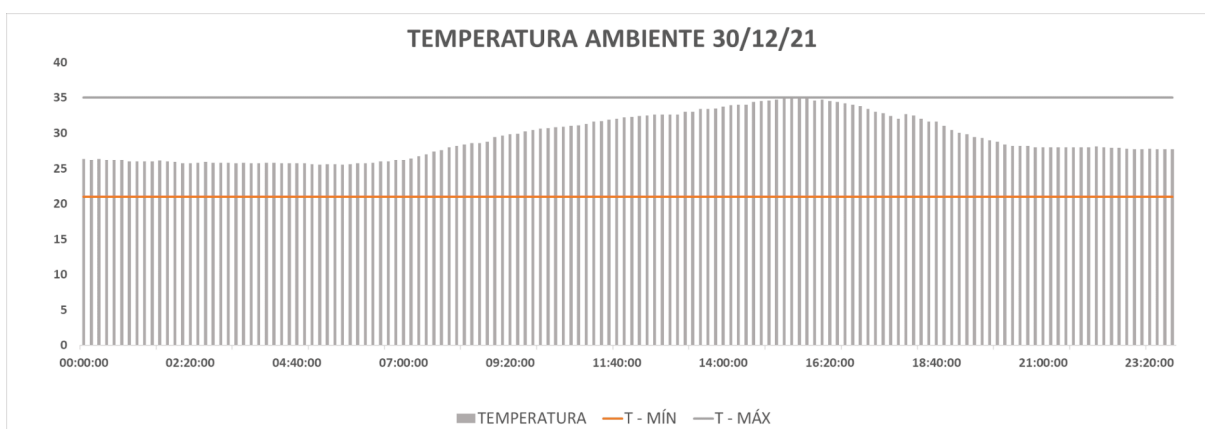
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7 — Temperatura do ambiente no quinto dia de análise



Fonte: Elaborado pelo autor.

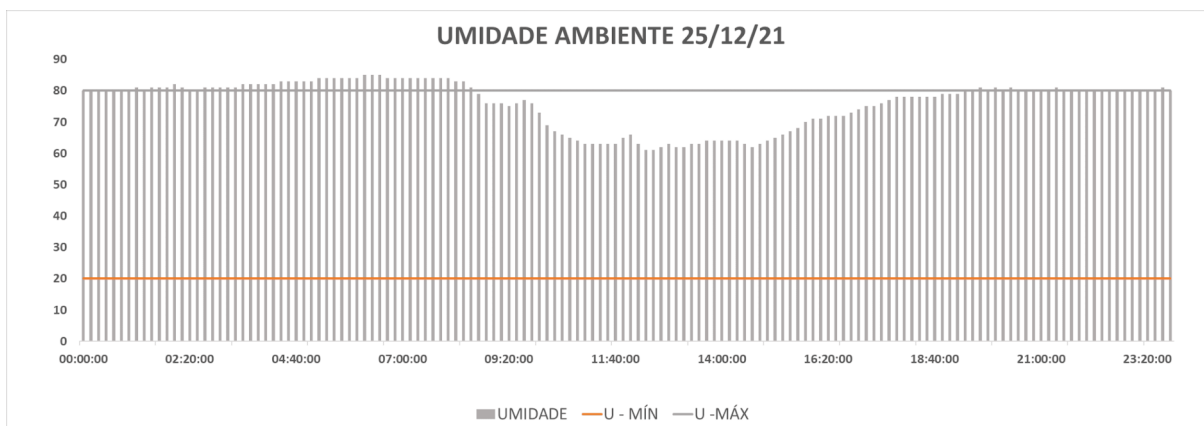
Gráfico 8 — Temperatura do ambiente no sexto dia de análise



Fonte: Elaborado pelo autor.

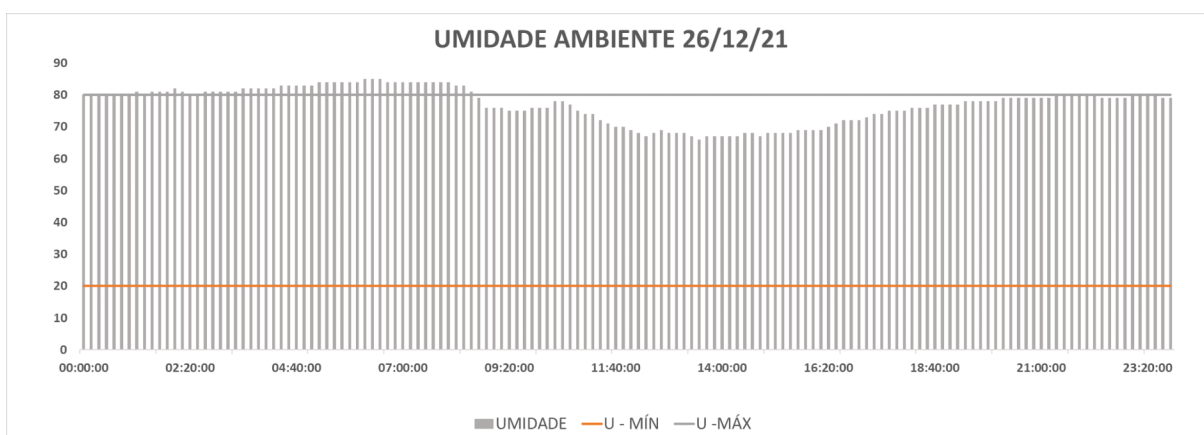
As medidas de umidade do ambiente dos seis dias de análise são apresentadas nos Gráficos 9, 10, 11, 12, 13 e 14.

Gráfico 9 — Umidade do ambiente no primeiro dia de análise



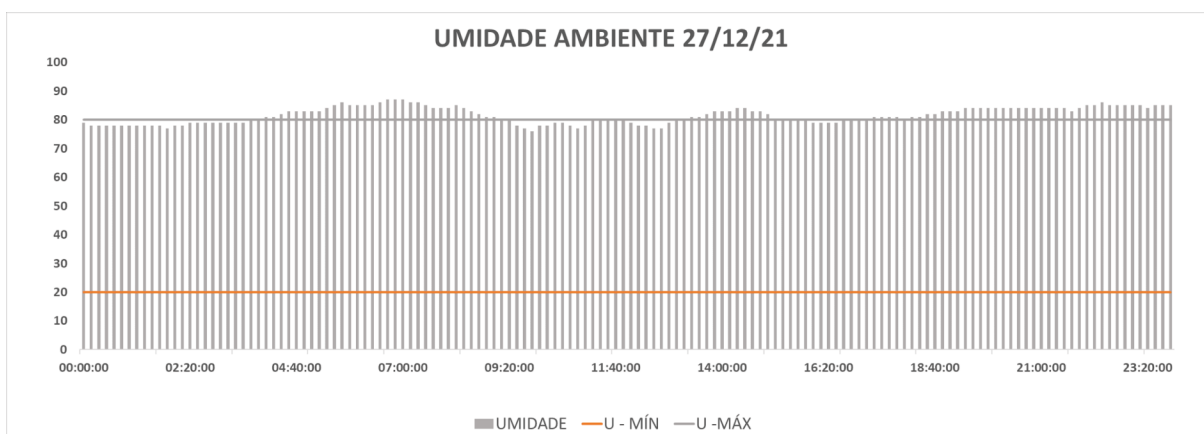
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 — Umidade do ambiente no segundo dia de análise



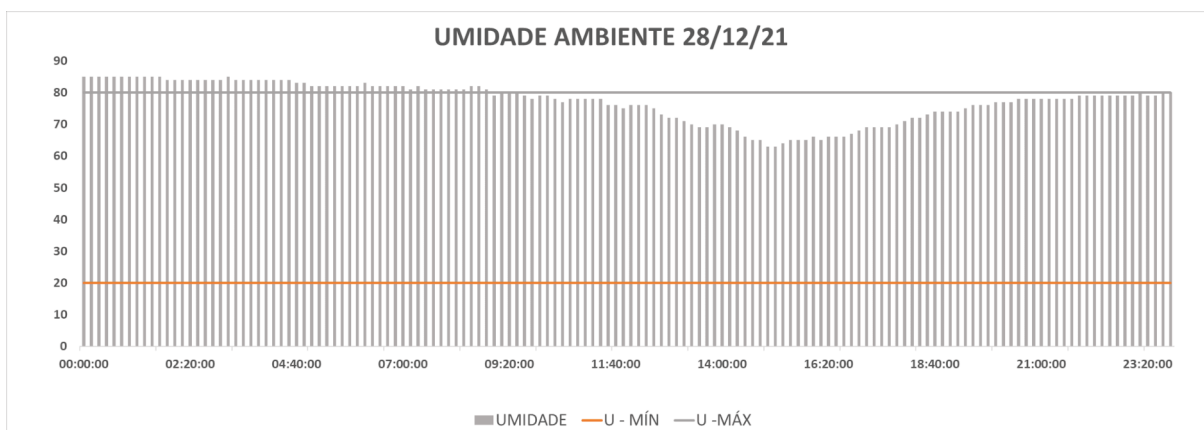
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 — Umidade do ambiente no terceiro dia de análise



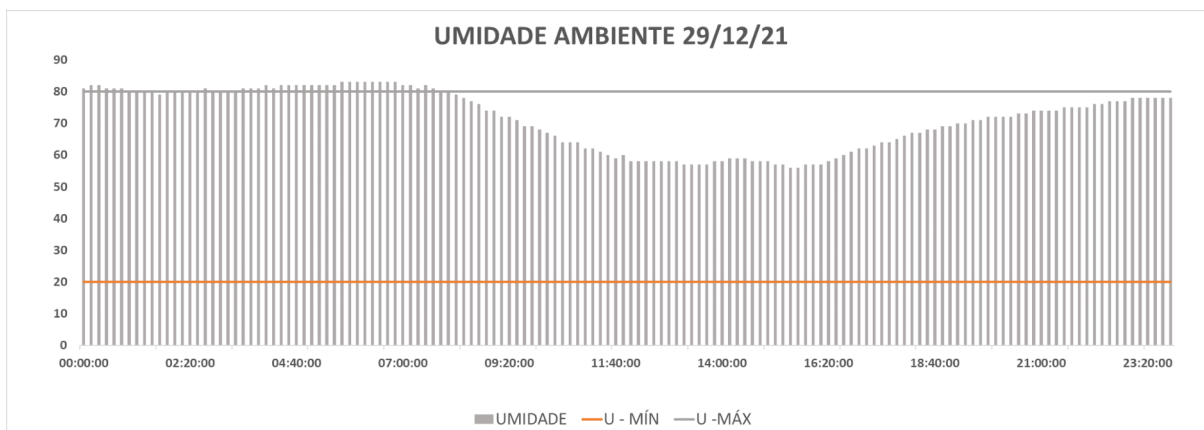
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 — Umidade do ambiente no quarto dia de análise



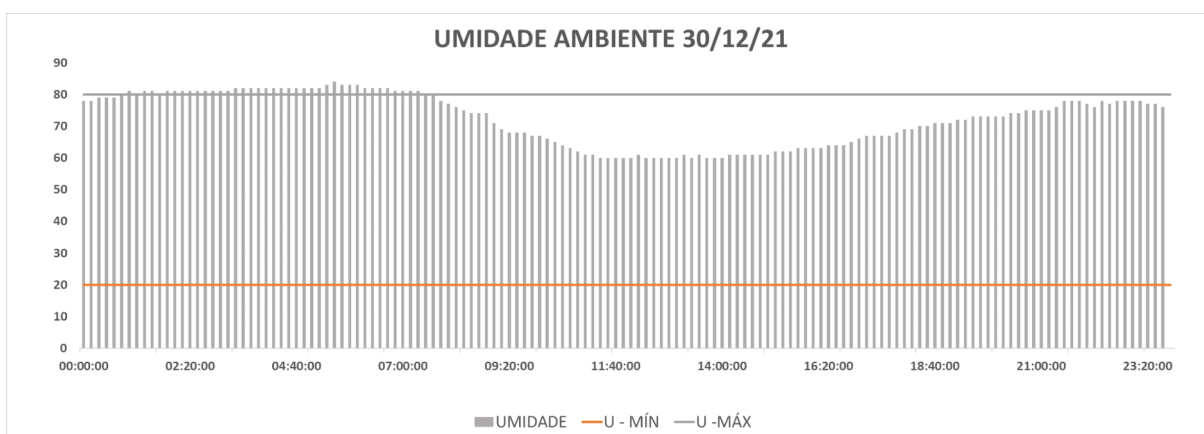
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 — Umidade do ambiente no quinto dia de análise



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 — Umidade do ambiente no sexto dia de análise



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, analisando os dados coletados, observou-se que o ambiente de produção possivelmente estava agravando o surgimento de defeitos. Como já discutido, a temperatura e a umidade são fatores de extrema importância para um bom processo de infusão; o controle desses parâmetros evita picos de exotermia e a contaminação do tecido pelo vapor de água no ar.

Pelos gráficos, concluiu-se, como era previsto, que a temperatura e a umidade apresentam picos em horários opostos, isto é, o aumento de uma dessas variáveis acarreta na diminuição da outra. Na prática, esse fato impediria a produção da peça durante todo o dia, sobretudo a realização do processo de infusão e cura do laminado, porém, ao que tudo indica, essas informações não foram tratadas ou foram ignoradas.

Outro fator que pode acarretar a contaminação de tecido, a danificação do plástico devido a cavacos de rebarba e a contaminação de resina é o pó gerado no processo de rebarbação. Esse problema é normalmente previsto no projeto de *layout* do setor produtivo, contudo, por muitas vezes, é necessário realizar a atividade próximo ao molde devido à falta de espaço físico. Na fábrica, a aferição de excessiva poeira no galpão era apenas subjetiva e, conforme avaliado pelo analista de produção, os postos de rebarbação ficavam a apenas 5 metros do molde das peças de *spar cap*. Além disso, nos postos, eram rebarbados os pré-fabricados de raiz e almas, ou seja, o molde recebia poeira praticamente durante as 24 horas de processo.

5.2.6 Umidade percentual da resina

Os resultados dos cálculos da unidade percentual da resina constam na Tabela 7.

Tabela 7 — Dados das amostras analisadas

	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5
Pi	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Pf	4,988	4,912	4,944	4,932	4,962
Percentual	0,240%	1,760%	1,120%	1,360%	0,760%
Média	1,048%				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme especificação do cliente, o limite superior aceitável para a umidade da resina é de 2%. Logo, todas as amostras foram aprovadas e a hipótese de que a umidade dos materiais vindos do fornecedor pudesse ser uma das causas dos problemas detectados foi descartada.

5.3 Ações corretivas

O plano de ação corretivas é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 — Plano de ações corretivas

Ação	Responsável
DIMINUIR RPM DO BICO MISTURADOR PARA DIMINUIÇÃO DE TURBULÊNCIA DA RESINA E EVITAR PICOS EXOTÉRMICOS NO MOMENTO DA SAÍDA DE MATERIAL.	LÍDER MANUTENÇÃO E INFRAESTRUTURA
INSTALAÇÃO DE SENSOR VISUAL E SONORO NA MÁQUINA MISTURADORA DE RESINA PARA PICOS EXOTÉRMICOS.	LÍDER MANUTENÇÃO E INFRAESTRUTURA
SEPARAR QUANTIDADE DE ROLOS NA QUANTIDADE CORRETA E SUFICIENTE PARA PRODUÇÃO DE 1 UNIDADE DE SPAR CAP.	LÍDER DE ALMOXARIFADO
TROCAR CHAPAS DE TELHADO DANIFICADAS POR TODO O GALPÃO.	LÍDER MANUTENÇÃO E INFRAESTRUTURA
ATUALIZAR PROCEDIMENTO OPERAÇÃO PADRÃO COM ALTERAÇÕES PROVENIENTES DESTE PROJETO.	ANALISTA DE ENGENHARIA DE PROCESSO
TREINAR A EQUIPE DE PRODUÇÃO UTILIZANDO O POP ATUALIZADO EM AULAS TEÓRICAS E PRÁTICAS.	ANALISTA DE ENGENHARIA DE PROCESSO
REALIZAR HIGIENIZAÇÃO DE ALUPORTAS PARA QUE O SISTEMA DE DEGASS TENHA A LEITURA DE PRESSÃO MAIS PRECISA POSSÍVEL E ATIVE OS EQUIPAMENTOS DESGASEIFICADORES.	LÍDER MANUTENÇÃO E INFRAESTRUTURA
REPOSICIONAR OS RESISTORES PRESENTES NA REGIÃO INFERIOR DO MOLDE PARA MELHOR ATENDIMENTO À RECEITA DE CURA DA ENGENHARIA.	LÍDER MANUTENÇÃO E INFRAESTRUTURA
INSTALAR SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO NO GALPÃO COMO TAMBÉM INSTALAR PORTAS E JANELAS.	LÍDER MANUTENÇÃO E INFRAESTRUTURA
READEQUAR LAYOUT DO GALPÃO INSTALANDO CABINES DE REBARBAÇÃO PARA QUE AS REBARBAS NÃO ATINJAM O MOLDE.	LÍDER MANUTENÇÃO E INFRAESTRUTURA

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 Implementação das ações corretivas

Na Tabela 9, que contém os dados de produção de algumas peças após adoção dessa ação, há uma taxa de 11% de defeitos nas *spar caps* para SS e de 16% nas *spar caps* para PS.

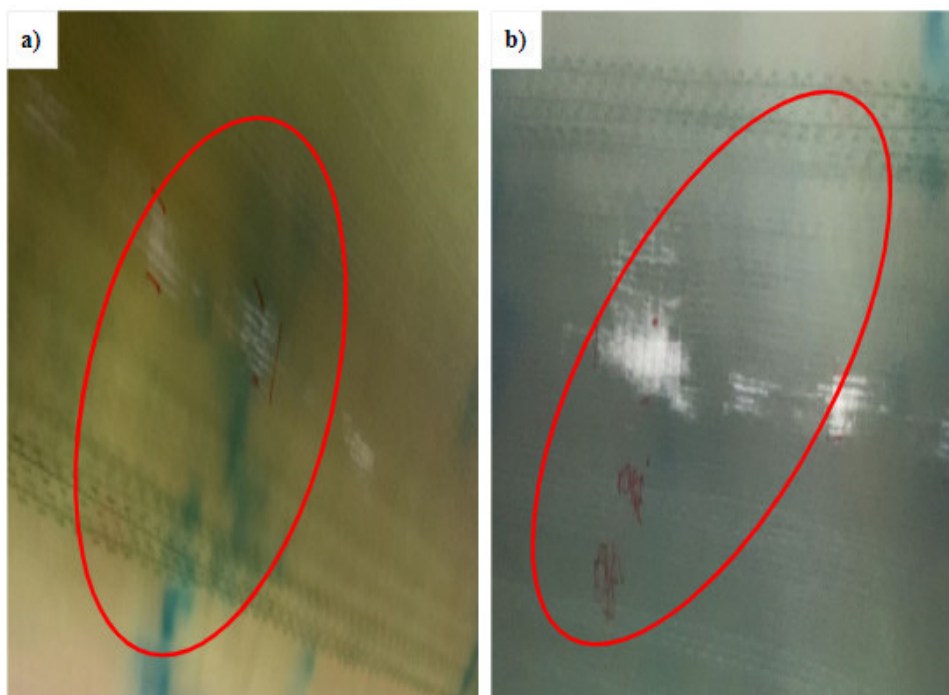
Tabela 9 — Dados de inspeção de defeitos das spar caps produzidas após mudança no plano de infusão

SPAR CAP			
SS	INSPEÇÃO	PS	INSPEÇÃO
77	✓	77	✓
78	✓	78	✓
79	✓	79	✓
80	✓	80	✓
81	✓	81	✓
82	✓	82	✓
83	✓	83	✗
84	✓	84	✗
85	✓	85	✓
86	✗	86	✓
87	✓	87	✓
88	✗	88	✓
89	✓	89	✓
90	✓	90	✓
91	✓	91	✗
92	✓	92	✓
93	✓	93	✓
94	✓	94	✓
95	✓	95	✓

Fonte: Elaborada pelo autor.

Optou-se por alterar o plano de infusão da peça porque todas as peças defeituosas possuíam o aspecto branco de tecido semi-seco na mesma região. A região em questão era no sentido da corda ou lateral, sendo em torno de 650 mm da linha de corte do molde, assim como apresentado na Figura 24. Os defeitos nas peças variavam apenas no sentido longitudinal do Z14000 ao Z21000. Portanto, esse era um forte indício de falha nos “freios” do plano; os freios são materiais consumíveis que tem o objetivo de dar maior ou menor aceleração ao fluxo de resina em determinadas regiões.

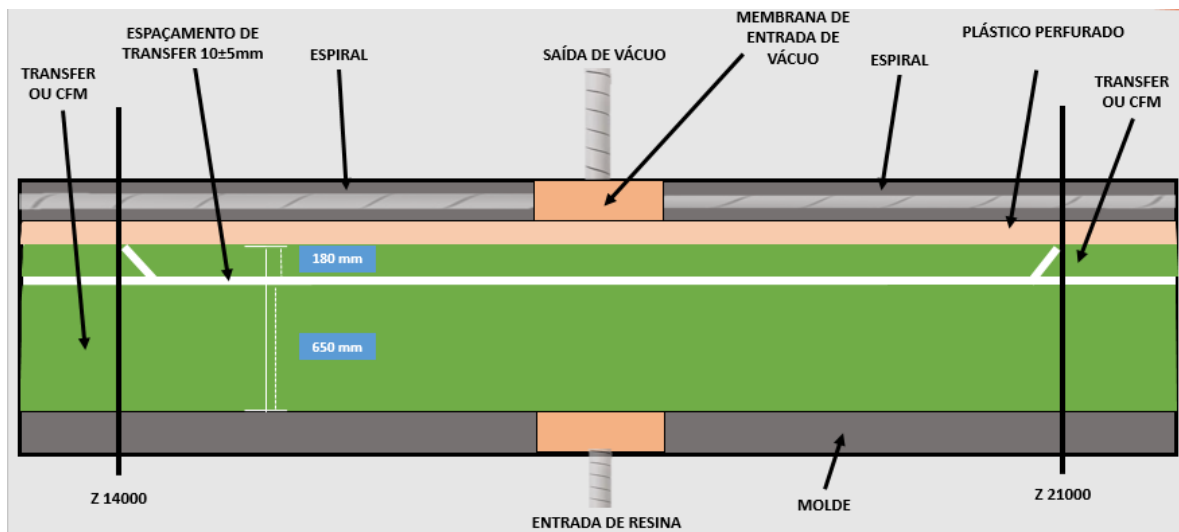
Figura 24 — Região a) no sentido da corda e b) lateral da peça



Fonte: Elaborada pelo autor.

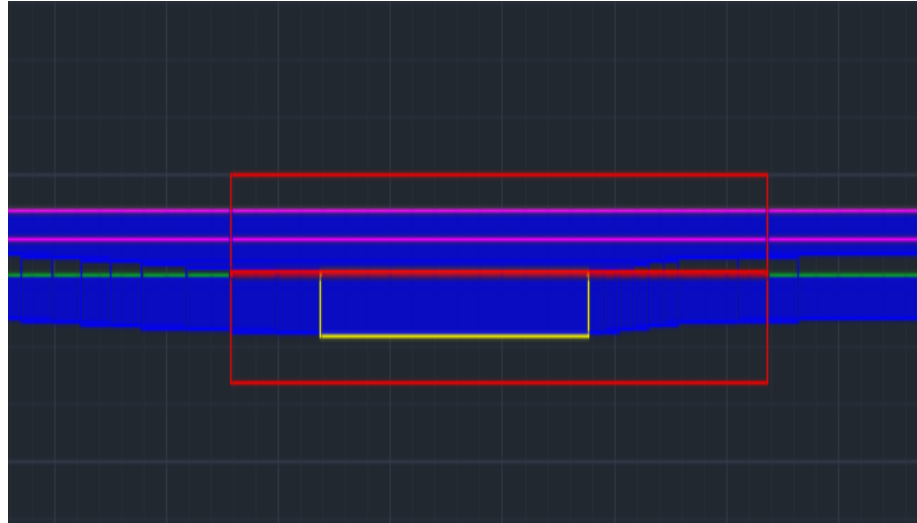
A solução proposta foi esquematizada conforme a Figura 25, e foi idealizada a partir da análise de que nesta região é onde há o maior pacote de camadas, levando-se em consideração o escalonamento (Figura 26). Além disso, devido à concavidade longitudinal do molde, a resina não possuía um tempo hábil de trabalho para total preenchimento das camadas; era necessário desacelerar-lá nessa região para, assim, fornecer o tempo propício para o preenchimento completo.

Figura 25 — Esquema de mudança do plano de infusão



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 — Representação do esquema de escalonamento de camadas



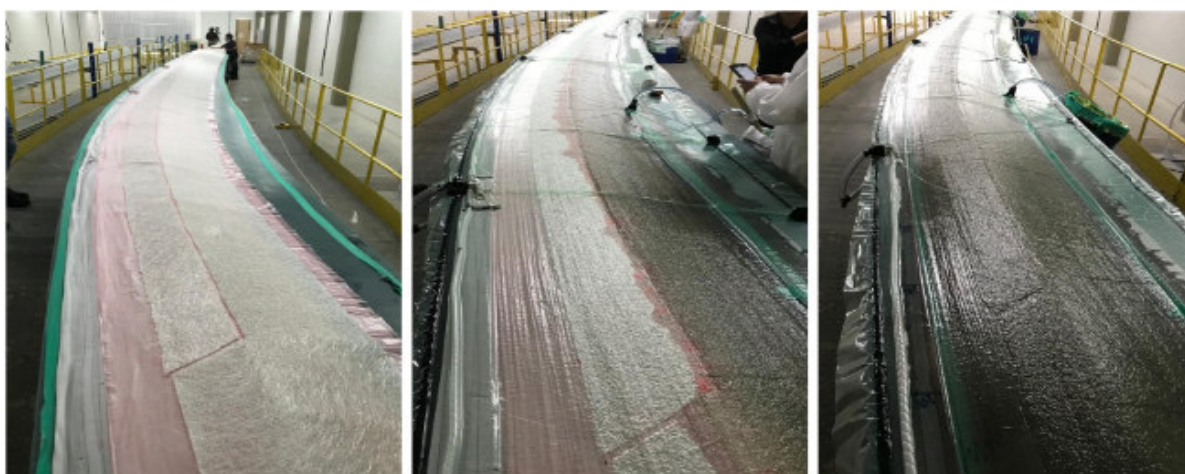
Fonte: Elaborada pelo autor.

Sendo assim, foi solicitado um corte no freio na posição 650 mm da linha de corte à entrada de resina, exatamente entre o Z14000 e Z21000, garantindo um espaçamento de 10 mm (± 5 mm) no freio (Transfer para SS e CFM para PS). Nesse espaçamento, a resina foi impulsionada apenas pelo nylon e pelo plástico perfurado, diminuindo seu fluxo em pelo

menos 60% em relação ao anterior, para logo depois voltar seu fluxo mais acelerado e preencher todas as regiões da peça.

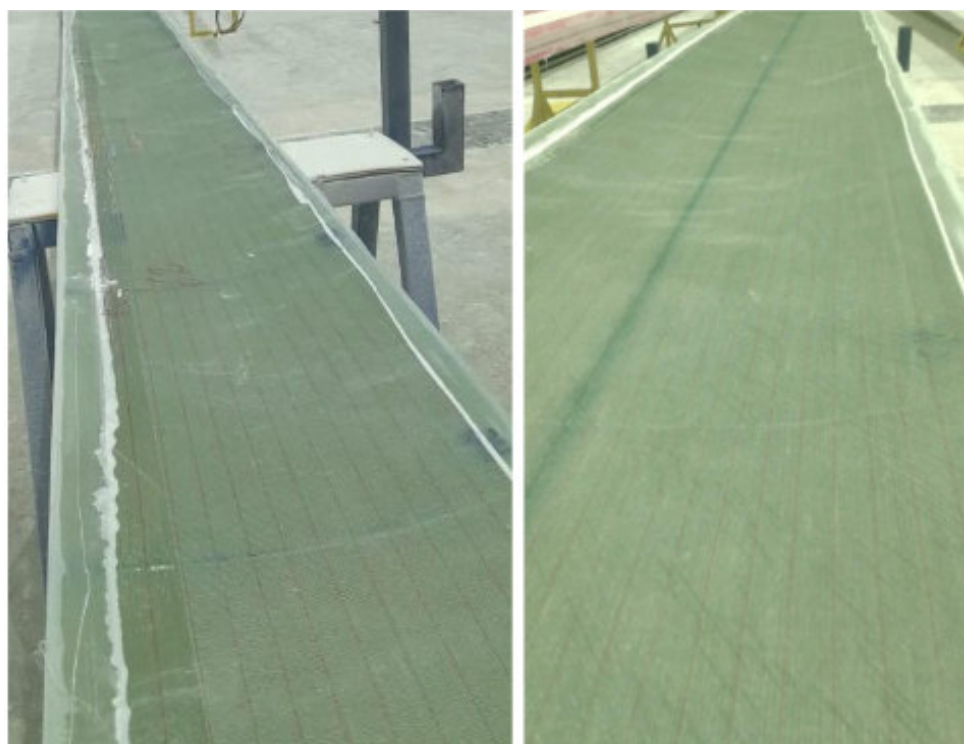
Esse procedimento foi validado em 10 peças SS e PS, conforme evidências mostradas nas Figuras 27 e 28, onde verifica-se uma peça com aspecto totalmente verde, sem a presença de manchas brancas, e na Tabela 10, que contém as verificações das inspeções.

Figura 27 — Imagens da fabricação de uma *spar cap* após a mudança do plano de infusão























Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 — *Spar cap* não defeituosa



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10 — Resultados de inspeção após ações corretivas

SPAR CAP			
SS	INSPEÇÃO	PS	INSPEÇÃO
96		96	
97		97	
98		98	
99		99	
100		100	
101		101	
102		102	
103		103	
104		104	
105		105	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação aos corpos de prova sem defeitos, que conferiram uma média de resultado de conferência, as medidas no ensaio de *pull off* constam na Tabela 11.

Tabela 11 — Resultados do ensaio de *pull off*

RESULTADO DE REFERÊNCIA (Mpa)					
CORPO 1	CORPO 2	CORPO 3	CORPO 4	CORPO 5	CORPO 6
11,12	12,11	12,98	13,13	13,43	12,35
Média					
12,52					

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, os testes realizados nos ensaios de peças defeituosas devem ser comparados e avaliados se levando em consideração os valores obtidos nesta etapa. Logo, para os testes das peças que apresentaram defeitos, as tensões medidas no ensaio de *pull off* estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 — Resultados de inspeção

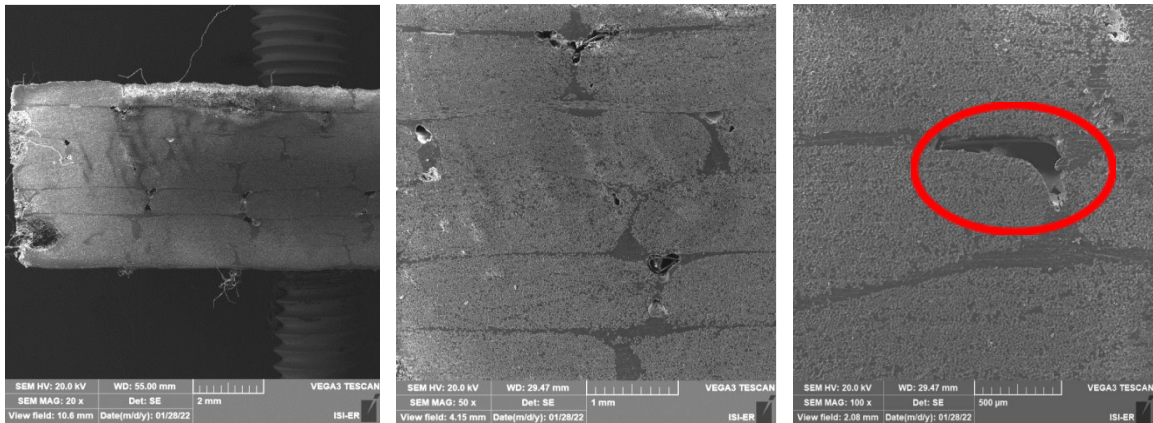
SPAR CAP			
SS	INSPEÇÃO	PS	INSPEÇÃO
60	9,49	61	13,88
61	13,43	64	12,87
62	13,71	65	9,81
64	8,99	68	13,49
65	8,26	69	13,13
68	13,31	70	12,14
69	9,25	74	11,32
70	13,25	83	13,52
72	9,26	84	12,17
86	14,09	91	13,86
88	13,14		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos resultados, identificou-se que 9 peças ficaram abaixo da média considerada padrão. Essas peças, segundo o corpo técnico da empresa, deveriam ser sucateadas. Às demais peças, aferiu-se que os defeitos poderiam se encontrar apenas nas primeiras camadas, ou, algumas vezes, serem uma questão apenas estética, dependendo da causa raiz que os originou.

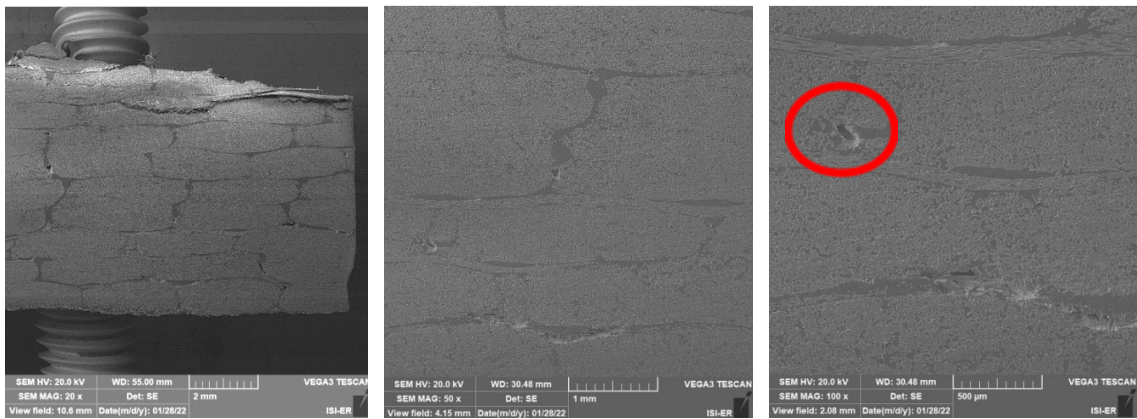
Visando diminuir o prejuízo monetário do sucateamento de uma peça, que está avaliado em cerca de R\$ 75.000, sem considerar os custos com SEB (salários, encargos e benefícios) e os valores de infraestrutura, como energia, água e transporte, foi solicitado uma análise microscópica das peças. Portanto, realizou-se microscopia eletrônica de varredura (MEV) em corpos de prova de 5 cm x 2 cm nas peças PS 70, 74 e 84; as micrografias são apresentadas a seguir, nas Figuras 29, 30 e 31, respectivamente.

Figura 29 — Micrografias da amostra PS 74



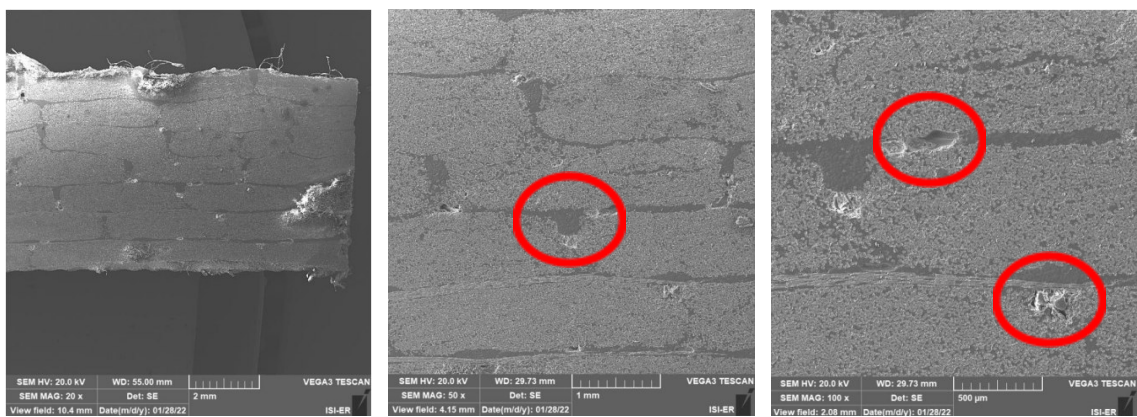
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 — Micrografias da amostra PS 70



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 — Micrografias da amostra PS 84



Fonte: Elaborada pelo autor.

Mediante a análise das imagens, constatou-se que a peça 74 possuía vazios de profundidade severa, fato esse que prejudicava a resistência à fadiga da peça em campo, diminuindo abruptamente o tempo de vida útil da pá eólica. Assim, essa peça não foi aceita

pelo cliente ou atestada pelo engenheiro estrutural da empresa fabricante. Por sua vez, as peças 70 e 84 também possuíam diversos vazios em sua microestrutura, porém, vazios de menor profundidade. E, após ajustes no contrato de venda em relação à garantia estendida do componente em atividade, essas peças foram aceitas pelo cliente.

4 CONCLUSÃO

Aplicar uma metodologia para resolução de problemas relacionados à confecção de materiais compósitos por meio do processo de infusão é uma medida muitas vezes obrigatória, devido à complexidade das etapas de fabricação. E, a partir do estudo dos resultados expostos neste trabalho, foi possível notar que a metodologia 8D mostrou-se uma ferramenta bastante eficaz nesse quesito, tendo seu uso sido bem-sucedido para solucionar os problemas detectados no processo de fabricação de *spar caps*.

Por meio das disciplinas da metodologia 8D, todas as variáveis e fatores importantes para determinar as causas dos defeitos foram levados em consideração. De acordo com as análises do presente trabalho, concluiu-se que:

- O plano de ação elaborado pela equipe de trabalho foi efetivo. Após sua implementação, produziram-se peças com zero defeitos, aprovadas pelos critérios de inspeção visual e ultrassônica;
- A mudança do plano de infusão visando o retardo no fluxo de resina em determinadas regiões e o estudo das curvas de aquecimento ao longo de toda a extensão do molde foram ações cruciais para a resolução do problema;
- Pela fabricação das *spar caps* se tratar de um processo quase totalmente manual, necessitou-se que as variáveis humanas, como tempo de treinamento e qualificação do operador, entrassem no cenário avaliado juntamente às condições ambientais de temperatura e umidade;
- A realização de ensaios de *pull off* e de análises microestruturais, ao todo, resultaram na aprovação de 14 das 21 peças atingidas pelo defeito aerado, o que, em valores comerciais, representa uma economia de R\$ 1.800.000,00 em material, aproximadamente, ignorando custos secundários inerentes à produção.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, Bhagwan D.; BROUTMAN, Lawrence J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and Performance of Fiber Composites**. 3° ed. Nova Deli: Wiley-Interscience, 2015.
- ALMACO. **Compósitos 2: Tecnologia de Processos**. 2° ed. 2020.
- ASTM. **ASTM D4541-17: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers**. 2017.
- BERNARDINO, Erika. **Brasil termina 2021 com maior acréscimo em potência instalada desde 2016**. 2022. Disponível em: <https://almaco.org.br/2022/01/12/brasil-termina-2021-com-maior-acrescimo-em-potencia-instalada-desde-2016/>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- BERTHELOT, Jean-Marie. **Mechanics of Composite Materials and Structures**. 3° ed. Vallouise: Springer, 1999.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 8° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CAMPOS, Maxdavid Oliveira. **Estudo Comparativo de pás para aerogeradores de grande porte fabricadas em materiais compósitos reforçada com fibra de carbono ou fibra de vidro**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12818>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. **Gestão da Qualidade: Conceitos e Técnicas**. 1° ed. São Paulo: ATLAS, 2010.
- CARVALHO, Marly. PALADINI, Edson. **Gestão da Qualidade: teoria e casos**. 2° ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- CORTIR. **The Blade Handbook™: A shared lingo for the future of wind**. 2019.
- FAHR, A.; KANDEIL, A. Y. Ultrasonic C-Scan Inspection of Composite Materials. **Engineering Journal of Qatar University**. Vol. 5. 1992, p. 201-222.
- GRIFFIN, Dayton. **A Blade System Design Studies Volume II: Preliminary Blade Designs and Recommended Test Matrix**. Sandia Report, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237726788_Blade_System_Design_Studies_Volume_II_Preliminary_Blade_Designs_and_Recommended_Test_Matrix. Acesso em: 08 fev. 2022.
- GURIT®. **Guide to Composites**. 2022. Disponível em: <http://gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-tocomposites.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2022.

JOHNSON, Todd. **Thermoplastic vs. Thermoset Resins**. 2020. Disponível em: <http://thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405>. Acesso em: 22 jan. 2022.

MANWELL, James F.; MCGOWAN, Jon G.; ROGERS, Antony L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2° ed. Grã-Bretanha: Wiley, 2009.

MARCHINI, Lodinei Roberto. **Disciplina 8D**. 2022. Disponível em: <http://lodineimarchini.no.comunidades.net/index.php?pagina=1365216015>. Acesso em: 23 jan. 2022.

MOURA, Marcelo F. S. F. de; MORAIS, Alfredo B. de; MAGALHÃES, António G. de. **Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2° ed. Publidisa, 2011.

NORTEGUBISIAN. **Como manter resultados de melhoria**. 2016. Disponível em: <https://www.nortegubisian.com.br/blog/como-manter-resultados-de-melhoria>. Acesso em: 27 jan. 2022.

RAMBAUD, Laurie. **8D structured problem solving: a guide to creating high quality 8D reports (spiral-bound)**. 1° ed. Breckenridge: Phred solutions, 2006.

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. 1° ed. Editora Artliber. 2011.

SONG, Xiaolan. **Vacuum assisted resin transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Faculdade do Instituto Politécnico e Universidade Estadual da Virgínia, Blacksburg, 2003. Disponível em: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/27168>. Acesso em: 05 fev. 2022.

STAAB, George H. **Laminar Composites**. 1° ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

STIESDAL, Henrik. **The Wind turbine components and Operation**. Bonus Energy A/S, 1999.

THOMAZ JUNIOR, Celso Rangel. **Desempenho aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabe**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Mecânica) — Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade do Chile, Santiago, 2012. Disponível em: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112558>. Acessado em: 21 jan. 2022.

UNNTHÓRSSON, Rúnar; JONSSON, M. T.; RUNARSSON, T. P. **NDT Methods For Evaluating Carbon Fiber Composites**. 2014.