



Otimização da manufatura de compósitos utilizando as ferramentas da engenharia da produção

Composite manufacturing optimization using engineering production tools

Carlos Eduardo Alves Ramos Junior¹
Murilo Carneiro Chagas²
Cláudio Renato Simões de Jesus³
Kalil Figueiredo Almeida⁴
Bruno Souza Fernandes⁵
Stephanie Gonçalves Nunes⁶
Nilmar de Souza⁷
Fábio André Lora⁸
Luís Oscar Silva Martins⁹
André de Mendonça Santos¹⁰
Franco Dani Rico Amado¹¹
Danilo Maciel Barquete¹²
Djoille Denner Damm¹³

¹Graduando em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: caloscadu9@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-1214-863X>

²Graduando em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: murilo@aluno.ufrb.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-3550-9071>

³Mestrando em Ciência, Inovação e Modelagem de Materiais, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho, Ilhéus - BA, CEP: 45662-900. E-mail: renatoubaitaba@hotmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-2714-8740>

⁴Mestre em Ciência, Inovação e Modelagem de Materiais, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: kalil@ufrb.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3954-5708>

⁵Doutor em Engenharia Industrial, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: bruno.fernandes@ufrb.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1211-6671>

⁶Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Riga Technical University (RTU), Latvia, Suécia.

E-mail: stephaniegnunes@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6457-4028>

⁷Doutor em Mecatrônica, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: nilmar@ufrb.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2882-1671>

⁸Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: fabio.lora@ufrb.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9951-1916>

⁹Doutor em Energia e Ambiente, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: luisoscar@ufrb.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0040-7762>

¹⁰Mestre em Ciência, Inovação e Modelagem de Materiais, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: andre.mendonca@ufrb.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3887-0189>

¹¹Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho, Ilhéus - BA, CEP: 45662-900. E-mail: fdramado@uesc.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7555-1876>

¹²Doutor em Ciências e Tecnologias Espaciais, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Rod. Jorge Amado, Km 16, Salobrinho, Ilhéus - BA, CEP: 45662-900. E-mail: daniilo@uesc.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0383-9966>

¹³Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Av. Centenário, 697, Sim, Feira de Santana - BA, CEP: 44042-280. E-mail: djoille@ufrb.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3584-0638>

Resumo

Compósitos poliméricos são aplicados em larga escala como material de engenharia devido ao seu conjunto de propriedades dificilmente encontradas em um único material. Este material específico é, geralmente, constituído industrialmente por uma combinação de matrizes de resinas (poliéster ou epóxi) com uma fase estrutural como fibra de vidro, fibra de carbono ou fibras naturais. Os processos tecnológicos mais utilizados são a pultrusão, moldagem por compressão e injeção de resina. No entanto, na indústria de turbinas eólicas, apesar da evolução e otimizações dos processos, ainda é necessário muito trabalho com técnicas simples, como *spry lay-up* e *hand lay-up*, para unir os enormes componentes. Na indústria de compósitos, grandes desenvolvimentos foram gerados para melhorar as propriedades dos materiais compósitos enquanto a sistematização da produção não teve o mesmo crescimento ascendente. Atualmente, apesar dos esforços, muito mais pode ser feito para melhorar os padrões dos sistemas produtivos. Este estudo apresenta o desenvolvimento sistemático de um material compósito processado manualmente para ser aplicado em turbinas eólicas aplicando o *Systematic Layout Planning (SLP)*, métodos de fabricação *just in time*, mapeamento e modelagem de processos, indicadores de desempenho, sistemas de controle e melhoria contínua, inter-relações e grau de proximidade entre as etapas de produção. O desenho dos setores de trabalho e o fluxograma de materiais e produtos propostos neste trabalho podem trazer ganhos na redução do tempo padrão de produção (40%), praticamente eliminando o reprocessamento por contaminação e, conseqüentemente, reduzindo perdas e desperdícios (10%) com as melhorias alcançadas na produtividade e na qualidade do processo.

Palavras-chave: Laminados Compósitos. Propriedades dos Materiais. Planejamento Sistemático de Layout. Sistema de Manufatura.

Abstract

Polymeric composites are spread applied as engineering material due to its properties sets hardly found in a single material. This specific material is, generally, constituted industrially by a combination of resin matrix (polyester or epoxy) with a structural phase such as fiberglass, carbon fiber or natural fibers. The most technologic processes utilized are the pultrusion, compressing molding and resin injection. However, in the wind turbines industry, despite the processes evolution and optimizations, a lot of work with simple techniques such as *spry lay-up* and *hand lay-up* still is required to join the huge components together. In the composites industry great developments have been done about improving composites materials properties while the production systematization did not have the same upward growth. Currently, despite the efforts, much more can be done to improve the standards of

production systems. This study presents the systematic development of a composite material processed by hand lay-up to be applied in wind turbines applying Systematic Layout Planning (SLP), methods of just-in-time manufacturing, mapping and modelling processes, performance indicators, control systems and continuous improvement, interrelations and degree proximity between production steps. The work sectors design and the materials and products flow chart proposed in this work could brought about gains in reducing the production standard time (40%), practically eliminating reprocessing by contamination, and consequently reducing losses and waste (10%) with the improvements achieved in productivity and process quality.

Keywords: Composites Laminates. Material Properties. Systematic Layout Planning. Manufacturing System.

Introdução

Os materiais compósitos poliméricos têm sido cada vez mais utilizados para atender as propriedades mecânicas exigidas dos produtos finais devido ao acoplamento de características intrínsecas de cada componente, bem como leveza e resistência mecânica satisfatória [1], [2], absorção de energia de impacto [3] altos módulos específicos (E/p), altas resistências específicas (S/p) e alto amortecimento do material. Devido à natureza heterogênea dos materiais compósitos, a análise de tensão e falha do compósito torna-se muito mais difícil do que a isotrópica [4].

Os materiais compósitos de matriz de resina reforçada com fibras contínuas têm sido usados na fabricação de estruturas de aeronaves, elementos de máquinas como braços de robôs, eixos de transmissão de energia automotiva, máquinas-ferramentas e turbinas eólicas. Recentemente, esses materiais têm sido amplamente utilizados em artigos esportivos e de lazer, como raquetes de tênis, varas de pesca e tacos de golfe, pois os preços desses materiais se tornam mais baixos [5]. À medida que as demandas por materiais compósitos aumentam, muitos métodos de processamento de materiais compósitos devem ser desenvolvidos e refinados para atender aos requisitos de qualidade, produtividade e baixo custo [6].

A vantagem do peso ser reduzido com a aplicação de compósitos é certamente um fator considerável na seleção de materiais. Porém, o custo de fabricação de peças compostas é maior por quilo do que aquelas projetadas em metais/ligas, por exemplo. Como resultado, o crescimento da utilização de compósitos para aplicações estruturais não é significativo. É

óbvio que a utilização de compósitos em diferentes aplicações pode ser aprimorada apenas com tecnologias econômicas [7].

Compósitos poliméricos podem ser processados por diversas técnicas como a pultrusão [8], moldagem por compressão [9], injeção de resina [10], *spry lay-up* [11] e *hand lay-up* [12]. Apesar de serem técnicas simples, *spry lay-up* e *hand lay-up* ainda são amplamente utilizadas na indústria de turbinas eólicas [13]–[15]. *Hand lay-up*, também chamado de *wet lay-up*, é a técnica mais antiga e simples para a fabricação de componentes compostos. Basicamente, o *hand lay-up* é uma técnica de molde aberto, que é realizada colocando manualmente mantas de tecido seco no molde e posteriormente aplicando resina. Em seguida, a resina é forçada através dos reforços usando rolos manuais para garantir sua distribuição uniforme e remoção do ar retido no interior do laminado. Este processo deve ser repetido quantas vezes forem necessárias para melhorar o acabamento.

Peças compostas com grande área superficial têm sido fabricadas de forma artesanal e um dos principais problemas com esses processos é a emissão contínua de compostos orgânicos voláteis (VOC) [16]. O planejamento do layout deve considerar uma solução econômica para garantir condições de trabalho seguras e atender às regulamentações legais.

Para se qualificar para aplicações primárias e secundárias de suporte de carga, os produtos compósitos estruturais têxteis são geralmente feitos de fibras ou fios de alto módulo, como vidro, grafite e aramida. Cada material tem uma vantagem e deficiência particular em relação a outros materiais. O grafite exibe o maior módulo ou rigidez, mas carece de tenacidade. Para aeronaves e outras aplicações em que a relação entre rigidez e peso é importante o grafite tornou-se a fibra dominante. Por outro lado, a fibra de vidro é o material mais confiável para muitos compósitos têxteis devido ao seu baixo custo e elevadas propriedades mecânicas [17]. Neste trabalho, a fibra de vidro foi escolhida para reforçar a matriz composta por suas elevadas propriedades mecânicas e baixo custo.

Para compósitos termofixos de fibra e resina, a etapa de cura geralmente leva muito tempo, várias horas, para completar a reticulação da resina para obter excelentes propriedades mecânicas. Está muito além do ciclo de fabricação almejado, que requer vários minutos por peça, na indústria automotiva [18]. Portanto, a redução do tempo de cura é fundamental para melhorar a eficiência do processamento. Outros fatores que podem impactar diretamente na qualidade e produtividade dos compósitos poliméricos são a rugosidade e o acabamento da superfície, melhorar esses requisitos pode ser uma forma de evitar a falha do material [19] e também deve ser considerado no projeto do produto.

Os avanços tecnológicos que levam à melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos, como resistência à tração, compressão, torção, baixa densidade, entre

outras, são importantes para que esses materiais continuem sendo aplicados em larga escala na indústria. Porém, com o aumento da competitividade dos mercados ao longo dos anos, é fundamental que as empresas busquem ser cada vez mais eficientes. Isso exige que eles ofereçam não apenas um produto de altíssima qualidade, mas também a um custo que seus clientes estejam dispostos a pagar. No cenário atual, a produção baseada apenas em agregar valor aos produtos não é mais suficiente, é necessário também apresentar alta produtividade. Para isso é necessário que a produção seja enxuta, organizada, tenha baixo tempo padrão, elimine perdas e reduza o retrabalho.

Pensando em agregar esses valores aos compósitos poliméricos aplicados à indústria de aerogeradores, como objetivo primordial deste trabalho, o sistema de produção de compósitos foi projetado pela concepção *Lean Manufacturing*. Através deste conceito foram estudados classificação, relação e grau de afinidade entre as etapas de produção e técnicas aplicadas sobre reorganização de layout, avaliação ergonômica dos movimentos e redução do tempo padrão de produção.

A organização do layout é um fator “otimizador” para a melhoria dos processos produtivos. A redefinição dos espaços físicos juntamente com a padronização dos padrões de tempo entre as operações de trabalho podem contribuir qualitativamente para melhorar as propriedades dos compósitos e o método de fabricação [20].

Lean Manufacturing ou Produção Enxuta, derivado do Sistema Toyota de Produção [21] e é uma abordagem baseada no esforço para a satisfação máxima dos requisitos do cliente. Ao mesmo tempo, há um esforço para alcançar custos baixos e tempo mínimo, sem redução da qualidade do produto. Esses objetivos são alcançados principalmente pela eliminação de resíduos. Os seguintes tipos básicos de desperdício foram identificados pela abordagem *Lean*: transporte, superprodução, espera, qualidade, movimentação, excesso de processamento e estoque. Para eliminar essas fontes de desperdício podem ser aplicadas várias técnicas e ferramentas.

O principal objetivo deste trabalho foi a reestruturação e dimensionamento de todo o processo produtivo de laminados compósitos poliméricos com base nos conceitos da manufatura enxuta. Os fatores de produção que impactam na qualidade e produtividade foram mapeados através do estudo da relação entre as etapas produtivas e das atividades desenvolvidas em cada setor produtivo. Desta forma, o planejamento sistemático de layout (SLP) foi concebido através da mentalidade *Lean Manufacturing*, não deixando de lado os valores ergonômicos quanto ao conforto operacional e ao impacto da produção no meio ambiente. Neste trabalho foi possível medir e controlar rapidamente o ponto de cura através

da avaliação da dureza superficial do material, o que permitiu ganhos efetivos de tempo e propriedades mecânicas.

Procedimentos Experimentais

A produção de compósitos poliméricos formados a partir de resina de poliéster e fibra de vidro ou fibra natural (como juta, coco, banana, piaçava, entre outras) foi simulada experimentalmente no laboratório de uma instituição de pesquisa. Aproveitando o que de melhor tem sido feito na indústria, especificamente na cadeia produtiva de compósitos para aerogeradores, foi concebido um sistema de produção pelo qual os laminados compósitos seriam processados.

Os laminados foram fabricados pelo processo de *hand lay-up* devido ao seu baixo custo operacional e alta diversidade. Os laminados são constituídos basicamente por 8 camadas de resina e 7 camadas de fibra sobrepostas dispostas em forma de placa plana com dimensões (30x25) cm, de onde serão usinados 8 corpos com dimensões (2,5x25) cm cada.

A produção básica de laminados compósitos requer as seguintes etapas básicas: armazenagem e preparação do material, cura, usinagem/acabamento e ensaio mecânico não destrutivo. O teste de dureza Rockwell 15T foi adaptado para avaliar a cura do material por meio de medidas de dureza na superfície de compósitos laminados. A dureza superficial foi realizada na escala Rockwell 15T. Os parâmetros utilizados no ensaio foram: pré-carga de 3kgf, carga de 15kgf e penetrador de esfera de aço 1/16. O equipamento utilizado foi o durômetro Durotwin Plus, Mitutoyo, modelo DT-20.

Neste trabalho são analisadas as melhorias e vantagens que os laminados compósitos produzidos podem obter aplicando o conceito de Planejamento Sistemático de Layout (SLP); os métodos de fabricação *just in time*; mapeamento e modelagem de processos; indicadores de desempenho; e o estudo das inter-relações e grau de proximidade entre todas as etapas da produção.

Resultados e Discussões

3.1 Planejamento Sistemático do Layout (SLP)

Amostras de compósitos poliméricos foram fabricadas pelo método *hand lay-up* e curados em estufa. As propriedades mecânicas resultantes foram avaliadas por testes de indentação de dureza Rockwell adaptados [22], [23]. Os corpos de prova compósitos foram

preparados com resina de poliéster e fibra de vidro. Para a concepção do processo de fabricação ideal foi modelado as etapas de fabricação que são necessariamente sequenciais, cada uma com um insumo na entrada e um produto acabado na outra. O fluxograma de fabricação dos corpos de prova compósitos teve a seguinte sequência: 1) preparo dos materiais; 2) *lay-up* de mão; 3) cura; 4) acabamento e 5) ensaios mecânicos. O desenho esquemático do fluxograma de produção dos laminados compósitos é mostrado na Figura 1.

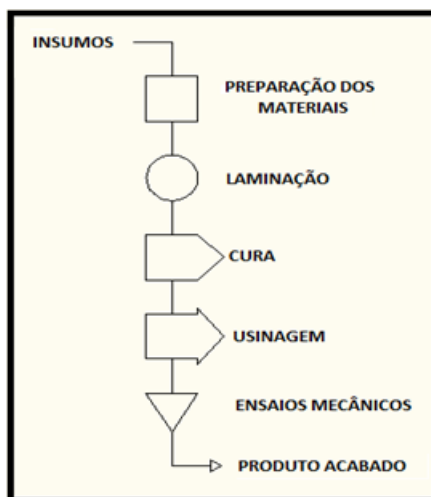


Figura 1. O fluxograma de fabricação dos compósitos.

O Planejamento Sistemático de Layout (SLP) é uma metodologia utilizada para organizar o ambiente de trabalho para otimizar o espaço e aumentar a produtividade e eficiência. Diversas atividades foram mapeadas e relacionadas quanto a conveniência, afinidade e limites de interface [24]. A proximidade foi classificada como: 4) Necessária; 3) Muito Importante; 2) Importante; 1) Pouco Importante; 0) Indiferente; e X) indesejáveis. Cada etapa da produção de laminados foi segmentada por setores de atividade de forma a concentrar equipamentos, *know-how* e pessoas em um mesmo espaço. A divisão em departamentos especializados em determinada atividade pode melhorar a realização de tarefas específicas e reduzir o tempo da tarefa. Utilizamos a classificação de proximidade para estudar a inter-relação entre as oficinas com o objetivo de avaliar a conveniência de ter diferentes departamentos próximos uns dos outros. A Tabela 1 abaixo apresenta as classificações de proximidade adotadas.

Classificações de Proximidade	Significado da Classificação
4	Necessário
3	Muito Importante
2	Importante
1	Pouco Importante
0	Indiferente
X	Indesejável

Tabela 1. Classificação de proximidade.

Um *brainstorming* foi conduzido para avaliar os limites e aspectos dos departamentos quanto à relevância da proximidade entre os setores como a distância física entre os ambientes, controle da atmosfera do ambiente de trabalho, resíduos sólidos, contaminação das amostras e disposição espacial dos equipamentos. O resultado da análise nas seções de trabalho é mostrado na Figura 2 a seguir.

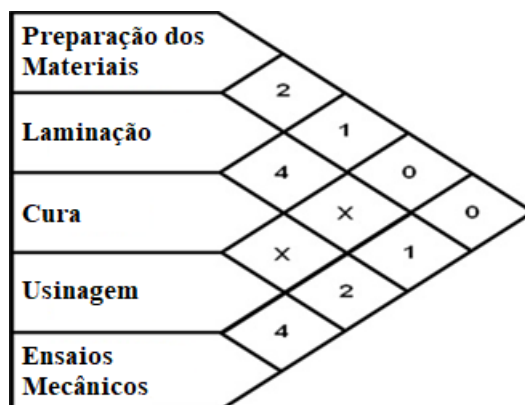


Figura 2. Análise da classificação de proximidade.

A análise de proximidade realizada mostrou que setores como *hand lay-up* e cura são indesejáveis para serem acompanhados do acabamento, pois os pós gerados pelo processo de acabamento podem contaminar o material. A deposição de partículas sólidas na superfície do laminado pode resultar em imperfeições e eventualmente contribuir para a criação de pontos de concentração de tensões. Esse fato pode prejudicar as propriedades mecânicas do material. No entanto, a proximidade entre os departamentos de laminação, cura e os ensaios mecânicos podem diminuir o *lead time* de produção. O layout que atende a todos os requisitos de pareamento de departamentos com classificação de proximidade foi desenvolvido e pode ser representado na Figura 3 abaixo.

Usinagem	Ensaio Mecânicos	Cura
	Preparação de Materiais	Laminação

Figura 3. O layout ideal.

A unidade de fabricação idealizada para o presente trabalho visa abranger o processo de transformação de compósitos independentes de sua constituição estrutural. Como o centro fabril será instalado dentro de uma universidade, para o desenvolvimento de compósitos de alto desempenho, os departamentos de produção devem ser flexíveis de forma a comportar a produção de compósitos compostos por diversos materiais, onde a matriz é sempre um material polimérico e o reforço podendo ser de origem metálico, polimérico, cerâmico, vegetal ou híbrido.

A organização estrutural que se deseja obter no compósito pode interferir no processamento, como o compósito também pode passar por diversos tipos de processamento de forma a atender as normas ASTM, referente aos esforços que serão estudados. Dessa forma, a sequência de produção de um compósito de matriz polimérica e reforço cerâmico, por exemplo, pode ser alterada de um lote para o outro. O material pode ser laminado por diferentes métodos como a pultrusão, *resin transfer molding*, *hand lay-up* e *compression molding*. Esta variabilidade no processamento pode alterar as propriedades de resposta do material a um determinado esforço. O fluxo produtivo pode seguir uma sequência representada pela Tabela 2, analisado a seguir.

FLUXO DA PRODUÇÃO					
ORIGEM	CONSTITUIÇÃO		PROCESSAMENTO (LAMINAÇÃO)	CURA	ENSAIOS MECÂNICOS
	MATRIZ	REFORÇO			
Polimérico + Metálico	Resina	Ferro	Pultrusão	Autoclave	Compressão
	Epóxi	Aço			
	Resina	Bronze			
	Poliéster	Outros.			
Polimérico + Cerâmico	Resina	Vidro	<i>Resin Transfer Molding</i>	Estufa	Tração
	Epóxi	Kevlar			
	Resina	Aramida			
	Poliéster	Outros.			
Polimérico + Polimérico	Resina	Carbono	<i>Compression Molding</i>	Temperatura Ambiente.	Flexão
	Epóxi	Nylon			
	Resina	Poliamida			
	Poliéster	Outros.			
Polimérico + Orgânico	Resina	Sisal	<i>Hand Lay-up</i>	Temperatura Ambiente.	Impacto
	Epóxi	Juta			
	Resina	Piçava			
	Poliéster	Outros.			

Polimérico + Híbrido	Resina Epóxi	Uso de dois ou mais reforços diferentes.			FTIR
	Resina Poliéster				

Tabela 2. As possíveis sequências de processamento.

Podemos observar na Tabela 2, que a escolha do material, o método de processamento e o processo de cura podem interferir no desempenho dos materiais. Percebe-se, pela Tabela 2 que faltam duas etapas de produção que são a armazenagem e a usinagem dos materiais. Estas etapas não foram representadas por conta de sua continuidade, ou seja, os mesmos métodos são aplicados independente do material a ser trabalhado. Logo, estas etapas não interferem diretamente no desempenho dos materiais.

A fase de planejamento do layout físico usando o SLP consiste na determinação dos requisitos mínimos de espaço. Espera-se que os dados iniciais tenham sido analisados e o fluxograma e as cartas de inter-relações preferenciais estejam prontos para que se tenha uma melhor noção da divisão das atividades e conseqüentemente da divisão dos espaços [25].

O SLP demanda um estudo sobre espaço físico mínimo, fluxograma de fabricação, disposição espacial dos equipamentos, estudo ergonômico do fluxo de pessoas e fluxo de materiais para ser eficaz no planejamento do layout. O principal conflito foi o fluxo de materiais e pessoas. Foi necessário analisar os seguintes pontos: identificar o roteiro da seqüência de produção, o tempo dos materiais em cada oficina, deslocamento dos materiais, áreas de circulação, possibilidade de compartimentalização, hierarquização das atividades, movimentação de pessoal, tamanho dos equipamentos e instrumentos e trabalho físico no departamento de caracterização. Nas tarefas produtivas foram observadas a frequência, a repetitividade, as posturas ergonômicas, o tempo para realização das atividades e o número de funcionários por setor.

Limitações humanas na realização das atividades foram observadas e a disposição dos espaços dos equipamentos foi modificada para tornar confortável a movimentação ergonômica das pessoas. Do ponto de vista ergonômico, o foco principal é o trabalhador e as estações de trabalho foram projetadas para caber em cada posto de trabalho um funcionário e isso reduz o desperdício durante a produção. O ajuste para atender aos requisitos ergonômicos pode ser obtido, por exemplo, com cadeiras e apoios de pés ajustáveis em altura ou usando elevadores de caixas [26], mover contêineres para posições mais convenientes para os funcionários [27], [28].

As atividades nesse tipo de sistema de produção foram analisadas em três posições operacionais: em pé, sentado e inclinado. Os equipamentos, materiais e ferramentas foram alocados em cada etapa da produção na mesma oficina. Assim, a Tabela 3 abaixo mostra as dimensões do equipamento a ser utilizado nesta nova linha de produção.

Código da Etapa	Departamento	Posição Operação	Área (m ²)			Área Total (m ²)
			Equipamentos	Operação	Ampliação	
1	Preparação dos Materiais	Em Pé / Sentado	3,22	6,2	4	>13,42
2	Laminação	Em Pé	22,6	22,5	6	>51,1
3	Cura	Em Pé	10,8	7,5	6	>24,3
4	Usinagem	Em pé / Sentado / Inclinado	3,04	6,9	6	>15,94
5	Ensaio Mecânicos	Em Pé / Sentado	3,72	8,14	6	>17,86

Tabela 3. Área mínima dos departamentos.

A Tabela 3 mostra que nos departamentos onde a atividade operacional é mais intensa, os valores são maiores em área do que a área do próprio equipamento. O espaço de trabalho para o operador realizar as tarefas deve proporcionar conforto físico sem que haja perda de produtividade.

O fluxo ininterrupto de peças de trabalho concluídas é o resultado desejado de oficinas enxutas projetadas adequadamente. A solução otimizada do fluxo de materiais é uma tarefa central principalmente porque esta é uma fonte potencial de economia de tempo e também porque para atingir o objetivo em ser “lean” está associado à necessidade de minimizar o espaço e a ociosidade no local de trabalho, bem como sincronizar o transporte de peças entre células de trabalho [29].

O layout ótimo do posto de trabalho, tão quanto a possibilidade de alteração, é um aspecto importante para converter os procedimentos de montagem, e promoção de alterações de sua organização no trabalho operacional. O layout flexível é um recurso que permite modificar a tarefa de montagem e ajustar o fluxo de material de acordo com as condições alteradas, onde o espaço significativo pode ser otimizado com o dimensionamento adequado das estações de trabalho.

A utilização do conhecimento obtido com o fluxograma de fabricação, classificação de proximidade, layout ideal e arranjo de espaço mínimo, foi aplicado para o desenvolvimento do arranjo de espaço do layout das oficinas conforme a Figura 4.

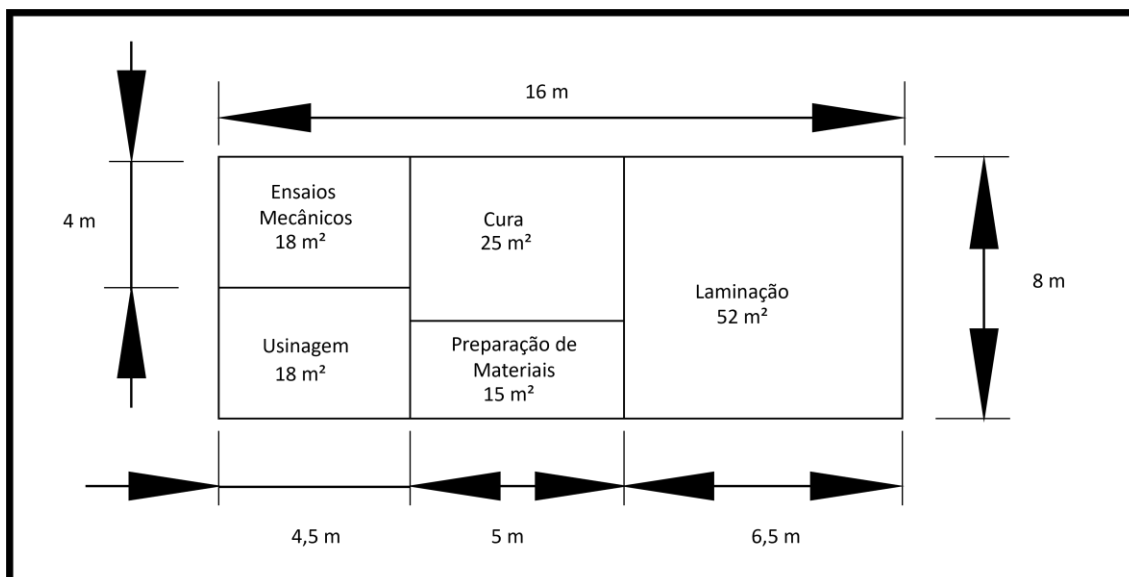


Figura 4. Dimensão e layout dos departamentos de trabalho.

3.2 Determinação do Tempo Padrão

Os tempos e movimentos de produção foram estudados adotando a *hand lay-up* para processamento de resina de poliéster e fibra de vidro passando pela cura em estufa e ensaio não destrutivo de dureza Rockwell 15T.

O tempo padrão de uma unidade produzida permite a compreensão dos dados para custeio e balanceamento das linhas de produção, o que permite a inferência sobre a possibilidade de redução da ociosidade do fluxo produtivo [30]. O tempo padrão (TP) é obtido multiplicando-se o tempo normal (TN) pela tolerância à fadiga (TF), conforme expressão $TP = TN \times TF$. O FT no percentual de tempo p concedido em relação ao tempo de trabalho diário é determinado pela expressão $FT = 1 / (1-p)$.

O tempo normal (TN) é obtido multiplicando o tempo médio (TM) pela velocidade (V) através da expressão $TN = TM \times V$, onde “n” é calculado a partir dos tempos médios obtidos (TM) e a velocidade é determinada subjetivamente pelo cronometrista. O trabalho consiste na produção de 8 produtos por lotes e são adicionados tempos de preparação e acabamentos. Utilizando a fórmula $TPP = (n \times TS) + p \times (\sum TP) + (f \times TF)$, onde n é o número de setups que devem ser feitos, TS o tempo padrão por setup, p o número de peças por lote, TP o tempo padrão por operação, f é o número de envios a serem feitos e TF o tempo padrão das atividades de finalização. Foram adotados para o presente trabalho os valores de $p = 15\%$ e $V = 95\%$, os valores foram obtidos conforme a Tabela 4 abaixo:

Descrição da Etapa	Tempo Padrão (h)	Quantidade Produtos	Tempo Setup (h)	Número Setups	Tempo Finalização (h)	Número Finalizações	Tempo Padrão Produto (h)
Preparação dos Materiais	1,09	1	0,2	1	0,2	1	1,49
Laminação	1,64	1	0,15	1	0,41	1	2,2
Cura	48	1	0,1	1	0,08	1	48,18
Usinagem	0,55	8	0,25	1	0,17	1	4,82
Ensaio Mecânicos	0,27	8	0,33	1	0,17	1	2,66
Tempo Padrão Total da Produção (h)							59,35

Tabela 4. Estágios de produção e o tempo padrão das etapas e do lote com 8 unidades.

3.3 Teste de Indentação Rockwell 15T

Notamos que o gargalo da produção estava no departamento de cura, em torno de 48h, aumentando o tempo total de produção dos corpos de prova. Para otimizar o tempo total de produção foram realizados três experimentos variando a temperatura e o tempo de cura. Os valores de dureza superficial no teste Rockwell 15T foram utilizados para validar a modificação dos procedimentos. Algumas imagens do processo de produção de amostras e teste de dureza Rockwell 15T são mostradas na Figura 5.

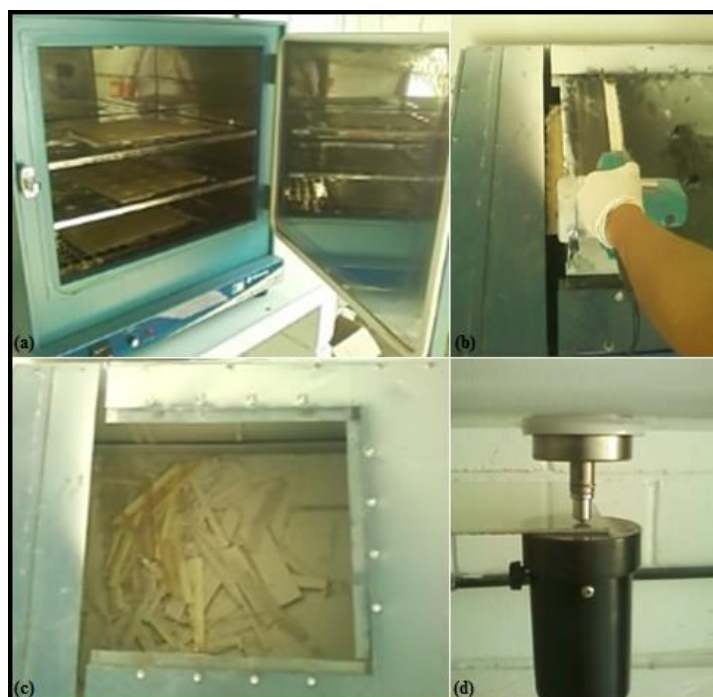


Figura 5. O processo de produção e análise dos laminados compósitos.

3.4 As Melhorias de Qualidade e a Redução do Tempo Padrão

A primeira análise foi a correlação entre a dureza superficial do material e o grau de polimerização da resina. O tempo de cura foi mantido constante em 48h e a faixa de temperatura de cura variou de 40°C a 140°C. Foram realizadas 18 medições para cada CP fabricado, chegando ao seguinte gráfico na Figura 5.

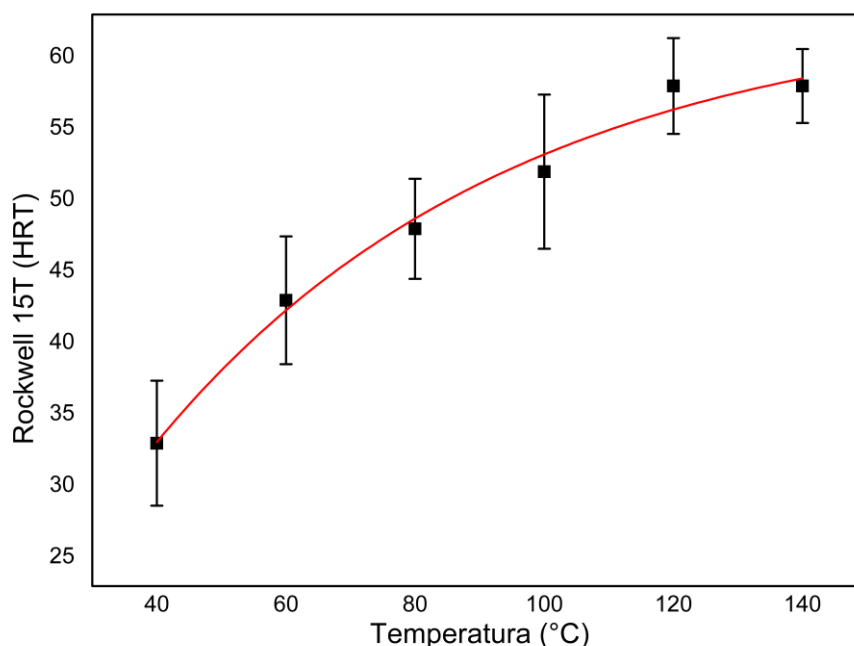


Figura 5. Dureza Rockwell 15T versus temperatura de cura no tempo de 48h.

O gráfico mostra um aumento substancial da dureza da superfície do laminado compósito de 40°C para 60°C. Isso indica que o material não foi completamente curado abaixo de 60°C. A faixa de temperatura de 60 a 100°C apresentou comportamento de dureza relativamente constante. A estabilização da dureza em torno de 55 HRT indica que a cura do material pode estar em torno deste valor. Acima de 120°C, observando o ângulo da curva, pode indicar que acima desta faixa de temperatura o material pode estar em alto grau de polimerização. O aumento da rigidez do material indica que o material pode estar perdendo sua ductilidade, o que o torna mais rígido, porém mais frágil e sujeito à fadiga. A perda de material em ductilidade e flexibilidade não é desejada no desenvolvimento deste material.

Uma inspeção visual foi realizada nos laminados indicando elevada polimerização e degradação do material. Aumentando a temperatura acima de 100 °C foi observado o amarelamento do material que pode ser causado pela saturação do polímero reticulado. Essa

é uma característica da resina termofixa. A Figura 6 mostra a variação do amarelamento do material em função da temperatura.

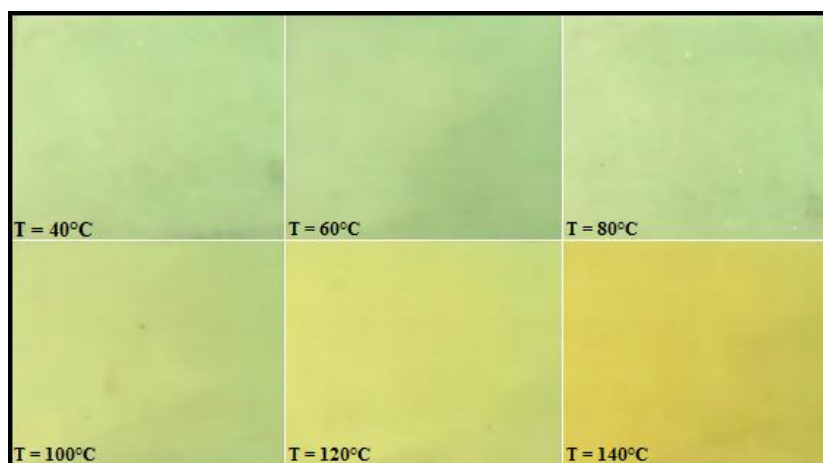


Figura 6. Os laminados amarelando em função da temperatura.

Determinado o parâmetro de dureza para o ponto de cura do material para uma faixa de 45 a 50 HRT, a dureza dos compósitos foi estudada em função do tempo a temperaturas constantes de 60°C e 80°C. O objetivo deste estudo foi reduzir o tempo de cura do material, que é o gargalo do processo. Para uma temperatura constante de 60°C, o tempo para atingir a cura total do laminado foi de 36 horas. Isso significa que para a temperatura constante de 60°C usando um tempo de cura inferior a 36 horas não é suficiente para a cura completa do material. Observa-se que acima de 72h há um aumento e estabilização na dureza superficial podendo significar a fragilização do material por degradação. O tempo de cura foi identificado entre 36h e 72h, porém recomenda-se adotar um tempo próximo a 36h para eliminar os gastos com energia que não agregam valor ao produto. Não houve aumento significativo da dureza com o aumento do tempo acima de 92h a uma temperatura constante de 60 °C. A Figura 7 abaixo apresenta a dureza em função do tempo em T = 60°C.

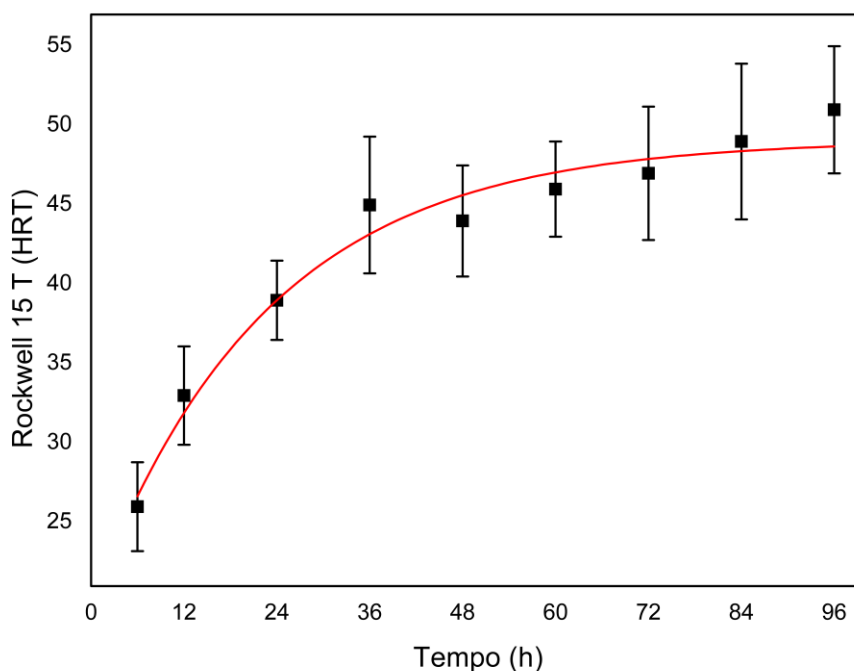


Figura 7. Gráfico da relação de dureza Rockwell 15T x Tempo (h) a $T = 60^{\circ}\text{C}$ constante.

O aumento da temperatura a 80°C mostrou a existência de uma redução muito significativa no tempo de cura sem perda de propriedades mecânicas. O tempo de cura obtido foi otimizado em 12h, o que significa uma redução de 25% do tempo necessário para a cura do material a $T = 40^{\circ}\text{C}$. A redução do tempo de produção no gargalo reduz o excesso de custos de energia e torna o processo de fabricação mais curto, podendo fornecer uma vantagem competitiva considerando a aplicação em escala industrial. Foi observado o comportamento de degradação do material a partir do tempo de cura acima de 24h, conforme o gráfico da Figura 8. Não houve aumento significativo da dureza acima de 92h com o aumento do tempo a uma temperatura constante de 80°C .

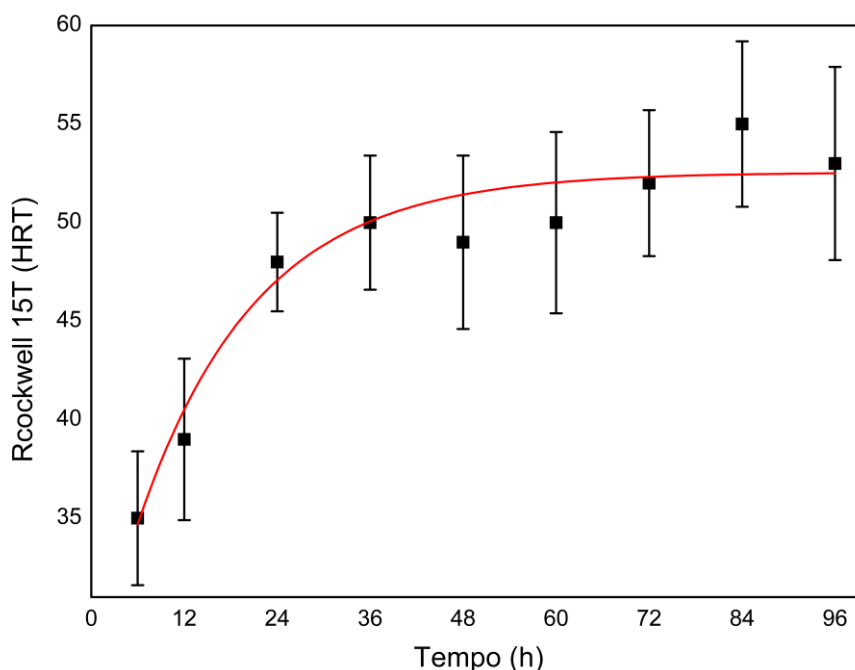


Figura 8. Gráfico da relação de dureza Rockwell 15T x Tempo (h) a $T = 60^{\circ}\text{C}$ constante.

Conclusões

O método SLP no planejamento de produtos fabricados com aplicação do *just in time* apresentou uma economia de tempo de produção em torno de 40%. A redução de desperdício de material, fibra e resina, para a produção do corpo de prova dentro da cadeia de suprimentos em torno de 10%. A padronização do grau de polimerização pelo teste não destrutivo Rockwell foi estabelecido para as temperaturas de cura a 60°C e a 80°C . Aumentando o tempo de cura, acima de 92h, tanto para 60°C quanto para 80°C não mostrou aumento significativo na dureza do material. Foi obtido uma redução muito significativa do tempo total do processo de fabricação entorno de 47 h a 60°C e de 35 h para temperatura a 80°C . A condução de estudos semelhantes realizados na indústria de compósitos poliméricos pode resultar em vantagens competitivas em escala industrial permitindo a economia de tempo, energia e custo de produção. Porém, os limites do tempo a temperatura de cura constante devem ser respeitados para garantir as propriedades mecânicas do material.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no financiamento do projeto de pesquisa 4050021/2021-6, e também a

Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), especificamente ao Laboratório de materiais e meio ambiente (LAMMA) por apoiar esta pesquisa científica, e a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), especificamente ao Laboratório de Engenharia de Superfícies (LES) pela disponibilidade da infraestrutura física e do corpo docente e discente.

Referências

- [1] A. J. Majumdar and R. W. Nurse, “Glass Fibre Reinforced Cement,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 15, pp. 107–127, 1974.
- [2] W. Callister Jr and S. Soares, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 5th ed. 2008.
- [3] S. S. Cheon, T. S. Lim, and D. G. Lee, “Impact energy absorption characteristics of glass fiber hybrid composites,” *Compos. Struct.*, vol. 46, no. 3, pp. 267–278, 1999.
- [4] O. Aluko, “Failure Analysis in Graphite Epoxy Composite Laminates,” *J. Mech. Enginering Autom.*, vol. 4, pp. 813–819, 2014.
- [5] P. S, S. KM, N. K, and S. S, “Fiber Reinforced Composites - A Review,” *J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 3, 2017.
- [6] Y. G. Kim, D. G. Lee, and P. K. Oh, “Manufacturing of the composite screw rotors by resin transfer molding,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 48, no. 1–4, pp. 641–647, 1995.
- [7] N. K. Naik, M. Sirisha, and A. Inani, “Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 65, pp. 22–40, 2014.
- [8] M. S. Irfan *et al.*, “A modified pultrusion process,” *J. Compos. Mater.*, vol. 51, no. 13, pp. 1925–1941, 2017.
- [9] C.-Y. Chang, “Simulation of Mold Filling in Simultaneous Resin Injection/Compression Molding,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 25, no. 12, pp. 1255–1268, 2006.
- [10] A. Endruweit, S. Gehrig, and P. Ermanni, “Mechanisms of hydrodynamically induced in-plane deformation of reinforcement textiles in resin injection processes,” *J. Compos. Mater.*, vol. 37, no. 18, pp. 1675–1692, 2003.
- [11] B. Xiao, Y. Yang, X. Wu, M. Liao, R. Nishida, and H. Hamada, “Hybrid laminated composites molded by spray lay-up process,” *Fibers Polym.*, vol. 16, no. 8, pp. 1759–1765, 2015.
- [12] S. V. Hoa, W. S. Berczynski, and T. S. Sankar, “Buckling of Hand Lay Up Composite Cylindrical Vessel,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 4, no. 2, pp. 162–172, 1985.
- [13] A. G. Dutton, P. A. Bonnet, P. Hogg, and Y. L. Lleong, “Novel materials and modelling for large wind turbine blades,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 224, no. 2, pp. 203–210, 2010.
- [14] P. D. Clausen and D. H. Wood, “Recent Advances in Small Wind Turbine Technology,” *Wind Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 189–201, 2000.
- [15] O. T. Thomsen, “Sandwich Materials for Wind Turbine Blades — Present and Future,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 11, no. 1, pp. 7–26, 2009.

- [16] D. Modi, N. Correia, M. Johnson, A. Long, C. Rudd, and F. Robitaille, “Active control of the vacuum infusion process,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 5, pp. 1271–1287, 2007.
- [17] E. Sevkat, B. Liaw, F. Delale, and B. B. Raju, “Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 8, pp. 1090–1110, 2009.
- [18] K. Zhang, Y. Gu, M. li, and Z. Zhang, “Effect of rapid curing process on the properties of carbon fiber/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding,” *Mater. Des.*, vol. 54, pp. 624–631, 2014.
- [19] V. C. Ruschel, H. P. Maia, E. Araújo, and C. N. Sousa, “Effect of autoclaving on action of polishing systems on the surface roughness of a composite resin,” *J. Mater. Sci. Eng. A*, vol. 3, no. 4, pp. 120–125, 2014.
- [20] N. Gaither and G. Frazier, *Production Management and Operations*. São Paulo: Pioners, 2002.
- [21] Y. Moden, *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [22] N. Vidakis, A. Antoniadis, and N. Bilalis, “The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 143–144, no. 1, pp. 481–485, 2003.
- [23] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- [24] S. C. Tan, *Stress Concentrations in Laminated Composites*. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1994.
- [25] J. P. WOMACK, *Lean Thinking in Business: eliminate waste and create wealth*. Rio de Janeiro: Campus, 1998.
- [26] K. Senderská, A. Lesková, and A. Mares, “Design Characteristics of Manual Assembly Workstation System,” *J. Prod. Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 87–92, 2013.
- [27] V. Rudy, “Methods and techniques used in processing of assembly equipment models in machinery manufacturing,” *Sovrem. naučnyj vestnik.*, vol. 29, pp. 46–53, 2008.
- [28] V. Rudy and J. Kováč, “Innovation methods of model design of structures of production systems,” *In: Oraldyn, fylym žaršyzy.*, vol. 15, no. 7, pp. 47–51, 2008.
- [29] S. Cvetkovič, “Modeliranje i upravljanje logističkim sistemom,” *In. "VIII međunarodna naučno-stručna Konf. MMA 2003.*, vol. 4, p. 96, 2003.
- [30] R. MUTHER, *Planejamento do layout: sistema SLP.*, Edgar Blüch. São Paulo: Cahners Books, 1978.

Submetido em: 02.05.2023

Aceito em: 06.06.2023