

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

JONAS SAMUEL DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO E INFUSÃO A VÁCUO PARA
O PROJETO DE EXTENSÃO NAVÍCULA BOAT DESIGN

Recife

2021

JONAS SAMUEL DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO E INFUSÃO A VÁCUO PARA
O PROJETO DE EXTENSÃO NAVÍCULA BOAT DESIGN

Trabalho de Conclusão de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: César Augusto Salhua Moreno

Recife

2021

Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Tecnologias e Geociências - Departamento de Engenharia Mecânica

DEMEC - CTG – UFPE

DESENVOLVIMENTO DOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO E INFUSÃO A VÁCUO PARA
O PROJETO DE EXTENSÃO NAVÍCULA BOAT DESIGN

Jonas Samuel da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologias e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval.

Aprovado por:

Prof. César Augusto Salhua Moreno, D.Sc.
(Orientador – UFPE)

Profa. Luciete Alves Bezerra
(Examinador interno – UFPE)

Eng. Mário Marques Xavier Neto
(Examinador externo – Aeris Energy)

Eng. Bruno Henrique Sampaio Colares
(Examinador externo – Aeris Energy)

Recife, Pernambuco – Brasil

Dezembro, 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo incentivo, por toda ajuda e apoio incondicional.

A Universidade Federal de Pernambuco por ter me proporcionado um ensino de qualidade, com conhecimentos que serão necessários na provisão e levados por toda a vida.

Agradeço ao meu orientador professor César Augusto Salhua Moreno, por ter me motivado a trabalhar neste tema, pela paciência, orientação e amizade. Também por toda a contribuição com relação a materiais e equipamentos utilizados do Laboratório de Manufatura Naval (LABMAN).

Aos amigos que me ajudaram e estiveram disponíveis nos momentos que mais precisei.

Ao projeto de extensão Navícula Boat Design, por todas as aventuras vividas, pelo aprendizado e desenvolvimento técnico e pessoal.

“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado”

(J. R. R. Tolkien)

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Tecnologias e Geociências / UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval.

DESENVOLVIMENTO DOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO E INFUSÃO A VÁCUO PARA O PROJETO DE EXTENSÃO NAVÍCULA BOAT DESIGN

Jonas Samuel da Silva

Orientador: César Augusto Salhua Moreno

Curso: Engenharia Naval

O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver os processos de laminação e infusão a vácuo, empregando fibra de vidro, para ser utilizado no projeto de extensão Navícula Boat Design, possibilitando construir embarcações com menor peso e, portanto, melhor desempenho em provas de alta velocidade. Esses métodos apresentam resultados superiores em vários aspectos, quando comparado com processos mais convencionais, como a laminação manual. Serão abordados os materiais utilizados, as diferenças entre os dois processos, os equipamentos, a construção do molde e a preparação para a realização desses métodos. Neste trabalho foram feitos cascos utilizando os processos de laminação a vácuo e de infusão de um modelo em escala 1:2 de um rebocador radiocontrolado, para que possa ser utilizado como um guia para futuros projetos. Mostra-se o procedimento e execução dos testes para ter noção do tempo necessário para a infusão e determinação da permeabilidade utilizando a lei de Darcy. Realizou-se também simulações CFD para verificar o comportamento aproximado do processo de infusão de resina, para desta forma prever possíveis problemas.

Palavras-chave: Infusão a vácuo. Laminação a vácuo. Permeabilidade. CFD.

Abstract of Undergraduate Conclusion Thesis presented at the Centre of Technologies and Geosciences / UFPE as partial fulfillment of the requirements for the degree of Naval Engineer.

DEVELOPMENT OF VACUUM LAMINATION AND INFUSION PROCESSES FOR THE NAVÍCULA BOAT DESIGN EXTENSION PROJECT

Jonas Samuel da Silva

Supervisor: César Augusto Salhua Moreno

Course: Naval Engineering

The main objective of the present work is to develop the processes of lamination and vacuum infusion, using fiberglass, to be used in the Navícula Boat Design extension project, making it possible to build vessels with less weight and, therefore, better performance in high-speed tests. These methods show superior results in several aspects when compared to more conventional processes such as manual lamination. The materials used, the differences between the two processes, the equipment, the construction of the mold and the preparation for carrying out these methods will be shown. In this work, hulls were made using the vacuum lamination and infusion processes of a 1:2 scale model of a radio-controlled tugboat, so that it can be used as a guide for future projects. The procedure and execution of the tests are shown to get an idea of the time needed for the infusion and determination of permeability using Darcy's law. CFD simulations were also carried out to verify the approximate behavior of the resin infusion process, in order to predict possible problems.

Keywords: Vacuum infusion. Vacuum bag. Permeability. CFD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resistência a tração.	19
Figura 2 - Comparação de Teor de Fibra.	20
Figura 3 - Spray-Up.	21
Figura 4 - Laminação manual.	22
Figura 5 - Resin Transfer Molding (RTM).	22
Figura 6 - Pá eólica.....	23
Figura 7 - Processo LRTM.	24
Figura 8 - Exemplo esquemático do Processo de Filament Widing.	25
Figura 9 - Laminação a vácuo.	25
Figura 10 - Esquema básico da infusão a vácuo.....	27
Figura 11 - Prepeg de fibras de carbono.	28
Figura 12 - Automated Fiber Placemete.	29
Figura 13 - Gráfico comparativo da densidade superficial das placas de acordo com o tipo de fabricação.	30
Figura 14 - Resistência à tração das chapas de acordo com o tipo de fabricação. ..	31
Figura 15 - Escoamento Unidirecional.	36
Figura 16 - Escoamento Radial.	37
Figura 17 - Equipe Navícula Boat Design.....	38
Figura 18 - Equipe Lampião.....	39
Figura 19 - Equipe que participou do Hydrocontest 2018.	40
Figura 20 - Embarcações do Navícula Boat Design participando das competições.	40
Figura 21 – Tecido utilizado (R83P).	42
Figura 22 – Manta (300g/m ²).	43
Figura 23 – Consumíveis.....	46
Figura 24 - Adaptação na entrada de resina	48
Figura 25 - Esquema para a infusão.	49
Figura 26 - Esquema para a laminação a vácuo.	49
Figura 27 - Massa de modelar aplicada.	50
Figura 28 - Imagem externa do reservatório.	51
Figura 29 - Parte interna do reservatório.	52
Figura 30 - Reservatório com a tampa.	53
Figura 31 - Conexões na tampa.	53
Figura 32 - Equipamentos principais para a laminação a vácuo e a infusão a vácuo.	54
Figura 33 – Lampião.....	55
Figura 34 - Geometria do Lampião.	55
Figura 35 - Planejamento da estrutura.	57
Figura 36 - Estrutura pronta para ser impressa.	57
Figura 37 - Preparação para o corte.....	58
Figura 38 - Furos para facilitar os cortes.	58
Figura 39 - Estrutura costada.	59

Figura 40 - Estrutura montada.	59
Figura 41 – Superfície de papelão.	60
Figura 42 - Imagem do casco com fibra de vidro.	61
Figura 43 - Imagem da fibra aplicada na parte interna.	62
Figura 44 - Imagem interna.	62
Figura 45 - Modelo lixado.	63
Figura 46 - Acabamento finalizado.	64
Figura 47 - Preparação para construir o molde.	65
Figura 48 - Aplicação da massa de modelar.	65
Figura 49 - Imagem superfície polida.	66
Figura 50 - Aplicação do gel-coat.	67
Figura 51 - Fibra de vidro aplicada.	68
Figura 52 – Molde.	68
Figura 53 - Molde pronto.	69
Figura 54 - Gel-coat para molde laranja.	69
Figura 55 - Esquema da laminação.	72
Figura 56 - Materiais cortados.	73
Figura 57 - Teste com placa plana.	73
Figura 58 - Termômetro infravermelho.	74
Figura 59 - Resultado da infusão da placa.	75
Figura 60 - Organizando o laminado.	77
Figura 61 - Colocando os consumíveis.	77
Figura 62 - Tudo pronto para a infusão.	78
Figura 63 - Detector de vazamento ultrassônico.	78
Figura 64 - Frente de resina na infusão do casco.	79
Figura 65 - Laminado prestes a ser desmoldado.	80
Figura 66 - Retirando o peel ply e a malha de infusão.	81
Figura 67 - Dimensões da placa em mm.	82
Figura 68 – Comparação entre CFD e infusão de teste utilizando água.	84
Figura 69 - Simulação da infusão (Placa plana).	85
Figura 70 - Geometria do casco.	86
Figura 71 - Simulação da infusão do casco.	88
Figura 72 - Disposição dos materiais para a laminação a vácuo.	89
Figura 73 - Laminação a vácuo.	90
Figura 74 - Resultado da Infusão 1.	91
Figura 75 - Resultado da Infusão 2.	92
Figura 76 - Resultado da laminação a vácuo.	93
Figura 77 - Comparação infusão da placa com CFD.	96
Figura 78 - Comparação da infusão do casco com CFD.	97
Figura 79 - Configurações gerais.	107
Figura 80 - Criando o fluido resina.	108
Figura 81 - Modelo de simulação.	109
Figura 82 – Fases.	110
Figura 83 – Porosidade.	111

Figura 84 – Permeabilidade.	111
Figura 85 - Condições de contorno da mistura.	112
Figura 86 - Condições de contorno da resina.	113
Figura 87 - Condições de operação.	113
Figura 88 - Inicialização.	114
Figura 89 – Salvar automaticamente.	115
Figura 90 – Contorno.	115
Figura 91 - Definições de animação.	116
Figura 92 - Configurações finais.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa da fibra, massa da resina, massa total e fração de fibras das placas de acordo com o tipo de fabricação.	31
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da infusão.	32
Tabela 3 - Principais dimensões geométricas do casco (escala 1:2).	56
Tabela 4 - Cálculo da porosidade.	70
Tabela 5 - Plano de laminação.	71
Tabela 6 - Dados da placa.	74
Tabela 7 - Permeabilidade do laminado.	75
Tabela 8 - Permeabilidade do casco.	80
Tabela 9 - Teste de convergência da malha da placa.	82
Tabela 10 - Malha da placa.	83
Tabela 11 - Métricas da malha da placa.	83
Tabela 12 - Tabela dos dados usados no Fluent (Placa).	84
Tabela 13 - Teste de convergência da malha do casco.	86
Tabela 14 - Malha do casco.	86
Tabela 15 - Métricas da malha do casco.	87
Tabela 16 - Dados da simulação do casco.	87
Tabela 17 - Custo de produção do casco em cada processo.	94
Tabela 18 - Comparação do teor de fibra.	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Breve história da laminação com compósitos	17
3.2	Principais tipos de processos	18
3.2.1	Spray-Up	20
3.2.2	Laminação Manual	21
3.2.3	Resin Transfer Molding (RTM)	22
3.2.4	Filament Widing	24
3.2.5	Laminação a Vácuo (Vacuum Bagging)	25
3.2.6	Infusão a Vácuo	26
3.2.7	Prepregs	27
3.2.8	Automated Fiber Placemete - AFP	28
3.3	Comparação dos processos mais utilizados na indústria náutica	29
3.4	Vantagens e desvantagens dos processos de laminação e infusão a vácuo	32
3.5	Equações do escoamento no processo de infusão	33
3.5.1	Permeabilidade	33
3.5.2	Escoamento	33
3.5.3	Velocidade da frente de escoamento	35
3.5.4	Escoamento Unidirecional	36
3.5.5	Escoamento Radial	37
4	EQUIPE NAVÍCULA BOAT DESIGN	38
4.1	Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA)	38
4.2	Hydrocontest	39
5	METODOLOGIA	41
5.1	Materiais compósitos usados	41
5.1.1	Reforço de fibra de vidro	41
5.1.1.1	Tecido	41
5.1.1.2	Manta	42
5.1.2	Resina poliéster insaturada	43
5.1.3	Resina epóxi (ou epoxy)	44
5.2	Consumíveis utilizados	45

5.2.1	Tacky tape	46
5.2.2	Peel ply	46
5.2.3	Malha de infusão (flow media ou air flow)	47
5.2.4	Filme de vácuo (plástico de vácuo ou bolsa de vácuo)	47
5.2.5	Breather	47
5.2.6	Mangueiras e conexões	47
5.3	Descrição dos sistemas usados	48
5.4	Reservatório de vácuo	50
5.5	Construção do molde de um casco em escala reduzida	54
5.5.1	Geometria	54
5.5.2	Construção do casco (positivo ou plug)	56
5.5.3	Construção do molde	64
6	LAMINAÇÃO DE UM CASCO POR INFUSÃO A VÁCUO	70
6.1	Infusão em uma placa	71
6.1.1	Determinação da permeabilidade	71
6.1.2	Plano de laminação	71
6.2	Infusão a vácuo do casco	76
6.2.1	Preparação dos equipamentos para a infusão do casco	76
6.2.2	Infusão	79
6.2.3	Retirada do molde	80
6.3	Simulação com CFD	81
7	LAMINANDO UM CASCO POR LAMINAÇÃO A VÁCUO	89
7.1	Procedimentos iniciais	89
7.2	Laminação a vácuo	89
8	RESULTADOS E DISCUSÕES	91
8.1	Cascos obtidos	91
8.2	Custos	94
8.3	Teor de fibra	95
8.4	Comparação com a simulação	95
8.5	Sugestões	98
9	CONCLUSÕES	99
10	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	103
	ANEXO A – INTEGRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE DARCY	105
	ANEXO B – CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO NO FLUENT	107

1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, o homem procura otimizar os materiais utilizados nos variados aspectos da vida, e foi a partir dessa busca e com o avanço da tecnologia que surgiram os materiais compósitos utilizados hoje. Estes materiais se caracterizam por apresentar altas propriedades mecânicas e baixo peso estrutural. Podendo substituir o aço e o alumínio em muitas aplicações navais, com destaque para a fibra de vidro que além de ser um produto bastante versátil, apresenta um custo bem mais baixo, quando comparado com a fibra de carbono e a aramida.

As embarcações de alto desempenho se caracterizam por atingir altas velocidades. Para a fabricação destas, geralmente busca-se por materiais leves, que proporcionam maior velocidade para uma mesma potência. Os materiais compósitos servem muito bem a esse propósito, uma vez que unem leveza e resistência mecânica. Aliado com a laminação a vácuo e a infusão, é possível otimizar ainda mais essas características, com laminados mais leves e mais resistentes.

A indústria náutica de embarcações de recreação tem buscado maneiras de se tornar mais eficiente, produzindo produtos de alta qualidade, com menos riscos para os funcionários e com menos danos ao meio ambiente (NASSEH, 2021). Por isso, os processos de laminação e infusão a vácuo têm ganhado cada vez mais espaço, frente ao processo de laminação manual.

A laminação manual apresenta alguns problemas em uma produção em série, principalmente pela falta de padrão na construção de um mesmo tipo de produto, uma vez que a qualidade do laminado depende das habilidades de cada laminador. Com isso, não é incomum encontrar em laminados processados de forma manual regiões onde a espessura é maior e outras onde a espessura é menor, devido a variação na quantidade de resina aplicada em locais diferentes. (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Visando evitar esse tipo de problema, tem crescido o interesse nos processos de laminação utilizando vácuo. A laminação à vácuo já traz bastante melhorias nesse sentido, por ser praticamente uma evolução do processo de laminação manual. A peça laminada manualmente é vedada por um plástico (filme de vácuo) e submetida a uma pressão negativa. Com isso é possível obter uma peça mais homogênea do

ponto de vista da quantidade de resina, de espessura, e das propriedades mecânicas, pois o excesso de resina é retirado da peça.

Um processo superior de laminação é a infusão a vácuo, que além de apresentar todos os benefícios da laminação a vácuo, ainda é mais limpo, uma vez que não é mais necessário a laminação manual. Sendo assim, os funcionários têm seu contato com a resina reduzido drasticamente, evitando também que o ambiente de trabalho fique impregnado com os gases provenientes da resina, que muitas vezes apresentam um cheiro bastante incômodo. (RICHE; PABON; COHEN, 2007)

Com essas melhorias, fica mais propício preservar a saúde do laminador e as condições ambientais na empresa. Além de evitar desperdícios de materiais que precisam ser descartados, o que acontece com a rebarba gerada na laminação manual.

Testes mostram a relação de leveza e melhores propriedades mecânicas em laminados feitos com o processo de infusão a vácuo, quando comparados com a laminação manual e laminação a vácuo. O que mostra que esse processo é bastante promissor. (BITTENCOURT; DUTRA; TANCREDI, 2016)

Isso possibilitará embarcações com melhor acabamento, maior padronização, com melhor competitividade e que ao longo prazo trará economia nos custos de produção. O que permitirá melhorar o desempenho da equipe em competições de alto desempenho, onde o que está em jogo é a eficiência e a velocidade, e se destacar nesses aspectos. Também poderá ser bem visto pela indústria local, que em muitos casos tem seu processo de produção ainda manual, nem sequer utilizando a laminação a vácuo. Isso poderá gerar parcerias que podem beneficiar ambos os lados.

Porém, antes de laminar uma peça pelo processo de infusão em um plano de laminação diferente e sem dados prévios, é interessante fazer um teste para descobrir uma aproximação da permeabilidade do laminado usando a lei de Darcy. Este trabalho mostra um exemplo deste procedimento com um teste em uma placa com dimensões conhecidas e com o tempo de infusão registrado.

Com o auxílio do CFD também é possível prever o comportamento da resina durante a infusão, proporcionando a identificação de possíveis problemas ou locais onde será necessária uma nova entrada de resina, e se a frente de resina já avançou

até próximo do tempo de começar a se solidificar. Assim, é possível fazer um planejamento detalhado em peças maiores, onde são necessários mais linhas de vácuo e mais entradas de resina para que a infusão seja realizada corretamente. Pode-se também determinar a melhor combinação das linhas de resina e de vácuo, fazendo simulações diferentes.

No presente trabalho são mostrados os materiais utilizados nesses processos, detalhes dos equipamentos, exemplo de construção de um reservatório para o vácuo, como construir e preparar um casco em escala reduzida, o seu molde, e toda preparação para a montagem das linhas de vácuo e entrada de resina.

Finalmente, os resultados dos processos de laminação são apresentados, onde é possível observar os dados de cada casco e comparar as vantagens e desvantagens proporcionado por cada método. Mostra-se também a comparação feita entre as imagens dos processos de laminação por infusão realizados e dos seus respectivos modelos de CFD, para que seja observada a semelhança entre eles em um mesmo intervalo de tempo.

Os resultados obtidos neste trabalho servem para viabilizar melhorias nos processos de construção da equipe Navícula Boat Design. Esta equipe, formada em 2014, tem participado de competições nacionais e internacionais de embarcações de alto desempenho e rebocadores em escala reduzida, onde seus cascos são construídos pelo processo de laminação manual. Com o objetivo de melhorar seus processos de produção, a Navícula tem buscado por inovação ao incentivar a utilização dos processos utilizando vácuo.

2 OBJETIVOS

Nesta seção, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral propor uma metodologia de utilização dos processos de laminação e infusão a vácuo a fim de serem usada em futuras construções da equipe Navícula.

2.2 Objetivos específicos

Os tópicos desenvolvidos neste trabalho a fim de atingir o objetivo geral, são os seguintes:

- Construir o reservatório de vácuo, equipamento essencial para os processos de laminação e infusão a vácuo.
- Definir o plano de laminação que será utilizado nos processos, a organização e as conexões entre os equipamentos.
- Fazer um teste preliminar do processo de infusão a vácuo em uma peça plana (placa), para obter informações iniciais.
- Laminar um casco de um modelo em escala reduzida de um barco utilizando o processo de infusão a vácuo e outro por laminação a vácuo.
- Fazer simulações dos processos de infusão realizados, utilizando o Ansys Fluent.
- Avaliar os resultados obtidos em cada processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são descritos diversos motivos que influenciaram o desenvolvimento e o uso de materiais compósitos, como a fibra de vidro com resina poliéster ou resina epóxi, utilizados no presente trabalho.

3.1 Breve história da laminação com compósitos

Durante a história, a humanidade vem buscando desenvolver ou descobrir materiais que se adequem melhor as suas necessidades, e os materiais compósitos contribuíram em vários aspectos a moldar o mundo em que vivemos.

Acredita-se que o primeiro uso de materiais compósitos foi feito pelos mesopotâmicos, por volta de 3400 a. C., onde se utilizava tiras de madeira em diferentes ângulos para criar uma espécie de compensado (MAR-BAL, 2015).

Pode-se citar também aos egípcios, que entre 2181 e 2055 a. C., usaram camadas de linho ou papiro juntamente com gesso para fazer máscaras mortuárias (MAR-BAL, 2015).

Por volta de 1500 a.C., construtores e artesãos egípcios e mesopotâmicos usavam palha para reforçar tijolos de barro, cerâmica e barcos (MAR-BAL, 2015).

Gerr (1999) faz uma analogia entre a fibra de vidro com a palha e a argila com a resina. Ele afirma que a fibra de vidro deriva de um princípio bastante antigo aplicado a construção de tijolos, este consistia em adicionar aproximadamente 2% de algum elemento como palha ou fibra em argila ou gesso, para torna-los mais resistentes. Adicionava-se palha a argila para unir as características desses dois materiais, tornando o tijolo muito mais resistente, sendo necessário apenas que uma certa proporção entre esses dois materiais fosse respeitada.

Em alguns momentos mais críticos da nossa civilização, a busca por materiais mais leves e resistentes se intensifica, como aconteceu durante a Segunda Guerra Mundial. Segundo Nasseh (2021), existiu uma grande demanda por aço que não conseguia ser suprida, sendo necessário buscar soluções alternativas. Ele afirma que foi nesse período que houve o desenvolvimento da tecnologia de fabricação dos

plásticos. Devido a isto, surgiram novas resinas, que se mostraram muito promissoras quando usadas como matrizes em materiais compósitos.

Houve uma busca por resinas que tivessem um comportamento estável, tendo em vista que as existentes apresentavam distorções e contração. Até que o químico Carlton Ellis produziu a resina poliéster em 1937 na Dupont, empresa em que trabalhava. A resina poliéster só pode ser moldada uma única vez, pois ela é termofixa. Diferentemente dos termoplásticos (poliestireno, polietileno e o cloreto polivinílico) que podem ser aquecidos e modificados para uma outra forma (NASSEH, 2021).

Nasseh (2021) diz que os ésteres são o resultado da reação entre ácidos e álcool, onde há eliminação de água. A resina poliéster é formada por um arranjo de repetições de ligações de ésteres. Na resina poliéster, é utilizado um catalizador para começar a polimerização, que é a reação em cadeia que promove a sua cura (de forma simplificada, a transformação da resina do estado líquido para o sólido). Ele também menciona que posteriormente a resina poliéster foi utilizada juntamente com um tecido de vidro, para fortalecer e servir como material estrutural. O princípio é parecido com o utilizado na construção civil com o concreto e barras de ferro, ou como a palha na argila, como já mencionado.

Depois da guerra houve o surgimento da fibra de carbono e aramida que tinham propriedades mecânicas melhores que as da fibra de vidro. Em seguida, surgiram outras resinas como a epóxi, e as estervinílicas (NASSEH, 2021).

Dessa forma, desde muito tempo, construtores, artesãos, fabricantes e engenheiros continuam na busca por compósitos para uma grande variedade de aplicações (MAR-BAL, 2015).

3.2 Principais tipos de processos

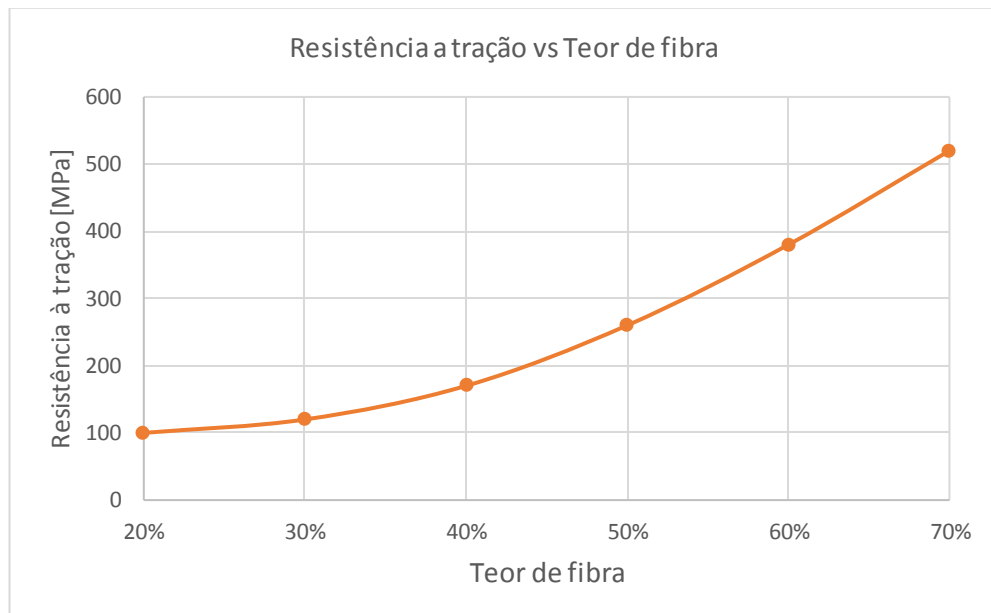
A seguir serão apresentados os principais processos de laminação usados atualmente na indústria e suas principais características.

Para escolher qual é o tipo de processo adequado para determinado trabalho, deve-se considerar os seguintes fatores (BARRACUDA COMPOSITES, 2021):

- Teor de Fibra
- Tipo de Peça
- Plano de Laminação
- Produtividade

A Figura 1 apresenta o gráfico que mostra a relação do teor de fibra com a resistência à tração do laminado.

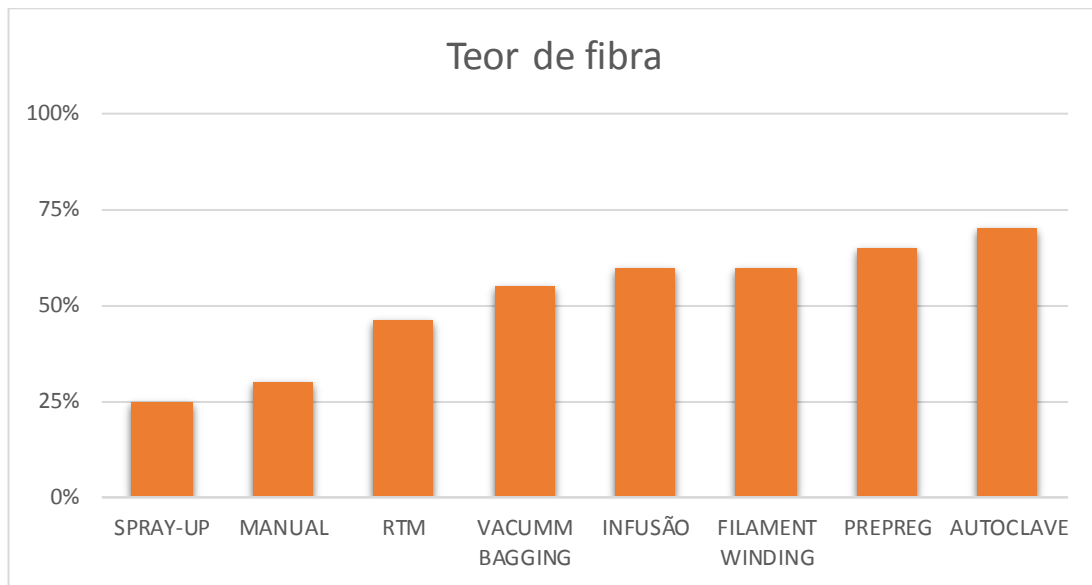
Figura 1 - Resistência a tração.



Fonte: Nasseh, 2007.

A Figura 2 mostra a relação do teor de fibra com o tipo de processo de laminação:

Figura 2 - Comparação de Teor de Fibra.



Fonte: Barracuda Composites, 2021.

O teor de fibra de um laminado exerce muito influência nas propriedades mecânicas. Em resumo, quanto maior o teor de fibra, melhor as propriedades mecânicas. Porém, é importante deixar claro que existe uma quantidade mínima de resina para manter as fibras unidas a cada tipo de reforço (NASSEH, 2007).

Assim, é importante conhecer um pouco sobre cada tipo de processo e quais as suas principais diferenças.

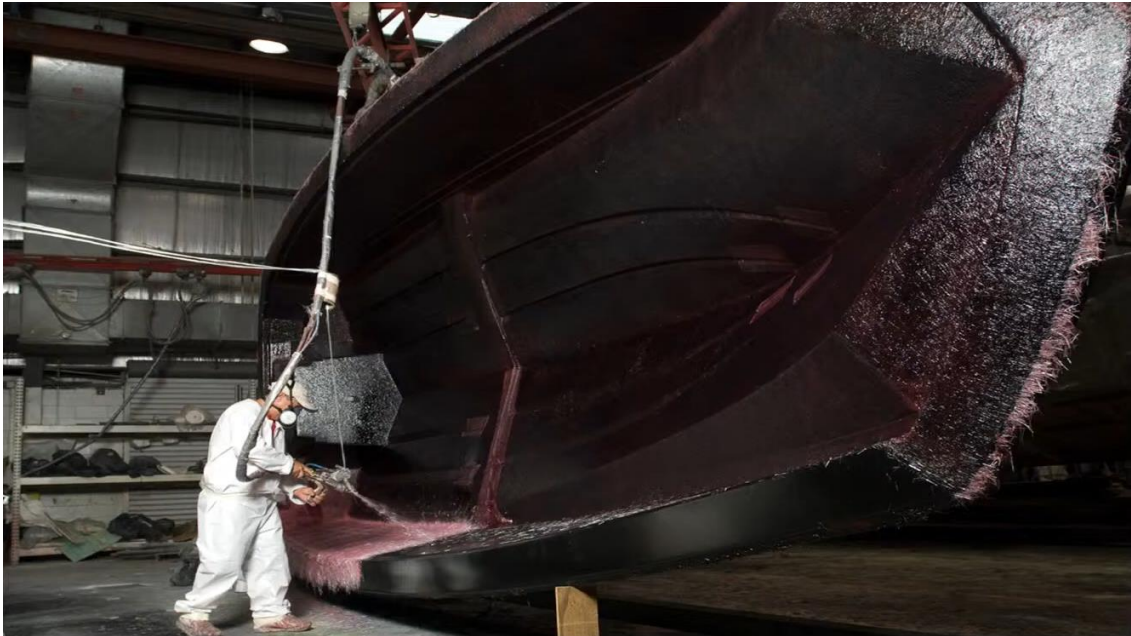
3.2.1 Spray-Up

É um processo que usa uma máquina que picota um fio de fibra de vidro que está armazenado em um rolo. Com uma pistola apropriada, esse fio é cortado e lançado para a direção desejada, juntamente com resina e catalizador (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Este processo precisa de mão de obra qualificada para operar a máquina picotadora e o laminado pode não ficar uniforme, com sua espessura podendo variar bastante. Por isso pode haver grande diferença no peso dos produtos fabricados por esse processo, sendo difícil manter um padrão. Quando manter um padrão não for

necessário, apresenta a vantagem de ser um processo rápido com um custo mais baixo. Porém, é um processo que gera muito desperdício (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 3 - Spray-Up.



Fonte: Barracuda Composites, 2021.

3.2.2 Laminação Manual

É o processo mais conhecido e mais simples, considerado a base dos processos de laminação. O laminador vai fazendo a impregnação da fibra com a resina utilizando trincha (pincel), rolinho ou compactador. Tem por volta de 40% de teor de fibra, sendo possível chegar a teores maiores, porém com um controle maior do processo. Este método depende muito das habilidades do laminador, principalmente quando o assunto é evitar desperdício de resina (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 4 - Laminação manual.

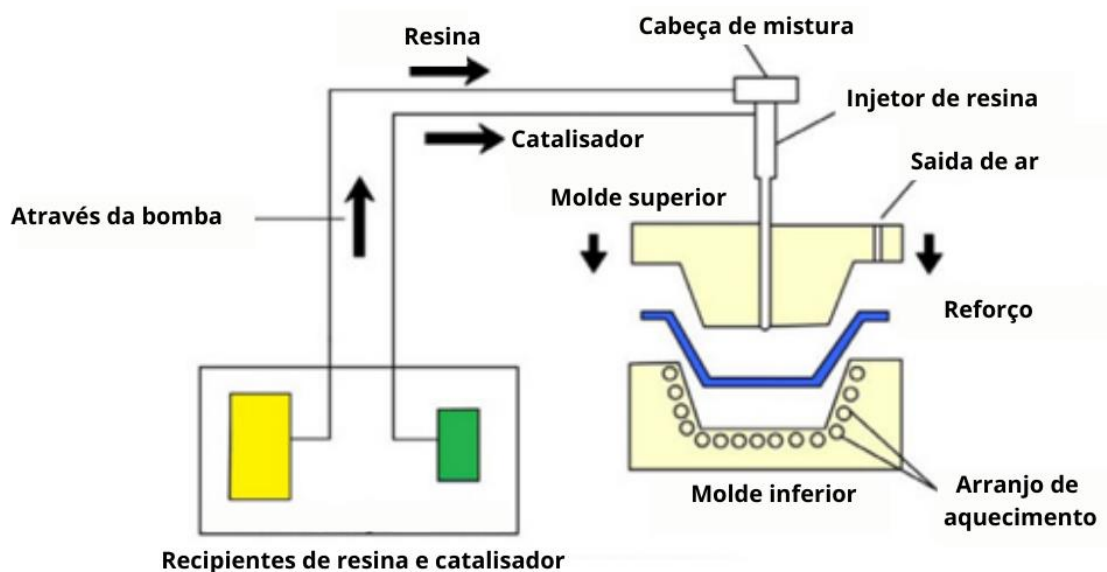


Fonte: Advanced Vaccum Hi - Tech Composites, 2021.

3.2.3 Resin Transfer Molding (RTM)

Existem vários tipos de processos RTM. O mais clássico é o que utiliza dois moldes (geralmente feitos em metal), fechados um contra o outro, onde é injetado resina com bastante pressão, impregnando assim o material que está dentro. A resina entra em uma bomba injetora para ser inserida no laminado (material que resultará na peça) entre os moldes (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 5 - Resin Transfer Molding (RTM).



Fonte: EPP Composites, 2021.

Esse processo é muito utilizado para a construção dos spinners de pás eólicas, pois ele garante boa uniformidade dimensional, o que é um fator importante para o balanceamento de peças que giram (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 6 - Pá eólica.

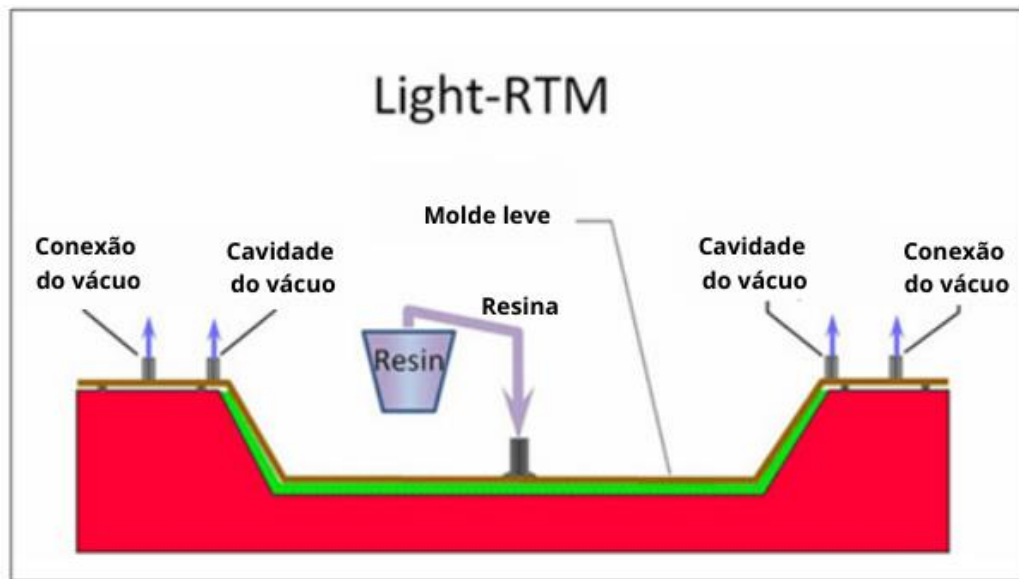


Fonte: imagem adaptada de [Steppinstars](#) por [Pixabay](#), 2021.

Entretanto, não é um processo indicado para alto volume de produção, além de os moldes metálicos apresentarem um alto custo (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Outro processo RTM bastante conhecido é o Light (LRTM), onde se usa moldes de fibra. A pressão interna neste caso é bem menor, uma vez que a resina é injetada por um lado e uma bomba de vácuo suga o ar do outro lado (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 7 - Processo LRTM.



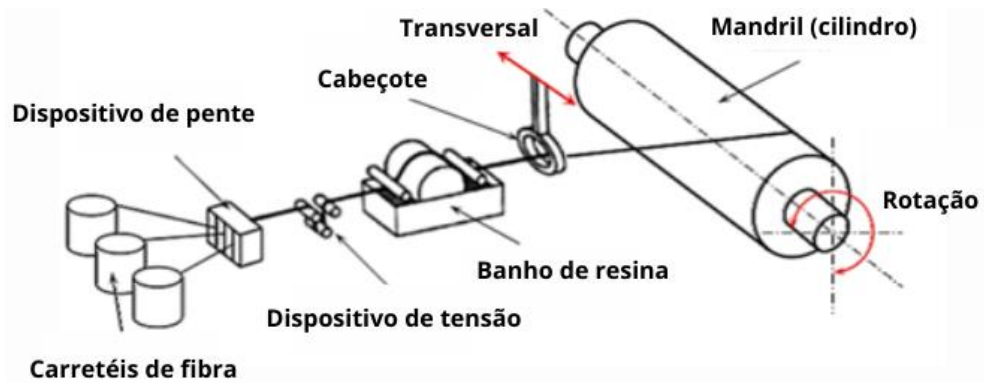
Fonte: Indutch, 2021.

O Ultra Light RTM é uma mistura do processo de RTM e de infusão a vácuo. Neste processo é possível utilizar material de núcleo (material usado na laminação para melhorar as propriedades mecânicas e a espessura do laminado, como por exemplo, divynycell, honeycomb de polipropileno, dentre outros), diferente dos processos RTM já mencionados que só permitem a utilização de material sólido, ou seja, sem material de núcleo (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

3.2.4 Filament Winding

Neste processo, um cilindro gira em determinada velocidade enquanto um cabeçote distribui uma faixa de fios em uma certa angulação, de acordo com o projeto estrutural feito. Essa angulação varia com a velocidade de rotação e com a velocidade de avanço do cabeçote. É um processo tecnológico e tem ganhado bastante mercado. É muito utilizado para produzir peças tubulares (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 8 - Exemplo esquemático do Processo de Filament Widing.



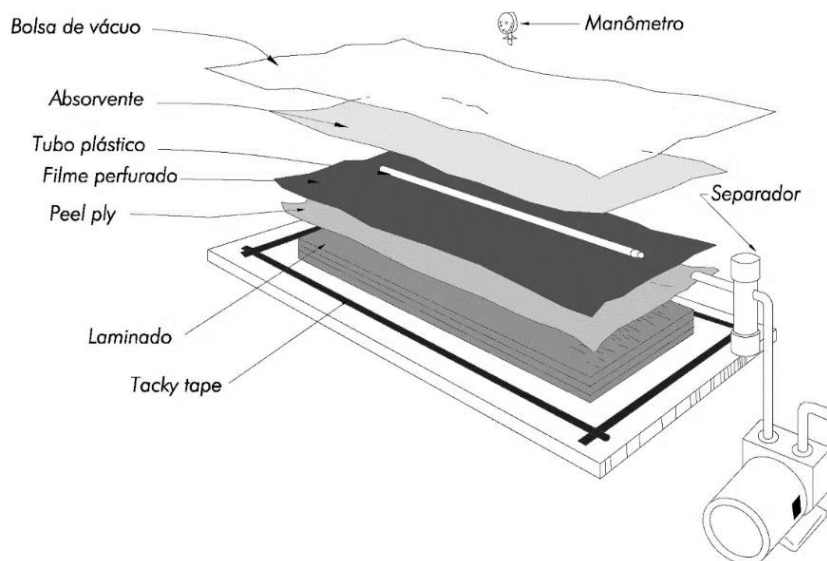
Fonte: Quanjin et al., 2019.

3.2.5 Laminação a Vácuo (Vacuum Bagging)

A laminação a vácuo começa com a laminação manual, logo em seguida é utilizado o vácuo para retirar o excesso de resina do laminado. Com isso, tem-se uma compactação maior, gerando um maior teor de fibra, evitando-se vazios e bolhas na peça (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

A Figura 9 mostra os principais elementos utilizados em uma laminação a vácuo.

Figura 9 - Laminação a vácuo.



Fonte: Barracuda Composites, 2021.

É um processo indicado para geometrias complexas, onde consegue-se uma boa adaptação do laminado a geometria do molde. É preciso levar em consideração o tempo utilizado para fazer a laminação manual e depois montar os equipamentos para o vácuo, por isso deve-se utilizar a resina com um maior tempo de polimerização. É possível chegar a 60% de teor de fibra (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

3.2.6 Infusão a Vácuo

Neste processo, o material é colocado seco no molde, onde é compactado pelo vácuo. A resina é sugada para dentro do laminado pela diferença de pressão existente entre a pressão atmosférica e a provocada pela bomba de vácuo. Isso faz com que esse processo seja superior ao processo de laminação a vácuo, pois só permite a entrada de resina onde tem espaço, dessa forma, fornecendo um laminado de alta qualidade. Como o material é colocado seco, facilita muito a montagem deles no molde, o que diminui o contato do laminador com a resina (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Este processo é muitas vezes considerado como o que apresenta o melhor custo benefício para a produção de embarcações de forma seriada (MANUAL DE CONSTRUÇÃO DE BARCOS, 2021).

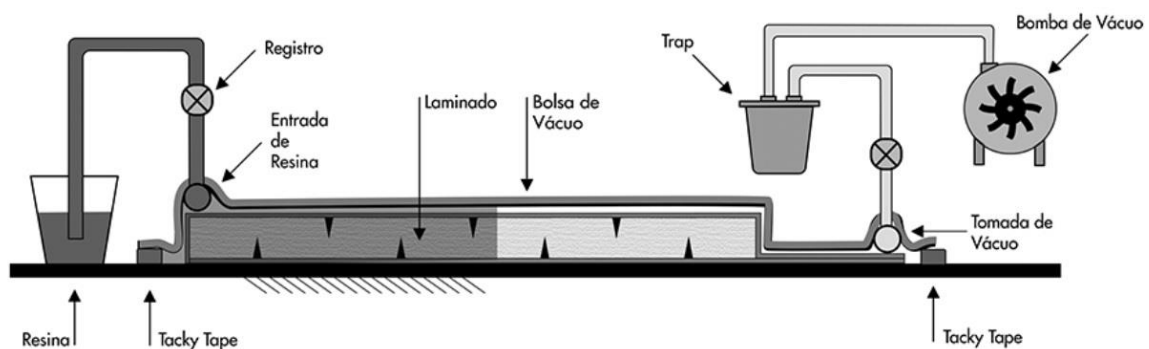
A infusão a vácuo é o principal processo usado na indústria de geração de energia eólica e vem crescendo bastante na indústria náutica. A maioria das embarcações acima de 30 pés já utilizam esse processo. O teor de fibra fica em torno de 60%, que geralmente é igual ou um pouco maior que a laminação a vácuo (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

A infusão a vácuo também é conhecida por VARTM, SCRIMP, VIP, LRI dentre outras abreviações. Essas abreviações indicam particularidades de cada processo de infusão (NASSEH, 2011).

Para se obter um processo otimizado de infusão recomenda-se utilizar uma bomba de vácuo que produza a maior pressão negativa possível, além disso, também é importante usar uma resina de baixa viscosidade e uma fibra que apresente baixa porosidade e alta permeabilidade (NASSEH, 2021).

Para realizar este processo são necessários basicamente: uma bomba de vácuo, um reservatório (trap), peel ply, tacky tape, o material a ser laminado e o filme de vácuo (também chamado de bolsa de vácuo), conforme mostrado na Figura 10, onde é apresentado um esquema básico para a laminação por infusão a vácuo (MANUAL DE CONSTRUÇÃO DE BARCOS, 2021).

Figura 10 - Esquema básico da infusão a vácuo.



Fonte: Manual de Construção de Barcos - Infusão a Vácuo, 2021.

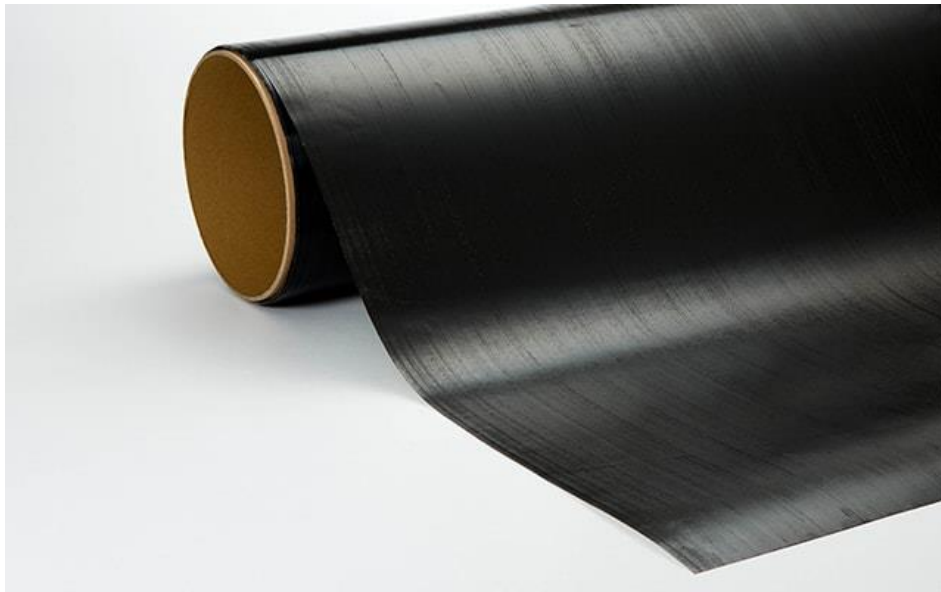
3.2.7 Prepregs

É um processo de laminação a quente, onde o tecido já vem impregnado com uma quantidade fixa de resina que é colocado para curar no vácuo, sendo possível chegar a um pouco mais de 70% de teor de fibra. Esse tecido é um laminado de epoxy pre-impregnado na fábrica (com resina epoxy bicomponete) e é armazenado congelado a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependendo do tipo de prepreg. Depois, a cura é ativada aumentando a temperatura para um valor entre $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

É um processo fácil de trabalhar, muito limpo, porém tem um alto custo, uma vez que é necessário ter uma estufa com controle de temperatura, ter uma sala limpa e refrigerada. Apresenta ótimo acabamento, pouco desperdício e pouca variação de uma peça para outra e de distribuição de peso (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Esse processo é utilizado nas indústrias de alta tecnologia, como a indústria aeroespacial e Formula 1 (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 11 - Prepeg de fibras de carbono.



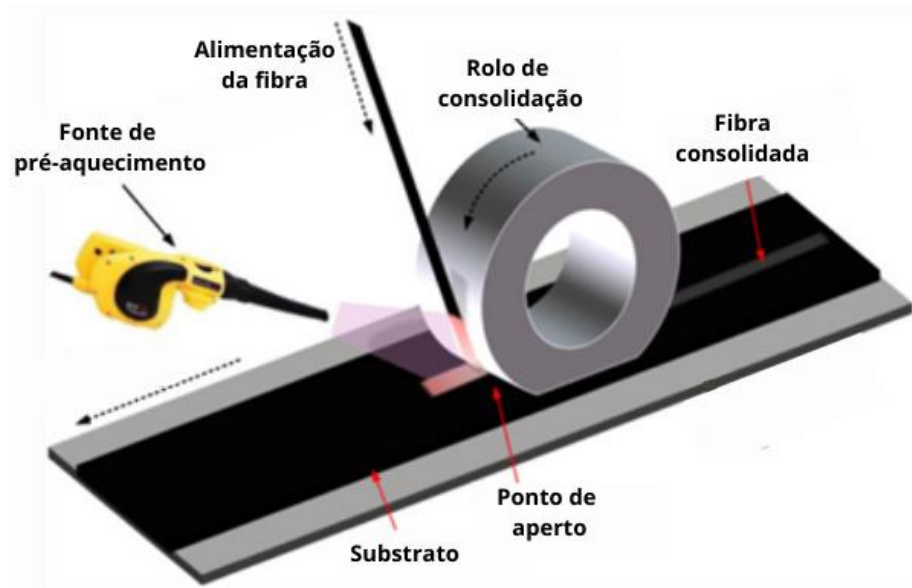
Fonte: Toray, 2021.

3.2.8 Automated Fiber Placement - AFP

Este processo é uma variação dos prepegs e é feito de forma automática. Uma máquina coloca de forma automática a fibra na posição correta, em uma determinada direção, sendo necessário manter o laminado em um ambiente semelhante ao prepreg. Pode ser utilizado uma autoclave para aumentar ainda mais a pressão (3 a 5 atmosferas) no laminado, conseguindo-se uma melhor compactação, evitando ainda mais os vazios e, dessa forma, um melhor teor de fibra (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

É geralmente utilizado em tanques de aeronaves, peças de aviação, fuselagem entre outras aplicações (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Figura 12 - Automated Fiber Placement.



Fonte: Han et al., 2017.

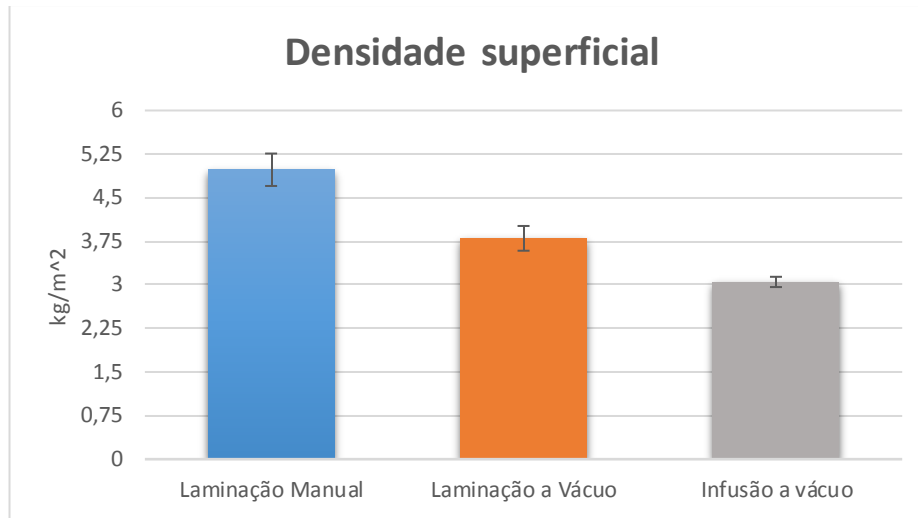
3.3 Comparação dos processos mais utilizados na indústria náutica

As técnicas de laminação mais comuns na indústria náutica hoje são: a laminação manual, a laminação a vácuo e a infusão. Desses métodos, conforme consta em Bittencourt, Dutra e Tanquedri (2016), a infusão apresenta a melhor qualidade e maior resistência mecânica, quando comparado com a laminação manual. Ela também é superior na preservação ambiental e também em relação a saúde dos funcionários, segundo RICHE et al. (2007). Já a laminação a vácuo costuma ser um processo com menor custo em comparação a infusão.

Para avaliar as propriedades físicas e mecânicas das três técnicas de laminação já mencionadas, Bittencourt, Dutra e Tanquedri (2016) realizaram ensaios com corpos de provas para possibilitar comparações entre essas técnicas. Os resultados são mostrados a seguir.

O gráfico da Figura 13 mostra o comparativo da densidade superficial dos resultados obtidos dos ensaios de Bittencourt, Dutra e Tanquedri (2016) nos processos de laminação manual, laminação a vácuo, e infusão a vácuo.

Figura 13 - Gráfico comparativo da densidade superficial das placas de acordo com o tipo de fabricação.



Fonte: Bittencourt; Dutra; Tancredi, 2016.

Com a infusão a vácuo é possível diminuir o peso do laminado uma vez que será usado uma quantidade menor de resina e tudo será compactado na bolsa de vácuo. Além disso, para Nasseh (2021), como a compactação do laminado é maior, o laminado tende a apresentar melhor índice de cura, dispondo de uma melhor relação estrutural.

Outro fator que influencia na densidade do laminado é a menor quantidade de resina aplicada. Uma maior quantidade de resina aumenta a massa sem contribuir necessariamente com as propriedades mecânicas (BITTENCOURT; DUTRA; TANCREDI, 2016).

Com o peso do tecido e da manta usada no corpo de prova e o peso total, Bittencourt et al. (2016) conseguiram determinar a quantidade de resina que ficou em cada laminado. A Tabela 1 mostra a fração de fibra para os corpos de prova em cada processo:

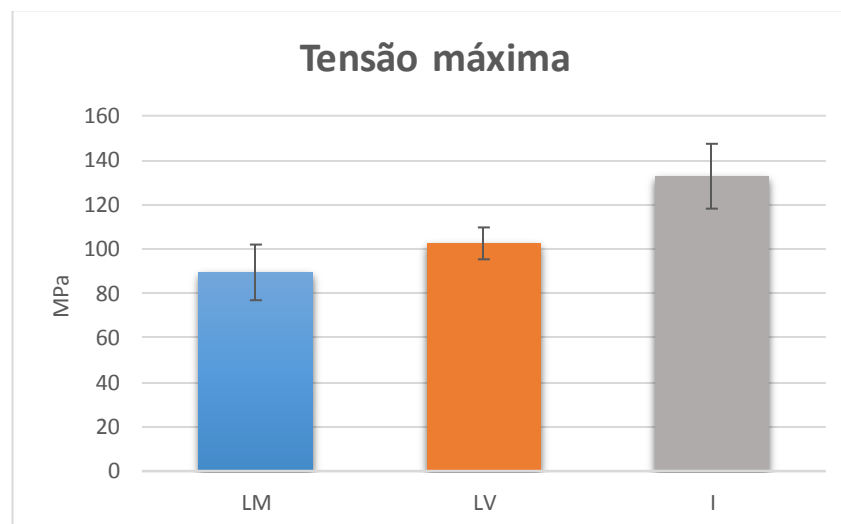
Tabela 1 - Massa da fibra, massa da resina, massa total e fração de fibras das placas de acordo com o tipo de fabricação.

Método	Massa da fibra [g]	Massa da resina [g]	Massa total [g]	Fração de fibra [g/g]
LM	401	766	1167	0,34
LV	347	526	873	0,40
I	304	220	524	0,58

Fonte: Bittencourt; Dutra; Tancredi, 2016.

Outro fator evidente no estudo é que a infusão proporcionou maior resistência a tração do laminado, o que confirma as palavras de Nasseh (2021), como podemos ver na Figura 14.

Figura 14 - Resistência à tração das chapas de acordo com o tipo de fabricação.



Fonte: Bittencourt; Dutra; Tancredi, 2016.

Com os resultados obtidos, observa-se que a infusão apresenta o maior valor de tensão máxima (48,4% superior a laminação manual), seguido pela laminação a vácuo com um resultado mediano (14,6% superior a laminação manual) e a laminação manual com o pior resultado (BITTENCOURT; DUTRA; TANCREDI, 2016).

3.4 Vantagens e desvantagens dos processos de laminação e infusão a vácuo

A Tabela 2, extraída de Silva (2016), mostra as principais vantagens e desvantagens do processo de infusão a vácuo.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da infusão.

Vantagens	Desvantagens
1. Bom controle das tolerâncias dimensionais	1. Projeto do molde é fundamental para a qualidade da peça
2. Laminação com qualidade constante	2. Os tempos de ciclo podem ser um pouco lentos
3. As superfícies podem ser revestidas com gel para melhorar o acabamento	3. Possibilidade de existência de interstícios na estrutura final do material
4. Acabamento liso na superfície de contato com o molde	4. Elevada flexibilidade estrutural devido à redução de quantidade de resina (em alguns casos pode ser uma vantagem)
5. Possibilita modelagens com reforços estruturais	5. Requer viscosidades baixas
6. Infusão a baixa pressão	6. Possibilidade de não reutilização de alguns elementos usados
7. Preço de prototipagem relativamente baixo	7. Pressões de infusão baixas
8. Controle de emissões de gases voláteis (Ex: estireno) pelo fato da modelagem ser fechada	8. Preço dos materiais consumíveis
9. Não são necessários níveis elevado de trabalho nem de habilitações para operar este processo	9. Quanto menor o valor da permeabilidade, maior a dificuldade de impregnação da resina.
10. É possível laminar designs complexos	
11. Boas propriedades mecânicas	
12. Razão entre a quantidade de fibra e resina é muito elevada (≈ 60% fibra e 40% resina)	
13. Econômico relativamente a outros processos	

Fonte: adaptado de Silva, 2016.

Já na laminação a vácuo, as principais vantagens em comparação a laminação manual é a possibilidade de construir um laminado mais leve e ao mesmo tempo mais resistente, por ter um teor de fibra maior, onde a quantidade de resina pode ser reduzida em até 70%. A principal desvantagem está no custo de produção um pouco mais elevado que pode ser compensado com a produção de mais unidades (NASSEH, 2007).

3.5 Equações do escoamento no processo de infusão

A descrição da infusão tem suas raízes nos trabalhos desenvolvidos pelo francês Henry Darcy, que em seu trabalho “Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon”, fez um experimento onde desenvolveu a equação que rege o escoamento de um fluido através de um meio poroso (MANUAL DE CONSTRUÇÃO DE BARCOS, 2021).

O processo de laminação por infusão, ao contrário do que se intui, é antigo e apareceu antes mesmo da laminação manual. Muito do seu desenvolvimento vem das pesquisas realizadas por Darcy e das suas equações. A equação conhecida como Lei de Darcy pode ser usada para calcular a permeabilidade ou tempo que demora para a resina impregnar completamente a peça a ser laminada, que tem influência da porosidade desse laminado (NASSEH, 2021).

3.5.1 Permeabilidade

A permeabilidade (K) é a capacidade que um meio fibroso apresenta de possibilitar o escoamento de um fluido por sua estrutura. Ela depende das características do reforço, mas pode também ser influenciada indiretamente pela alteração da porosidade de um material (SILVA, 2016).

3.5.2 Escoamento

Para descrever o escoamento considera-se o meio fibroso como heterogêneo e anisotrópico, além da resina ser considerada um fluido newtoniano incompressível, e

dessa forma, com massa constante. Os efeitos da gravidade podem ser desprezados e a variação de espessura do laminado (em alguns casos) pode ser desconsiderada (GEORGE, 2011; HSIAO; HEIDER, 2012).

O escoamento é regido pelas seguintes equações:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho \partial u}{\partial x} + \frac{\rho \partial v}{\partial y} + \frac{\rho \partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. 1}$$

- Equação de Navier-Stokes

Equação vetorial de Navier-Stokes para um escoamento incompressível com viscosidade constante:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad \text{Eq. 2}$$

- Lei de Darcy

$$\{\vec{U}_D\} = -\frac{1}{\mu} [K] \cdot \nabla P \Leftrightarrow \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

\vec{U}_D - velocidade de Darcy;

P – pressão;

μ – viscosidade do fluido;

[K] – matriz de permeabilidade do meio fibroso.

3.5.3 Velocidade da frente de escoamento

Com a velocidade obtida pela equação da lei de Darcy (U_D), é possível calcular a velocidade da frente de avanço do escoamento (U_F) utilizando a porosidade (ϕ) da seguinte maneira (HSIAO; HEIDER, 2012):

$$U_F = \frac{U_D}{\phi} \quad \text{Eq. 4}$$

A partir de uma relação com a espessura, é possível descobrir a fração de volume de fibra para diferentes tipos de reforços submetido a compactação (HSIAO; HEIDER, 2012).

$$h = \frac{n \cdot W_a}{\rho_f \cdot V_f} \Leftrightarrow V_f = \frac{n \cdot W_a}{\rho_f \cdot h} \quad \text{Eq. 5}$$

onde,

n – número de camadas de fibra;

W_a – peso por unidade de área de cada camada;

ρ_f – densidade da fibra;

h – espessura.

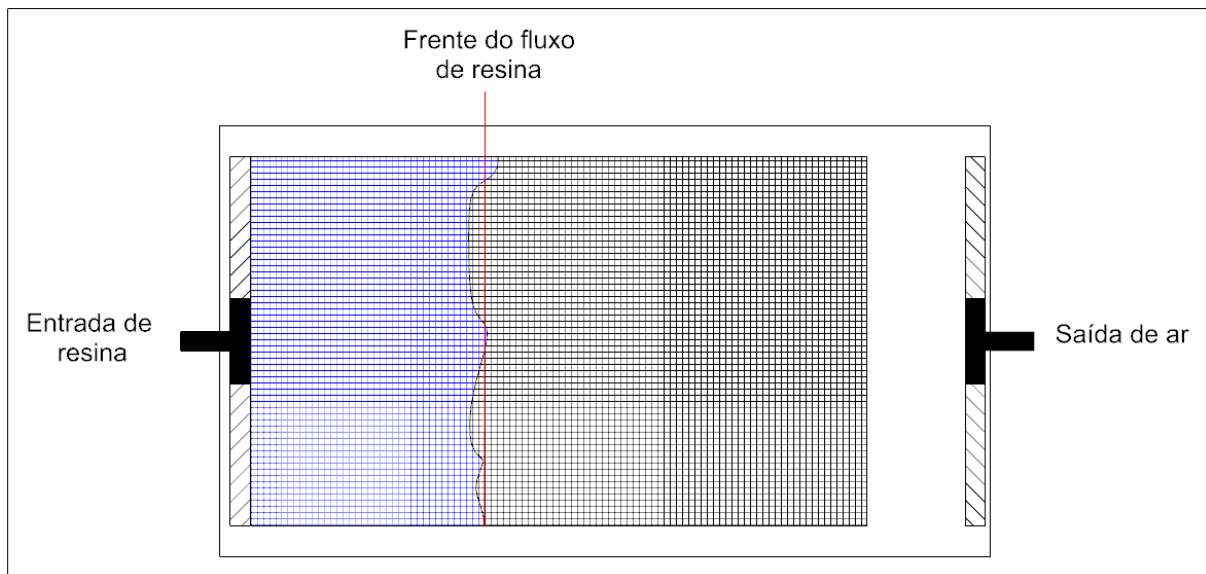
Outra relação importante, é a da porosidade (ϕ) com a fração de volume de fibra (V_f), como mostra a Equação 6 (HSIAO; HEIDER, 2012).

$$V_f + \phi = 1 \quad \text{Eq. 6}$$

3.5.4 Escoamento Unidirecional

Para calcular a permeabilidade em um escoamento unidirecional, Figura 15, utiliza-se o resultado da integração da equação de Darcy, como mostra a Equação 7 (ARBTER et al., 2011). O Anexo A mostra mais detalhes dessa integração.

Figura 15 - Escoamento Unidirecional.



Fonte: autor, 2021.

$$K = \frac{L^2 \cdot \phi \cdot \mu}{2 \cdot \Delta P \cdot t} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde,

L – distância percorrida pelo fluido;

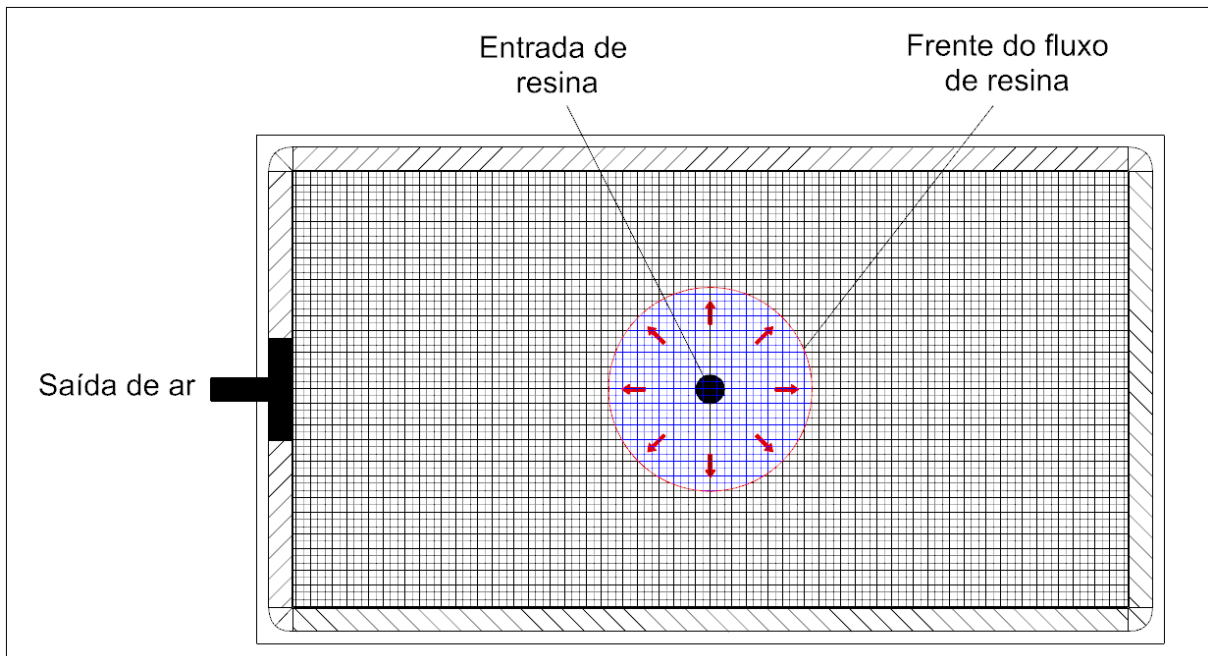
t – tempo para o fluido percorrer a distância L ;

ΔP – diferença entre a pressão atmosférica e a pressão no laminado.

3.5.5 Escoamento Radial

Já a permeabilidade para um escoamento radial é determinada pela equação de Laplace, obtida pela combinação da equação da continuidade para fluidos incompressíveis, da equação de Navier-Stokes e a lei de Darcy. Deve-se ressaltar que essa equação (Equação 8) pode ser utilizada em uma situação de pressão constante e reforço isotrópico (ARBTER et al., 2011).

Figura 16 - Escoamento Radial.



Fonte: autor, 2021.

$$K = \frac{\Phi \cdot \mu \cdot R_0^2}{4 \cdot \Delta p \cdot t} \left(\left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \left(2 \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) - 1 \right) + 1 \right) \quad \text{Eq. 8}$$

Com,

R – raio da frente do escoamento;

t – tempo para o fluido percorrer R ;

R_0 – raio da entrada do fluido.

4 EQUIPE NAVÍCULA BOAT DESIGN

Trata-se de uma equipe multidisciplinar, criada em 2014, formada por alunos de Engenharia Naval, Mecânica, Controle e Automação, Eletrônica e Publicidade e Propaganda. Realiza suas atividades dentro do escopo da extensão universitária dentro da área educação e tecnologia. A equipe tem por objetivo desenvolver o projeto e construção de embarcações radiocontroladas e tripuladas de alto desempenho. Representa a UFPE em competições nacionais e internacionais de Engenharia Naval e Oceânica. A equipe tem a orientação do professor César Augusto Salhua Moreno do curso de Engenharia Naval da UFPE, e tem alcançado excelentes resultados em suas atuações participando das competições DUNA e Hydrocontest.

Figura 17 - Equipe Navícula Boat Design.



Fonte: Navícula Boat Design, 2021.

A seguir são apresentadas algumas particularidades dessas competições.

4.1 Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA)

DUNA é uma competição onde as equipes desenvolvem modelos do tipo rebocador portuário radiocontrolados, com comprimento máximo de um metro. As embarcações são equipadas com motor elétrico e devem alcançar a máxima eficiência

para participar de diversas provas, onde cada uma mede alguma qualidade inerente da embarcação, como por exemplo: força, manobrabilidade, velocidade, etc. Esta competição atrai participantes de muitas universidades do Brasil e de outros países. Acontece anualmente na cidade de Joinville, Santa Catarina.

Figura 18 - Equipe Lampião 2017.



Fonte: Instagram do Navícula Boat Design, 2017.

4.2 Hydrocontest

O Hydrocontest foi uma competição internacional com propósito de desenvolver embarcações de alto desempenho, que consigam transportar a maior quantidade de carga com a maior velocidade possível, buscando a máxima eficiência, com o menor consumo de energia.

Nesta competição existiam duas categorias: uma para embarcações leves, que deveriam transportar 20 kg de carga e outra para embarcações de maior porte, que deveriam carregar 200 kg. As embarcações também utilizavam motor elétrico e poderiam ter dimensões máximas de 2,5 m x 2 m x 2m. A última edição aconteceu em 2018 em Saint-Tropez, França, contando com a participação de equipes de diversos países.

Figura 19 - Equipe que participou do Hydrocontest 2018.



Fonte: Navícula Boat Design, 2018.

A Figura 20 mostra algumas embarcações participando das competições.

Figura 20 - Embarcações do Navícula Boat Design participando das competições.



Fonte: adaptado do Instagram do Navícula Boat Design, 2021.

5 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho. São abordados os materiais utilizados, os esquemas de representação de cada circuito e o passo a passo para preparar os componentes que serão usados nos processos de laminação e infusão a vácuo.

5.1 Materiais compósitos usados

A matéria prima escolhida neste trabalho visa principalmente a redução de custos. Sendo assim, para construir o modelo em escala reduzida foi utilizado fibra de vidro, pois além de ter um bom custo benefício e ser fácil de encontrar, também atende bem os requisitos de resistência mecânica para essa construção.

Segundo Nasseh (2011), poucos materiais têm melhor custo benefícios que a fibra de vidro na utilização para a construção de barcos.

5.1.1 Reforço de fibra de vidro

No material composto, os reforços são responsáveis por transferir as tensões na matriz de resina. Eles proporcionam a coesão do laminado, o que é altamente influenciado pelo tipo tecelagem, trama e tratamento superficial (NASSEH, 2007).

Os reforços mais conhecidos no mercado hoje são os tecidos e as mantas (NASSEH, 2011).

5.1.1.1 Tecido

Os tecidos são reforços para laminados de alta performance, que visam a leveza e a resistência. Proporcionam alto teor de fibra e espessuras menores. São constituídos de filamentos. A trama varia de acordo com o tipo de tecido e eles podem ser combinados em direções diferentes para ter suas propriedades aprimoradas (NASSEH, 2011).

Foi utilizado um tecido bidirecional (0/90°) de 83 g/m², que pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Tecido utilizado (R83P).



Fonte: autor, 2021.

5.1.1.2 Manta

Consistem basicamente de pequenos pedaços de diferentes tamanhos de vidro do tipo E, que são depositados aleatoriamente em uma esteira onde se utiliza um material ligante (binder) para que os pedaços fiquem juntos (NASSEH, 2011).

Dentre as vantagens de utilizar manta, destaca-se que ela é um dos reforços com o custo mais baixo, além de ser considerado praticamente isotrópico, pois suas propriedades mecânicas são quase iguais em todas as direções, sendo as diferenças existentes desprezíveis (NASSEH, 2011).

Nasseh (2011) afirma que a utilização de manta no laminado faz com ele apresente menor teor de fibra. Para ele é difícil chegar a um alto teor de fibra utilizando

apenas manta no laminado. O fato de as fibras serem descontínua faz com que as propriedades mecânicas das mantas em geral sejam inferiores aos tecidos.

A Figura 22 mostra a manta de 300 g/m² utilizada nos processos de infusão e laminação a vácuo deste trabalho.

Figura 22 – Manta (300 g/m²).



Fonte: autor, 2021.

5.1.2 Resina poliéster insaturada

A resina poliéster insaturada é formada pela mistura de ácidos instaurados, os mais comumente usados são o ácido fumárico e o anidrido maleico, com um ácido saturado tipo orto ou isoftálico, onde se adiciona glicol e utiliza-se um monômero reativo, que geralmente é o estireno (NASSEH, 2011).

Quando se mistura o catalisador com a resina, ela tem um tempo de gel (situação em que a resina começa a ficar com o aspecto de gel) e um tempo de cura (tempo de endurecimento). Por último, existe também o tempo de maturação, que é o tempo em que a resina adquire estabilidade e dureza (NASSEH, 2011).

Geralmente, a proporção de catalisador usada neste tipo de resina é entre 1% e 2%. O mais usado é o peróxido de metil-etilcetona (MEKP) (NASSEH, 2011).

O processo de cura é altamente influenciado pela temperatura ambiente e pode ser controlada pela dosagem do catalisador, ou seja, quando se deseja acelerar a realização deve-se adicionar mais catalisador. Também é possível utilizar aceleradores a base de cobalto para acelerar o processo (NASSEH, 2011).

No momento em que a resina começa a virar gel, inicia-se o aumento de temperatura, causadas pelas reações exotérmicas. A partir desse momento, a resina fica impossibilitada de ser usada na laminação. É possível que a resina chegue a uma temperatura de 170 °C, mas existem no mercado resinas que apresentam temperaturas menores (NASSEH, 2011).

É comum as resinas para infusão apresentarem um tempo de gel maior que as de laminação manual (NASSEH, 2011).

Diferente das resinas usadas em outros processos de laminação, a resina para infusão deve ter um tempo de gel de 40 a 50 minutos aproximadamente e viscosidade inferior a 200 cps (centipoises) (NASSEH, 2008).

Uma resina com tempo de trabalho muito longo também pode causar problemas, pois se a resina não curar dentro do intervalo esperado e continuar sendo sugada, o teor de fibras pode ficar muito elevado. Um teor de fibra maior que 70% de fração em volume pode fazer com que a matriz de resina não consiga manter a coesão das fibras, o que provoca uma redução das propriedades mecânicas (NASSEH, 2007).

5.1.3 Resina epóxi (ou epoxy)

Assim como a poliéster, a resina epóxi é termofixa. Tem sido bastante utilizada nos processos de laminação a vácuo, infusão e prepreg, com destaque também para o seu uso na indústria eletroeletrônica, na construção civil, em transporte, dentre outros (NASSEH, 2008).

Essa resina apresenta maior resistência a fadiga nos laminados, quando comparada a outras resinas (como a poliéster), devido à baixa contração (em torno

de 2%), que pode chegar a ser quatro vezes menor que a poliéster. Além disso, apresenta alto poder de colagem, alongamento que pode ser maior que 6%, maior resistência a tração e menor absorção de água. Também é superior na resistência a abrasão e resistência a água, fator importante para a indústria náutica (NASSEH, 2011).

A proporção entre catalisador e resina deve ser seguida à risca, uma vez que, se não for feita da forma indicada pelo fabricante, pode-se chegar até a perder o material. A proporção de catalisador costuma ser bem maior que a da resina poliéster, variando com o tipo de resina epóxi (NASSEH, 2011).

Outras diferenças importantes em relação a resina poliéster é que existe uma grande variedade de combinações possíveis entre resina e catalizadores diferentes, com o objetivo de serem usados em aplicações distintas. É possível combinar também diferentes catalizadores, com tempos de cura diferentes, a fim de mexer no tempo de gel, que em muitos casos não pode ser alterado com diferença na proporção entre resina e catalisador, como já mencionado para a resina poliéster. Isso faz com que exista uma ampla gama de diversos tipos de resina epóxi disponíveis no mercado. A temperatura ambiente é um fator que influencia no tempo de gel da resina epóxi (NASSEH, 2011).

Devido ao uso nos processos de laminação a vácuo e infusão, tem ganhado cada vez mais espaço na construção de embarcações (NASSEH, 2008).

5.2 Consumíveis utilizados

Os consumíveis são materiais que não fazem parte do laminado, porém são usados apenas para viabilizar os processos de laminação e infusão a vácuo. Após serem usados em um desses processos a maioria dos consumíveis acabam sendo descartados, uma vez que ficam impregnados de resina. A Figura 23 mostra os seguintes consumíveis: 1) Tacky tape, 2) Peel ply, 3) Malha de infusão, 4) Filme de vácuo, 5) Mangueira cristal, 6) Breather, 7) Espiroduto e 8) "T".

Figura 23 – Consumíveis.



Fonte: adaptado de E-composites, 2021.

5.2.1 Tacky tape

A tacky tape é um tipo de fita dupla-face resistente a resina que é usada para colar o filme de vácuo e vedar o laminado no molde, permitindo que o vácuo seja executado. Tem um aspecto de borracha flexível e uma ótima capacidade de vedação, quando aplicada corretamente.

5.2.2 Peel ply

O peel ply é um tipo de tecido feito de poliamida. É posicionado logo acima do laminado para que os materiais que estiverem sobre ele não fiquem grudados na peça a ser laminada, por causa do contato com a resina. Por isso, facilita bastante no desmolde, uma vez que ele pode ser arrancado do laminado junto com os outros materiais que estão acima dele.

O peel ply também ajuda para que aconteça uma impregnação de resina uniforme na peça, uma vez que a resina tem que passar por seus pequenos furos.

5.2.3 Malha de infusão (flow media ou air flow)

A malha de infusão é um entrelaçado flexível de plástico que ajuda a resina a ser transferida ao longo do laminado. É aplicada acima do peel ply, e é desmoldada juntamente com ele. A malha de infusão não deve entrar em contato direto com o laminado, sem o peel ply por baixo, pois pode grudar no laminado e danificá-lo durante a sua remoção.

5.2.4 Filme de vácuo (plástico de vácuo ou bolsa de vácuo)

O filme de vácuo é o plástico utilizado para cobrir o laminado, sendo vedado com tacky tape no molde. É muito importante que ele não esteja esticado, ou seja, é preciso deixar o plástico folgado e criar vincos (rugas) para que ele se adapte corretamente ao laminado.

5.2.5 Breather

É um tecido bastante poroso com a finalidade de retirar o excesso de resina no processo de laminação a vácuo. Neste processo, é aplicado a cima do peel ply. Quando é feito o vácuo e o laminado é pressionado, a resina sobressalente passa pelo peel ply e fica impregnada no breather.

Quando é usada na infusão, facilita a remoção da malha de infusão.

5.2.6 Mangueiras e conexões

Além dos consumíveis já mencionado, é importante destacar também o uso de mangueiras do tipo cristal, para que o fluxo de resina possa ser observado, e de paredes espessas (em torno de 3 mm).

O espiroduto é uma espécie de mangueira em espiral que é usada para formar as linhas de resina, responsáveis pela entrada de resina ao longo de seu comprimento, e as linhas de vácuo, responsáveis por retirar o ar da peça.

Os “T’s” são responsáveis por conectar as mangueiras aos espirodutos, fazendo parte da entrada de resina e da linha de vácuo.

Por fim, na infusão usa-se também uma válvula para controlar a entrada de resina no laminado. Durante os trabalhos uma torneira foi adaptada para ser usada nesta função, como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Adaptação na entrada de resina



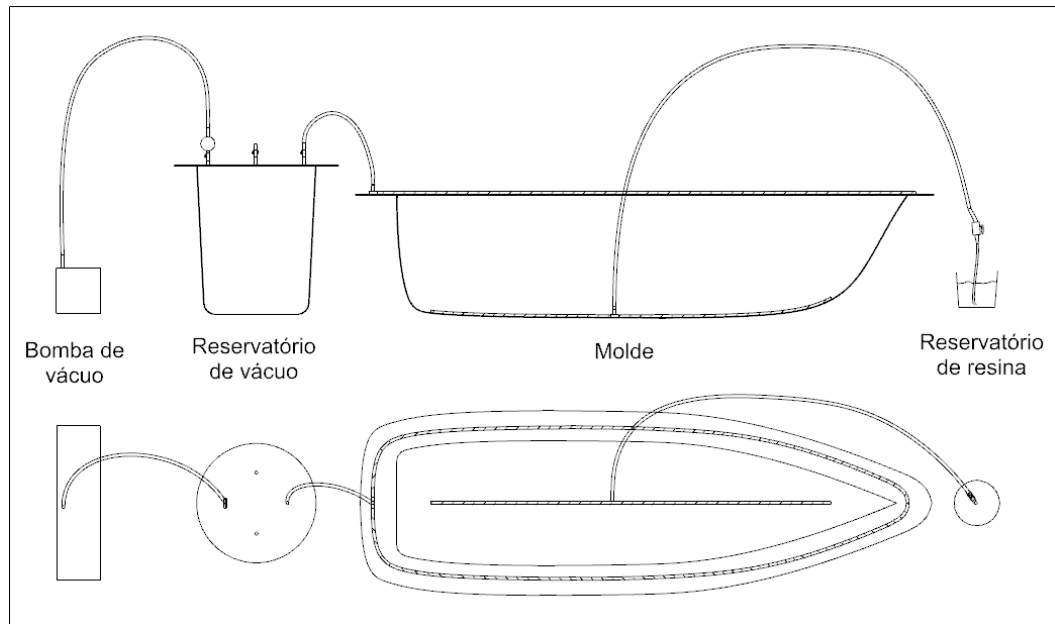
Fonte: autor, 2021.

5.3 Descrição dos sistemas usados

Para a infusão, utilizou-se uma linha de vácuo circulando a aba do molde e uma linha de entrada de resina na região do fundo do molde, respeitando a simetria do casco (plano diametral), o que otimiza o processo e diminui o tempo de impregnação.

A Figura 25 mostra um esquema da organização dos componentes da infusão que foi realizada:

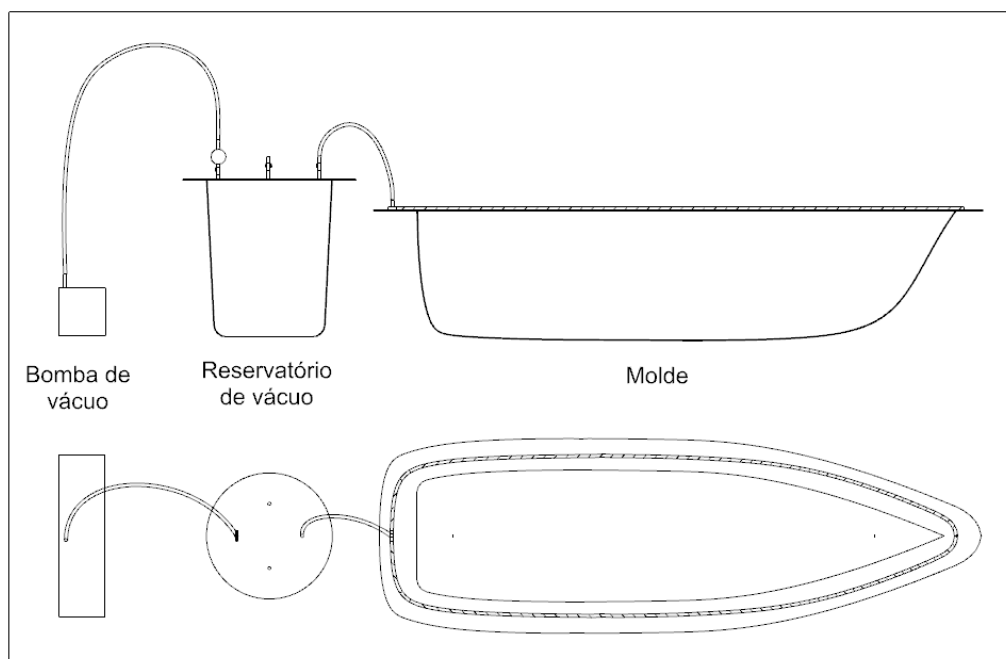
Figura 25 - Esquema para a infusão.



Fonte: autor, 2021.

Já para a laminação a vácuo não há necessidade de reservatório para a resina, uma vez que a laminação é feita manualmente antes de fechar a bolsa de vácuo. Portanto o esquema proposto para a laminação a vácuo do casco é mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Esquema para a laminação a vácuo.



Fonte: autor, 2021.

Para realizar os processos de laminação e infusão a vácuo, mostrados nas figuras 25 e 26, utilizou-se uma bomba de 7 CFM com duplo estágio e um reservatório de vácuo.

5.4 Reservatório de vácuo

A função principal deste reservatório é proteger a bomba, pois é nele que a resina excedente fica depositada quando sai do laminado. Também pode ser usado para adicionar mais linhas de vácuo, caso seja necessário em um procedimento de maior porte.

A construção foi feita sobre uma placa de vidro, visando a facilidade de desmoldagem que o vidro proporciona, por possuir uma superfície bastante lisa. Um balde comum foi utilizado como molde positivo (ou plug), para ser copiado e se obter o reservatório como resultado.

Como preparação, fez-se cindo polimentos com cera de carnaúba no vidro e no balde, com um intervalo de 30 minutos entre os polimentos. Após isso, utilizou-se massa de modelar para dar acabamento em regiões que apresentavam rebaixo, para fixar o balde e para retirar as quinas na junção com o vidro.

Figura 27 - Massa de modelar aplicada.



Fonte: autor, 2019.

A cera de carnaúba foi utilizada novamente para polir as regiões que ficaram manchada com a aplicação da massa de modelar. Depois passou-se uma demão de desmoldante líquido PVA, para criar uma fina película que facilita na hora de desmoldar a peça. Após o desmoldante secar, foi aplicado gel coat no balde e no vidro, nas proximidades do balde, para criar a borda que servirá para sustentar a tampa.

Recomenda-se utilizar de 500 g a 700 g de gel coat para uma superfície de 1m². Decidiu-se utilizar 700 g para criar uma camada bastante uniforme e evitar problema durante a desmoldagem. O gel coat foi catalisado aos poucos (200 g ou menos com 2% de catalisador), pois geralmente ele tem um tempo de trabalho em torno de 15 minutos. (ADVANCED VACUUM HI-TECH COMPOSITES, 2019).

O gel coat foi aplicado em duas demãos, para um resultado mais homogêneo. Após aguardar 6h a cura do gel coat, iniciou-se a laminação da primeira camada de fibra de vidro. As próximas camadas de fibra de vidro foram adicionadas de duas em duas, respeitando o tempo de cura entre as aplicações, até chegar a um total de 7 camadas, obtendo uma espessura aproximada de 8 mm.

Figura 28 - Imagem externa do reservatório.



Fonte: autor, 2019.

Para facilitar o desmolde utilizou-se de espátula e chave de fenda para forçar o balde para fora. A massa de modelar também ajudou na desmoldagem. Após isso, fez-se uma limpeza no reservatório e cortou-se a rebarba da aba para dar acabamento. O resultado pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 - Parte interna do reservatório.



Fonte: autor, 2019.

Para a confecção da tampa seguiu-se um procedimento semelhante, onde utilizou-se novamente um vidro para fazer a laminação. Esse vidro foi encerado de forma semelhante ao procedimento anterior.

Neste caso, as camadas foram construídas de forma intercaladas (com manta de fibra de vidro, tecido de fibra de vidro, e novamente manta), repetindo-se esta etapa 3 vezes com o objetivo de atingir uma espessura de aproximadamente 8 mm. Utilizou-se um rolinho tira bolhas para ajudar na compactação. Foi preciso esperar de 4h a 6h entre cada etapa.

Uma última camada de manta de fibra de vidro foi adicionada e após a cura foi possível desmoldar a tampa do vidro. Após isto, a rebarba foi cortada e a tampa estava finalizada.

Figura 30 - Reservatório com a tampa.



Fonte: autor, 2019.

Depois, fez-se furos na tampa em quatro posições simétricas para a colocação das conexões, como mostra a Figura 31.

Figura 31 - Conexões na tampa.



Fonte: autor, 2019.

Um vacuômetro foi adicionado a tampa para acompanhamento da pressão durante a utilização do reservatório nos processos de laminação.

A Figura 32 mostra os dois componentes mais importantes para começar os testes dos processos de laminação a vácuo e a infusão: a bomba de vácuo e o reservatório.

Figura 32 - Equipamentos principais para a laminação a vácuo e a infusão a vácuo.



Fonte: autor, 2019.

5.5 Construção do molde de um casco em escala reduzida

Para construir o molde, é preciso definir a peça que será moldada. Para isso foi construído um casco de um modelo em escala reduzida pelo processo de laminação manual, como descrito a seguir.

5.5.1 Geometria

Foi escolhida a geometria do casco do Lampião, modelo do projeto de extensão Navícula Boat Design da UFPE, bastante conhecido por suas diversas participações no Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA). A Figura 33 mostra uma imagem do lampião.

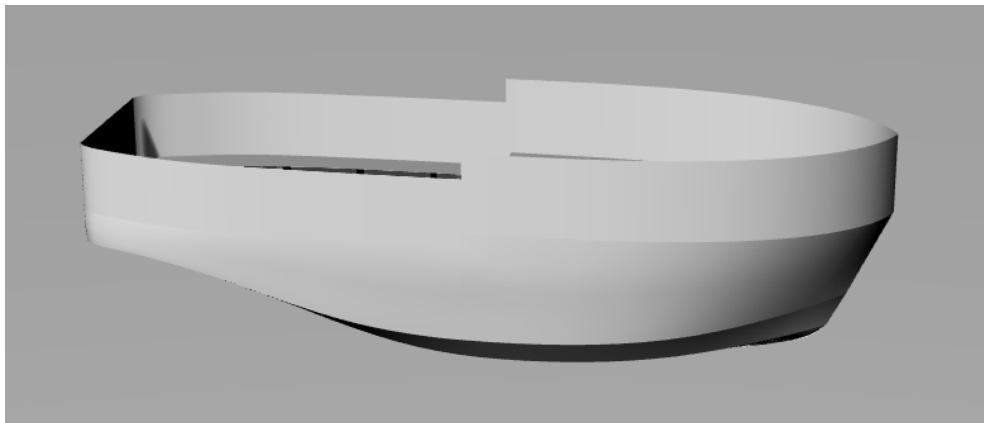
Figura 33 – Lampião.



Fonte: Instagram do Navícula, 2017.

O modelo geométrico tridimensional do barco foi disponibilizado pelo projeto no formato de modelagem do *software* Rhinoceros, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Geometria do Lampião.



Fonte: Navícula, 2021.

Decidiu-se que o modelo construído teria 50 cm de comprimento. Pois, caso houvesse algum problema na execução do projeto, o prejuízo de materiais não seria tão impactante e seria mais fácil refazer algum trabalho. Uma vez que tudo ocorresse bem, os procedimentos seriam relativamente fáceis de serem estendidos para os casos de cascos de maior porte.

Na Tabela 3 estão as principais dimensões geométricas do modelo com escala de 1:2 em relação ao Lampião.

Tabela 3 - Principais dimensões geométricas do casco (escala 1:2).

Dimensões principais [cm]	
Comprimento	50
Boca	16
Pontal	15

Fonte: autor, 2021.

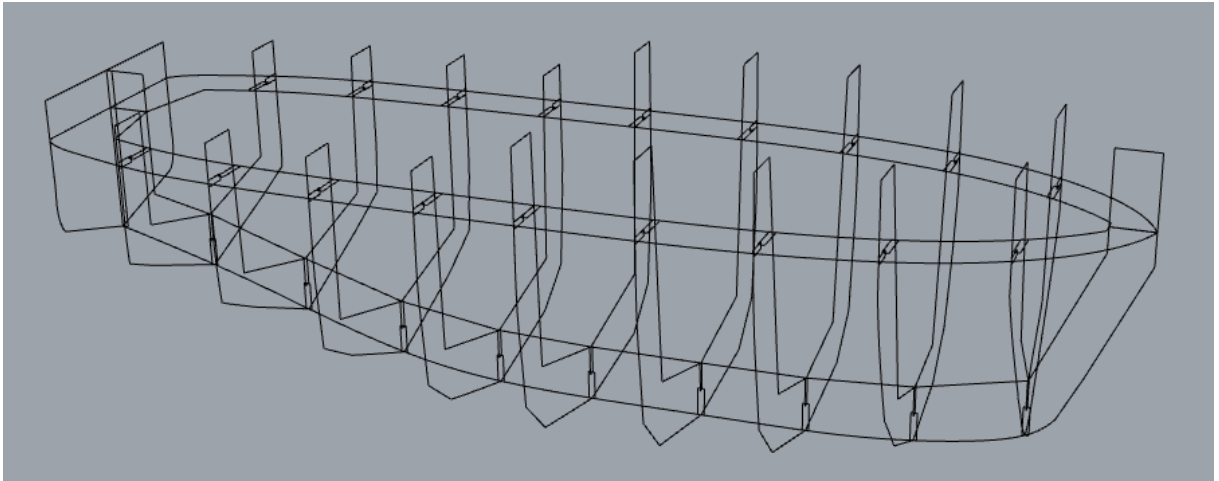
5.5.2 Construção do casco (positivo ou plug)

Com a geometria, foi possível fazer o planejamento de como seria fabricado a estrutura interna do casco a ser construído. A estrutura foi cortada em MDF cru de 3 mm de espessura. Este material foi escolhido por ser rígido e fácil de ser cortado manualmente, se apresentando de forma consistente para a estrutura de um modelo desse tamanho.

Porém, como os cortes seriam feitos a mão, não foi possível otimizar a utilização do MDF através de um Nesting, como é viável quando se usa uma cortadora a laser. Para que fosse possível cortar com uma lâmina de serra manual (uma vez que uma tico-tico não estava disponível nessa etapa) e dada as dimensões das peças, decidiu-se que a estrutura teria em média 2 cm de largura.

A estrutura foi feita com o auxílio de planos intersectando o casco em 3D, com as linhas de interseção sendo usadas para fazer offset de 2 cm, gerando a largura de cada parte da estrutura. Algumas modificações foram feitas em algumas regiões que estavam estreitas ou largas demais. Na Figura 35 é possível visualizar o planejamento da estrutura:

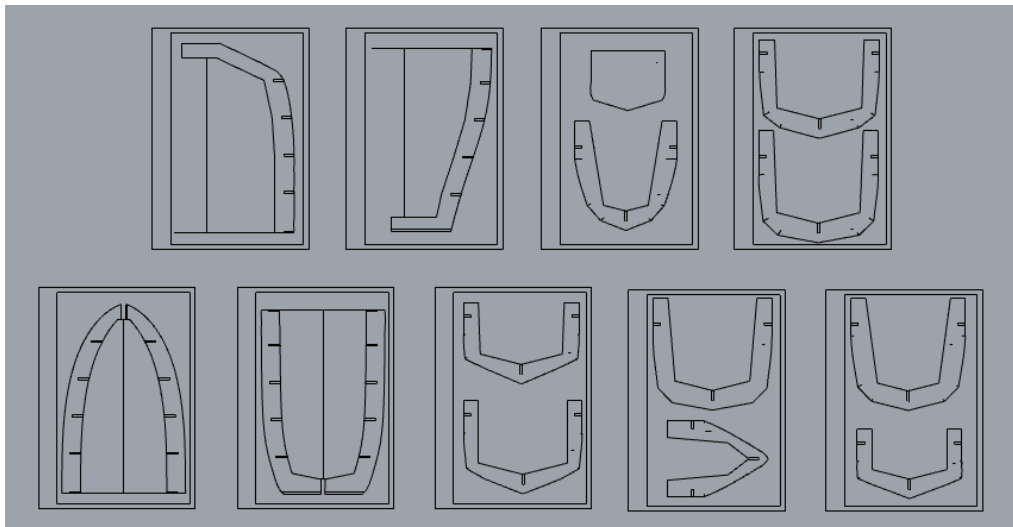
Figura 35 - Planejamento da estrutura.



Fonte: autor, 2021.

Após isso, as seções transversais e longitudinais foram postas em regiões com formato A4 para serem impressas, como pode ser visto na Figura 36:

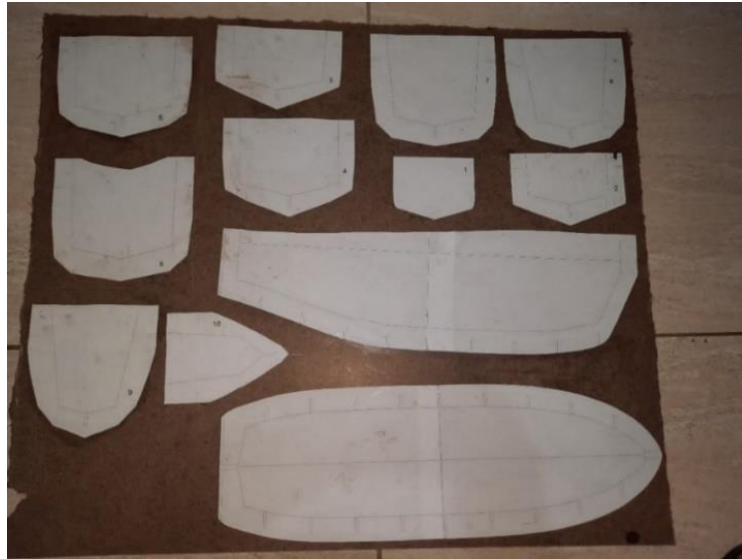
Figura 36 - Estrutura pronta para ser impressa.



Fonte: autor, 2021.

Uma vez impressas, foram cortadas e coladas sobre o MDF cru para servirem de guias no corte. Com um arco de serra e com uma serra adaptada, cortou-se o MDF seguindo as linhas do desenho.

Figura 37 - Preparação para o corte.



Fonte: autor, 2021.

Foram feitos furos em algumas regiões para facilitar o corte, como mostra a Figura 38.

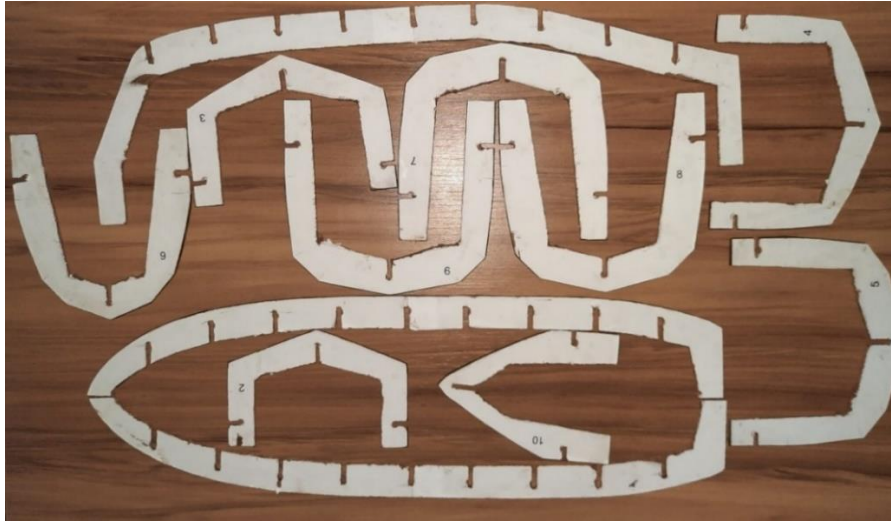
Figura 38 - Furos para facilitar os cortes.



Fonte: autor, 2021.

A Figura 39 mostra os elementos da estrutura já cortadas, prontas para serem montadas.

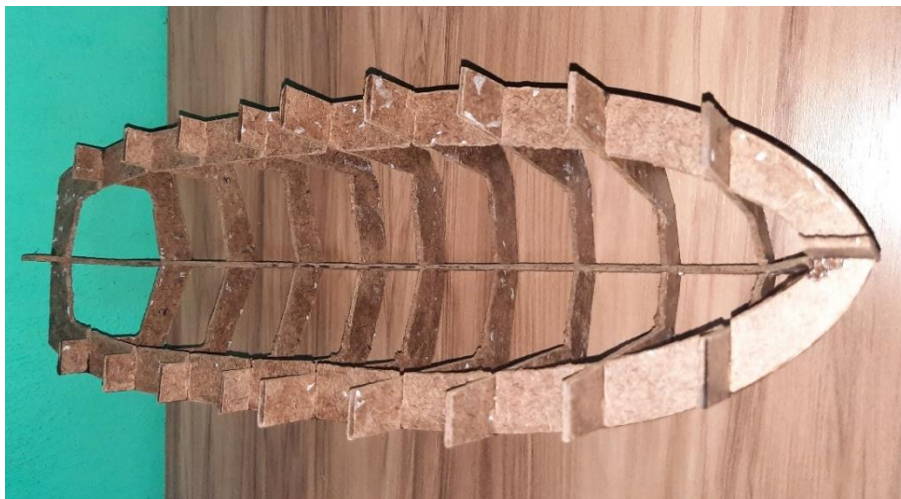
Figura 39 - Estrutura costada.



Fonte: autor, 2021.

Com todas as partes da estrutura cortadas, iniciou-se a montagem com cola instantânea. Para facilitar a montagem, em cada seção transversal foi colocado um número correspondente a sua ordem na estrutura.

Figura 40 - Estrutura montada.



Fonte: autor, 2021.

Com a estrutura montada, utilizou-se papelão para dar forma ao casco. O papelão usado foi do tipo comumente encontrados em caixas de sapato e em outros tipos de embalagens. Por ser fino, o papelão permite acompanhar melhor a forma do casco na hora de modelar.

É importante destacar que não se utilizou o método de construção conhecido como strip-planking, muito usado em construções de embarcações de madeira e no modelismo de forma geral, que consiste em ir colando tiras de madeira fazendo o contorno da forma dado pela estrutura. Como se trata de um modelo com uma escala bastante reduzida, decidiu-se colar pedaços completos da superfície do casco, sendo possível fazer as medições dessas superfícies nos desenhos em 3D.

Como resultado, obteve-se superfícies mais uniformes as quais tornaram mais fáceis os próximos passos da construção.

Figura 41 – Superfície de papelão.



Fonte: autor, 2021.

A principal função da superfície de papelão, conforme a Figura 41, é dar forma ao casco de uma maneira simples e econômica, uma vez que não é possível laminar diretamente sobre os espaços entre as estruturas.

No momento em que o modelo já estava com uma superfície de papelão cobrindo toda a estrutura, aplicou-se camadas de fibra de vidro, para deixar a superfície mais resistente e com um acabamento superficial adequadamente carenado (superfície lisa).

Foi preciso medir cada pedaço que iria cobrir determinada superfície do modelo previamente. As partes foram previamente cortadas para agilizar o processo de laminação e ter maior controle na quantidade de resina que será usada.

Optou-se por utilizar duas camadas de fibra de vidro, as quais se mostraram suficientes para dar a resistência necessária ao modelo. A adição de duas camadas, representou um aumento de 0,152 kg no laminado.

Para calcular a quantidade necessária para a correta impregnação da fibra de vidro com resina, utiliza-se a proporção de 1 para 2, ou seja, a quantidade de resina é estimada como sendo duas vezes a massa de fibra de vidro, que neste caso seria 0,304 kg. Obviamente, isso é só um valor aproximado, podendo ser necessário uma quantidade maior, dependendo de vários fatores como o tipo de manta ou tecido e as habilidades do laminador. É importante frisar também que não é necessário catalisar de uma única vez toda a resina que será utilizada, é até recomendável que isso seja feito por partes.

Figura 42 - Imagem do casco com fibra de vidro.



Fonte: autor, 2021.

Com as duas camadas de fibra aplicadas, foram feitos alguns reforços internos com o intuito de aumentar a resistência e de fazer a estrutura aderir melhor ao casco, como mostra a Figura 43.

Figura 43 - Imagem da fibra aplicada na parte interna.



Fonte: autor, 2021.

Foi observado que dentro do modelo o papelão ficou exposto, sendo assim, decidiu-se passar uma camada de resina poliéster nesta região para torná-la resistente a água, como mostra a Figura 44.

Figura 44 - Imagem interna.



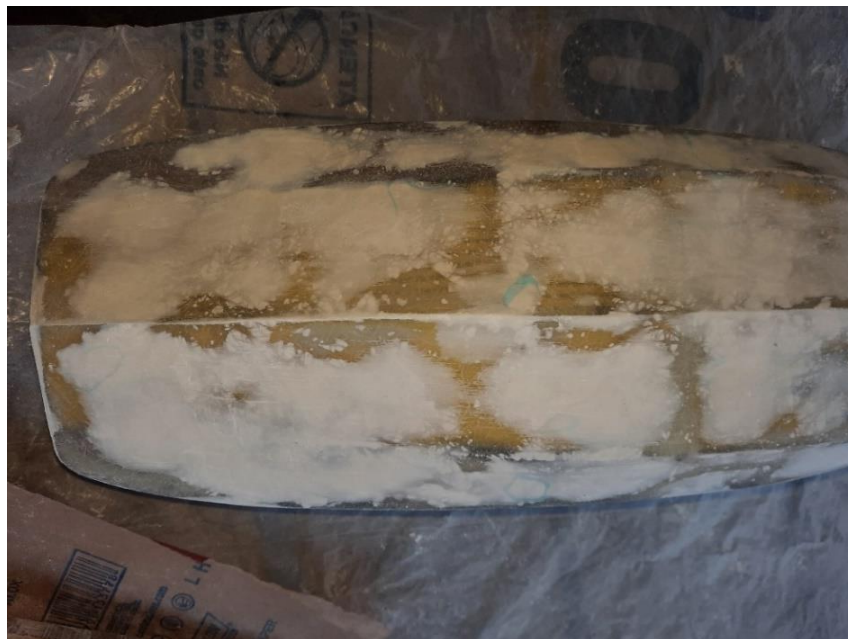
Fonte: autor, 2021.

A próxima etapa é o acabamento da superfície externa do casco. Este é um dos passos mais importantes, visto que é preciso deixar a superfície extremamente lisa e sem defeitos para que o molde fique perfeito.

Iniciou-se lixando com lixa de ferro 60 para aplainar a superfície que estava bastante irregular. Uma vez atingido uma regularidade da superfície foi usado massa plástica para dar acabamento em regiões onde existia rebaixo ou defeitos da laminação manual.

A sequência de lixas utilizadas obedeceu a seguinte numeração: 60, 100, 220, 320, 400, 500 e 1200.

Figura 45 - Modelo lixado.



Fonte: autor, 2021.

Depois da sequência de lixa, uma prática comum é aplicar um prime para reduzir a rugosidade da superfície, produzindo um perfil da superfície uniforme para a aplicação da tinta. Porém, em decorrência da falta dos equipamentos necessários, não foi possível realizar o procedimento conforme o padrão, sendo assim, optou-se por utilizar tinta spray para a superfície do modelo. Porém, o resultado alcançado não

foi o almejado. A tinta spray deixou a superfície com um aspecto fosco. E assim foi preciso lixar novamente e utilizar outro método.

Foi preciso tornar a superfície da fibra de vidro lisa, o que requer mais lixamento e, por isso, um maior custo com lixas. Dessa vez foi preciso dar mais ênfase nas últimas etapas da sequência de lixa, para que o acabamento ficasse melhor.

Figura 46 - Acabamento finalizado.



Fonte: autor, 2021.

A superfície do modelo ficou lisa e estava pronta para iniciar a construção do molde.

5.5.3 Construção do molde

O casco do modelo (plug) foi colocado em uma superfície de vidro, onde tanto o vidro como o plug foram polidos 5 vezes com cera de carnaúba, com 30 minutos de intervalo entre as aplicações.

Figura 47 - Preparação para construir o molde.



Fonte: autor, 2021.

Na região da popa existe um rebaixo na superfície do costado. O ideal seria usar outro pedaço de vidro nessa região, porém, optou-se por utilizar um pedaço de MDF cru de 3mm como substituto, como mostra a Figura 47. Para o laminado não grudar no MDF, usou-se fita crepe para cobrir a área a ser laminada.

Entre a superfície do casco e a base existiam fendas que precisavam ser fechadas antes de iniciar a laminação. Para isso, utilizou-se massa de modelar. Também foi necessário utilizar um palito de picolé para retirar o excesso de massa e deixá-la com um acabamento mais uniforme.

Figura 48 - Aplicação da massa de modelar.



Fonte: autor, 2021.

Após a montagem, constatou-se que as superfícies que foram polidas anteriormente estavam um pouco manchadas, em decorrência do manuseio da peça. Por esse motivo repetiu-se os passos do polimento para garantir que as superfícies ficassem totalmente limpas e bem polidas.

Figura 49 - Imagem superfície polida.



Fonte: autor, 2021.

Depois desse retoque no polimento, aplicou-se o desmoldante líquido PVA. Esse desmoldante, depois de seco, cria uma camada parecida com um plástico finíssimo, que ajuda na hora da desmoldagem.

O desmoldante foi aplicado com uma bucha macia, do tipo utilizada para lavar louças. A aplicação foi feita de forma a deixar uma camada uniforme. Após aplicar o desmoldante e esperar secar, a montagem estava pronta para receber o gel coat.

O gel coat deve ser aplicado também de forma uniforme. Foi utilizado um pincel de 1 polegada para a aplicação, que se assemelha bastante ao de uma pintura.

É importante ressaltar que o gel coat deve ser aplicado de forma a deixar uma camada considerável. Pois, se a camada for muito fina, pode ocorrer problema depois que aplicar a fibra. Problemas também podem ocorrer se a camada ficar espessa.

Assim, seguiu-se a mesma proporção usado na fabricação do reservatório, de 500 g a 700 g para cada metro quadrado (ADVANCED VACUUM HI-TECH COMPOSITES, 2019). Uma forma fácil de contornar esse problema é utilizar um gabarito, um pente de ruga.

Assim, o gel foi aplicado em duas demãos, com a segunda corrigindo alguns eventuais problemas da primeira e uniformizando a espessura.

Figura 50 - Aplicação do gel-coat.



Fonte: autor, 2021.

Aplicado o gel coat, é preciso esperar em torno de 4h a 6h (em temperatura ambiente) para que se comece a laminação de fibra de vidro por cima.

Uma vez decorrido esse tempo, aplicou-se uma camada de fibra de vidro. Esperou-se novamente até a cura (neste caso em torno de 6h) e outra camada foi aplicada. O processo foi outra vez repetido, totalizando 3 camadas.

Figura 51 - Fibra de vidro aplicada.



Fonte: autor, 2021.

Após a cura da última camada, o molde está pronto e o plug já pode ser desmoldado.

Utilizou-se palitos de picolé para ser colocados na lateral da superfície enquanto se forçava o casco para fora do molde. Um martelo de bater pneus também foi usado para leves batidas no fundo do molde, com o objetivo de descolar o fundo do casco.

Com o auxílio de um pé de cabra de martelo, forçou-se a saída do casco pelas estruturas internas. Assim, o casco foi desmoldado e o molde pode ser observado na Figura 52.

Figura 52 – Molde.



Fonte: autor, 2021.

Depois, foi feita uma limpeza no molde, as rebarbas foram cortadas e alguns pequenos defeitos foram corrigidos com gel coat. Assim, o molde estava pronto.

Figura 53 - Molde pronto.



Fonte: autor, 2021.

Foi utilizado o gel coat isoftálico branco para fazer o molde. Porém, esse não é o tipo ideal para se construir moldes. Existe no mercado um tipo de gel coat isoftálico (geralmente laranja) apropriado para fabricação de moldes, como mostra a Figura 54. Entretanto, essa mudança apenas interfere na vida útil do molde.

Figura 54 - Gel-coat para molde laranja.



Fonte: Redelease, 2021.

6 LAMINAÇÃO DE UM CASCO POR INFUSÃO A VÁCUO

Antes da infusão é importante ter em mente uma estimativa de quanto tempo é necessário para a resina atingir todo o laminado, permitindo assim fazer um bom planejamento do processo.

Para fazer previsões ou simular uma laminação por infusão, é muito importante conhecer todos os dados da equação de Darcy. Para Silva (2016), o desafio principal é obter os valores da permeabilidade e da porosidade do material, nem sempre disponibilizados pelos fabricantes ou distribuidores. Mesmo que esses valores sejam conhecidos, ao criar uma configuração particular de manta e tecido, esses valores podem ser alterados.

Uma alternativa para contornar esse problema, é a realização de experimentos práticos para determinar a permeabilidade, onde se fornece um valor para a porosidade na formula da lei de Darcy, por exemplo, $\Phi = 0,5$ (BARRACUDA COMPOSITES, 2021).

Também é possível utilizar as equações 5 e 6 para se obter o valor da porosidade, como mostra a Tabela 4.

$$V_f = \frac{n \cdot W_a}{\rho_f \cdot h} \quad \text{Eq. 5}$$

$$V_f + \Phi = 1 \quad \text{Eq. 6}$$

Tabela 4 - Calculo da porosidade.

Dados das Equações	Manta	Tecido	Unidade
n =	3	2	-
W _a =	300	83	[g/m ²]
ρ _f =	2540	2540	[kg/m ³]
h =	0,003	0,00018	[m]
V _f =	0,1181	0,3631	-
V _{f_total} =	0,4812		-
Φ =	0,5188		-

Fonte: autor, 2021.

Com este resultado, a permeabilidade pode ser obtida pela lei de Darcy, uma vez que os outros dados já são conhecidos.

6.1 Infusão em uma placa

O objetivo de realizar a infusão em uma placa é a avaliar a permeabilidade do plano de laminação utilizado e verificar a possibilidade de fazer a infusão do casco do modelo.

6.1.1 Determinação da permeabilidade

Antes de realizar o experimento para determinar a permeabilidade, é necessário definir como será o plano de laminação a ser utilizado no processo de infusão. Planejar e registrar o layout de infusão permitirá, em muitos casos, que infusões futuras dos cascos sejam realizadas sem a necessidade de testes prévios para uma mesma configuração.

6.1.2 Plano de laminação

O plano de laminação indica a sequência que serão postas as diversas camadas de fibra de vidro que formam o laminado. A Tabela 4 mostra como ficou determinada esta sequência.

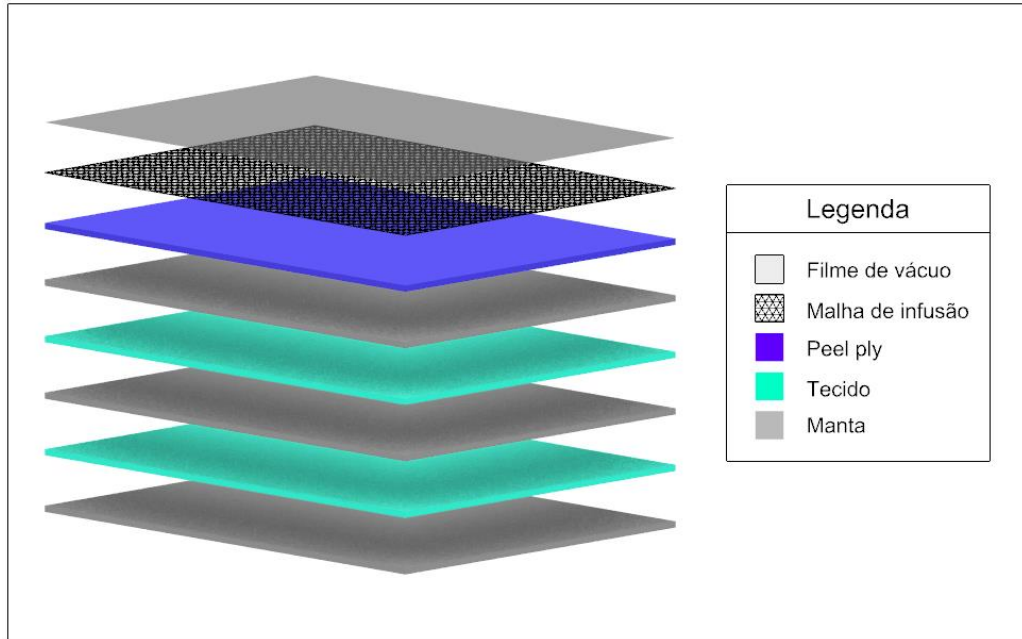
Tabela 5 - Plano de laminação.

Camada	Tipo	g/m ²	Orientação
1	Manta	300	-
2	Tecido de trama plana RE83P	83	0/90°
3	Manta	300	-
4	Tecido de trama plana RE83P	83	0/90°
5	Manta	300	-

Fonte: autor, 2021.

Com as camadas colocadas na ordem correta, é hora de colocar o peel ply, a malha de infusão, e o filme de vácuo. A Figura 55 mostra como todos esses materiais ficaram organizados.

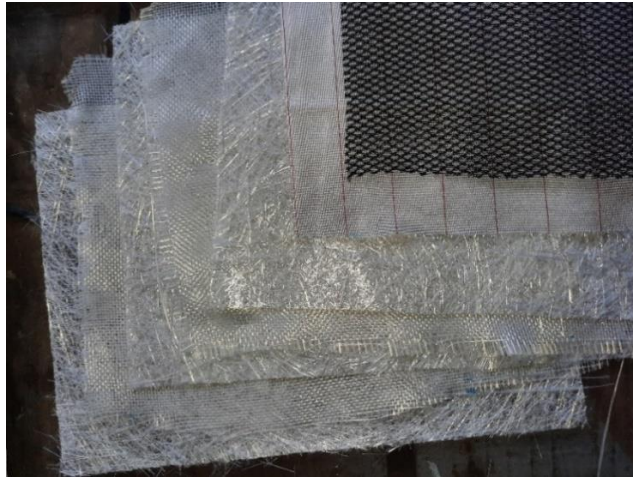
Figura 55 - Esquema da laminação.



Fonte: autor, 2021.

Determinou-se que a placa para o teste teria 30 cm de comprimento e 21 cm de largura, para que suas dimensões sejam suficientes para ser usada em futuros testes de resistência a tração. Dessa forma, os materiais foram cortados como mostra a Figura 56.

Figura 56 - Materiais cortados.



Fonte: autor, 2021.

Com a mesa de testes montada, iniciou-se a laminação da placa. O teste foi organizado como mostra a Figura 57.

Figura 57 - Teste com placa plana.



Fonte: autor, 2021.

A bomba permaneceu ligada após a infusão por aproximadamente 50 minutos. Transcorrido esse tempo, a resina já parecia estar com o processo de cura bastante avançado e por esse motivo a bomba foi desligada.

Para aferir a temperatura do laminado durante a cura da resina, utilizou-se o termômetro infravermelho mostrado na Figura 58.

Figura 58 - Termômetro infravermelho.



Fonte: autor, 2021.

A temperatura máxima foi de 29,8 °C, ou seja, não houve um aumento significativo na temperatura durante este teste, isto pode ter acontecido devido à baixa espessura do laminado e a consequente pouca quantidade de resina.

Em relação a quantidade de resina poliéster e fibra de vidro, a placa apresentou as seguintes características:

Tabela 6 - Dados da placa.

Especificação	Comentário	Quantidade
Manta	3 camadas de manta 300 g/m ²	57 g
Tecido	2 camadas de Tecido RE83P (83 g/m ²)	9 g
Resina	Peso total - Peso dos reforços	47 g
Peso total do laminado	Peso do laminado após a cura	111 g
Teor de fibra	Peso dos reforços / Peso total	0,5765 (≈ 58%)

Fonte: autor, 2021.

A Figura 59 mostra como ficou o resultado da placa.

Figura 59 - Resultado da infusão da placa.



Fonte: autor, 2021.

Uma vez que a infusão foi feita e bem-sucedida, e com o tempo registrado, é possível agora usar a Lei de Darcy e estimar a permeabilidade do plano de laminação usado na placa, sendo esse dado também útil posteriormente para a simulação CFD.

Usando a Equação 7 apresentada na seção 3.5.4, chega-se ao seguinte valor para a permeabilidade:

$$K = \frac{L^2 \cdot \Phi \cdot \mu}{2 \cdot \Delta P \cdot t} \quad \text{Eq. 7}$$

Tabela 7 - Permeabilidade do laminado.

Item	Viscosidade [Pa.s]	Diferença de pressão [Pa]	Porosidade	Tempo [s]	Comprimento [m]	Permeabilidade [m ²]
	μ	Δ	Φ	t	L	K_1
Valores	0,295	51325	0,5188	119,00	0,35	$1,53 \times 10^{-9}$

Fonte: autor, 2021.

6.2 Infusão a vácuo do casco

Os dados do teste da placa mostram que é viável fazer uma infusão para obter um casco com o molde, uma vez que a maior distância que a resina vai percorrer, para a configuração de infusão mostrada na Figura 25, é de cerca de 20,5 cm, medido desde a quilha até o fim do costado, a qual é menor que o comprimento da placa.

Como a resina utilizada na placa tem tempo de trabalho de aproximadamente 10 minutos e o tempo para a infusão da placa ficou muito inferior a esse valor, logo, para a infusão do casco o tempo será ainda menor, utilizando a mesma resina e o mesmo plano de laminação.

6.2.1 Preparação dos equipamentos para a infusão do casco

O molde precisa estar completamente limpo antes de começar os preparativos da infusão. Após a limpeza, pode-se deixar a tacky tape já posicionada, com a parte superior coberta para não grudar.

Após isso, o molde foi polido com cera de carnaúba 5 vezes, com intervalo de 30 minutos entre cada polimento. Depois, aplicou-se uma camada uniforme do desmoldante líquido PVA.

Com isso, adicionou-se as camadas de fibra de vidro no molde, seguindo o mesmo plano de laminação da placa, como mostra a Figura 60.

Figura 60 - Organizando o laminado.



Fonte: autor, 2021.

É importante mencionar também que, antes de colocar os outros elementos, é necessário se certificar de que a fibra está bem acomodada na geometria do molde. A fibra não deve ficar esticada e precisa estar bem posicionada nas regiões que apresentam quinas. Uma atenção especial deve ser dada as regiões conhecidas como “cantos vivos”.

Com a fibra de vidro no seu devido lugar, colocou-se o peel ply e em seguida a malha de infusão. Após isso, as linhas de vácuo e de resina foram posicionadas e o filme de vácuo foi colocado, sendo fixado aos poucos na tacky tape, deixando vincos (rugas) para que se adaptasse melhor ao molde.

Figura 61 - Colocando os consumíveis.



Fonte: autor, 2021.

Após a colocação do filme de vácuo, conectou-se as mangueiras de vácuo e da entrada de resina.

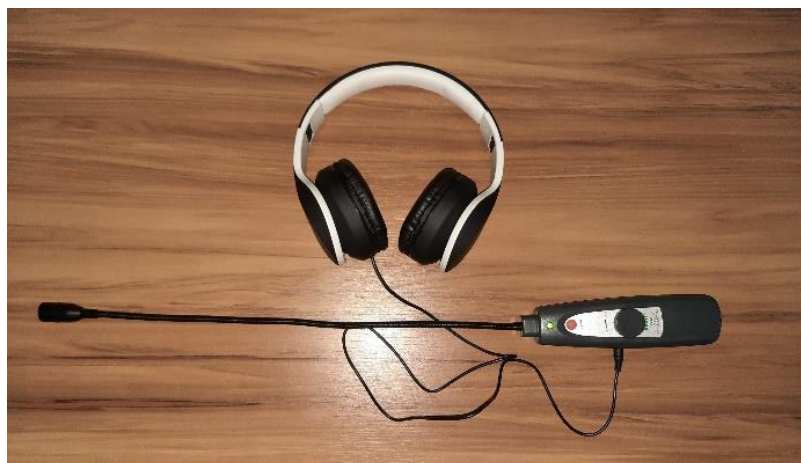
Figura 62 - Tudo pronto para a infusão.



Fonte: autor, 2021.

Antes de começa a infusão, deve-se testar se o vácuo está sendo feito de forma adequada, se não há vazamentos e se o laminado está bem acomodado no molde. Isso pode evitar problemas que podem influenciar no resultado da infusão. Para esta verificação, foi utilizado um detector de vazamentos ultrassônico, mostrado na Figura 63.

Figura 63 - Detector de vazamento ultrassônico.



Fonte: autor, 2021.

O detector emite pulsos que podem ser ouvidos através do fone de ouvido conectado ao equipamento. Para procurar vazamentos, deve-se aproximar a ponta do detector às regiões das conexões e da união entre o filme de vácuo e a tacky tape. Ao se aproximar de uma região onde há vazamento, a frequência dos pulsos aumenta. Neste caso, é preciso eliminar ou minimizar o vazamento o máximo possível, reforçando a vedação das conexões e pressionando o filme de vácuo no local da tacky tape, para que a adesão entre eles aumente. Se o vazamento estiver acontecendo por causa de um furo no filme de vácuo, deve-se procurar vedar esse furo.

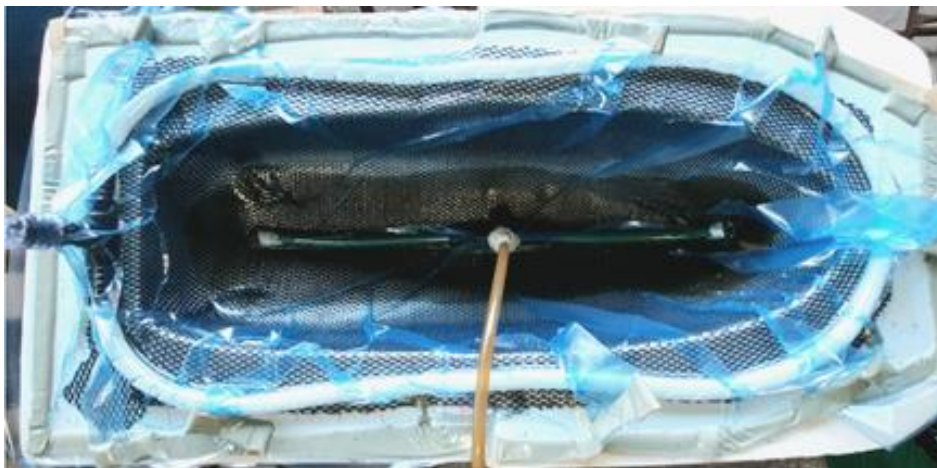
6.2.2 Infusão

Garantindo as condições necessárias para a infusão, preparou-se a resina. Uma quantidade estimada de resina poliéster (do mesmo tipo utilizado na placa) e de catalisador foram deixados em recipientes separados para posterior mistura.

A bomba foi ligada e esperou-se um tempo, até atingir a estabilidade de vácuo. Para isso, é preciso observar se o ponteiro do vacuômetro parou de se movimentar. Isso leva uns poucos minutos, dependendo do laminado.

Com o vácuo já estabilizado, misturou-se a resina com o catalisador e a válvula para a entrada da resina foi aberta, dando início a infusão.

Figura 64 - Frente de resina na infusão do casco.



Fonte: autor, 2021.

Uma vez que a resina preparada foi sugada, deve-se fechar a válvula de alimentação para reestabelecer a estanqueidade do vácuo.

Após a resina atingir todos os pontos do laminado, deixou-se a bomba ligada por 50 minutos, durante o processo de cura, afim de evitar qualquer entrada de ar. Depois disso, o laminado foi deixado para terminar a cura e no dia posterior, desmoldado.

Utilizando novamente a Equação 7, foram obtidos os valores mostrados na Tabela 7.

$$K = \frac{L^2 \cdot \phi \cdot \mu}{2 \cdot \Delta P \cdot t} \quad \text{Eq. 7}$$

Tabela 8 - Permeabilidade do casco.

Item	Viscosidade [Pa.s]	Diferença de pressão [Pa]	Porosidade	Tempo [s]	Comprimento [m]	Permeabilidade [m ²]
	μ	Δ	ϕ	t	L	K_2
Valores	0,295	71325	0,5188	98,00	0,205	$4,60 \times 10^{-10}$

Fonte: autor, 2021.

6.2.3 Retirada do molde

A Figura 65 mostra o resultado da infusão sendo retirado do molde.

Figura 65 - Laminado prestes a ser desmoldado.



Fonte: autor, 2021.

A Figura 66 mostra a malha de infusão e o peel ply sendo retirado.

Figura 66 - Retirando o peel ply e a malha de infusão.



Fonte: autor, 2021.

6.3 Simulação com CFD

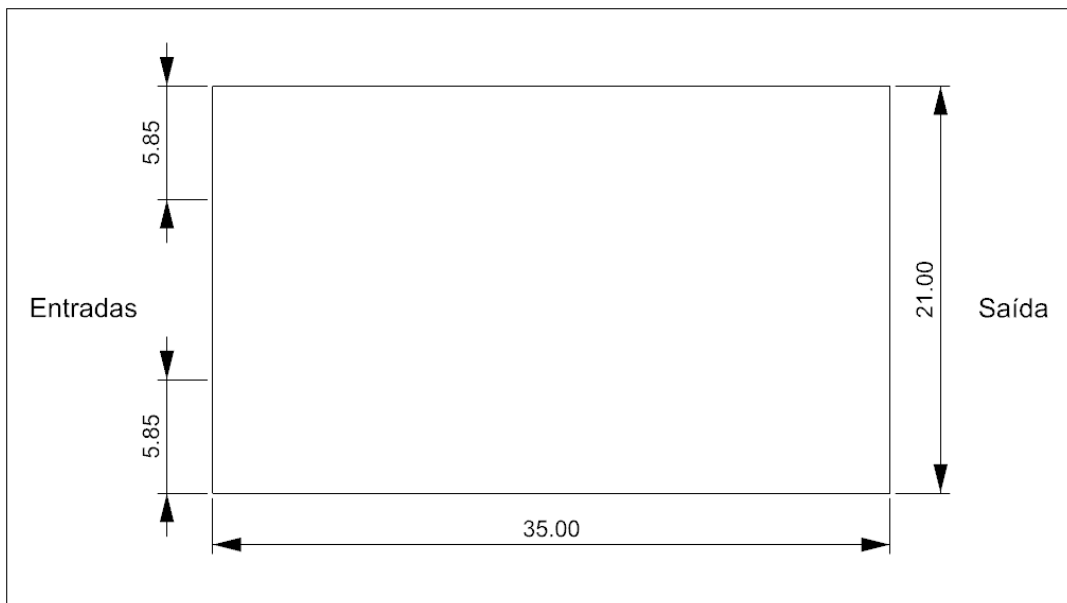
As simulações aqui apresentadas seguem o exemplo feito por M. Letzow et al. (2012) para um processo LRTM, no *software* Ansys Fluent. Em seu trabalho, evidencia-se que é possível utilizar o Fluent para avaliar o tempo e o avanço da resina como aproximação para um LRTM (LETZOW et al., 2012).

Como o LRTM tem similaridades com o processo de infusão, buscou-se utilizar este método para averiguar a possibilidade de fazer simulações também no processo de infusão. Essas simulações podem ser de grande utilidade para fazer previsões em geometrias complexas.

Inicialmente foi feito um teste para a infusão realizada na placa. Fez-se uma geometria com as mesmas dimensões utilizada na infusão real, onde foi definida as regiões de entrada de resina e saída para ar (*inlet* e *outlet*), em ambas foi definido condições de contorno do tipo pressão. As demais arestas da geometria foram definidas como parede (*wall*). O Anexo B mostra mais detalhes sobre as configurações desta simulação.

Para simular de forma mais precisa, definiu-se as regiões de entrada de resina apenas as partes onde ficam os espirodutos, desconsiderando a região do “T”, conforme mostrado na Figura 67. Já para a saída isso não foi necessário, uma vez que ficou afastada do laminado, sendo preferível deixar toda a aresta da direita para a ela.

Figura 67 - Dimensões da placa em mm.



Fonte: autor, 2021.

A malha foi gerada para a geometria da placa. Para avaliar a qualidade dessa malha, foi feito um teste de convergência, como mostra a Tabela 9. O tamanho adotado para os elementos foi 0,001.

Tabela 9 - Teste de convergência da malha da placa.

Tamanho do elemento [m]	Tempo aproximado para completar a infusão [s]
0,01	164
0,005	135
0,001	119
0,00075	119

Fonte: autor, 2021.

A Tabela 10 mostra os dados da malha gerada para a placa.

Tabela 10 - Malha da placa.

Dados da malha da placa	
Tamanho do elemento [m]	0,001
Quantidade de nós	74412
Quantidade de elementos	73850

Fonte: autor, 2021.

A Tabela 11 apresenta algumas métricas desta malha.

Tabela 11 - Métricas da malha da placa.

Métricas da malha (placa)	
Element Quality (valor médio)	0,99945
Desvio padrão do Element Quality	1,7989E-05
Skewness (valor médio)	1,3062E-10
Desvio padrão do Skewness	0,0000
Orthogonal Quality (valor médio)	1,0000
Desvio padrão do Orthogonal Quality	0,0000

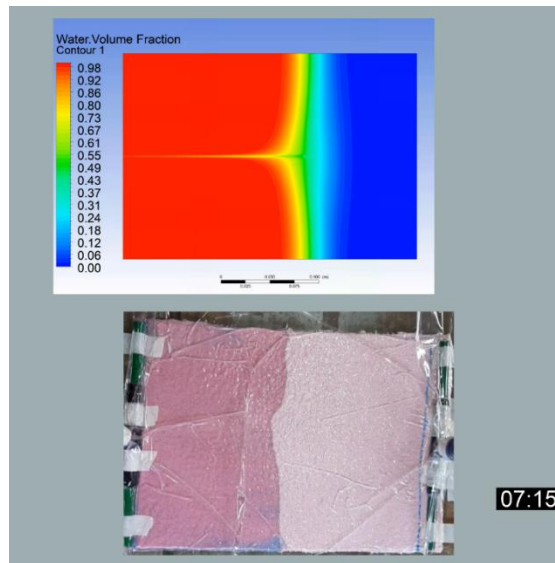
Fonte: autor, 2021.

Foram realizadas comparações entre simulações e infusões reais de teste. Essas infusões de teste foram realizadas com água antes das infusões utilizando resina, mostradas nesta seção.

Como os testes foram filmados, as imagens puderam ser usadas para fazer comparações com CFD, servindo para analisar a confiabilidade da malha gerada nas geometrias utilizadas e como auxílio na validação das simulações. Esses procedimentos foram realizados tanto para a placa quanto para o casco, que será abordado mais adiante.

A Figura 68 mostra um *frame* de um vídeo onde é feita uma comparação entre o CFD e uma infusão de teste com água.

Figura 68 – Comparação entre CFD e infusão de teste utilizando água.



Fonte: autor, 2021.

Após os testes com água e com a malha pronta, é possível iniciar as configurações no Fluent para a simulação da placa desta seção. A Tabela 12 mostra os dados necessários para adicionar as condições de contorno e os outros dados no Fluent.

Tabela 12 - Tabela dos dados usados no Fluent (Placa).

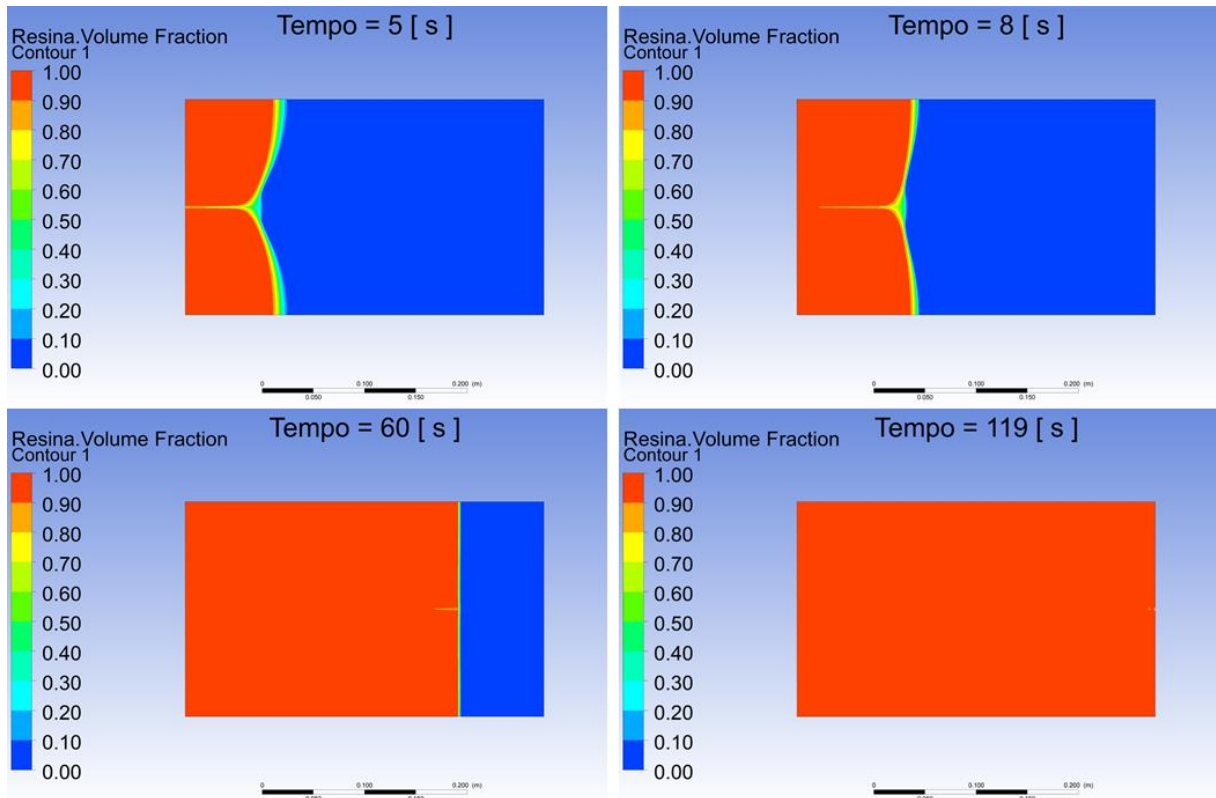
Dados	Valor	Unidade
Diferença de pressão (ΔP)	51325	[Pa]
Resistência Viscosa ($1/K_1$)	$6,52 \times 10^8$	[1/m ²]
Tempo total (t)	119	[s]
Porosidade (Φ)	0,5188	-
Viscosidade (μ)	0,295	[Pa.s]
Densidade (ρ)	916	[kg/m ³]
Comprimento máximo percorrido (L)	0,35	[m]

Fonte: autor, 2021.

É importante observar que no Fluent utiliza-se a resistência viscosa, que é o inverso da permeabilidade.

A Figura 68 mostra a fração de resina na placa para diferentes intervalos de tempo, onde a região em vermelho representa a área totalmente ocupada pela resina (com valor 1 na escala) e a região azul é a área sem resina (com valor 0 na escala).

Figura 69 - Simulação da infusão (Placa plana).



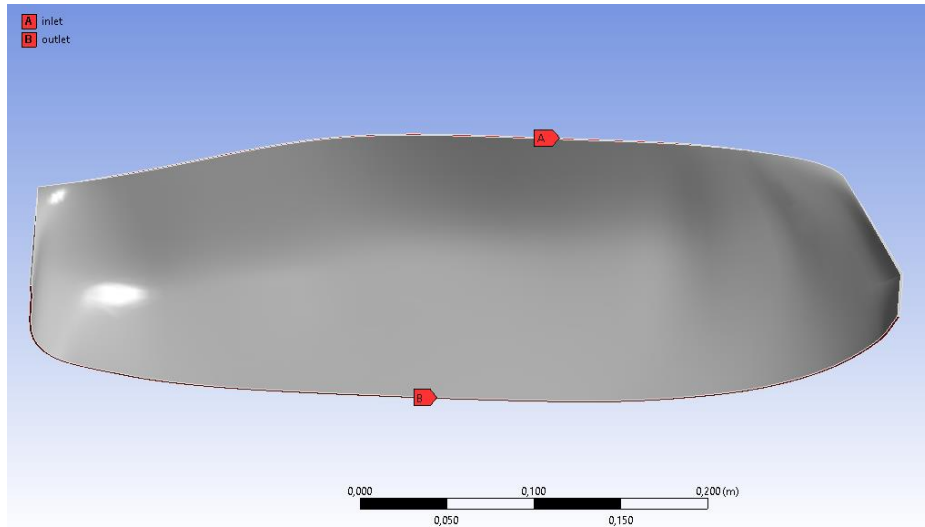
Fonte: autor, 2021.

Também foram feitas simulações da infusão do casco apresentada na seção 5.2.2, considerando o mesmo posicionamento da linha de vácuo e da entrada de resina, com o objetivo de avaliar o avanço da resina.

Seguindo um procedimento semelhante ao da placa, definiu-se uma geometria com as mesmas dimensões do casco do modelo e suas regiões de entrada, saída e o local de escoamento. A geometria foi levemente simplificada para evitar problemas de continuidade e erros no programa, suavizando as quinas e regiões de encontro de superfície.

Também buscou-se aproveitar a simetria do casco, em relação ao seu plano diametral. Dessa forma, é necessário simular apenas uma metade e espelhar o resultado, uma vez que o escoamento em ambos os lados é idêntico. Com isso, é possível reduzir bastante o poder computacional necessário para a simulação. O resultado da geometria pode ser observar na Figura 70.

Figura 70 - Geometria do casco.



Fonte: autor, 2021.

Na tabela 13 estão os dados do teste de convergência feito para a malha do casco.

Tabela 13 - Teste de convergência da malha do casco.

Tamanho do elemento [m]	Tempo aproximado para completar a infusão [s]
0,01	140
0,005	127
0,001	98
0,00075	98

Fonte: autor, 2021.

Dessa forma, foi adotado o tamanho 0,001 para os elementos da malha. A Tabela 14 mostra os dados da malha gerada para a geometria do casco.

Tabela 14 - Malha do casco.

Dados da malha do casco	
Tamanho do elemento [m]	0,001
Quantidade de nós	166320
Quantidade de elementos	109616

Fonte: autor, 2021.

Na Tabela 15 são apresentadas algumas métricas desta malha.

Tabela 15 - Métricas da malha do casco.

Métricas da malha (casco)	
Element Quality (valor médio)	0,72393
Desvio padrão do Element Quality	0,09410
Skewness (valor médio)	0,17727
Desvio padrão do Skewness	0,12280
Orthogonal Quality (valor médio)	0,93839
Desvio padrão do Orthogonal Quality	0,09074

Fonte: autor, 2021.

Para esse caso, os dados utilizados no programa podem ser observados na Tabela 16.

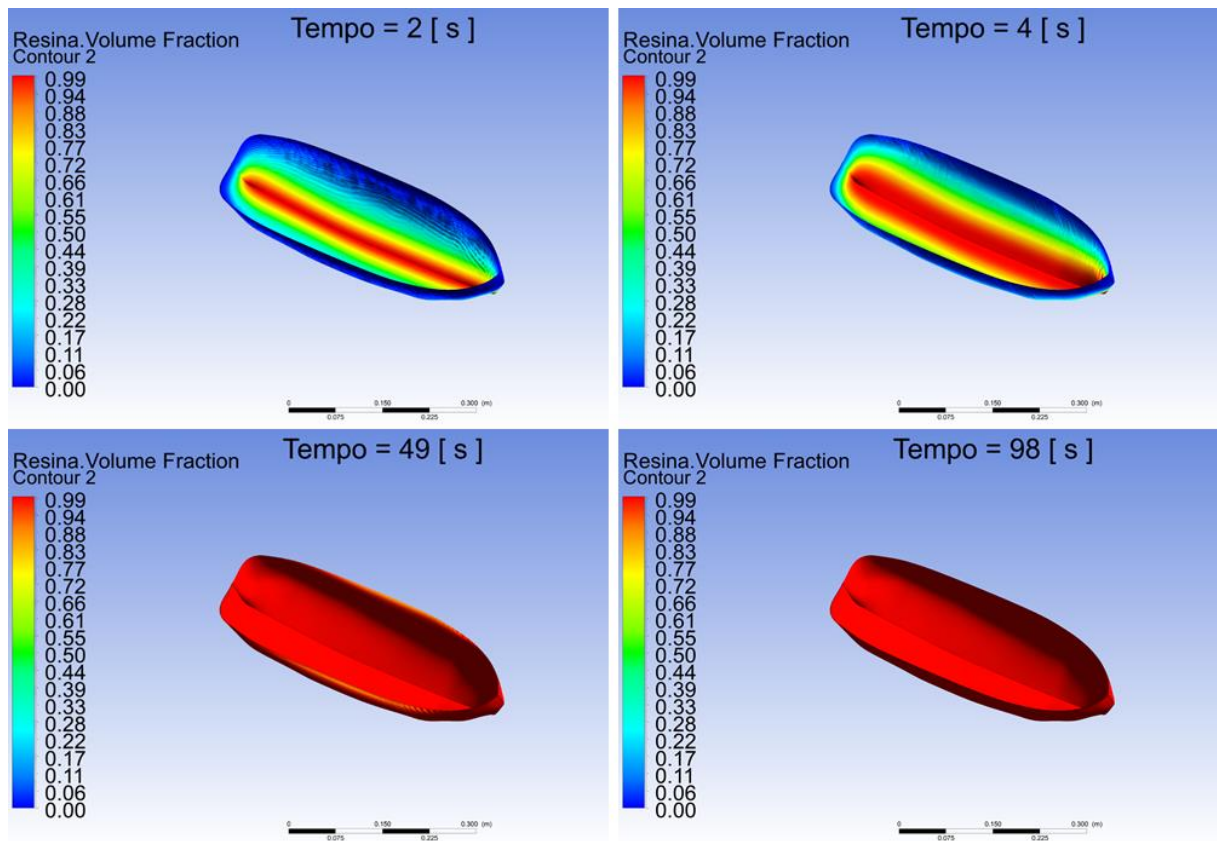
Tabela 16 - Dados da simulação do casco.

Dados	Valor	Unidade
Diferença de pressão (ΔP)	71325	[Pa]
Resistência Viscosa ($1/K_2$)	$2,17 \times 10^9$	[1/m ²]
Tempo total (t)	98	[s]
Porosidade (Φ)	0,5188	-
Viscosidade (μ)	0,295	[Pa.s]
Densidade (ρ)	916	[kg/m ³]
Comprimento máximo percorrido (L)	0,201	[m]

Fonte: autor, 2021.

A Figura 71 mostra a fração de resina no casco, em diferentes intervalos de tempo.

Figura 71 - Simulação da infusão do casco.



Fonte: autor, 2021.

7 LAMINANDO UM CASCO POR LAMINAÇÃO A VÁCUO

Neste capítulo é mostrado a construção de um casco pelo processo de laminação a vácuo utilizando o mesmo molde que foi usado para o processo de infusão.

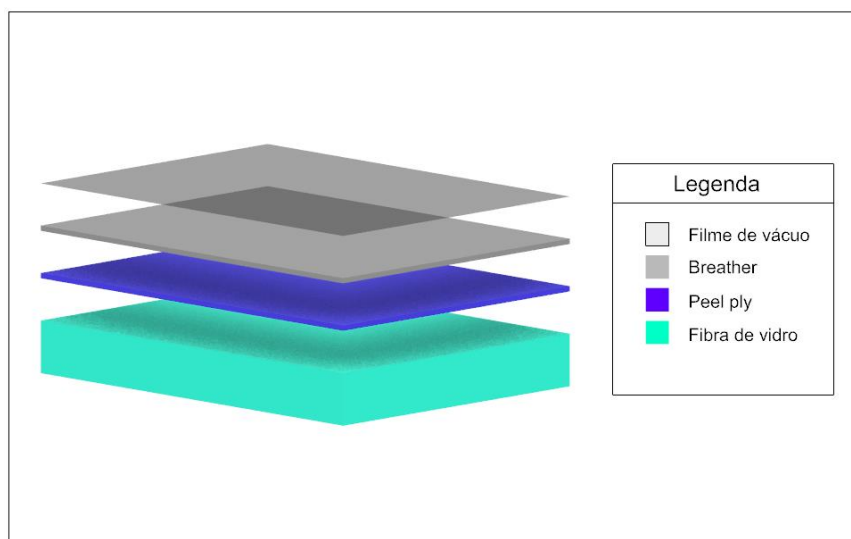
7.1 Procedimentos iniciais

O molde foi polido seguindo o mesmo procedimento mencionado para a infusão. Novamente, após o polimento, foi preciso aplicar uma demão de desmoldante líquido PVA.

7.2 Laminação a vácuo

O início desse processo é exatamente igual a laminação manual, utilizou-se um pincel (trincha) para a aplicação de resina poliéster no molde. Em seguida, foi colocado uma camada de manta de fibra de vidro que foi impregnada por resina com o pincel. Esse mesmo procedimento foi repetido três vezes, totalizando um total de três camadas de fibra de vidro.

Figura 72 - Disposição dos materiais para a laminação a vácuo.

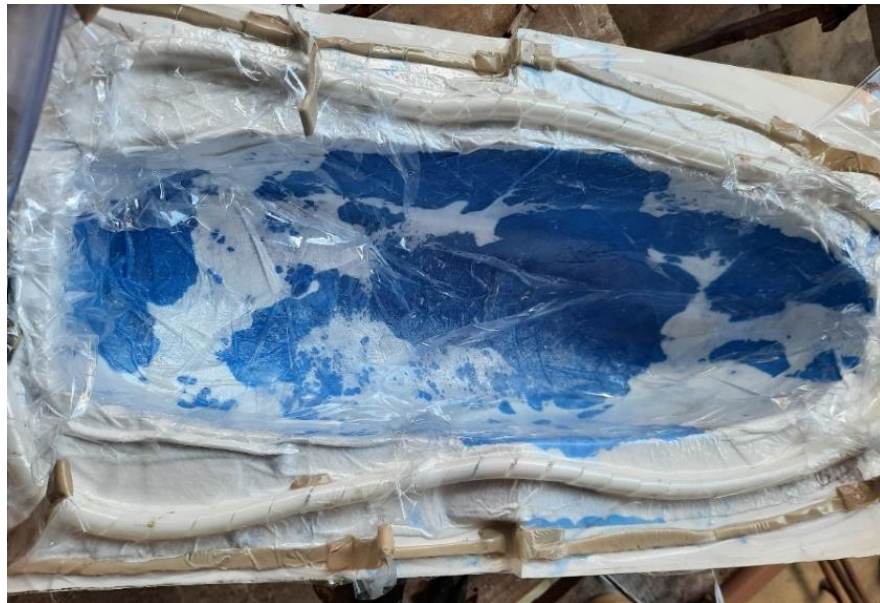


Fonte: autor, 2021.

Rapidamente, o peel ply foi colocado por cima do laminado, em seguida foi colocado o breather, a linha de vácuo e o filme de vácuo. O filme de vácuo foi fixado ao molde com tacky tape, a mangueira de vácuo foi conectada ao reservatório e deu-se início ao vácuo. É preciso verificar a existência de vazamentos e procurar minimizá-los utilizando o sensor de vazamento ultrassônico, para ter um bom nível de compactação.

Para esse procedimento foi utilizado uma resina poliéster de baixa viscosidade. Este tipo de resina apresenta maior tempo de trabalho, fator importante para a laminação a vácuo, pois, é preciso que a cura da resina aconteça enquanto o vácuo está sendo realizado. Dessa forma, o excesso de resina pode ser retirado do laminado, como mostra a Figura 73.

Figura 73 - Laminação a vácuo.



Fonte: autor, 2021.

A temperatura máxima durante o processo foi de 37,4 °C e a bomba ficou ligada durante 1h30min, durante a cura da resina.

8 RESULTADOS E DISCUSÕES

Nesta etapa são apresentados os resultados obtidos pelos processos utilizados e são discutidas as principais diferenças.

8.1 Cascos obtidos

O primeiro casco do modelo foi obtido por infusão (Infusão 1). Neste processo foi utilizado a resina poliéster da marca Reparauto, ou seja, utilizou-se as mesmas configurações e materiais utilizados no teste da placa mostrada na Figura 59. O resultado do casco pode ser visto na Figura 74.

Figura 74 - Resultado da Infusão 1.



Fonte: autor, 2021.

Durante a infusão, a resina percorreu todo molde e impregnou de forma contínua e uniforme os reforços. Apesar disso, algumas regiões, principalmente o fundo,

ficaram com algumas falhas na impregnação, alguns pontos brancos que mostram imperfeições durante o processo.

Algumas falhas também podem ser vistas nas regiões que apresentam quinas. Inicialmente pensou-se que isso aconteceu pelo fato da resina utilizada não ser de baixa viscosidade, o que poderia ter dificultado o seu transporte pelo laminado. Outro motivo que poderia ter contribuído, seria a má acomodação da fibra de vidro no molde.

Assim, foi feita uma nova laminação por infusão (Infusão 2) para avaliar o resultado utilizando, desta vez, a resina epóxi 2004 (resina epóxi de baixa viscosidade) juntamente com o catalisador 3154, ambos da marca Redelease, além de tomar todos os cuidados possíveis para acomodar os reforços no molde da melhor forma. Apesar de todo o esforço, o problema continuou, com algumas regiões apresentando o mesmo problema da Infusão 1.

A Figura 75 mostra o resultado da infusão utilizando a resina epóxi de baixa viscosidade. Importante frisar que a resina utilizada era transparente e que mesmo adicionando corante azul, ela ficou bastante translúcida.

Figura 75 - Resultado da Infusão 2.



Fonte: autor, 2021.

Comparando as duas imagens, a Infusão 1 apresenta um aparente resultado melhor. Isso pode ter acontecido devido ao fato que a resina epóxi utilizada tem um tempo de trabalho muito maior (em torno de 60 minutos), comparado com o da resina poliéster utilizada, que era de 10 minutos. Para essa infusão, foi utilizada a proporção padrão entre resina epóxi e catalisador, seguindo as instruções do fabricante, tendo em vista evitar problemas de instabilidade da resina e superaquecimento.

Na indústria, um dos motivos de se utilizar resina epóxi é em decorrência do seu maior tempo de trabalho. Já para os casos aqui abordados, por se tratar de um modelo relativamente pequeno, o tempo maior de trabalho pode acabar sendo uma desvantagem, porque uma vez que a infusão ocorreu em todo o molde, a resina continua sendo sugada por muito tempo antes de curar, o que acaba deixando o laminado com uma aparente qualidade inferior. Dessa forma, a Infusão 2 apresentou maior teor de fibra, como será mostrado mais adiante.

Por fim, a Figura 76 mostra o resultado do casco obtido pelo processo de laminação a vácuo.

Figura 76 - Resultado da laminação a vácuo.



Fonte: autor, 2021.

O resultado apresentou um acabamento um pouco superior ao das infusões e menos falhas, o que pode ser atribuído ao nível maior de controle desse processo pelo laminador.

O fundo desse casco apresentou resultado excelente, porém o mesmo não aconteceu com os costados próximos as bordas, que ficaram com qualidade menor. Isso pode ter acontecido por causa da resina utilizada no processo. Para ter um tempo maior para trabalhar, resolveu-se utilizar resina poliéster de baixa viscosidade. Essas resinas apresentam maior dificuldade de serem laminadas na vertical, pois escorrem com facilidade, isso pode ter diminuído a quantidade de resina nessa região.

Outro fator que pode ter contribuído para esse problema, seria provocado porque uma pequena parte da resina nessa região pode ter sido sugada pela linha de vácuo, que ficou próxima da borda do costado.

8.2 Custos

A Tabela 17 mostra os custos de produção em cada um dos cascos obtidos, para que seja possível comparar cada um deles, e facilitar uma decisão em projetos futuros.

É importante ressaltar que os custos mencionados na tabela não levam em conta a fabricação do molde no custo total, uma vez que o interesse está apenas na comparação do custo de produção entre cada processo. O custo do molde foi de aproximadamente R\$ 65,60.

Tabela 17 - Custo de produção do casco em cada processo.

Processo	Custo com manta de fibra de vidro	Custo da resina	Custo dos consumíveis	Custo Total
Infusão 1	R\$10,08	R\$8,40	R\$117,49	R\$135,97
Infusão 2	R\$10,19	R\$44,40	R\$117,49	R\$172,08
Laminação a vácuo	R\$9,91	R\$11,20	R\$93,11	R\$114,22

Fonte: autor, 2021.

Para efeito de comparação, a Tabela 17 só leva em conta o valor gasto com manta de fibra de vidro, pois o tecido não foi usado no processo de laminação a vácuo. Dessa

forma, seria injusto comparar adicionando essa despesa ao custo total das infusões, já que costuma ter valor elevado.

De certa forma, já era esperado que a infusão fosse o método que apresentasse maior custo de produção, tendo vista que este método só apresenta vantagem econômica para a produção de várias unidades.

8.3 Teor de fibra

O teor de fibra é um importante indicador da qualidade do laminado. Por isso, a Tabela 18 mostra a comparação do teor de fibra entre os diferentes processos de laminação. Ele foi calculado como sendo a razão entre a massa de fibra sobre a massa total do laminado.

Tabela 18 - Comparação do teor de fibra.

Processo	Fibra [g]	Resina [g]	Massa total [g]	Teor de fibra [%]
Infusão 1	263	208	471	55,84
Infusão 2	265	139	404	65,59
Laminação a vácuo	293	398	691	42,40

Fonte: autor, 2021.

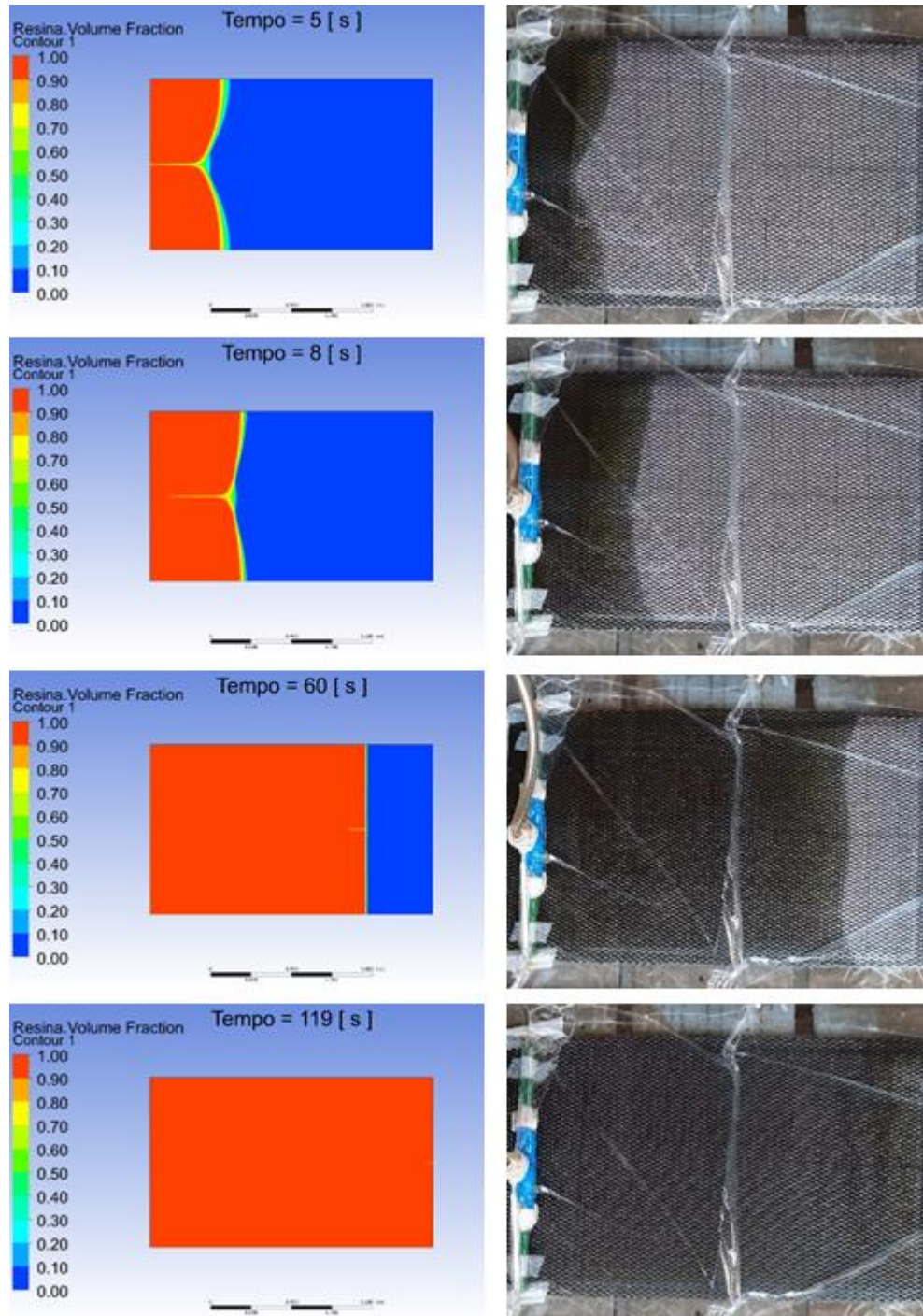
Era esperado que a infusão fosse o método com melhor teor de fibra. Os resultados estão próximos dos valores apresentados na Figura 2 e na Tabela 1. É importante ressaltar que houveram algumas imperfeições nas infusões (pequenas falhas na impregnação do laminado pela resina), o que pode ter influenciado levemente no teor de fibra, elevando um pouco os valores.

8.4 Comparação com a simulação

A seguir são apresentadas as imagens com as comparações entre as simulações feitas em CFD e as imagens das infusões realizadas.

As imagens da simulação na Figura 77 são de intervalos de tempos idênticos aos das fotos da infusão realizado na placa.

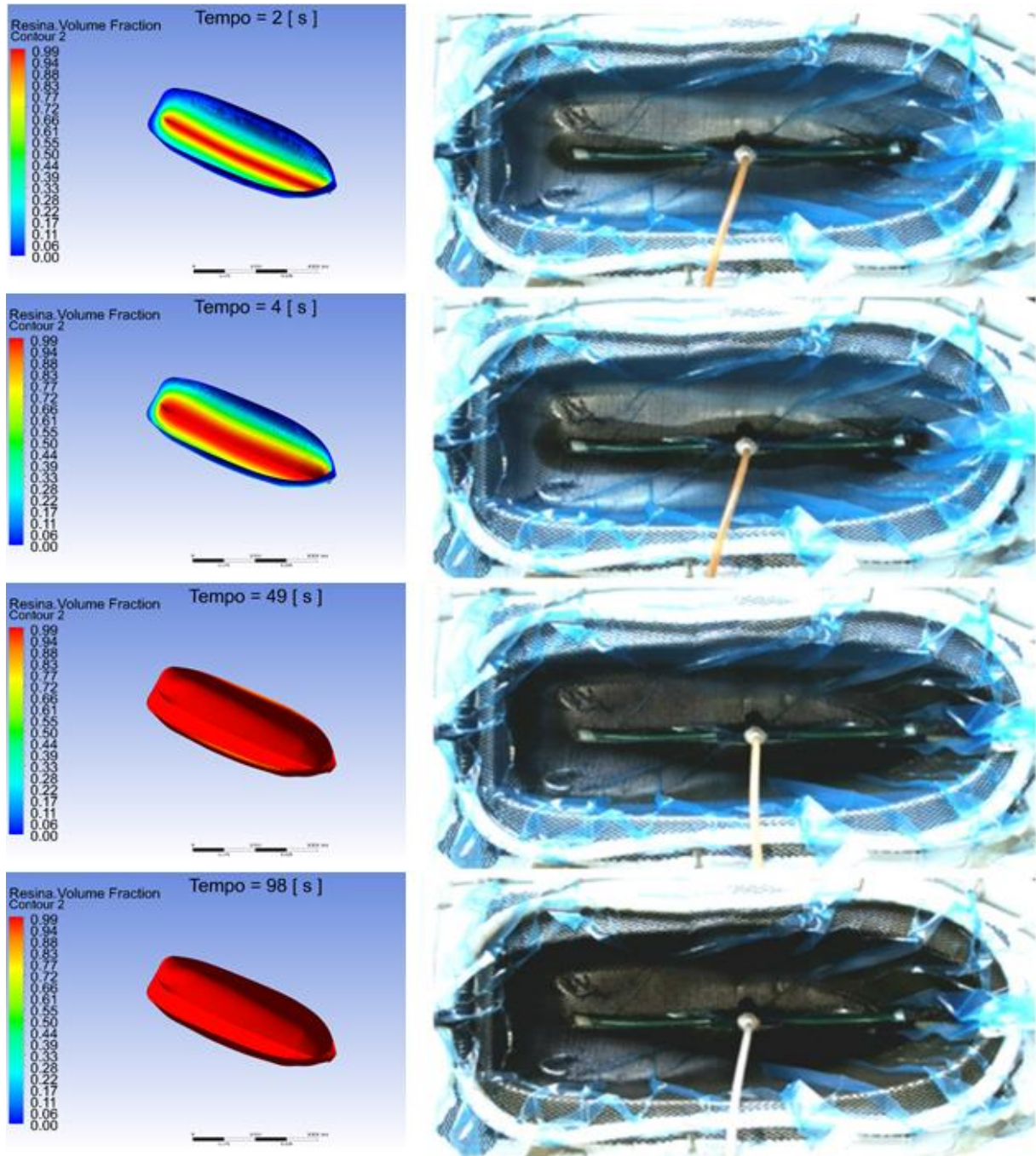
Figura 77 - Comparação infusão da placa com CFD.



Fonte: autor, 2021.

A Figura 78 mostra a mesma comparação, agora para a infusão 1 do casco.

Figura 78 - Comparação da infusão do casco com CFD.



Fonte: autor, 2021.

Observa-se que existe bastante semelhança entre as simulações feitas no Ansys Fluent e as infusões reais. Assim, este programa se mostra como um importante aliado

na identificação de problemas, para evitar desperdícios de materiais e auxiliar no planejamento do processo.

8.5 Sugestões

Os cascos obtidos nos processos relatados podem ser facilmente finalizados com apenas um leve acabamento e pintura, ficando prontos para serem utilizados, exigindo menos trabalho no acabamento que um casco produzido por laminação manual.

É útil criar um banco de dados com valores da permeabilidade, com esses valores sendo registrados toda vez que um novo plano de laminação fosse utilizado em uma infusão, para que possa ser consultado sempre que necessário. Isso pode diminuir a necessidade de realizar novos testes toda vez em que houver uma modificação da geometria ou na disposição dos tecidos utilizados, economizando assim material e tempo na construção dos cascos.

Diante dos resultados das análises dos processos utilizados na confecção dos cascos, pode-se decidir os métodos mais indicados para diferentes modelos a serem construídos pela equipe Navícula Boat Design, escolhendo aqueles que trazem mais vantagens em cada competição.

Dessa forma, se a competição não for de alto desempenho, a laminação a vácuo apresenta melhor custo benefício, uma vez que apenas um barco de cada tipo é construído. E como já mencionado, a infusão só apresenta vantagem econômica se for construído várias unidades. Se o método de construção for levado em conta para pontuação na competição, nesse caso, a infusão pode ser uma boa alternativa, por ser um processo mais tecnológico e superior a laminação a vácuo em muitos aspectos.

No caso de embarcações de alto desempenho, o investimento maior na infusão é compensado pela maior performance da embarcação. Sendo dessa forma justificado a escolha por um processo de fabricação que permita gerar peças leves, resistentes e capazes de atingir maiores velocidades.

9 CONCLUSÕES

A metodologia de utilização dos processos de laminação e infusão a vácuo foi desenvolvida e aplicada, utilizou-se um casco de um rebocador em escala reduzida para servir de modelo a ser copiado por esses métodos de construção.

Foi construído um reservatório de vácuo para proteger a bomba e possibilitar mais conexões de vácuo, caso seja necessário. O reservatório atendeu as necessidades dos processos relatados neste trabalho. As conexões e organização dos equipamentos propostos nas Figuras 25 e 26, funcionou adequadamente, permitindo a realização bem-sucedida da infusão a vácuo e da laminação a vácuo.

Com a infusão a vácuo realizada na placa, foram obtidas as informações iniciais necessárias para a preparação das infusões que seriam feitas com o modelo em escala reduzida. Foi possível ter uma noção do tempo necessário para a impregnação da resina e obter a permeabilidade do plano de laminação utilizado.

Foram construídos três cascos, dois pelo processo de infusão a vácuo (utilizando resinas diferentes), e um por laminação a vácuo. Os cascos obtidos foram desmoldados com sucesso e apresentaram resultados positivos.

Após as infusões, foram realizadas simulações utilizando CFD com o Ansys Fluent. Simulações desse tipo podem ser utilizadas na identificação de problemas e possibilitar um melhor planejamento usando este método de construção.

Os valores das permeabilidades obtidas podem ser utilizados em futuras infusões, com o mesmo plano de laminação e, apesar de diferentes, elas ficaram relativamente próximas, em questão de ordem de grandeza. Essa desigualdade pode ter acontecido devido a variações existentes entre a infusão da placa e do casco, principalmente com relação a pressão.

A pressão indicada no vacuômetro não é necessariamente a mesma no laminado. Por mais que se tente mitigar qualquer vazamento é difícil chegar a uma situação de total estanqueidade. Especialmente porque muitas das conexões utilizadas são fabricadas para outras finalidades, como por exemplo a conexão "T" (ver Figura 23), que tem sua principal utilização em irrigação, jardinagem, entre outros. Entretanto, esses valores podem ser usados como estimativas para se ter uma noção do tempo e do comportamento da infusão, visando um melhor planejamento do processo.

Para melhorar a precisão na obtenção da permeabilidade, pode-se instalar um vacuômetro que afira a pressão no molde (próximo de laminado), alcançando-se, assim, o valor da pressão de vácuo neste local.

O processo de laminação por infusão é um método que traz benefícios em decorrência de uma maior produtividade, por permitir uma organização prévia do laminado de forma limpa e por evitar o contato do laminador com produtos químicos. Este processo também é muito superior do ponto de vista de segurança operacional, uma vez que os gases provenientes da laminação podem ser canalizados para fora do ambiente, e menos material proveniente de rebarbas são gerados.

Os resultados obtidos das infusões realizadas foram positivos, reduzindo drasticamente o peso dos laminados, o que permite construir embarcações mais leves para competições de alto desempenho.

Os cascos obtidos que apresentaram defeitos podem ser corrigidos com acabamento e isto não se torna um empecilho na utilização desses métodos, que visa obter embarcações superiores do ponto de vista de construção.

Além disso, a laminação a vácuo apresentou um bom acabamento superficial. Isso acontece devido ao maior controle do laminador no processo durante os trabalhos, onde podem ser feitas correções e ajustes durante a laminação manual. Apresenta também um melhor custo benefício para a produção de poucas unidades, por isso, é um método que traz vantagem econômica para algumas competições menos exigentes. É importante lembrar que esse método apresenta menor teor de fibra, e conseqüente maior peso no laminado, o que pode reduzir um pouco o desempenho de embarcações para altas velocidades.

Portanto, a escolha do método adequado deve levar em consideração fatores econômicos, a finalidade da embarcação, se é ou não focada na eficiência e alto desempenho e se haveria maior pontuação nas avaliações de relatórios em relação ao método escolhido.

Os resultados do teor de fibra em cada processo chegam próximo dos valores já conhecidos na literatura e na indústria. A infusão 1 ficou aproximadamente 32% mais leve que o resultado obtido na laminação a vácuo, com um teor de fibra 24% maior. O que comprova a superioridade de eficiência em laminados obtidos por esse processo,

podendo compensar seu custo mais elevado. O resultado obtido foi um laminado leve altamente compactado e resistente, o que já representa um grande avanço em comparação ao método de laminação manual.

Apesar das limitações, o uso do *software* Ansys Fluent para simular uma infusão parece bastante promissor. É preciso fazer testes para avaliar a possibilidade de uso em geometria de cascos mais complexas, onde pode ser de grande auxílio para a previsões de possíveis problemas e para um melhor planejamento das linhas de vácuo e de entrada de resina, principalmente no caso de grandes peças, uma vez que são usadas muitas entradas e linhas de vácuo.

10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros relacionados a esse tema:

- Testar as resistências dos laminados em laboratórios;
- Utilizar mais entradas e mais linhas de vácuo, ou um novo arranjo, para avaliar a influência da organização desses itens na infusão.

REFERÊNCIAS

- Advanced Vacuum Hi - Tech Composites.** Disponível em: <<https://www.advancedvacuum.com.br/resinas/resina-poliester-laminacao-manual>>. Acesso em: 6 dez. 2021.
- Advanced Vacuum Hi-Tech Composites.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/c/AdvancedVacuum>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- ARBTER, R. et al. Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 42, n. 9, p. 1157–1168, 2011.
- BARRACUDA COMPOSITES. **Processos Construtivos de Estruturas em Composites.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=tGDw7TKcBqY&ab_channel=barracudacomposites>. Acesso em: 11 ago. 2021.
- BITTENCOURT, A. P. P.; DUTRA, G. B.; TANCREDI, T. P. Effects of lamination processes on the physical and mechanical properties of fiberglass/polyester composites | Efeito dos processos de laminação sobre as propriedades físicas e mecânicas de compósitos de resina de poliéster com fibras de vidro. **Revista Materia**, v. 21, n. 4, p. 1021–1031, 2016.
- EPP COMPOSITES. **Resin Transfer Molding (RTM process).** Disponível em: <<https://www.eppcomposites.com/rtm-process.html>>. Acesso em: 6 dez. 2021.
- GEORGE, A. **Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies.** [s.l.] University of Stuttgart, 2011.
- GERR, D. **The Elements of Boat Strength for Builders, Designers and Owners.** [s.l.] International Marine Publishing Co, 1999.
- HAN, Z. et al. Multi-scale low-entropy method for optimizing the processing parameters during automated fiber placement. **Materials**, v. 10, n. 9, p. 1–18, 2017.
- HSIAO, K.-T.; HEIDER, D. 10 - Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites. In: **Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs).** [s.l.] Woodhead Publishing, 2012. p. 310–347.
- INDUTCH. **LRTM.** Disponível em: <<https://indutch.in/process/lrtm/>>. Acesso em: 5 dez. 2021.
- LETZOW, M. et al. Computational Modeling of Rtm and Lrtm. v. 11, n. 1, p. 93–99, 2012.
- MANUAL DE CONSTRUÇÃO DE BARCOS. **Infusão a Vácuo.** Disponível em: <<https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/infusao-a-vacu/>>. Acesso em: 10 set. 2021.

MAR-BAL. **History of Composite Materials**. Disponível em: <<https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>>. Acesso em: 10 set. 2021.

NASSEH, J. **Barcos - Métodos Avançados de Construção em Composites**. 1ª edição ed. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2007.

NASSEH, J. **Manual de Construção de Barcos**. 4ª edição ed. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2011.

NASSEH, J. **Processo de Infusão a Vácuo em Composites**. 1ª edição ed. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2021.

NASSEH, J. **Técnica e Prática de Laminação em Composites**. 1ª edição ed. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2008.

QUANJIN, M. et al. Wireless technology applied in 3-axis filament winding machine control system using MIT app inventor. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 469, n. 1, 2019.

REDELEASE. **Gel coat para molde laranja**. Disponível em: <https://www.redelease.com.br/catalog/product/view/id/1722/s/gel-molde-iso-laranja-com-catalisador-1-030-kg/?gclid=CjwKCAjwybyJBhBwEiwAvz4G7_5dcKBNMYTPMOjO_VNYSk4bMF8yr9q6gYKltp1ye_dFS_k1Hpmd_xoCpkIQAvD_BwE>. Acesso em: 10 abr. 2021.

RICHE, L.; PABON, L.; COHEN, M. Processo de laminação por Infusão de Barcos de Lazer como Fonte de Sustentabilidade e Vantagem competitiva das Empresas do Setor Náutico Brasileiro. **Vide Science Technique Et Applications**, p. 1–16, 2007.

SILVA, F. **Modelação Dinâmica de um Processo de Infusão a Vácuo**. Porto: Universidade do Porto, 2016.

STEPPINSTARS. **Pixabay**. Disponível em: <<https://pixabay.com/pt/photos/moinho-de-vento-vento-62257/>>. Acesso em: 3 nov. 2021.

TORAY. **TORAYCA™ PREPREG - Prepeg de fibras de carbono à base de poliacrilonitrilo**. Disponível em: <https://www.toray.com.br/products/carbon/car_0020.html>. Acesso em: 6 dez. 2021.

ANEXO A – INTEGRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE DARCY

A partir das Equações 3 e 4, é possível chegar a formula da lei de Darcy para escoamento unidirecional.

$$\{\overline{U}_D\} = -\frac{1}{\mu}[K].\nabla P \Leftrightarrow \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 3}$$

$$U_F = \frac{U_D}{\phi} \quad \text{Eq. 4}$$

Considerando apenas a direção x, temos:

$$U_x = -\frac{1}{\mu} K \frac{\partial P}{\partial x}$$

Substituindo U_x pelos valores da Equação 4 e fazendo alguns ajustes, a equação fica:

$$U_F \cdot \phi = -\frac{1}{\mu} K \frac{\Delta P}{x}$$

Onde,

$$U_F = \frac{dx}{dt}$$

E substituindo U_F ,

$$\frac{dx}{dt} \phi = -\frac{1}{\mu} K \frac{\Delta P}{x}$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{\mu \cdot \Phi} K \frac{\Delta P}{x}$$

Fazendo algumas manipulações e integrando,

$$\int_0^L x \, dx = -\frac{1}{\mu \cdot \Phi} K \Delta P \int_0^t dt$$

$$\frac{L^2}{2} = -\frac{1}{\mu \cdot \Phi} K \Delta P t$$

$$K = -\frac{L^2 \cdot \Phi \cdot \mu}{2 \cdot \Delta P \cdot t}$$

Como a pressão de vácuo é negativa, considerando o seu valor em módulo é possível escrever:

$$K = \frac{L^2 \cdot \Phi \cdot \mu}{2 \cdot \Delta P \cdot t} \quad \text{Eq. 7}$$

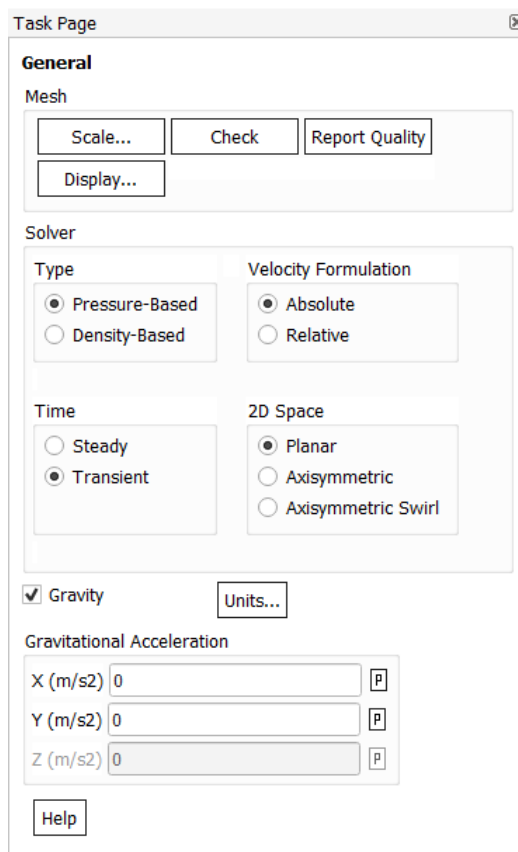
ANEXO B – CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO NO FLUENT

Este Anexo mostra os passos de configuração da simulação feita para a infusão a vácuo da placa. Para fazer a simulação do casco, são exatamente os mesmos passos, mudando apenas alguns dados (os dados do casco estão na Tabela 16).

Antes de iniciar as configurações no Fluent, todas as regiões das condições de contorno (*inlet*, *outlet*, *wall* e interior) foram definidas no Meshing utilizando Named Selections.

Ao abrir o Fluent, é possível iniciar as configurações gerais, como mostra a Figura 79.

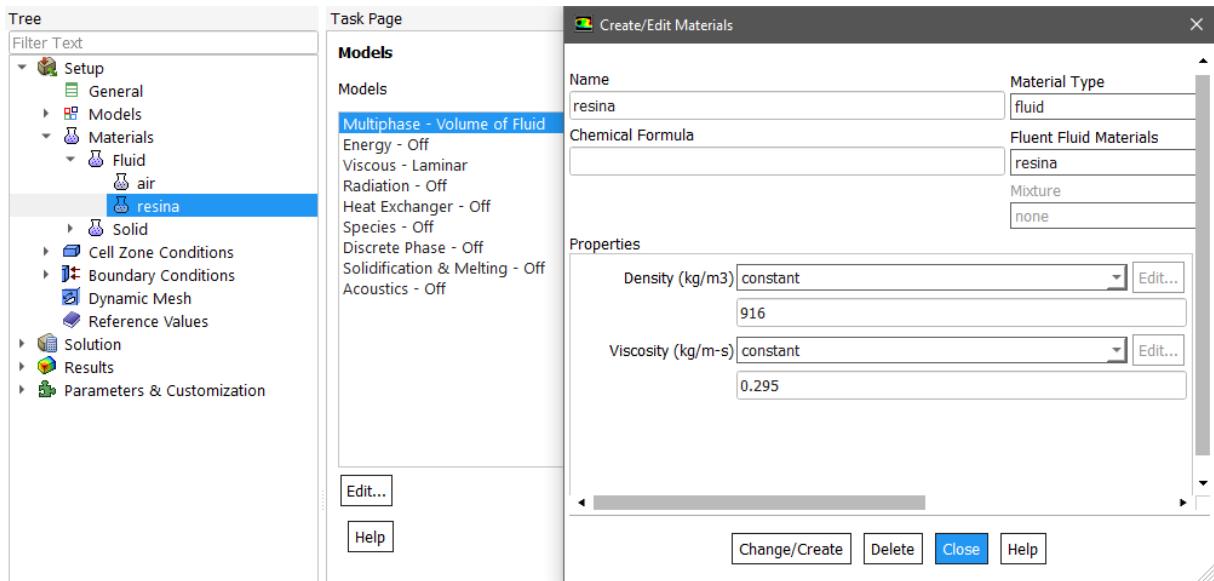
Figura 79 - Configurações gerais.



Fonte: autor, 2021.

Foi preciso criar o fluido resina, como pode ser observado na Figura 80.

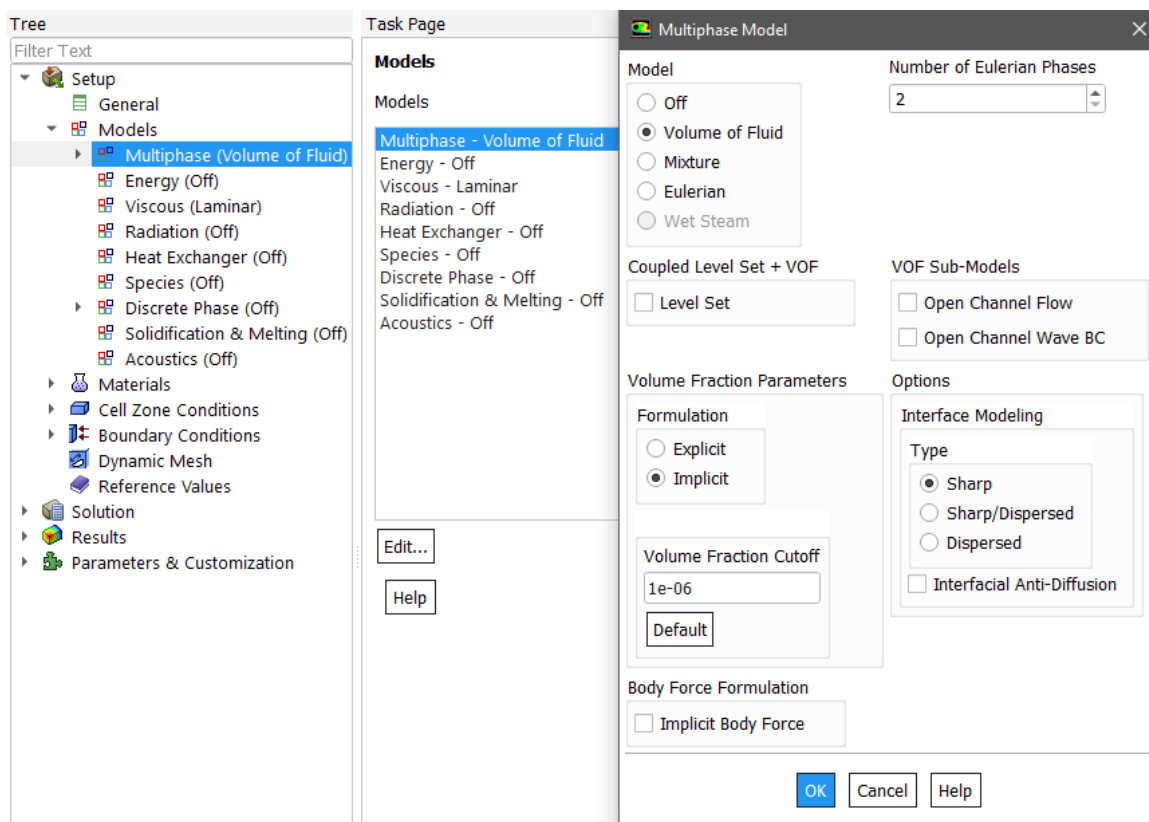
Figura 80 - Criando o fluido resina.



Fonte: autor, 2021.

Após isso, a simulação é definida como multifásica, com duas fases: ar e resina, como mostra as Figura 81.

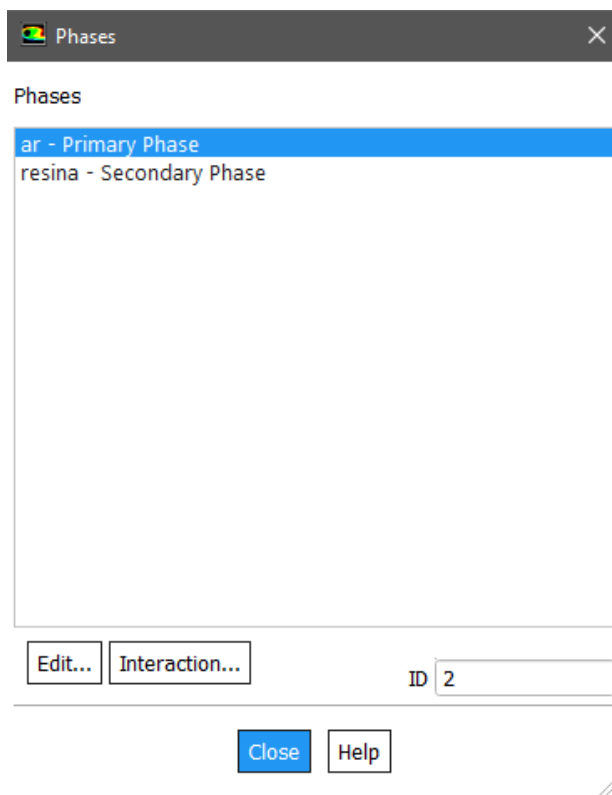
Figura 81 - Modelo de simulação.



Fonte: autor, 2021.

O ar é a fase primária e a resina é a fase secundária, como é possível observar na Figura 82.

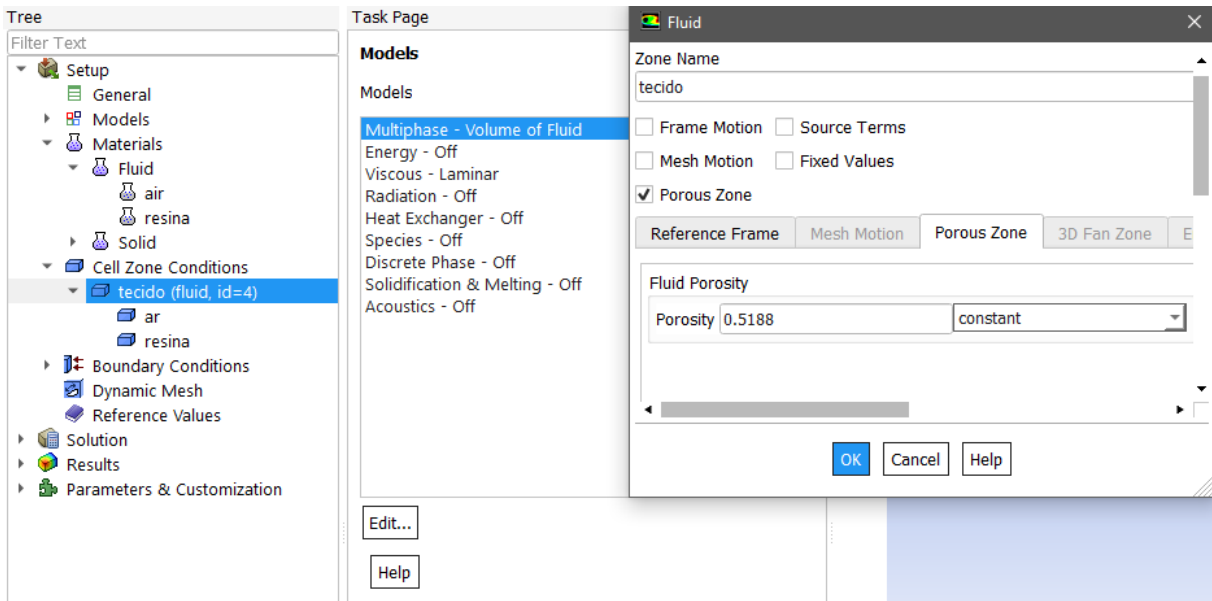
Figura 82 – Fases.



Fonte: autor, 2021.

Em seguida foram definidas as configurações do meio de propagação dos fluidos. A Figura 83 mostra a definição da porosidade.

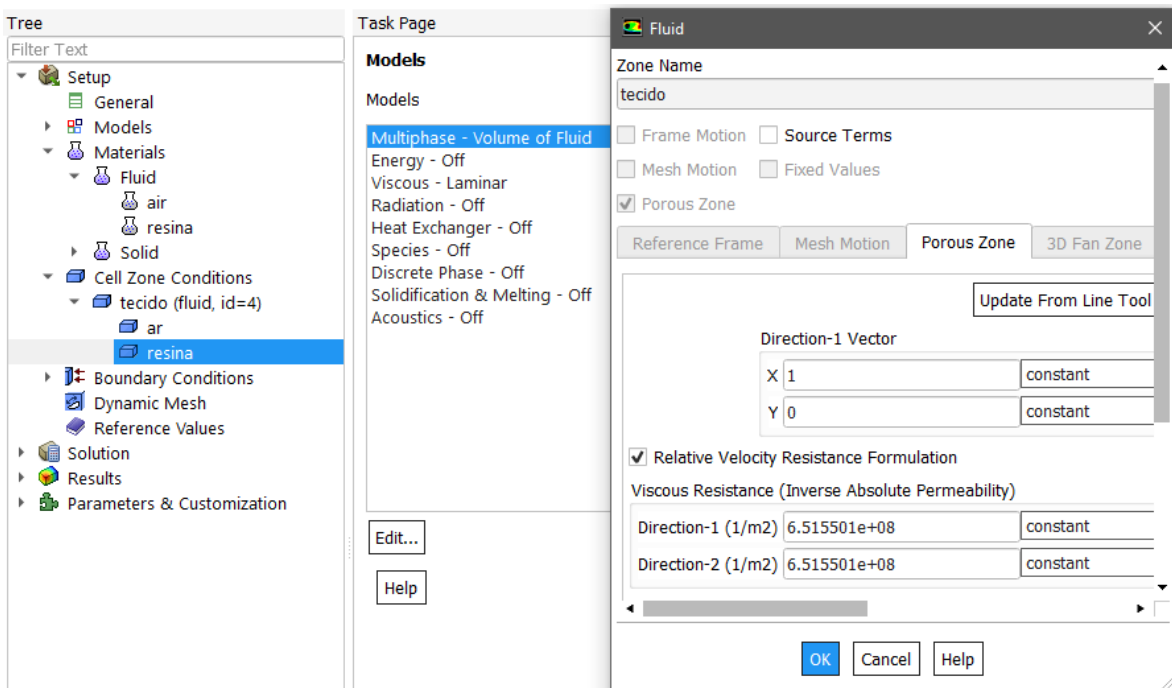
Figura 83 – Porosidade.



Fonte: autor, 2021.

A Figura 84 mostra a definição da resistência viscosa (resistência viscosa é o inverso da permeabilidade).

Figura 84 – Permeabilidade.



Fonte: autor, 2021.

A Figura 85 mostra as condições de contorno definidas para a mistura (resina e ar) no *inlet* e no *outlet*.

Figura 85 - Condições de contorno da mistura.

The image displays two screenshots of software dialog boxes for defining boundary conditions for a mixture. The top dialog is titled 'Pressure Inlet' and the bottom is 'Pressure Outlet'. Both have a 'Zone Name' field and a 'Phase' dropdown set to 'mixture'. The 'Pressure Inlet' dialog has tabs for 'Momentum', 'Thermal', 'Radiation', 'Species', 'DPM', 'Multiphase', 'Potential', and 'UDS'. Under 'Momentum', it shows 'Reference Frame' as 'Absolute', 'Gauge Total Pressure (pascal)' as '0' with a 'constant' dropdown, 'Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)' as '-51325' with a 'constant' dropdown, and 'Direction Specification Method' as 'Normal to Boundary'. The 'Pressure Outlet' dialog also has the same tabs. Under 'Momentum', it shows 'Gauge Pressure (pascal)' as '-101325' with a 'constant' dropdown, 'Pressure Profile Multiplier' as '1', 'Backflow Direction Specification Method' as 'Normal to Boundary', and 'Backflow Pressure Specification' as 'Total Pressure'. Both dialogs have 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons at the bottom.

Fonte: autor, 2021.

Na Figura 86 pode ser observada as condições de contorno definidas para a resina no *inlet* e no *outlet*.

Figura 86 - Condições de contorno da resina.

The image shows two screenshots of software dialog boxes for boundary conditions. The top dialog is titled "Pressure Inlet" and the bottom one is "Pressure Outlet". Both are for a phase named "resina".

Pressure Inlet Dialog:

- Zone Name: inlet
- Phase: resina
- Model tabs: Momentum, Thermal, Radiation, Species, DPM, Multiphase, Potential, UDS
- Volume Fraction: 1
- Volume Fraction Specification Method: constant
- Buttons: OK, Cancel, Help

Pressure Outlet Dialog:

- Zone Name: outlet
- Phase: resina
- Model tabs: Momentum, Thermal, Radiation, Species, DPM, Multiphase, Potential, UDS
- Volume Fraction Specification Method: Backflow Volume Fraction
- Backflow Volume Fraction: 0
- Backflow Volume Fraction Specification Method: constant
- Buttons: OK, Cancel, Help

Fonte: autor, 2021.

A Figura 87 mostra as condições de operação.

Figura 87 - Condições de operação.

The image shows a screenshot of the "Operating Conditions" dialog box. It is divided into two main sections: "Pressure" and "Gravity".

Pressure Section:

- Operating Pressure (pascal): 101325
- Reference Pressure Location:
 - X (m): 0
 - Y (m): 0
 - Z (m): 0

Gravity Section:

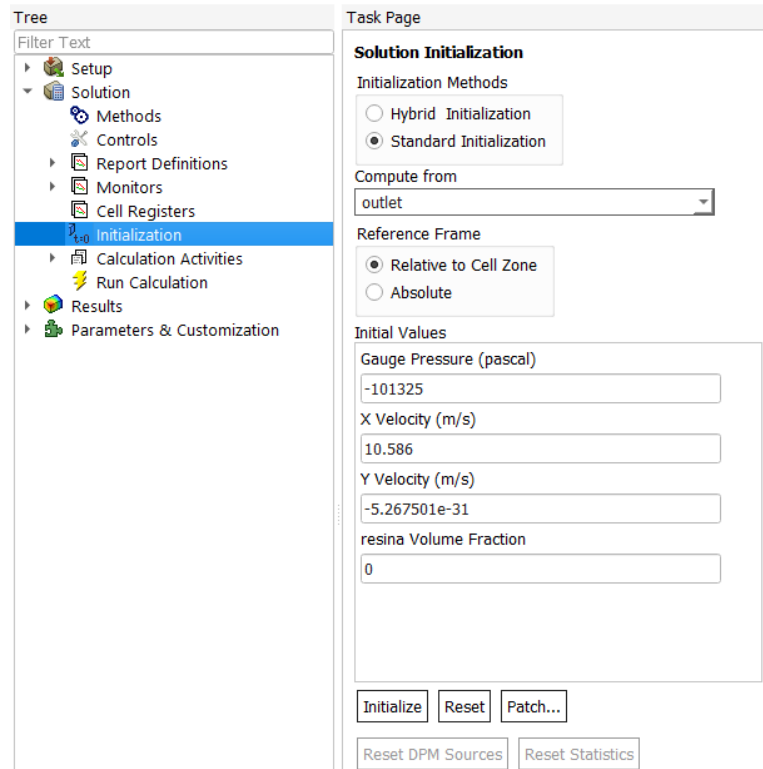
- Gravity
- Gravitational Acceleration:
 - X (m/s²): 0
 - Y (m/s²): 0
 - Z (m/s²): 0
- Variable-Density Parameters:
 - Specified Operating Density
 - Operating Density (kg/m³): 1.225

Buttons: OK, Cancel, Help

Fonte: autor, 2021.

A Figura 88 mostra as configurações de inicialização. É importante garantir que a fração de volume de resina seja definida com valor zero antes de inicializar.

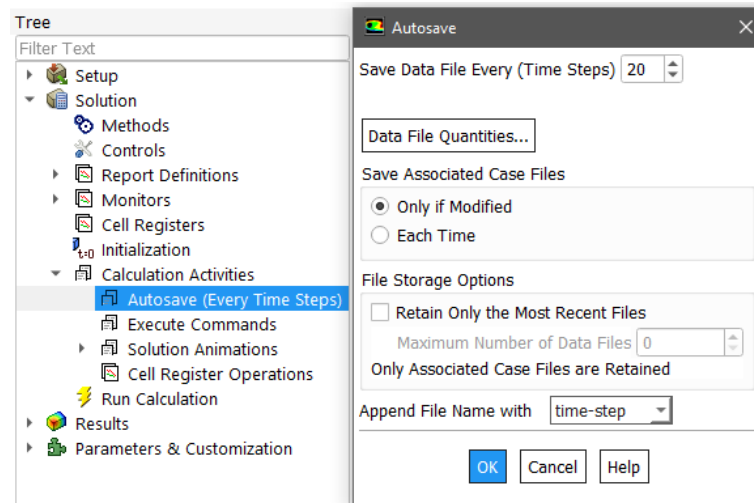
Figura 88 - Inicialização.



Fonte: autor, 2021.

A Figura 89 mostra a configuração do Auto Save, cuja função é salvar os arquivos em um intervalo definido. Esses arquivos podem ser usados posteriormente, por exemplo, para visualizações.

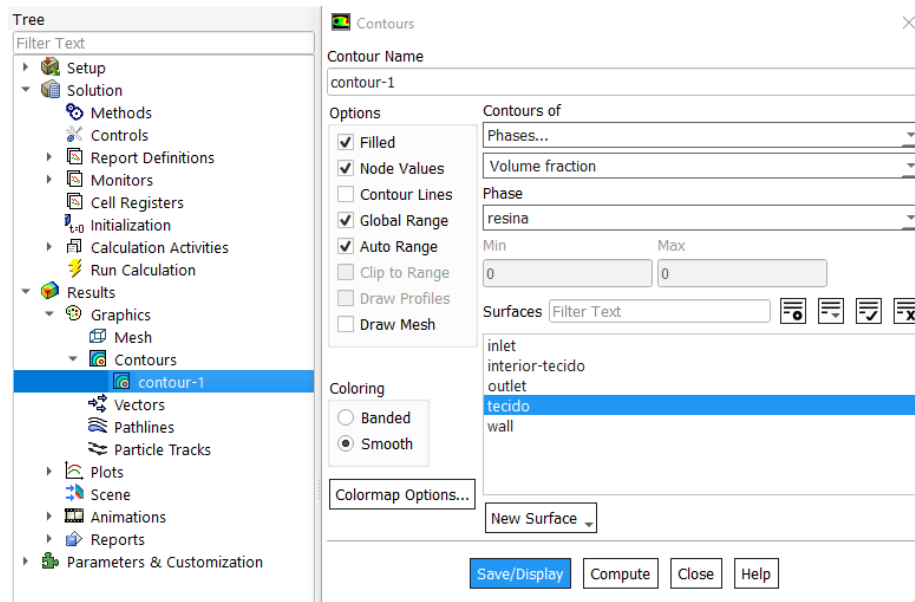
Figura 89 – Salvar automaticamente.



Fonte: autor, 2021.

Um contorno foi aplicado para observar a resina durante a simulação.

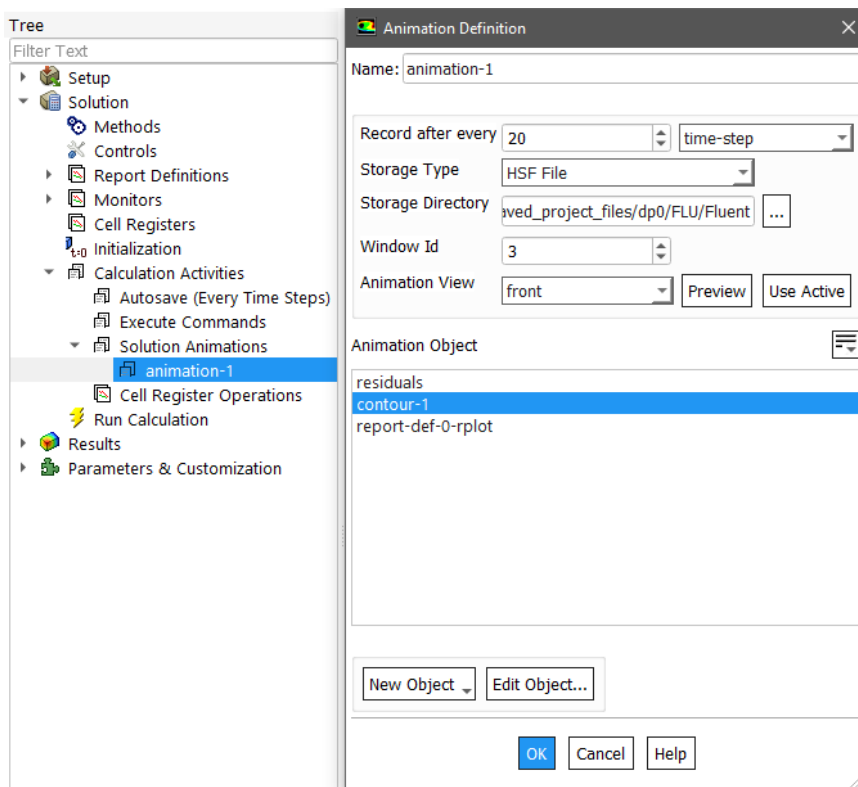
Figura 90 – Contorno.



Fonte: autor, 2021.

Depois é preciso configurar as Definições de animação, usando o Contorno da Figura 90. A Figura 91 mostra as definições utilizadas.

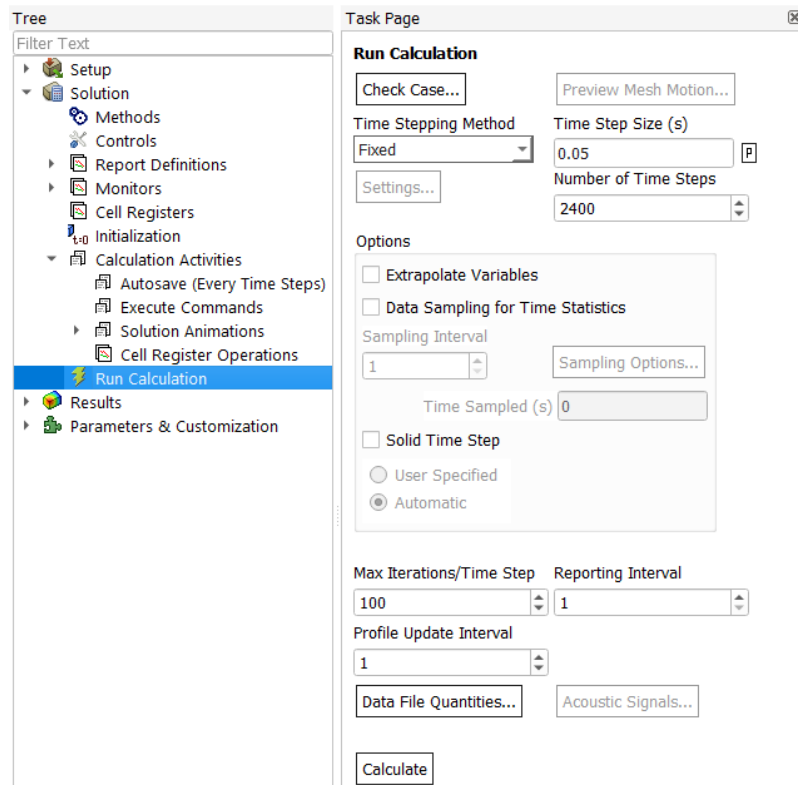
Figura 91 - Definições de animação.



Fonte: autor, 2021.

Finalmente, são definidos os passos de tempo, o número total de passos e o número máximo de iterações por tempo de passo, como mostra a Figura 92.

Figura 92 - Configurações finais.



Fonte: autor, 2021.

Com tudo isso definido, é possível iniciar os cálculos.