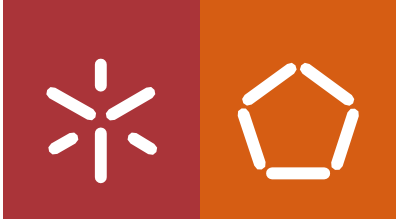




Bárbara Liliana Araújo da Silva

**Estudo da adesão de tintas e adesivos
estruturais sobre superfícies de
componentes compósitos usados em
pás eólicas**

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bárbara Liliana Araújo da Silva

**Estudo da adesão de tintas e adesivos
estruturais sobre superfícies de
componentes compósitos usados em pás
eólicas**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de
Dr. Braian Esneider Buitrago Uribe
Dr. Paulo Jorge da Rocha Soares Antunes

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

“I am not young enough to know everything.”

(Oscar Wilde)

Aos meus orientadores, Dr. Braian Uribe e ao Dr. Paulo Antunes, por todo o apoio e conhecimento transmitido desde o início deste projeto e pela ajuda demonstrada ao longo da orientação deste trabalho.

A todos os colaboradores do PIEP que me ajudaram durante o estágio, na execução do presente projeto e que contribuíram com conhecimento indispensável para o meu percurso académico.

A todos os meus amigos, agradeço por todo o companheirismo, momentos felizes e memórias que vou estimar com imenso carinho.

Acima de tudo, quero agradecer ao meu irmão por ser sempre uma referência de caráter na minha vida. Desde sucessos profissionais e pessoais mostrou ser sempre uma pessoa capaz, altruísta e determinada, inspirando-me pelo caminho.

Aos meus pais, por sempre transmitirem os valores de humildade, dedicação e empatia. Por sempre acreditarem em mim e por tudo o que fizeram para que nada faltasse na minha vida.

Aos meus avós, por todas as palavras de encorajamento e apoio incondicional ao longo deste percurso.

A todas as pessoas na minha vida que contribuíram para o meu crescimento a nível pessoal e profissional.

Muito obrigada a todos!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados nem nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, Outubro 2024

Bárbara Silva

RESUMO

Na produção de pás eólicas a adesão dos sistemas compósito-compósito e compósito-tinta são de extrema importância de forma a obter um produto com tempo de vida longo e integridade estrutural. Os objetivos gerais propostos para este estudo consistem na geração de conhecimento, com base numa análise experimental, em torno do fenómeno de adesão por forma a definir os fatores que intervêm no processo físico.

Foram produzidos 2 laminados compósitos, sendo utilizadas resinas distintas em cada um dos laminados. De modo a conferir rugosidade às superfícies dos laminados foram utilizados 4 *peel plies* diferentes. Os substratos foram caracterizados através da medição dos respetivos ângulos de contacto, bem como o cálculo da energia superficial e posteriormente análise FTIR de todos os substratos e *peel plies*. Para a avaliação da adesão das juntas adesivas foram efetuados dois ensaios de Lap Shear e aplicados 2 adesivos distintos. As fraturas dos provetes foram analisadas por Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM). Foi também efetuado um ensaio de Scratch de forma a avaliar o desempenho da tinta.

Os resultados obtidos mostraram que, na maioria das superfícies, com o aumento da rugosidade da superfície o valor de ângulo de contacto diminui e consequentemente a energia superficial calculada aumenta. Porém, a polaridade dos *peel plies* e das substâncias utilizadas também influenciam a molhabilidade e o caso descrito anteriormente não é sempre a regra.

Foi determinado que não existe uma correlação direta entre a molhabilidade e a força de adesão com a realização do 1º ensaio de *Lap Shear*. Com uma análise de variância foram definidas diferenças significativas entre as superfícies testadas pelo que, a rugosidade influencia, até um determinado ponto, a adesão entre o substrato e o adesivo. No 2º ensaio de *Lap Shear*, através da análise de variância, foi concluído que as diferenças de rugosidade conferidas pelos *peel plies* utilizados, bem como a alteração da temperatura do adesivo proveniente da ENERCON, não apresentaram diferenças significativas relativamente à força necessária para a rotura dos provetes.

Com respeito aos resultados obtidos no ensaio de *Scratch* foi possível concluir que a aplicação de várias camadas de tinta melhorou a adesão da mesma ao substrato. No entanto, não foi possível estabelecer uma correlação entre alteração da humidade do substrato e os parâmetros registados.

Palavras-chave: Peel Plies; Rugosidade; Adesão; Tinta; Molhabilidade.

ABSTRACT

In the production of wind blades, the adhesion of composite-composite and composite-paint systems is extremely important in order to obtain a product with a long lifespan and structural integrity. The general objectives proposed for this study consist of generating knowledge, based on an experimental analysis, around the adhesion phenomenon in order to define the factors that intervene in the adhesion process.

Two composite laminates were produced, using different resins in each of the laminates. In order to alter the roughness of the laminate surfaces, 4 peel plies were used. The substrates were characterized by measuring their respective contact angles, as well as calculating the surface energy and a FTIR analysis of all the substrates and peel plies. To evaluate the adhesion of the adhesive joints, two Lap Shear tests were carried out and two different adhesives were applied. The fractures were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM). A Scratch test was also carried out in order to evaluate the performance of the paint.

The results obtained allow us to conclude that, on most surfaces, with the increase in surface roughness the contact angle value decreased and consequently the calculated surface energy increases. However, the polarity of the peel plies and the substances used also influences wettability and the case described above is not always the rule.

It was determined that there is no direct correlation between wettability and adhesion strength while carrying out the 1st Lap Shear test. With a variance analysis, significant differences were detected between the tested surfaces, meaning, up to a certain point, roughness influences the adhesion between the substrate and the adhesive. In the 2nd Lap Shear test, through a variance analysis, it was concluded that the differences in roughness altered by the peel plies used, as well as the change in the temperature of the adhesive provided by ENERCON, did not present significant differences in relation to the force at break.

Regarding the results obtained in the Scratch test, it was possible to conclude that the application of several layers of paint improved its adhesion to the substrate. It was not possible to establish a correlation between changes in substrate humidity and the recorded parameters.

Keywords: Peel Plies; Roughness; Adhesion; Paint; Wettability.

ÍNDICE

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de Integridade	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos de Trabalho e Organização da Dissertação	1
2. Estado da arte	3
2.1 Energia Eólica.....	3
2.2 Materiais Compósitos.....	4
2.2.1 Reforço	5
2.2.2 Matriz.....	6
2.3 Infusão da Resina Assistida por Vácuo.....	6
2.4 Produção de Pás Eólicas.....	8
2.5 Adesivos e Tintas no Fabrico de Pás Eólicas	9
2.6 Relação entre Energia Superficial, Tensão Superficial e Molhabilidade.....	10
3. Materiais e métodos.....	13
3.1 Seleção de Materiais e Método de Fabrico.....	13
3.2 Ensaio Experimentais	14
3.2.1 Caracterização da Superfície	14
3.3 Ângulo de Contacto.....	14

3.4	<i>Lap Shear</i>	15
3.5	Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM).....	16
3.6	Espectrografia no Infravermelho por Transformada de Fourier	17
3.7	DoE Tinta	17
3.7.1	Defeitos Superficiais	19
3.7.2	Teste de <i>Scratch</i>	20
4.	Apresentação e discussão dos resultados	21
4.1	Caracterização de Superfície	21
4.2	Ângulo de Contacto.....	24
4.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier	29
4.4	<i>Lap Shear</i>	33
4.5	Análise Fractográfica.....	39
4.5.1	Modo de Falha	39
4.5.2	SEM	41
4.6	Determinação da Força de Adesão de Tintas Sobre o Substrato Compósito.....	47
4.6.1	Defeitos Superficiais	47
4.6.2	Ensaio de <i>Scratch</i>	49
5.	Conclusões e trabalhos futuros	54
	Bibliografia	56
	ANEXOS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Turbina de Gedser.....	3
Figura 2 - Estrutura do material compósito (adaptado de Kumar, 2016)	5
Figura 3 - Esquema da Infusão de Resina Assistida por Vácuo (adaptado de Abdurrohman e Siahaan, 2018).....	7
Figura 4 - Lay-Up materiais (adaptado de Thays Marinho, 2021)	8
Figura 5 - Inspeção da pá (adaptado de Thays Marinho, 2021).....	9
Figura 6 - Alteração da Superfície (adaptado de Thays Marinho, 2021)	9
Figura 7 - Locais de aplicação do adesivo na estrutura da pá eólica (adaptado de Samuel et al., 2023)	10
Figura 8 - Esquema da diferença visual da intensidade da energia superficial (adaptado de Richards, 2021).....	12
Figura 9 - Produção do laminado L1	13
Figura 10 - Produção do laminado L2	13
Figura 11 - Desenho 3D do gabarit.....	15
Figura 12 - Desenho 3D dos gabarits na posição de colagem	15
Figura 13 - Colagem dos provetes.....	16
Figura 14 - Adesivo fornecido pela ENERCON.....	16
Figura 15 - Colagem de provetes.....	16
Figura 16 – Método de aplicação da tinta.....	18
Figura 17 – Provetes no interior do exsiccador.....	19
Figura 18 - Provetes durante o ensaio de absorção de humidade.....	19
Figura 19 - Picos e Vales (Vidro).....	22
Figura 20 - Picos e Vales (Econolease)	22
Figura 21 - Picos e Vales (Econostitch).....	22
Figura 22 - Picos e Vales (Twill).....	23
Figura 23 - Picos e Vales (Plain).....	23
Figura 24 - Desvio-padrão do Ângulo de Contacto - ÁGUA (L1)	24
Figura 25 - Desvio-padrão do Ângulo de Contacto - DIIDOMETANO (L1).....	24
Figura 26 – Desvio Padrão do Ângulo de Contacto – Água (L2)	27

Figura 27 - Desvio Padrão do Ângulo de Contacto - Diiodometano (L2)	27
Figura 28 – Curvas FTIR das amostras dos <i>peel plies</i>	29
Figura 29 - Curva FTIR de Nylon e Poliéster (adaptado de Choi et al., 2022)	30
Figura 30- Comparação de curvas FTIR das amostras de <i>peel ply</i>	30
Figura 31 - Curva FTIR de amostras dos substratos.....	31
Figura 32 - Curva FTIR da amostra de substrato Econolease (L1)	32
Figura 33 - Curva FTIR de resina epóxi líquida (a) e curada (b) (Cerit et al.,2016)	32
Figura 34 - Gráfico Força/Deslocamento (Amostras L1) 1º ensaio	33
Figura 35 - Desvio Padrão de Força Máxima (Amostras L1) 1º ensaio	33
Figura 36 - Gráfico Força/Deslocamento (2º ensaio) - 23°C	36
Figura 37 - Desvio Padrão de Força Máxima (2º ensaio) - 23°C.....	36
Figura 38 - Gráfico Força/Deslocamento (2º ensaio) - 35°C	37
Figura 39 - Desvio Padrão de Força Máxima (2º ensaio) - 35°C.....	38
Figura 40 – Superfícies da junta (Vidro)	39
Figura 41 - Superfícies da juntas (Econostitch)	39
Figura 42 - Superfícies da junta (Econolease)	39
Figura 43 - Superfícies da junta (Twill).....	39
Figura 44 - Superfícies das juntas (Twill_L1- 23°C)	40
Figura 45 - Superfícies das juntas (Twill_L1- 35°C)	40
Figura 46 - Superfícies das juntas (Twill_L2- 23°C)	40
Figura 47 - Superfícies das juntas (Twill_L2- 35°C)	40
Figura 48 - Superfícies das juntas (Nylon - 23°C)	41
Figura 49 - Superfícies das juntas (Nylon - 35°C)	41
Figura 50 – Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo).....	41
Figura 51 - Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo) Zona 1	41
Figura 52 - Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo) Zona 1	42
Figura 53 - Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo) Zona 3	42
Figura 54 - Amostra SEM Econolease (Lado das fibras)	43
Figura 55 - Amostra SEM Econolease (Lado das fibras)	43
Figura 56 - Amostra SEM Twill (Lado do adesivo)	43
Figura 57 - Amostra SEM Twill (Lado do adesivo) Zona 1	43
Figura 58 - Amostra SEM Twill (Lado do adesivo) Zona 2.....	44

Figura 59 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras).....	44
Figura 60 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras) Zona 1	44
Figura 61 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras) Zona 2	45
Figura 62 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras) Zona 3	45
Figura 63 – Amostra 1 SEM 2ºensaio Lap Shear.....	45
Figura 64 – Amostra 1 SEM 2ºensaio Lap Shear Zona 1	45
Figura 65 – Amostra 1 SEM 2º ensaio de Lap Shear Zona 2 a)	46
Figura 66 – Amostra 1 SEM 2º ensaio de Lap Shear Zona 2 b)	46
Figura 67 - Amostra 2 SEM 2ºensaio Lap Shear	46
Figura 68 - Amostra 2 SEM 2ºensaio Lap Shear Zona 1	46
Figura 69 - Defeitos Superficiais (Amostra G1).....	47
Figura 70 - Defeitos Superficiais (Amostra G2) Objetiva x1.6.....	47
Figura 71 - Defeitos Superficiais (Amostra G2).....	47
Figura 72 - Defeitos Superficiais (Amostra G2) Objetiva x1.6.....	47
Figura 73 - Defeitos Superficiais (Amostra G7).....	48
Figura 74 - Defeitos Superficiais (Amostra G7) Objetiva x1.6.....	48
Figura 75 - Defeitos Superficiais (Amostra G8).....	48
Figura 76 - Defeitos Superficiais (Amostra G8) Objetiva x1.6.....	48
Figura 77 - Força Normal na Carga Crítica (LC1)	49
Figura 78 - Profundidade de Penetração	50
Figura 79 – Razão Força/Profundidade de Penetração.....	51
Figura 80 - LC1 (G1 Risco nº1)	52
Figura 81 - LC1 (G1 Risco nº2)	52
Figura 82 - LC1 (G1 Risco nº3)	52
Figura 83 - LC1 (G2 Risco nº1)	52
Figura 84 - LC1 (G2 Risco nº2)	52
Figura 85 - LC1 (G7 Risco nº1)	52
Figura 86 - LC1 (G7 Risco nº2)	53
Figura 87 - LC1 (G7 Risco nº3)	53
Figura 88 - LC1 (G8 Risco nº1)	53
Figura 89 - LC1 (G8 Risco nº2)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de fibras [4]	5
Tabela 2 - DoE de condições.....	18
Tabela 3 - Parâmetros de Rugosidade (Vidro)	22
Tabela 4 - Parâmetros de Rugosidade (Econolease).....	22
Tabela 5 - Parâmetros de Rugosidade (Econostitch)	22
Tabela 6 - Parâmetros de Rugosidade (Twill)	23
Tabela 7 – Parâmetros de Rugosidade (Plain)	23
Tabela 8 - Valores de energia superficial (L1)	25
Tabela 9 - Valores de energia superficial (L2)	28
Tabela 10 - Análise de Variância	35
Tabela 11 - Análise de Variância Double Factor	38
Tabela 12 - Tabela 12 - Médias dos valores dos comprimentos	49

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Devido ao seu carácter renovável, a energia eólica é uma aposta atual e futura no desenvolvimento de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis. Uma das opções para a produção de energia eólica baseia-se em turbinas eólicas compostas por pás de grandes dimensões, que por terem de apresentar uma elevada relação resistência mecânica/peso, são normalmente fabricadas em material compósito de matriz polimérica.

Uma importante fase do fabrico das pás consiste na colagem de vários componentes compósitos usando adesivos estruturais. A pintura das faces das pás eólicas expostas é outra das fases do processo de construção em que o processo de adesão é um fator determinante. De facto, uma má aderência da cola estrutural, à superfície das juntas, pode comprometer a integridade estrutural da pá e uma deficiente aderência da tinta ao substrato compósito causa aumento da resistência ao vento, maior desgaste superficial e a própria degradação da pintura por efeitos ambientais.

Neste sentido, o trabalho presente abordará, com base numa análise experimental, os fatores que intervêm no processo de aderência de adesivos estruturais e os que intervêm no processo de pintura das superfícies compósitas.

1.2 Objetivos de Trabalho e Organização da Dissertação

O objetivo principal do presente trabalho é gerar conhecimento e definir estratégias que permitam à empresa envolvida neste estudo otimizar a aplicação de adesivos estruturais e tintas, bem como estudar as variáveis intervenientes nos processos de aplicação, contribuindo assim para a redução de perdas de material e custos, permitindo aumentar a eficiência da produção de pás eólicas e melhorar o desempenho físico-mecânico das mesmas.

Este trabalho é organizado em 5 capítulos. No presente capítulo, faz-se um enquadramento e são apresentados os principais objetivos.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica onde é feita uma introdução à energia eólica e aos materiais compósitos, processo de fabrico das pás eólicas bem como conceitos importantes das interações químicas consideradas no seguimento do trabalho.

No capítulo 3, Materiais e Métodos, é explícito o procedimento experimental, ou seja, a descrição das técnicas utilizadas bem como o tipo de provetes e materiais dispostos.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Por fim, o último capítulo, capítulo 5, são contempladas as conclusões finais bem como sugestões para trabalhos futuros. Esta dissertação é ainda complementada com outras informações contidas em anexos.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Energia Eólica

A energia eólica tem sido utilizada durante milhares de anos: Em 5000 A.C. era utilizada para impulsionar barcos ao longo do rio Nilo; Em 200 A.C. bombas de água simples movidas a vento eram usadas na china e no Médio Oriente moinhos de vento moíam grãos.

No fim do século XIX, nos Estados Unidos da América, a exploração da energia eólica para a produção de eletricidade. Em 1888 a primeira turbina para a produção de energia para consumo próprio foi construída por Charles F. Brush. Em 1941 os primeiros projetos de turbinas comerciais começaram mas, estas eram fabricadas com ligas metálicas pelo que, após algumas centenas de horas de funcionamento, falhavam.[1]

Em 1957 foi proposto um novo modelo por Johannes Juul, a turbina eólica Gedser (figura 1). Este modelo é próximo dos modelos atuais pois, é composto por 3 pás eólicas e é produzido a partir de materiais compósitos. Esta turbina teve um tempo de funcionamento de 11 anos, muito maior do que as turbinas comerciais mencionadas anteriormente. Desde então a maior parte das turbinas eólicas passaram a ser produzidas com materiais compósitos.[1]



Figura 1 - Turbina de Gedser

Atualmente, o tamanho das torres e, consequentemente, das pás eólicas tem vindo a aumentar de modo a acompanhar a utilização de geradores, numa cota mais elevada, com a finalidade de produzir mais energia devido ao aumento da velocidade média do vento com a altitude.

A energia eólica consiste na transformação da energia do vento em energia útil, por exemplo para produzir eletricidade. A energia eólica está permanentemente disponível, é limpa e o impacto ambiental é, por norma, menos problemático do que outras fontes de energia.[2]

A função de uma pá eólica é interagir com o vento para que seja possível a sua rotação o que permite a transformação de energia mecânica em energia elétrica. Durante o funcionamento, a pá sofre cargas cíclicas e estáticas na sua estrutura, isto faz com que seja necessário que o material que compõe estas estruturas tenha como requisitos: baixo peso, alta durabilidade, resistência à fadiga e a condições ambientais.[2]

A produção de energias renováveis está a alcançar novos recordes, globalmente. Em 2022, a energia solar e eólica corresponderam a 12% da produção de energia no mundo, a maior percentagem já registada. Especificamente, a energia eólica representou 7,6% do consumo total.[3]

Esta conclusão é apresentada no *Global Electricity Review*, que indica que podemos estar a entrar numa nova era em que a produção de energia renovável ganha destaque.[3]

2.2 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são dos mais utilizados na área da engenharia devido as características que possuem em relação aos materiais tradicionais. Devido à combinação de dois ou mais materiais com distintas propriedades termo-mecânicas, o material resultante destes possui resistência mecânica, baixo peso e elevada rigidez específica.

Um material compósito é constituído por dois ou mais materiais de forma a obter um único material com propriedades superiores. Nestes materiais é possível identificar duas fases principais: fase contínua e fase dispersa (figura 2). A fase contínua, designada de matriz, concede estrutura ao compósito e preenche os espaços vazios entre o material de reforço. A fase dispersa, designada de material de reforço, realça as propriedades mecânicas e químicas do compósito.[1], [4], [5]

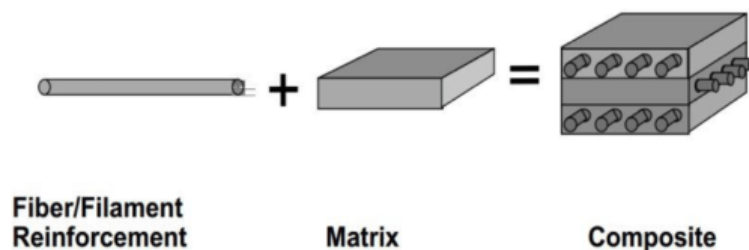


Figura 2 - Estrutura do material compósito (adaptado de Kumar, 2016)

O laminado final pode variar muito dependendo das propriedades da matriz e do material de reforço e da seleção dos mesmos, da quantidade de cada um dos materiais, bem como a orientação e comprimento das fibras.[4]

2.2.1 Reforço

Os materiais compósitos podem ser classificados como partículas, fibras, mantas/tecidos ou sandwich. No caso das pás eólicas, são importantes os reforços do tipo laminado. A fibra é empilhada, camada a camada e a sua orientação pode ou não variar, dependendo da sua aplicação, conferindo uma resposta final anisotrópica. As fibras mais comuns no mundo dos compósitos são as fibras de vidro, carbono e aramida.

Tabela 1 - Propriedades de fibras [4]

Tipo de Fibra/ Propriedades	Fibra de Vidro E	Fibra de Carbono	Fibra de Aramida
Peso específico	2,58	1,78 – 2,15	1,44
Resistência específica (GPa)	1,34	0,70 – 2,70	2,50 – 2,85
Módulo de elasticidade (GPa)	72,50	228 – 724	131
Resistência a tração (GPa)	3,45	1,50 – 4,80	3,60 – 4,10

No caso específico das pás eólicas, o material de reforço mais utilizado é a fibra de vidro. Os compósitos reforçados por fibra de vidro são, por norma, produzidos em grandes quantidades, devido à sua versatilidade.

A fibra de vidro é caracterizada por possuir alta resistência e ser quimicamente inerte logo pode ser utilizada em vários ambientes. Também existem limitações na utilização deste material, apesar de possuir alta resistência, este material não apresenta a rigidez necessária para algumas aplicações mais específicas e rigorosas e está limitada a temperaturas de serviço abaixo de 200 °C, podendo ser um pouco alterada se for utilizada sílica de alta pureza.[4]

2.2.2 Matriz

A matriz utilizada em materiais compósitos pode ser metálica, cerâmica ou polimérica. Em geral, metais e polímeros são utilizados como materiais em matrizes pois, alguma ductilidade é desejável.[4] No caso das pás eólicas são utilizadas matrizes poliméricas devido à sua relação resistência mecânica/peso.

A fase contínua tem vários propósitos: une as fibras e distribui as forças exteriores aplicadas no material, sendo que apenas uma pequena proporção da carga aplicada é suportada pela matriz. Além disso, o módulo elástico da fibra deve ser muito maior do que o da matriz de modo a resistir às forças aplicadas sem falhas no material compósito e de forma a que este possua maior rigidez.[4] Outra função da matriz é proteger as fibras individuais contra danos superficiais como abrasão ou ataques químicos pois, estas interações podem introduzir falhas superficiais capazes de formar fissuras, o que pode levar a falhas do material a baixos níveis de tensão. [4]

É essencial que as forças de ligação entre as fibras e a matriz sejam fortes. A resistência da ligação é uma consideração importante na escolha da combinação das duas fases, sendo que a resistência do compósito depende da força desta ligação, isto exige uma compatibilidade química adequada.[4]

2.3 Infusão da Resina Assistida por Vácuo

O rápido avanço da indústria de compósitos e a constante procura por componente rígidos, leves e de rápido fabrico impulsionaram a adoção de técnicas para produzir materiais com propriedades mecânicas excelentes.[6] As propriedades dos materiais compósitos, dependem do design, das características individuais dos componentes que os constituem bem como do método de fabrico. Os processos de fabrico mais utilizados em componentes de elevadas dimensões, como no caso das pás eólicas, são os de molde aberto.[7]

O processo de infusão caracteriza-se pela colocação do material de reforço no interior do molde seguido pelo material descartável, distribuição de resina desde os canais de entrada no laminado até aos canais de saída, cura da resina e abertura do molde. Este mecanismo assegura o escoamento completo por todo o laminado, sem que a progressão do material seja interrompida nem que a resina solidifique antes da infusão estar completa.[6]

Posteriormente à colocação das camadas do material de reforço, é empilhado o *peel ply*, um tecido que confere rugosidade à superfície da peça final, e é colocado o *flow mesh*, de modo a promover o fluxo de resina ao longo do material. São definidas a entrada e saída da resina e conectados tubos para a passagem da mesma. Finalmente é colocado o saco de vácuo, tendo em atenção as pregas formadas de forma ao saco para melhorar o ajuste e a eficácia geral do saco durante todo o processo, o que contribui para a produção de peças de alta qualidade. O saco de vácuo é unido ao molde com o auxílio de *tacky tape* o que promove a vedação do laminado de forma a assegurar a pressão de vácuo.

Os materiais são submetidos à pressão de vácuo enquanto ainda estão secos e só depois de assegurado o vácuo entre o saco e o molde é introduzida a resina. No final, qualquer excesso de resina que entra no interior do laminado é orientado até um recipiente, colocado entre o laminado e a bomba de vácuo. [6] Finalmente dá-se a cura da resina e a peça é desmoldada.

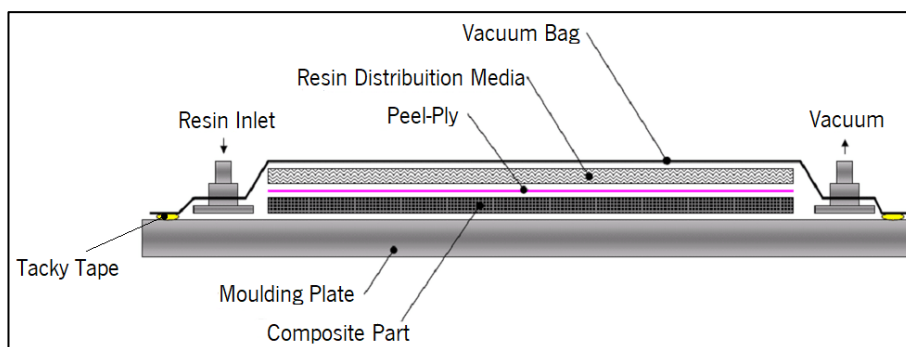


Figura 3 - Esquema da Infusão de Resina Assistida por Vácuo (adaptado de Abdurrohman e Siahaan, 2018)

Este processo de fabrico apresenta várias vantagens significativas, incluindo o baixo custo dos equipamentos, a versatilidade em termos de forma e tamanho do molde e a fácil configuração dos laminados. No entanto, devido ao processamento em molde aberto, é crucial considerar os riscos à saúde do operador associados à libertação de compostos orgânicos voláteis. Além disso, sendo um processo manual, a influência do desempenho do operador na qualidade final do produto é evidente. A reprodutibilidade do processo pode ser comprometida por erros sistemáticos.[7]

Este método possibilita a obtenção de peças com elevado desempenho, grandes dimensões e geometrias complexas. No entanto, as desvantagens incluem a baixa cadência de produção e a maior probabilidade de falhas durante a impregnação das fibras em produtos de grande dimensão. Durante o processo de infusão, podem ocorrer fugas de ar se a montagem não for realizada corretamente.[7]

2.4 Produção de Pás Eólicas

As pás eólicas são feitas, maioritariamente, de materiais compósitos, por norma de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro através do processo de infusão de resina assistida por vácuo.[5], [8]

Inicialmente é cortada a fibra de vidro e de seguida dá-se o processo de Lay-Up do material de reforço, núcleo e materiais secundários (figura 4).[5], [9] São colocadas as camadas, e posteriormente são também dispostas as longarinas bem como os materiais de núcleo (madeira balsa e espuma PVC). É preparado o processo de infusão assistida por vácuo, com todas as camadas necessárias bem como definidas a entrada e saída. A pá é desmoldada e são retirados os materiais descartáveis.[8]



Figura 4 - Lay-Up materiais (adaptado de Thays Marinho, 2021)

Posteriormente à cura dá-se o processo de colagem e o fecho das cavidades do molde. Os colaboradores preparam as superfícies que vão ser utilizadas na colagem, de forma a conferir rugosidade para obter um processo de colagem apropriado. São utilizados adesivos estruturais para a colagem das almas às cascas, bem como no bordo de ataque e no bordo de fuga.[8] Estes são depositados com um aplicador semiautomático de forma que a aplicação seja uniforme, garantindo que a posição e a quantidade de adesivo é depositada de acordo com as especificações da estrutura. Os adesivos são colocados também nas extremidades das cascas, a parte móvel do molde roda e o mesmo é fechado. A

parte superior da estrutura é rebaixada lentamente, com o auxílio de macacos e grampos, de modo que o adesivo se espalhe e cure uniformemente. [8]

Quando o adesivo está curado na totalidade da estrutura, o molde é aberto, a pá é retirada e dão-se os processos de acabamento. Todos os componentes desmoldados são suscetíveis a um processo de rebarbação de forma a manter a superfície uniforme. A pá é inspecionada e se forem encontrados defeitos estes são corrigidos. [8]

Na etapa do acabamento, o objetivo é a pintura da estrutura. Para que a tinta tenha boa adesão a superfície da pá é tratada de forma a conferir rugosidade à superfície e, consequentemente, melhorar as propriedades de adesão mecânica da mesma. Finalmente, as pás são pesadas, devido ao constante movimento na turbina, estas não podem ter pesos diferentes para que não haja excesso de esforços.



Figura 5 - Inspeção da pá (adaptado de Thays Marinho, 2021)



Figura 6 - Alteração da Superfície (adaptado de Thays Marinho, 2021)

2.5 Adesivos e Tintas no Fabrico de Pás Eólicas

Na produção de pás eólicas são utilizadas juntas compósitas para a ligação de diferentes componentes. Para que esta ligação seja adequada é necessário que se verifique a transferência de força entre os dois elementos de modo que a sua integridade estrutural seja garantida quando a estrutura é submetida a forças, [10] no caso das pás eólicas, cíclicas e estáticas.

Para a ligação destes componentes são utilizados adesivos estruturais pois, não adicionam tanto peso à estrutura como outras alternativas, reduzem a concentração de tensões e têm custo relativamente baixo. Os adesivos, que possuem propriedades tixotrópicas, proporcionam uma elevada área de contacto o que se traduz numa melhor distribuição de tensões. Porém, a funcionalidade de alguns adesivos depende da temperatura, humidade, quantidade de deformações que vão suportar, bem como as condições ambientais a que a estrutura final vai estar submetida. [11]

Na indústria das pás eólicas são utilizados vários tipos de adesivos estruturais, alguns deles epoxídicos, poliuretanos e até adesivos de metacrilato. [12] Contudo, os mais utilizados são os adesivos estruturais epoxídicos e poliuretanos. Estes adesivos são aplicados por colaboradores com o auxílio de aplicadores semiautomáticos bem como o equipamento de medição e mistura. O material é depositado nas extremidades das cascas e é também utilizado para fixar os componentes interiores da pá eólica [8] (figura 7).

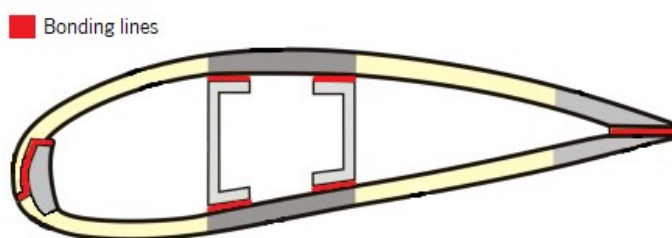


Figura 7 - Locais de aplicação do adesivo na estrutura da pá eólica (adaptado de Samuel et al., 2023)

Coatings são frequentemente aplicados à superfície dos materiais para proteger o material do ambiente, melhorar a aparência da estrutura e/ou proporcionar isolamento elétrico. [4]

No caso das pás eólicas, estas são pintadas para melhorar o seu aspeto, suavizar a superfície e aumentar o seu tempo de vida. Antes do processo de pintura a superfície da pá "verde" é desgastada com lixa para remover imperfeições e aumentar a rugosidade da superfície e, consequentemente, a adesão à tinta que será aplicada posteriormente. É da escolha do fabricante a decisão do revestimento da estrutura, se este será tinta ou gel coat, sendo que o propósito será o mesmo. [13]

A tinta pode ser aplicada manualmente por colaboradores com o auxílio de rolos de pintura ou de forma automatizada com assistência de robôs, sendo a posterior menos utilizada na produção de pás eólicas maiores. Quando se utiliza tinta, esta proporciona proteção ao bordo de ataque onde a erosão por chuva e gelo é mais prevalente. [13]

2.6 Relação entre Energia Superficial, Tensão Superficial e Molhabilidade

Os conceitos de energia superficial, tensão superficial e molhabilidade são todos relacionados no contexto de interações de líquido-sólido e líquido-gás

A molhabilidade descreve a facilidade com que um líquido se espalha ou adere a uma superfície sólida e é tipicamente quantificada pelo ângulo de contacto entre o líquido e o sólido. Quanto menor for o valor do ângulo de contacto melhor é a molhabilidade e vice-versa.[14]

A tensão superficial é uma propriedade física dos líquidos que descreve a força que atua na superfície de um líquido. Os líquidos minimizam, naturalmente, a sua área de superfície pois, para as moléculas é energeticamente favorável estarem rodeadas por outras moléculas. À superfície, as moléculas estão apenas parcialmente rodeadas por outras e o número de moléculas adjacentes é menor do que no interior do líquido. Para uma molécula se deslocar para a superfície é necessário trabalho (W) para quebrar as forças de atração que atuam nessa molécula, isto faz com que os líquidos resistam ao aumento da sua área superficial. A tensão superficial pode ser interpretada, então, como a energia necessária para trazer moléculas de um líquido para a superfície de modo a aumentar a sua área de contacto. [15]

Quando relacionada com molhabilidade, a energia superficial representa a energia em excesso na superfície de um substrato sólido que influencia a interação sólido-líquido. A molhabilidade dos líquidos em substratos sólidos é determinada pelo equilíbrio entre a energia superficial do sólido, a tensão superficial do líquido e a energia interfacial entre o sólido e o líquido.[16]

A molhabilidade é diretamente influenciada pela tensão superficial do líquido e a energia superficial do sólido. Esta relação é interpretada de melhor forma pela equação de Young (Eq.1)[17]:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \times \cos\theta \quad (1)$$

Onde:

- γ_{SG} é a energia superficial do sólido em contacto com o gás;
- γ_{SL} é a energia superficial do sólido em contacto com o líquido;
- γ_{LG} é a tensão superficial do líquido;
- θ é o ângulo de contacto entre o líquido e o sólido.

Com esta informação é possível concluir que líquidos com baixa tensão superficial e valores baixos de ângulo de contacto espalham-se mais facilmente e, portanto, beneficiam a molhabilidade. Sólidos com energia superficial elevada promovem melhor molhabilidade visto que, tendem a atrair as moléculas do líquido e baixam o ângulo de contacto. [14]

A molhabilidade é um conceito presente em várias aplicações práticas no dia a dia. As mais notáveis são em aplicações com superfícies hidrofóbicas e hidrofílicas.

Superfícies hidrofóbicas são superfícies com baixa energia superficial e valores de ângulos de contacto elevados, o que resulta em má molhabilidade. Aplicações destas superfícies são encontradas por exemplo, em estruturas exteriores que são tratadas com revestimentos de forma a repelir água e em aplicações no setor médico como cateteres para prevenir a adesão de bactérias ao equipamento.

Superfícies hidrofílicas são superfícies com energia superficial alta que promovem a molhabilidade. Algumas aplicações destas superfícies são encontradas em tratamentos de lentes de contacto para promover a confortabilidade do utilizador, soluções anti embaciamento em para-brisas de carros e em materiais utilizados no tratamento de feridas para promover a cicatrização.

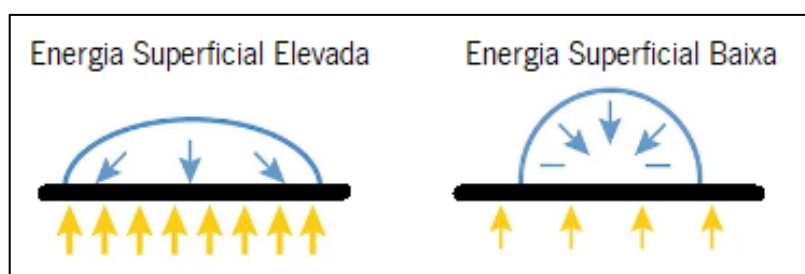


Figura 8 - Esquema da diferença visual da intensidade da energia superficial (adaptado de Richards, 2021)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Seleção de Materiais e Método de Fabrico

Inicialmente, foi preparado um laminado de fibra de vidro e resina epóxi (*SR INFUGREEN 810*) com dimensões 400 mm x 900 mm x 2.9 mm por infusão de resina assistida por vácuo contra um vidro. De forma a alterar a superfície do laminado foram aplicados 3 *peel plies* distintos denominados Twill, Econostitch e Econolease. Desta maneira foi possível obter 4 superfícies diferentes, conferidas pelos 3 *peel plies* e a superfície voltada para o vidro. Este laminado, daqui em diante designado como laminado L1, foi produzido de forma a obter uma base experimental para posteriormente comparar os resultados com materiais provenientes da *ENERCON*. (figura 9)

Posteriormente foi preparado outro laminado, com as mesmas dimensões, mas ligeiramente mais espesso com 3.2 mm de espessura devido à viscosidade da resina, com resina e *peel ply* provenientes da *ENERCON*. Este constituído da mesma maneira por resina epóxi e fibra de vidro. De forma a alterar a superfície foram aplicados dois *peel plies* distintos: O Twill utilizado anteriormente e um novo *peel ply* fornecido pela *ENERCON* designado como Plain. Sendo possível retirar três superfícies diferentes neste laminado, daqui em diante designado como laminado L2. (figura 10)

O procedimento foi o mesmo nos dois laminados, apenas variando a resina e um dos *peel-plies*. A quantidade de resina a preparar foi o resultado de cálculos em função do tamanho do laminado, número de camadas de fibra, tamanho do *flow mesh*, bem como a quantidade necessária para preencher os canais de alimentação. Depois da resina ser misturada com o catalisador, foi sujeita a desgaseificação para remover quaisquer bolhas de ar. No final do processo, o laminado é mantido a uma pressão mais baixa até à sua cura. No final da cura os materiais descartáveis são todos removidos e é obtido o laminado final.

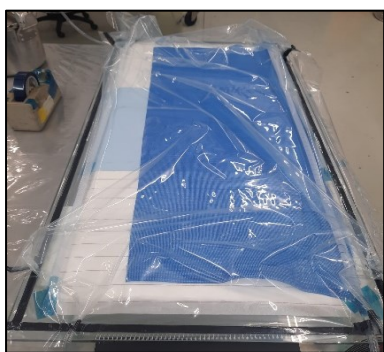


Figura 9 - Produção do laminado L1



Figura 10 - Produção do laminado L2

3.2 Ensaios Experimentais

3.2.1 Caracterização da Superfície

A rugosidade superficial é caracterizada por microirregularidades presentes na superfície do material que afetam as propriedades físicas do mesmo [18] sendo necessário analisar a superfície de modo a melhor entender os efeitos que possam gerar na interação com outros materiais e substâncias.

Como o acabamento das diferentes superfícies é importante para o estudo da aderência, a rugosidade destas é um parâmetro importante na avaliação do acabamento superficial dos diferentes substratos em estudo. Para caracterizar a superfície dos substratos foi utilizado o microscópio *Alicona InfiniteFocusSI*, uma ferramenta de medição ótica 3D para a medição de acabamento de superfícies.

Foram analisadas as cinco superfícies com auxílio do microscópio eletrónico e determinados vários parâmetros de modo a caracterizar cada uma com finalidade de tirar conclusões de como o acabamento das superfícies influencia a adesão. Para cada superfície foram efetuadas duas medições: na horizontal e na vertical, ao longo da amostra.

3.3 Ângulo de Contacto

Sendo a molhabilidade um conceito importante no estudo da adesão, é necessário obter uma medição quantitativa logo, procedeu-se à medição do ângulo de contacto.

O ensaio de gota séssil consiste em depositar uma gota, com velocidade de dosagem e volume controlados, de um líquido na superfície a estudar com auxílio de uma seringa. Foi utilizado um medidor de ângulos de contacto *ELNOR* que, posteriormente, grava uma imagem da forma ao *software SCA20*, ligado ao equipamento, medir o ângulo de contacto estático, que é definido pelo ajuste da equação de *Young-Laplace*.

Para cada superfície foi efetuado um ensaio com uma substância polar e substância apolar, água e diiodometano, respetivamente. Em ambos os ensaios foi utilizada a mesma velocidade de dosagem de 2,5 $\mu\text{L/s}$, no entanto, o volume da gota da água foi definido como 3 μL e o volume da gota de diiodometano foi definido como 2,5 μL para evitar o excesso da substância na saída da seringa. Depois da gota ser depositada no substrato, o ângulo de contacto foi medido após 3 segundos, de maneira à forma da gota estabilizar e ser obtida a melhor medida possível.

3.4 Lap Shear

Devido ao aumento do uso de adesivos estruturais para a união de materiais compósitos, como resultado das vantagens inerentes proporcionadas pelas juntas coladas ao invés das juntas fixadas mecanicamente, há uma necessidade de testes mecânicos pelos quais as juntas de vários substratos e adesivos possam ser comparados. [19]

A resistência ao corte das uniões a estudar foi determinada pela realização de ensaios de tração. Estes foram realizados com recurso a uma máquina universal de ensaios *Shimadzu AG-X*, com célula de carga de 50 kN e a uma velocidade de deformação de 13 mm/min. Foi registada a variação de força em função ao deslocamento, até se registar a falha ou rotura da união.

Para proceder ao 1º teste, apenas com provetes provenientes do laminado L1, foram preparados 12 provetes totais, 3 por cada superfície, devidamente identificados. Cada provete é constituído por 2 retângulos de 25,4 mm x 101,6 mm e 2 tabs de 25,4 mm x 25,4 mm.

Inicialmente foram fabricados 2 gabarits de modo a poder standardizar a espessura do adesivo utilizado bem como facilitar a colagem dos provetes. A espessura do adesivo foi assegurada a partir da diferença de espessuras entre os gabarits e os substratos que constituem os provetes. Os gabarits foram desenhados com auxílio do *software CAD 3D SolidWorks* e posteriormente maquinados a laser a partir de uma placa de PMMA. O mesmo processo foi repetido para a segundo teste, com o laminado L2.

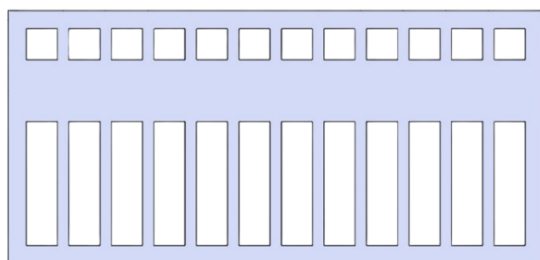


Figura 11 - Desenho 3D do gabarit

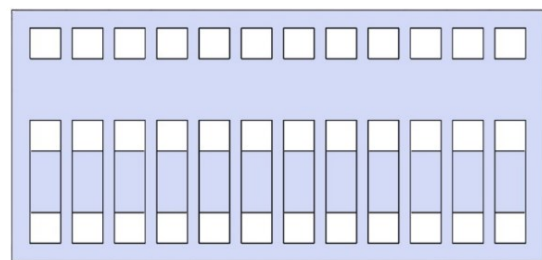


Figura 12 - Desenho 3D dos gabarits na posição de colagem

O processo de colagem foi feito com auxílio dos dois gabarits, sendo que um destes foi colocado na posição contrária em relação ao outro, de modo a assegurar a colagem correta dos substratos. O adesivo utilizado (*ELAN TECH ADH 891.892*) foi curado durante 24 horas e após a cura foi removido qualquer excesso de modo a não influenciar a área de colagem do provete.

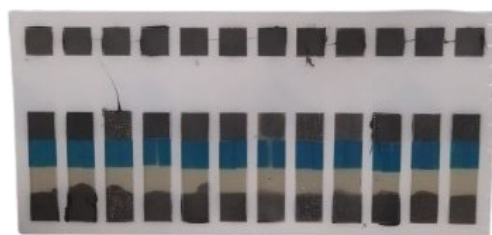


Figura 13 - Colagem dos provetes

Relativamente ao 2º teste de *Lap Shear* foram utilizados provetes de ambos os laminado, L1 e L2, de forma a comparar a influência das resinas utilizadas. Do laminado L1 foram preparados seis provetes caracterizados pela superfície Twill. Do laminado L2 foram preparados doze provetes totais, seis da superfície Twill e seis da superfície Plain. Nove dos provetes preparados, três de cada superfície, foram colados com o adesivo a temperatura ambiente, 23°C, e os nove restantes, três de cada superfície, foram colados com o adesivo aquecido a 35°C, de modo a analisar a influência da viscosidade na adesão das juntas. Sendo o resto do processo similar ao anteriormente descrito.



Figura 14 - Adesivo fornecido pela ENERCON

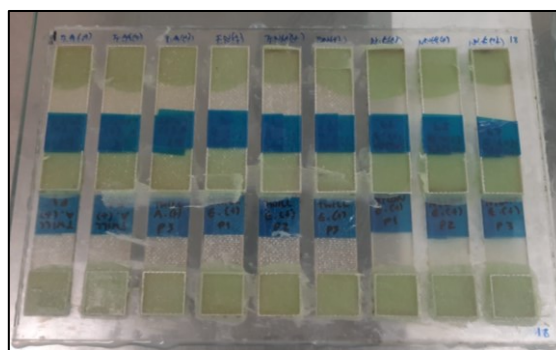


Figura 15 - Colagem de provetes

3.5 Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM)

Foi utilizado o microscópio eletrónico de varrimento de ultra alta resolução *FEI NOVA 200 (FEG/SEM)* com o modo de eletrões secundários (SE) e potência de 10 kV , de forma a efetuar uma análise fractográfica dos provetes de *Lap Shear* para determinar o tipo de fratura. Foram cortadas e analisadas quatro amostras de 1 cm² relacionadas com os provetes do 1º teste de *Lap Shear* e duas amostras do 2º ensaio de *Lap Shear*, tendo sido seleccionadas as amostras mais representativas dos ensaios.

Em cada superfície de interesse das amostras foi aplicada uma fina camada de ouro para melhorar a visualização no equipamento.

3.6 Espectrografia no Infravermelho por Transformada de Fourier

A espectroscopia no infravermelho por transformada de *Fourier*, também conhecida por análise FTIR, é uma técnica analítica usada para identificar vários tipos de materiais. O instrumento de análise FTIR envia radiação infravermelho através da amostra e a radiação absorvida é convertida em energia rotacional e/ou vibracional pelas moléculas da amostra. O sinal resultante no detetor apresenta-se como um espectro representando uma impressão molecular da amostra.[20]

O equipamento onde se realizou o ensaio foi *PerkinElmer Spectrum 100 FT-IR Spectrometer*. Foi colocada a amostra no sensor e aplicaram-se os parâmetros de comprimento de onda entre 4000 cm^{-1} e 500 cm^{-1} e 16 varrimentos, obteve-se a curva e repetiu-se o processo para cada uma das amostras.

Foram analisadas 8 amostras no total: 4 *peel plies* e 4 substratos. Os *peel plies* estudados foram os denominados anteriormente como Twill, Econolease, Econostitch e Plain. Relativamente aos substratos analisados apenas 2 foram provenientes do laminado L1, os substratos caracterizados pelos *peel plies* Twill e Econolease. O substrato Twill do laminado L1 foi analisado de forma a obter uma base experimental comparativa com o substrato Twill proveniente do laminado L2, que foi produzido com uma resina diferente. O substrato Econolease foi estudado devido aos resultados obtidos na medição do ângulo de contacto.

Os restantes provetes foram retirados a partir do laminado L2, estes sendo os substratos caracterizados pelos *peel plies* Twill e Plain.

3.7 DoE Tinta

De modo a testar a interação entre substrato-tinta foram definidas condições para a aplicação da tinta nos provetes para os ensaios experimentais, sendo estas: Temperatura de aplicação, humidade e espessura de aplicação. Foi definido um DoE com estas condições, de forma a posteriormente organizar as respostas aos devidos ensaios.

Tabela 2 - DoE de condições

Grupo de Provetes	Espessura	Temperatura	Humidade
G1	1 camada	23°C	±60%
G2	1 camada	23°C	±97,5%
G3*	1 camada	35°C	±97,5%
G4*	1 camada	35°C	±60%
G5*	3 camadas	35°C	±97,5%
G6*	3 camadas	35°C	±60%
G7	3 camadas	23°C	±60%
G8	3 camadas	23°C	±97,5%

*Grupo de provetes e respetivas condições que não foram utilizados

Relativamente a este DoE, foram definidas 2 respostas: Defeitos superficiais e teste de *Scratch*.

A espessura de aplicação da tinta nos provetes variou entre uma e três camadas. Com o auxílio de um rolo de pintura a tinta foi aplicada com pressão e passagens uniformes de modo a manter cada camada o mais homogênea possível.



Figura 16 – Método de aplicação da tinta

Quando a tinta foi aquecida para a aplicação a 35°C ficou extremamente espessa e a curou quase instantaneamente quando retirada da estufa. Foi feita outra tentativa de aquecimento a 30°C mas o mesmo resultado foi observado logo, foi retirada esta condição e apenas foram realizadas as restantes 2 condições. Apenas os grupos G1, G2, G7 e G8 foram analisados.

A humidade do substrato também foi alterada. Os grupos de provetes foram condicionados a duas humidades distintas. Os grupos de provetes G1 e G7 foram condicionados com a humidade do laboratório e os restantes, G2 e G8, foram condicionados a uma humidade relativa de $97,3\% \pm 0,5$. Isto foi alcançado com um ensaio experimental de absorção de humidade. Foi preparada uma solução aquosa saturada de sulfato de potássio (K_2SO_4) com 100 ml de água e um pouco mais de 12 g de sulfato de potássio, sendo a solubilidade do sulfato de potássio 111g/L. [21] Esta foi colocada num recipiente aberto e no inferior da placa de porcelana, com a precaução que a solução não tocasse nesta. Os provetes devidamente identificados foram colocados no interior do exsiccador e no topo da placa de porcelana. (figura 17). O exsiccador foi selado e os provetes foram condicionados durante 72 horas. (figura 18)

Posteriormente ao condicionamento dos provetes, estes foram pintados com as camadas e temperatura de aplicação definidas no DoE.

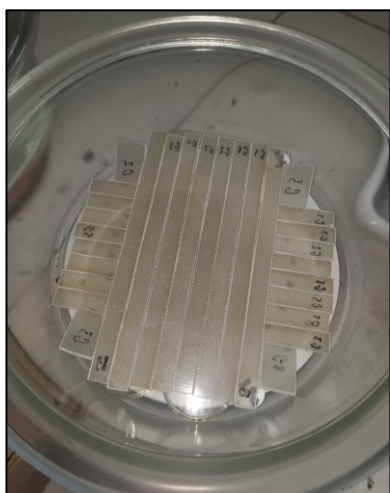


Figura 17 – Provetes no interior do exsiccador



Figura 18 - Provetes durante o ensaio de absorção de humidade

3.7.1 Defeitos Superficiais

A análise visual dos provetes foi realizada após a secagem total da tinta de forma a avaliar eventuais defeitos sem a realização de testes destrutivos. Com o auxílio do microscópio ótico *LEICA DMS 1000* os provetes foram examinados de forma a localizar defeitos de tinta comuns, tais como bolhas, casca de laranja, rachaduras e partículas que possam ter ficado presas durante o processo de pintura. Inicialmente foi captada uma imagem do local de interesse do provete e posteriormente, com a objetiva x1.6 foram analisados os defeitos detetados com a ampliação do equipamento.

3.7.2 Teste de *Scratch*

Foi utilizado o equipamento *CSM REVETEST Scratch Tester* de forma a analisar a resistência à abrasão da tinta ao substrato compósito. Foram cortados quatros provetes com dimensões de 30 mm x 40 mm, um para cada grupo estudado. Depois do condicionamento à humidade e pintura com as respetivas camadas definidas do DoE, os provetes foram secos durante 72 horas. Uma ponta de diamante foi utilizada para riscar os provetes por um comprimento predefinido e com uma carga normal que foi progressivamente aumentada de 0,9N até 12N. Cada provete foi testado no mínimo 2 vezes, se a carga critica diferisse muito da primeira, seria feito um terceiro risco. Posteriormente foram analisados os riscos com objetivas presentes no equipamento de forma a determinar as cargas críticas, bem como capturar uma foto das mesmas.

Ao longo do teste são medidos alguns parâmetros como a força normal, profundidade de penetração e força de fricção.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização de Superfície

Definida a rugosidade como a textura irregular da superfície, esta pode ser quantificada através de parâmetros relacionados com a altura das irregularidades bem como o seu espaçamento, ou uma combinação dos dois. Os parâmetros utilizados neste estudo são: Rugosidade Média [Ra], Rugosidade Média Quadrática [Rq], Máxima Distância de Pico a Vale [Rt] e Média das Distâncias entre Saliências [Sm]. O cálculo destes parâmetros é feito em relação a uma linha de referência.

A Rugosidade Média, Ra, é definida como a amplitude média do perfil em relação à linha de referência. Uma das limitações da utilização deste parâmetro é o facto de este não fazer a distinção entre picos e vales.[18]

A Rugosidade Média Quadrática, Rq, da mesma maneira que a Rugosidade Média, também indica a amplitude média das irregularidades da superfície, porém, quando comparado a Ra, o valor de Rq é mais sensível a amplitudes maiores que, quando elevadas ao quadrado, terão um peso maior no cálculo final. Logo, a comparação dos parâmetros Ra e Rq pode acrescentar alguma informação do formato das irregularidades.[18]

A Distância Máxima de Pico a Vale, Rt, corresponde à distância vertical entre o ponto mais baixo e o ponto mais alto e a Média das Distâncias entre Saliências, Sm, é definida como a média da largura das saliências, medidas sobre a linha média no comprimento de amostra.[18]

Os valores de Rugosidade Média, Ra, são bastante representativos da rugosidade das superfícies. Os restantes parâmetros, mencionados previamente, influenciam o desempenho da superfície final contudo, é difícil entender a influência de cada parâmetro no processo de adesão. [22]

Nas tabelas 3 a 7 estão representados os valores dos parâmetros utilizados para a caracterização das superfícies a estudar. Nas figuras 19 a 23 estão demonstradas as superfícies, com os picos e vales detalhados e alturas respetivas de forma a auxiliar na caracterização de cada uma das superfícies estudadas.

Analisando a figura 19 e 21 observam-se alguns vazios que podem ser explicados pela dificuldade do equipamento alcançar toda a superfície devido à cor translúcida conferida pela matriz, sendo que a superfície vidro necessitou de ser pintada de forma a ser visível no equipamento.

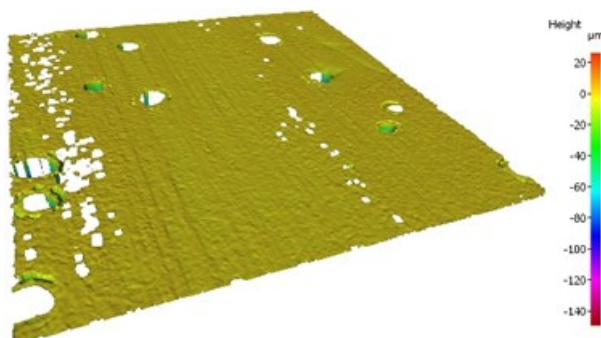


Figura 19 - Picos e Vales (Vidro)

Tabela 3 - Parâmetros de Rugosidade (Vidro)

Superfície	Vidro		
Medição	Vertical	Horizontal	Média
Ra (µm)	0,44	0,59	0,52
Rq (µm)	0,57	0,76	0,67
Rt (µm)	4,56	5,67	5,12
Sm (µm)	131,30	119,53	125,42

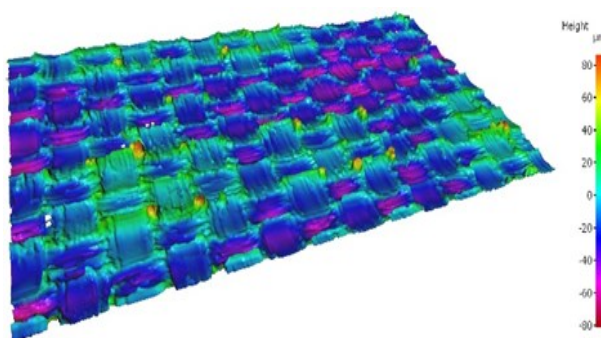


Figura 20 - Picos e Vales (Econolease)

Tabela 4 - Parâmetros de Rugosidade (Econolease)

Superfície	Econolease		
Medição	Vertical	Horizontal	Média
Ra (µm)	14,52	12,21	13,37
Rq (µm)	18,53	15,71	17,12
Rt (µm)	143,25	116,85	130,05
Sm (µm)	569,29	784,59	676,94

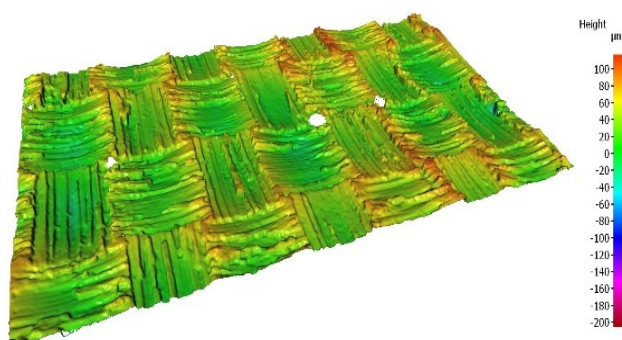


Figura 21 - Picos e Vales (Econostitch)

Tabela 5 - Parâmetros de Rugosidade (Econostitch)

Superfície	Econostitch		
Medição	Vertical	Horizontal	Média
Ra (µm)	13,57	16,11	14,84
Rq (µm)	17,36	19,85	18,61
Rt (µm)	165,89	108,25	137,07
Sm (µm)	1470	535,96	1002,9

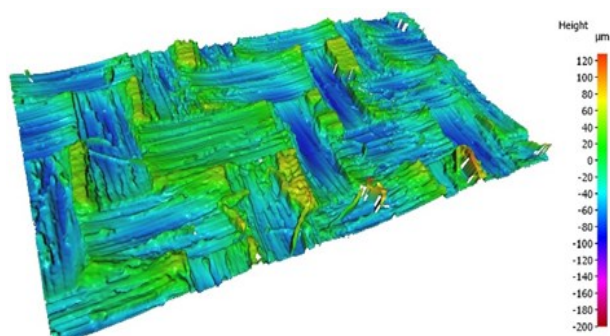


Figura 22 - Picos e Vales (Twill)

Tabela 6 - Parâmetros de Rugosidade (Twill)

Superfície	Twill		
Medição	Vertical	Horizontal	Média
Ra (µm)	22,18	25,38	23,78
Rq (µm)	27,68	31,50	59,18
Rt (µm)	153,38	172,38	162,88
Sm (µm)	738,86	755,44	747,15

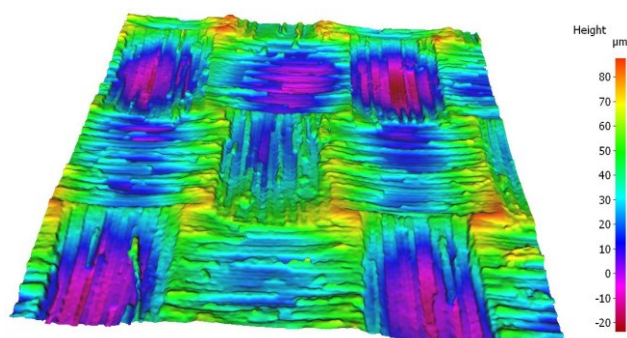


Figura 23 - Picos e Vales (Plain)

Tabela 7 – Parâmetros de Rugosidade (Plain)

Superfície	Plain		
Medição	Vertical	Horizontal	Média
Ra (µm)	7,03	8,52	7,78
Rq (µm)	8,80	7,26	8,03
Rt (µm)	47,70	49,65	48,68
Sm (µm)	332,75	350,72	341,74

Observando as tabelas, é possível verificar que a Rugosidade Média, Ra, tem um valor máximo na superfície caracterizada pelo *peel ply* Twill nas duas direções medidas. O mesmo é aparente na Rugosidade Média Quadrática. Isto é suportado pela Distância Máxima de Pico a Vale, Rt, na tabela 6, na média das medições das duas direções, sendo este valor também elevado.

Conforme antecipado, a superfície Vidro possui os menores valores em todos os parâmetros e em ambas as direções, sendo que não tem saliências comparativas ao resto das superfícies.

Relativamente aos *peel plies* Econostitch e Econolease os valores dos parâmetros obtidos são similares, apenas na Média das Distâncias entre Saliências é evidente uma maior diferença, quando comparado aos outros parâmetros, isto é elucidado pela diferença do padrão que os *peel plies* conferem à superfície, observado nas figuras 20 e 21.

Finalmente, relativamente à amostra caracterizada pelo *peel ply* Plain, fornecido pela *ENERCON*, os resultados obtidos não são similares às restantes superfícies estudadas. Os valores registados demonstram que esta superfície, com exceção à superfície Vidro, é a menos rugosa e possui um padrão de tecelagem mais apertado do que as restantes, isto é corroborado pelo parâmetro Média da Distância entre Saliências (Sm).

Conclui-se então, que a superfície mais rugosa é a superfície caracterizada pelo *peel/ply* Twill, seguida pelas superfícies Econostitch, Econolease, Plain e finalmente, a superfície menos rugosa, Vidro.

4.2 Ângulo de Contacto

Recorrendo ao medidor de ângulos de contacto foi possível obter o ângulo de contacto formado com cada uma das superfícies a estudar quando em interação com água e diiodometano. Nos gráficos ilustrados nas figuras 24 e 25 é possível observar os resultados obtidos, relativos ao laminado L1.

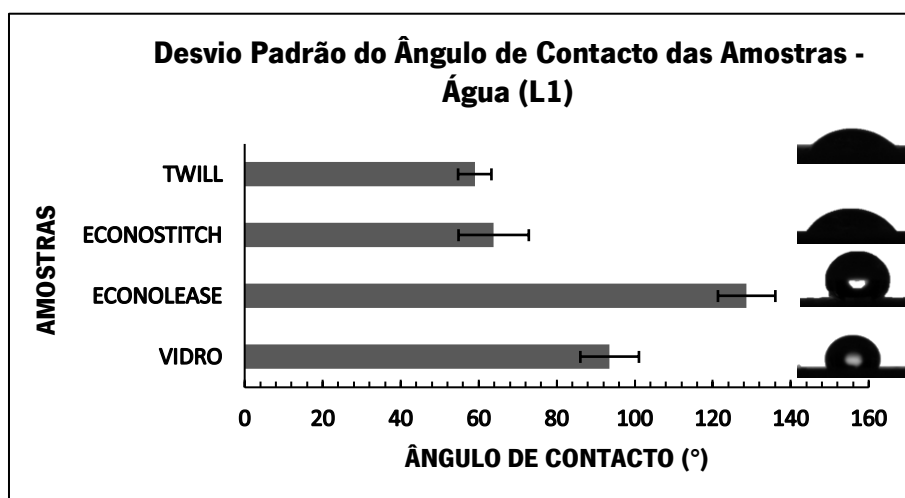


Figura 24 - Desvio-padrão do Ângulo de Contacto - ÁGUA (L1)

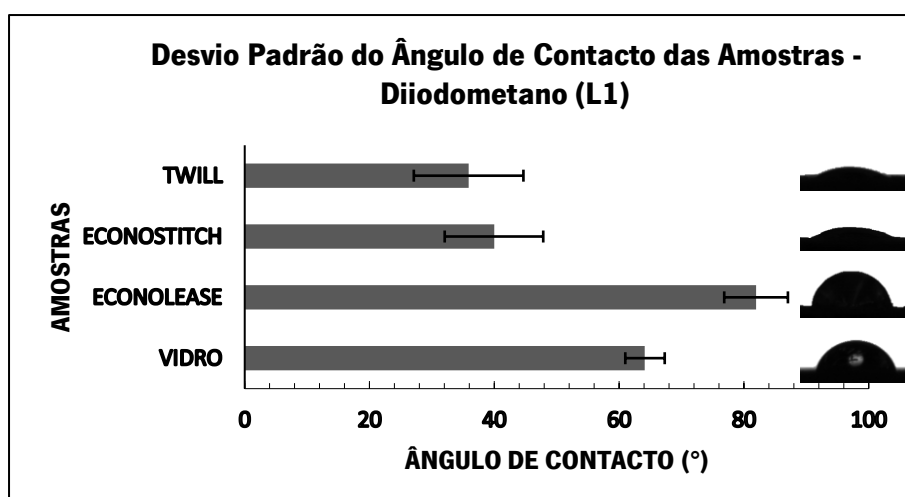


Figura 25 - Desvio-padrão do Ângulo de Contacto - DIIODOMETANO (L1)

A partir dos valores obtidos para os ângulos de contacto foi calculada a energia superficial de cada uma das superfícies estudadas com recurso à equação Owens-Wendt (Eq.1). No anexo 1 estão

explícitos os valores das componentes polar e dispersiva para a água e para o diiodometano. Aplicando os valores das componentes polar e dispersiva de cada líquido, quando relacionadas com a mesma superfície, é possível determinar as componentes polar e dispersiva da superfície de modo a calcular a energia superficial total. (Eq.2) (Eq.3) [14]

$$\frac{\gamma_L \times (1 + \cos \theta)}{2} = (\gamma_L^D \times \gamma_S^D)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_L^P \times \gamma_S^P)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Para água:
$$\frac{72,8 \times (1 + \cos \theta)}{2} = (21,9 \times \gamma_S^D)^{\frac{1}{2}} + (51 \times \gamma_S^P)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Para diiodometano:
$$\frac{50,8 \times (1 + \cos \theta)}{2} = (50,8 \times \gamma_S^D)^{\frac{1}{2}} + (0 \times \gamma_S^P)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Como a componente polar do diiodometano é 0, resolve-se a equação em ordem à componente dispersiva da superfície. (Eq.4) [17]

$$\gamma_S^D = \frac{\left[\frac{50,8 \times (1 + \cos \theta)}{2} \right]^2}{50,8} \quad (5)$$

Com o valor da componente dispersiva da superfície, é possível calcular a componente polar de superfície com o valor do ângulo de contacto da água. (Eq.5) [17]

$$\gamma_S^P = \frac{\left[\frac{72,8 \times (1 + \cos \theta)}{2} - (21,9 \times \gamma_S^D)^{\frac{1}{2}} \right]^2}{51} \quad (6)$$

Obtemos então, os valores da energia superficial total de cada uma das superfícies estudadas. (tabela 8)

Tabela 8 - Valores de energia superficial (L1)

Superfície	Twill	Econostitch	Econolease	Vidro
γ_S^D [mN/m]	41,60	39,64	16,53	26,19
γ_S^P [mN/m]	24,96	10,35	9,02	2,03
γ_S [mN/m]	66,63	49,99	26,45	28,22

É evidente a correlação entre os valores dos ângulos de contacto e da energia superficial de cada superfície. Quanto maior o ângulo de contacto, menor o valor de energia superficial isto pois, quanto maior a energia superficial melhor é a interação sólido-líquido, o que melhora a molhabilidade da

superfície. Com este cálculo é possível confirmar a influência da rugosidade nos valores de energia superficial dos substratos.[22]

É possível observar nos gráficos (figuras 24 e 25) que o ângulo de contacto do diiodometano é menor do que este da água, em todas as superfícies. Este resultado está dentro do expectável devido aos valores de tensão superficial das duas substâncias utilizadas, 50.8 mN/m para o diiodometano e 72.8 mN/m para a água [23], bem como a componente dispersiva calculada para o substrato compósito.

Na realidade a interação das moléculas do líquido com o substrato é mais complicada, sendo que, não depende apenas da tensão superficial, a polaridade dos líquidos e dos substratos dita muito a molhabilidade da superfície. [24] Todas as moléculas atraem outras moléculas. Quando uma gota entra em contacto com uma superfície, há agora a atração das moléculas do líquido com as moléculas da superfície, bem como entre si próprias, isto resulta na deformação da gota em direção à superfície o que causa a forma de cúpula. A forma final que a gota toma depende do equilíbrio das forças de atração do líquido para si mesmo e do líquido para a superfície. [25] Se a atração do líquido para a superfície for maior, o ângulo de contacto irá ser menor dada a intensificação da interação sólido-líquido. A relação do ângulo de contacto com o equilíbrio das forças de atração é quantitativa e é expressa pela equação de Young. (Eq.6) [17]

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \times \cos\theta \quad (1)$$

A equação de Young é uma relação fundamental que integra os conceitos de energia superficial, tensão superficial e ângulo de contato. Esta equação é essencial para a compreensão da molhabilidade dos substratos estudados uma vez que, os valores do ângulo de contacto (θ) influenciam diretamente a capacidade de um líquido molhar um certo substrato.

De todas as superfícies, a que apresenta o maior ângulo de contacto, independentemente do líquido utilizado, é a superfície caracterizada pelo *peel/ ply* Econolease. Embora esta superfície seja relativamente lisa, este *peel/ ply* é sujeito a um tratamento de silicone para facilitar a sua remoção e é possível que algum resíduo permaneça na superfície do substrato depois da sua remoção e altere a sua superfície, o que leva valores de ângulo de contacto elevados, até mais elevados do que a superfície Vidro, mesmo esta não possuindo saliências tão prominentes como a superfície Econolease.

Embora o desempenho da superfície Econostitch seja comparável, a superfície Twill é a superfície estudada com o menor ângulo de contacto, independentemente do líquido utilizado, isto porque, como determinado antes, é a superfície com maior rugosidade e Distância Máxima de Pico a Vale, ou seja, as saliências fazem com que o substrato tenha maior área de superfície para o líquido

aderir, o que melhora a interação sólido-líquido. [22] Com isto, o líquido vai ser mais propenso a espalhar-se conferindo uma melhor molhabilidade à superfície, o que se traduz num menor ângulo de contacto.

Nas figuras 26 e 27 é possível observar os resultados obtidos do laminado L2.

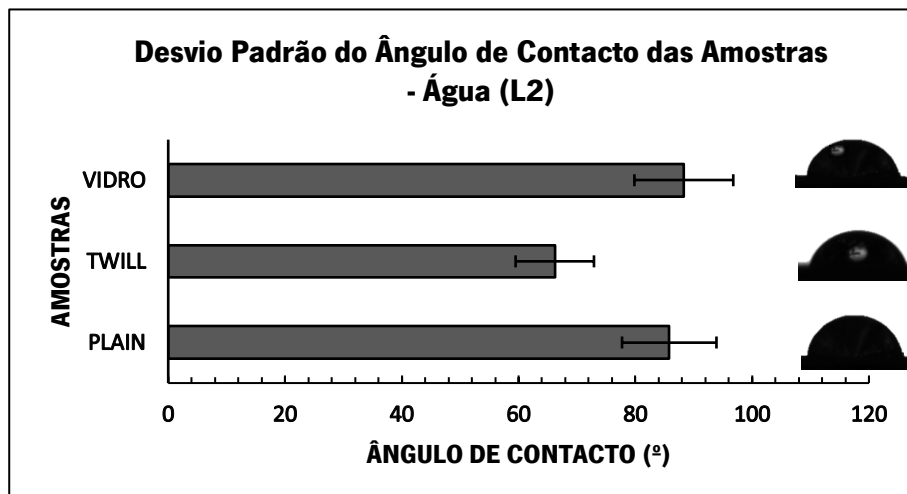


Figura 26 – Desvio Padrão do Ângulo de Contacto – Água (L2)

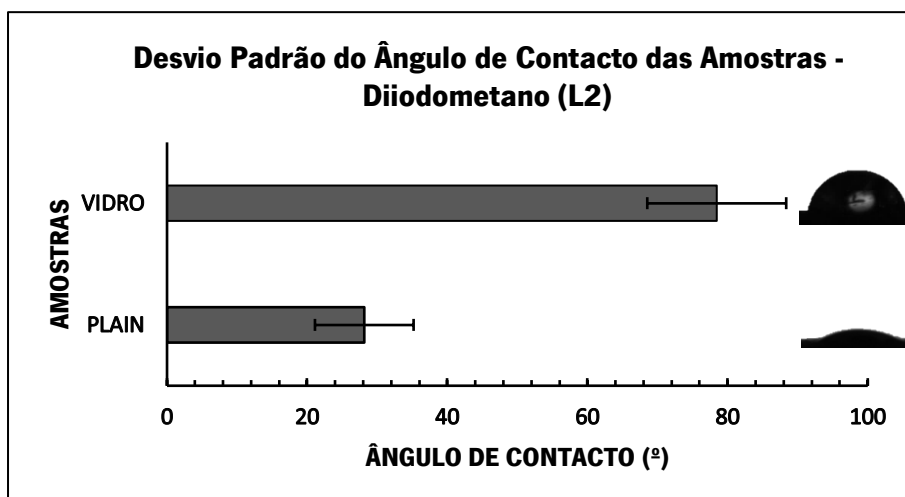


Figura 27 - Desvio Padrão do Ângulo de Contacto - Diiodometano (L2)

De novo, a mesma tendência mencionada em cima relacionada ao primeiro ensaio de medição de ângulo de contacto, acontece também no ensaio realizado com amostras do laminado L2. Os valores obtidos continuam a ser menores quando o ensaio é feito com a substância apolar enquanto que, quando este é realizado com água os valores são maiores. A menor diferença de valores entre os ensaios realizados com diferentes substâncias é observada na superfície com a menor rugosidade, a superfície Vidro, sendo que os valores são similares nos dois.

No ensaio realizado com diiodometano, apenas foram obtidos valores para as superfícies Vidro e Plain isto pois, no momento da deposição da gota da substância no substrato caracterizado pelo *peel*

ply Twill, esta espalhou-se completamente, sendo que não foi possível para o equipamento do ensaio medir o ângulo e obter um valor evidente. Isto demonstra uma molhabilidade extrema do laminado o que significa que a polaridade da resina ou do *peel/ply* utilizado no laminado L2 combinado com a rugosidade do substrato, influenciaram a interação entre as moléculas do laminado e da gota de diiodometano.

Da mesma forma, o efeito da polaridade pode ser observado na superfície Plain, porém com um resultado menos extremo devido à rugosidade reduzida em comparação com a superfície Twill. É de notar que o valor do ângulo de contacto da superfície Plain, realizado com a substância apolar, é muito reduzido quando comparado à mesma superfície no ensaio realizado com água, o que demonstra de novo a influência da polaridade na molhabilidade do substrato. Podemos então concluir que o laminado L2 é uma superfície ainda mais apolar que o laminado L1 estudado, devido aos valores reduzidos do ângulo de contacto, o que demonstra maior compatibilidade química entre a superfície e o líquido. É ainda possível que a combinação da polaridade da resina e a composição química dos *peel plies* utilizados possa melhorar a molhabilidade do substrato. Isto é analisado através de uma análise FTIR posteriormente.

Da mesma maneira que foi realizado no ensaio relativo ao laminado L1, foi calculada a energia superficial de cada superfície com os valores obtidos com o auxílio da equação de Owens-Wendt, bem como das equações utilizadas anteriormente. (Eq.2,3,4,5) Como não foi possível registar um valor fixo na medição do ângulo de contacto com o diiodometano na superfície Twill, é razoável assumir que o valor seria próximo de zero. Com isto, é evidente que se fosse possível calcular a energia superficial da superfície Twill o valor obtido seria mais elevado do que ambas a superfície Nylon e Vidro. Isto, pois, o ângulo de contacto extremamente reduzido traduz-se numa boa interação entre o sólido e o líquido e um valor elevado de energia superficial se fosse, eventualmente, calculado.

Tabela 9 - Valores de energia superficial (L2)

Superfície	Plain	Vidro
γ_S^D [mN/m]	44,96	18,29
γ_S^P [MN/m]	1,16	5,98
γ_S [mN/m]	46,12	24,27

O valor de energia superficial calculado para a superfície Twill é ligeiramente menor que o valor obtido para a superfície Econostitch.

4.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

Os resultados obtidos das amostras foram organizados em dois gráficos distintos: *Peel plies* (figura 28) e amostras do substrato (figura 31).

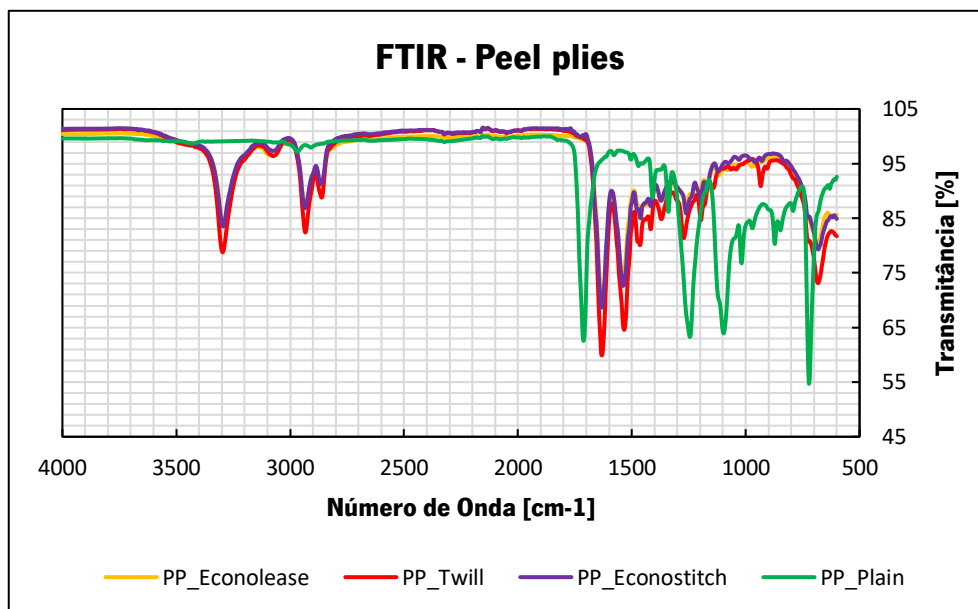


Figura 28 – Curvas FTIR das amostras dos *peel plies*

Observando os resultados obtidos na análise FTIR (figura 28), é possível notar que todas as amostras seguem, relativamente, a mesma curva, exceto o *peel ply* denominado de Plain, que apresenta menores picos na zona de grupos funcionais bem como diferenças na zona de impressão digital.

As curvas das restantes amostras apresentam picos, na zona de grupos funcionais a 3300 cm^{-1} , 1600 cm^{-1} e 1500 cm^{-1} que correspondem ao estiramento N-H, C=O e flexão N-H, respetivamente. Esta curva, descrita pelos bandas de absorção apresentadas na figura 28, tem similaridades com a curva FTIR de uma amostra de nylon (figura 29). O nylon é um polímero com grupos amida (N-H e C=O) na sua estrutura logo, a curva FTIR apresenta bandas de absorção relacionada com essas ligações.

Com esta análise é possível concluir que os *peel plies* Twill, Econolease e Econostitch são produzidos a partir de um tecido de nylon com diferentes padrões de tecelagem e tamanho de fibras.

É da informação de vários fornecedores que, enquanto que os *peel plies* Econostitch e Twill não têm qualquer tipo de tratamento, o *peel ply* Econolease é tratado com silicone de forma a facilitar a sua remoção das peças produzidas. A curva da amostra Econolease é semelhante às outras independente do tratamento que dispõe e não representa bandas de absorção relacionadas com o silicone. Isto pode acontecer pois, o nylon tende a apresentar picos característicos e intensos [26] logo, se a camada de

nylon for muito maior que a camada de silicone, é possível que a curva obtida prevaleça a quaisquer picos menos intensos característicos do silicone. Também é possível que a concentração de silicone pode ser muito baixa e abaixo do limite do equipamento e pode não ser detetada devido á maioria da amostra ser composto por nylon. Com um ensaio de XPS (Espectroscopia de fotoeletrões por raios x) talvez seja possível detetar a substância pois é mais sensível a revestimentos mais finos.

O *peel ply* Plain apresenta uma curva completamente diferente. As bandas de absorção a 1700 cm^{-1} e 1100 cm^{-1} correspondem aos estramentos C=O e C-O, respetivamente. Na zona de impressão digital também não tem picos que se relacionem com as restantes amostras. Com a informação das bandas de absorção e os respetivos estiramentos, bem como a comparação com curvas FTIR existentes (figura 29), é inferir concluir que o *peel ply* Plain é produzido a partir de poliéster, um material bastante utilizado na produção de *peel plies*.

São ainda mais evidentes as similaridades quando isoladas as curvas FTIR das amostras *peel plies* Plain e um dos outros *peel plies*, sendo que os restantes seguem a mesma curva.

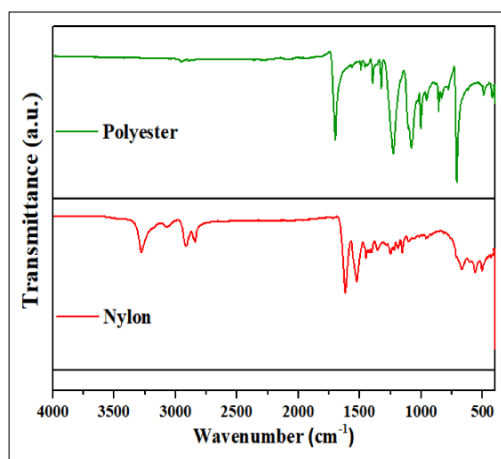


Figura 29 - Curva FTIR de Nylon e Poliéster (adaptado de Choi et al., 2022)

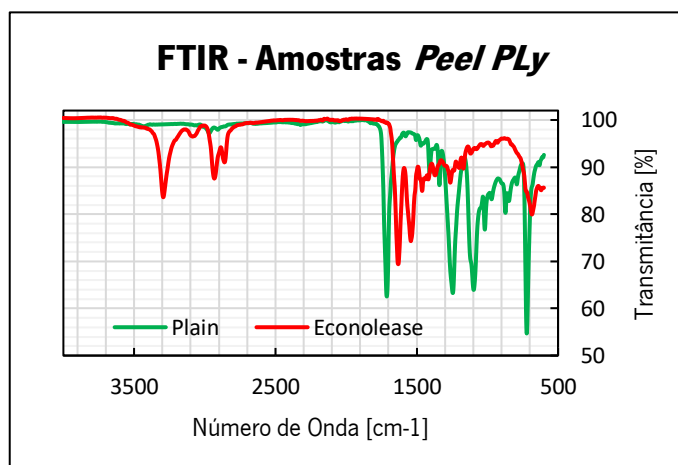


Figura 30- Comparação de curvas FTIR das amostras de *peel ply*

Agora com o material de cada *peel ply* definido é possível entender como cada um destes influencia a molhabilidade e adesão, relacionando estes resultados com as medições de ângulo de contacto e da rugosidade.

Os *peel plies* produzidos a partir de nylon podem, possivelmente, atrair grupos polares enquanto que os *peel plies* de poliéster induzem a predominância de grupos apolares. [22] Os tratamentos de superfície, como a aplicação de *peel plies*, têm como objetivo aumentar a componente polar do material de modo a aumentar a adesão química. Logo, é possível reconhecer que a combinação da rugosidade

elevada com a predominância de grupos polares na superfície Twill será favorável na molhabilidade do substrato bem como no processo de adesão. Porém, uma boa molhabilidade do substrato pode não ser traduzido numa boa adesão. [27]

Foram, também, analisadas amostras provenientes dos laminados L1 e L2, produzidos com duas resinas epóxi distintas e com diferentes acabamentos superficiais. Os resultados obtidos podem ser observados (figura 31). As amostras foram denominadas de acordo com o laminado que foi utilizado na produção dos provetes correspondentes,

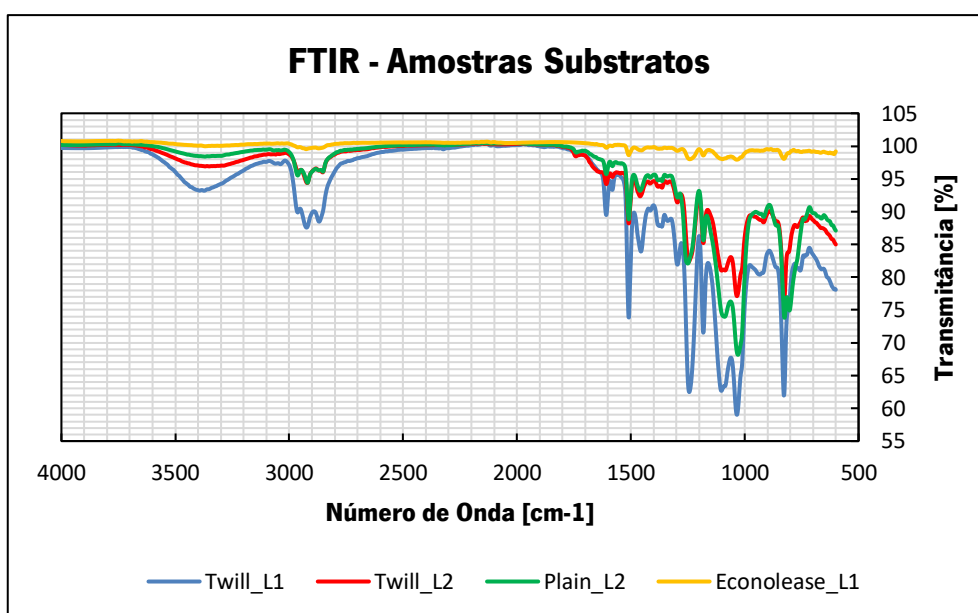


Figura 31 - Curva FTIR de amostras dos substratos

Com as curvas obtidas para cada uma das amostras são notáveis as diferenças e similaridades entre as mesmas. As amostras dos substratos tratados com os *peel plies* Twill e Plain, independente da resina utilizada, seguem a mesma tendência na zona dos grupos funcionais com uma banda de absorção larga entre 3500 cm⁻¹ e 3300 cm⁻¹, que corresponde ao estiramento -OH e três picos mais pequenos consecutivos entre 3000 cm⁻¹ e 2800 cm⁻¹, relativos ao estiramento C-H. O que muda entre as curvas de cada amostra é apenas a intensidade do sinal.

A curva da amostra da superfície do laminado L1 tratada com o *peel ply* Econolease aparenta uma curva diferente das outras apresentadas mas, como é possível observar na figura 32 a curva desta amostra segue a mesma tendência que as outras, apenas com picos de menor intensidade e não tão perceptíveis na figura 31. Isto é possivelmente relacionado com o *peel ply* utilizado na produção desta amostra. Como referido anteriormente, o *peel ply* Econolease é tratado com silicone logo, é possível que a interface criada entre o substrato e o *peel ply* possa ter alterado não só a morfologia da amostra, bem

como a química da superfície, o que pode justificar a menor intensidade dos picos quando a amostra foi submetida à análise FTIR.

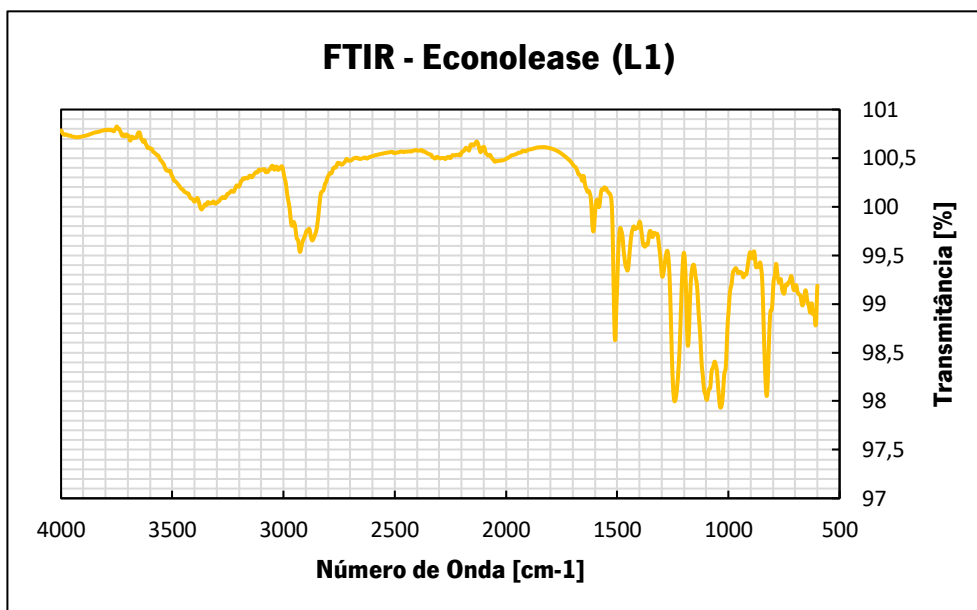


Figura 32 - Curva FTIR da amostra de substrato Econolease (L1)

Agora estabelecido que todas as amostras analisadas seguem a mesma curva, é de notar que os picos mais destacados e mencionados anteriormente correspondem aos picos presentes na curva FTIR de uma resina epóxi comum. (figura 33)

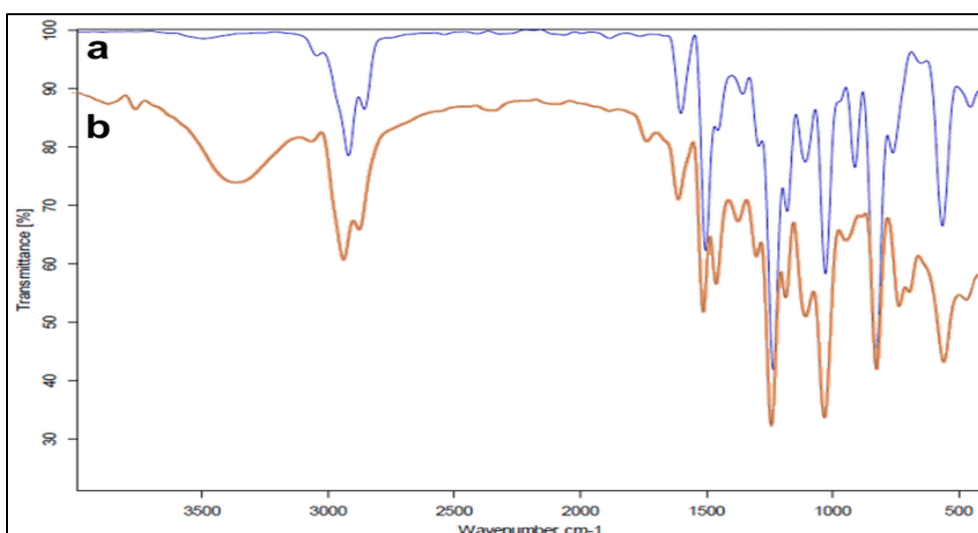


Figura 33 - Curva FTIR de resina epóxi líquida (a) e curada (b) (Cerit et al.,2016)

4.4 Lap Shear

Com recurso à máquina universal de ensaios *Shimadzu* foram efetuados os ensaios de *Lap Shear* e definidos os valores máximos de força necessária para a rotura dos provetes.

Na figura 34 estão representados os gráficos resultantes do 1º ensaio de *Lap Shear*. Para cada superfície está representado o provete com o maior valor de força máxima registada, na figura 35 o desvio padrão da força máxima dos provetes. Nos anexos 3 e 4 estão representados os gráficos resultantes de cada grupo de provetes analisados, bem como os valores de força máxima de cada provete, respetivamente.

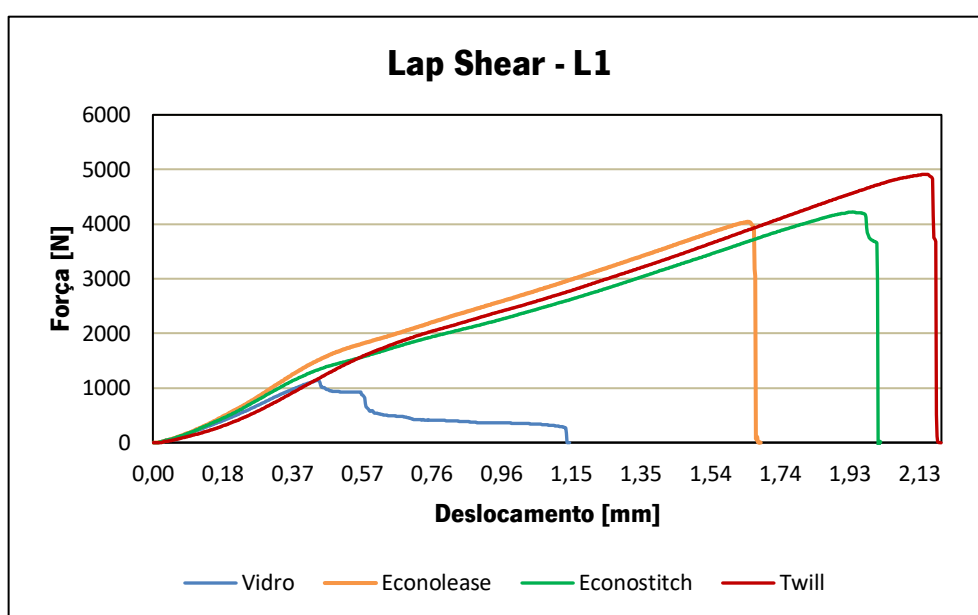


Figura 34 - Gráfico Força/Deslocamento (Amostras L1) 1º ensaio

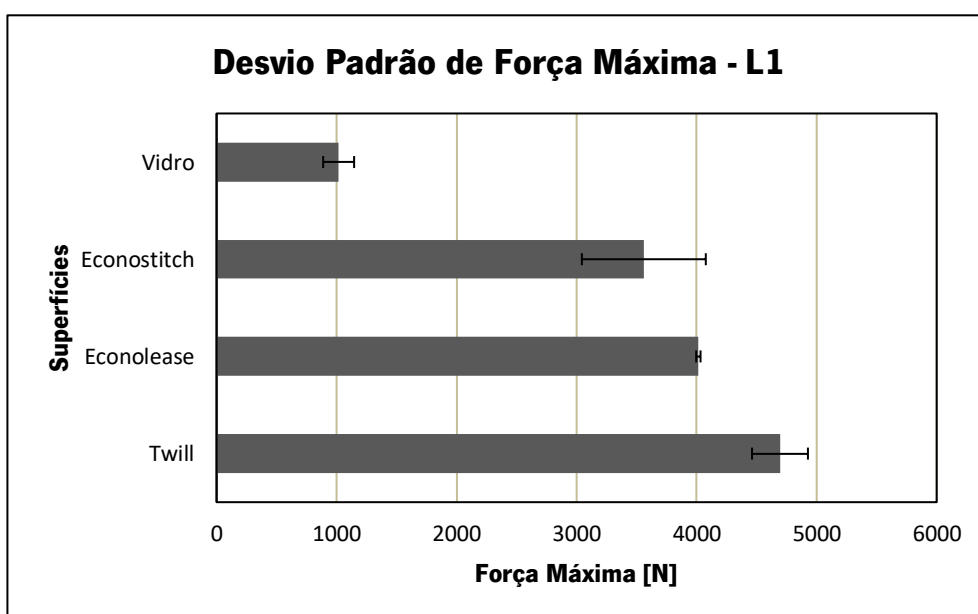


Figura 35 - Desvio Padrão de Força Máxima (Amostras L1) 1º ensaio

Com base nos resultados apresentados (figuras 34 e 35) é possível retirar algumas conclusões iniciais. É notável a diferença entre a força necessária para levar o provete à rotura quando comparadas as superfícies Twill e Vidro. A mesma força é mais aproximada nas superfícies Econostich e Econolease, mesmo quando comparada com a superfície Twill.

Relacionando os resultados da caracterização de superfície de cada substrato com os valores obtidos no ensaio de *Lap Shear* é evidente a correlação entre a rugosidade de cada provete com a força necessária para a rotura do mesmo. Sendo a superfície Twill a mais rugosa é aparente que o seu valor de força máxima, no ensaio de *Lap Shear*, é o maior comparando-o aos restantes provetes. A mesma relação é visível nos valores obtidos do ensaio com a superfície Vidro, sendo a que possui a menor rugosidade e, conseqüentemente, menor força necessária para a rotura do provete.

É então correto assumir que a rugosidade tem, de facto, influência, pelo menos até um certo nível, no processo de adesão. [22]

Esta relação não pode ser estabelecida para a molhabilidade e a força necessária para a rotura dos provetes. A superfície tratada com o *peel/ply* Econolease obteve um ângulo de contacto elevado, ambos com água e diiodometano, mas, obteve melhores resultados no ensaio de *Lap Shear* quando comparada com a superfície Vidro. Logo, não há uma correlação direta entre a molhabilidade e o desempenho do substrato na adesão. [27]

É de notar que não foi verificada nenhuma diferença significativa entre as superfícies tratadas pelos *peel/plies* Econolease e Econostitch, tendo em conta o desvio padrão, relativamente à força máxima pois, embora tenham relativamente o mesmo nível de rugosidade, o *peel/ply* Econolease é tratado com silicone, o que poderia alterar os valores de força necessária para levar o provete à rotura.

No entanto existem diferenças no deslocamento entre as amostras. De novo, a causa desta disparidade é explicada pelo tratamento de silicone utilizado no *peel/ply* Econolease, que diminui a energia superficial do substrato o que dificulta o processo de adesão logo, a junta obtida não é tão uniforme. Embora a força máxima seja similar à força obtida pela superfície Econostitch, a presença de vestígios de silicone faz com que a junta dos provetes não suporte níveis de deformação tão elevados como a superfície Econostitch.

Como estabelecido previamente, com base neste ensaio experimental inicial, existe correlação entre a rugosidade e a força necessária para levar o provete à rotura. Como evidenciado na análise FTIR, todos os *peel/plies* utilizados são fabricados a partir de nylon logo, a única variável é a morfologia da superfície de cada amostra, conferida pelos tipos de tecelagem dos *peel/plies*.

Foi realizada uma análise de variância (*ANOVA*) no *software Excel* com os valores de força máxima de cada grupo de forma a avaliar se existe uma diferença significativa entre as superfícies estudadas. Para isto, foi definido o valor de α como 0.05, valor comum quando realizada uma análise deste tipo. [28]

Foi definida a hipótese nula (H_0) como “A rugosidade não influencia os resultados” e a hipótese alternativa (H_1) como “A rugosidade influencia os resultados”. Se $p < \alpha$, a hipótese nula é rejeitada e a hipótese alternativa é aceite.

Tabela 10 - Análise de Variância

ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	23195887	3	7731962	61,05608	7,42E-06	4,066181
Dentro de grupos	1013097	8	126637,1			
Total	24208984	11				

Após os cálculos realizados pelo *software*, o valor de p obtido é menor que o valor de α definido (0.05) logo, a hipótese nula é rejeitada e é concluído que existem diferenças significativas entre pelo menos dois grupos e a hipótese alternativa “A rugosidade influencia os resultados.” é aceite.

O valor de F é bastante elevado, isto mostra que a diferença é maior entre os quatro grupos do que dentro dos grupos. [29] É de notar que o teste ANOVA só comprova que existem ou não diferenças entre os grupos, não confirma qual é a diferença entre os mesmos.

Posteriormente, foi realizado o 2º ensaio de *Lap Shear* com duas variáveis, a rugosidade dos provetes e a temperatura do adesivo. Na figura 36 estão representados os valores resultantes do ensaio com a adesivo a temperatura ambiente. Para cada superfície está representado o provete com a maior força máxima registada e na figura 37 o desvio padrão da força máxima dos provetes. No anexo 4 estão os gráficos resultantes de cada provete analisado, relativos ao 2º ensaio de *Lap Shear*.

As amostras denominadas de Twill_L1 e Twill_L2 referem-se ao laminado de onde foram retirados.

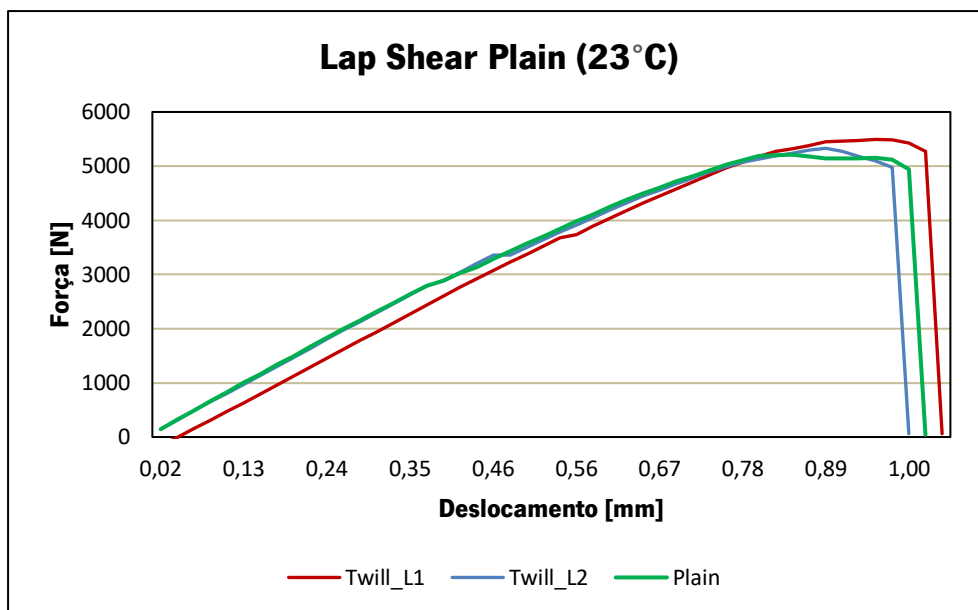


Figura 36 - Gráfico Força/Deslocamento (2º ensaio) - 23°C

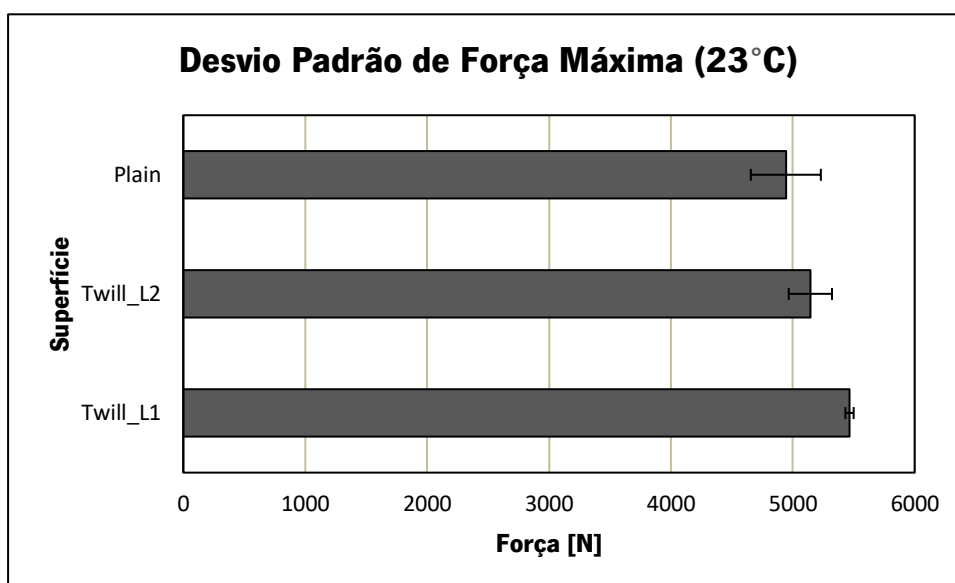


Figura 37 - Desvio Padrão de Força Máxima (2º ensaio) - 23°C

Relativamente aos resultados obtidos do 2º ensaio de *Lap Shear*, não é possível observar amplas disparidades da força necessária para levar os provetes à rotura entre as diferentes superfícies. Especialmente, quando tendo em conta o desvio padrão, observado na figura 37. Este resultado é consistente com o antecipado, relativamente às superfícies Twill_L1 e Twill_L2 pois, têm a mesma rugosidade e morfologia. Porém, relacionando os resultados de *Lap Shear* da superfície Twill_L1 com a superfície Twill do 1º ensaio de *Lap Shear*, é possível observar que quando foi utilizado o adesivo ENERCON, no 2º ensaio, a força necessária para levar o provete à rotura foi ligeiramente maior, cerca de 11,9 % enquanto que, o deslocamento foi muito reduzido em comparação.

É notável que a superfície tratada com o *peel ply* Plain obteve resultados muito similares às restantes amostras, tendo em conta que possui uma morfologia menos rugosa. É possível que o adesivo fornecido pela *ENERCON* ultrapasse a necessidade da alteração da superfície, a um certo ponto.

A partir dos resultados deste ensaio de *Lap Shear* é possível deduzir, neste caso, que com o adesivo fornecido pela *ENERCON* a rugosidade não determina o nível de adesão dos provetes produzidos pois, a diferença de rugosidade entre as superfícies Twill e Plain é bastante ampla e o valor de força necessária para a rotura de provetes é semelhante em todas as amostras. Isto pode indicar que quando a rugosidade e adesão química suficientes são alcançadas entre o substrato e o adesivo não há necessidade de aumentar a rugosidade do material.

Na figura 38 estão representados os valores resultantes do ensaio com o adesivo aquecido a 35°C. Novamente, para cada superfície está representado o provete com a maior força máxima registada. As amostras denominadas de Twill_L1 e Twill_L2 referem-se ao laminado de onde foram retirados.

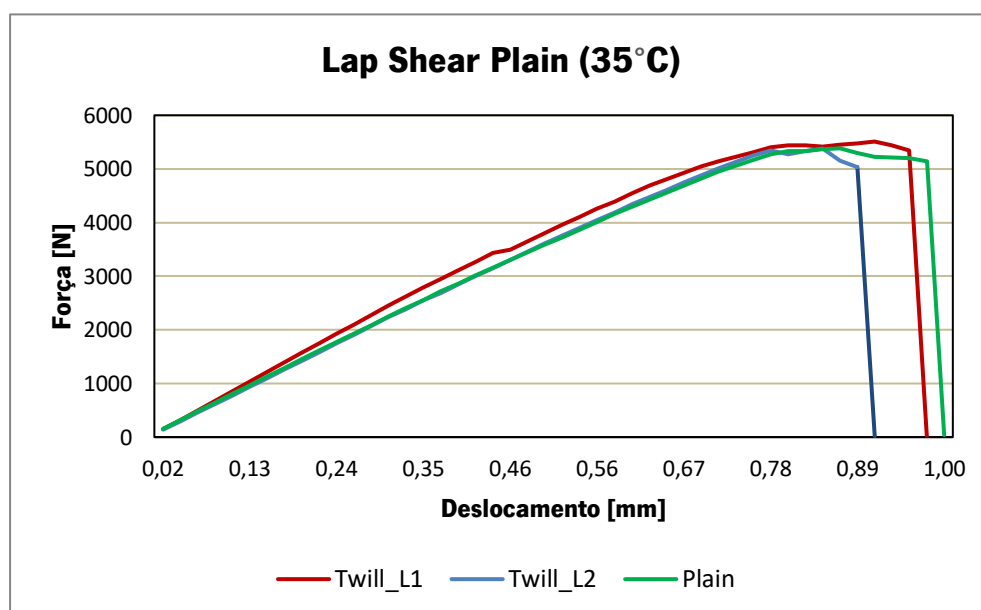


Figura 38 - Gráfico Força/Deslocamento (2º ensaio) - 35°C

Na figura 39 está representado o desvio padrão da força máxima dos provetes de cada grupo de amostras.

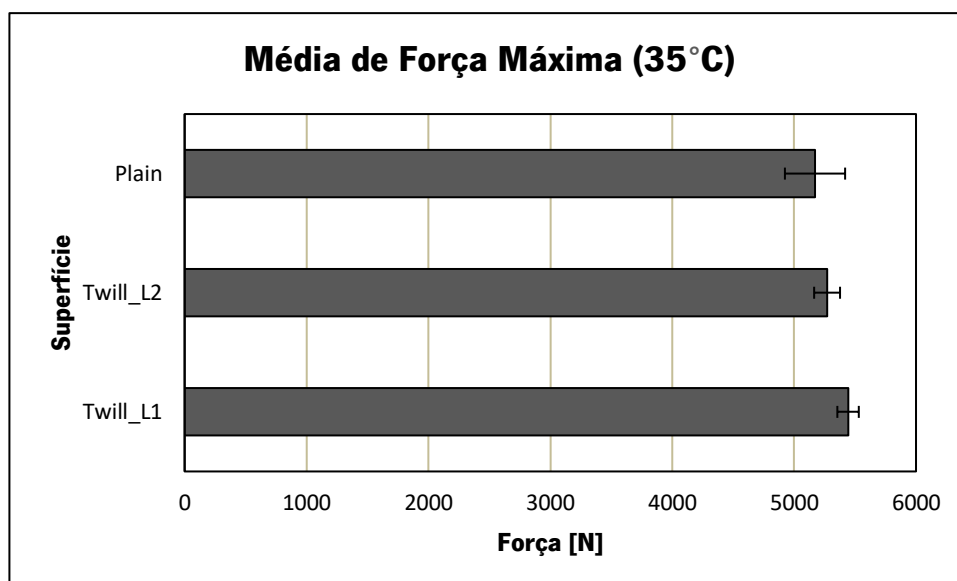


Figura 39 - Desvio Padrão de Força Máxima (2º ensaio) - 35°C

Numa primeira análise, pode-se afirmar-se que o aquecimento do adesivo não proporcionou nenhuma diferença significativa, tanto na força necessária para a rotura dos provetes como no deslocamento registado. Tendo em conta o desvio padrão da força máxima, os valores também não aparentam disparidades consideráveis.

Estas observações iniciais podem ser corroboradas pela realização de um teste de variância (ANOVA), como efetuado para os resultados no 1º ensaio de *Lap Shear*. A análise de variância (ANOVA) realizada para os provetes do 2º ensaio de *Lap Shear* é distinta da realizada anteriormente. Para estes grupos de provetes existem duas variáveis: a rugosidade e a temperatura do adesivo.

Com isto, foi realizada uma análise ANOVA double factor com repetição com o valor de α definido, novamente, como 0.05. A hipótese nula (H_0) foi definida como “Não existem diferenças entre os grupos.” e a hipótese alternativa (H_1) como “Existem diferença entre os grupos.” Os resultados obtidos podem ser observados na tabela 11.

Tabela 11 - Análise de Variância Double Factor

ANOVA						
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Amostra	50034,87	1	50034,87	1,014198	0,333775	4,747225
Colunas	480051,1	2	240025,6	4,865275	0,028357	3,885294
Interações	47680,73	2	23840,37	0,48324	0,628282	3,885294
Dentro	592013,2	12	49334,43			
Total	24208984	17				

O resultado desta análise demonstra que não existem diferenças significativas entre os grupos e confirma as observações iniciais que foram descritas anteriormente pois, o $p > \alpha$. Logo, a hipótese nula, “Não existem diferenças entre os grupos.”, é aceita.

Deste modo, é possível afirmar que o aquecimento do adesivo não influenciou a força de adesão dos provetes testados.

4.5 Análise Fractográfica

4.5.1 Modo de Falha

Para cada provete de *Lap Shear*, após o ensaio, foram fotografadas as superfícies da junta de forma a analisar o modo de falha de acordo com o tipo de rugosidade e adesivo utilizado.

Em relação ao 1º ensaio de *Lap Shear*, apenas com provetes provenientes do laminado L1, estão apresentadas as superfícies das juntas nas figuras 40 a 43.

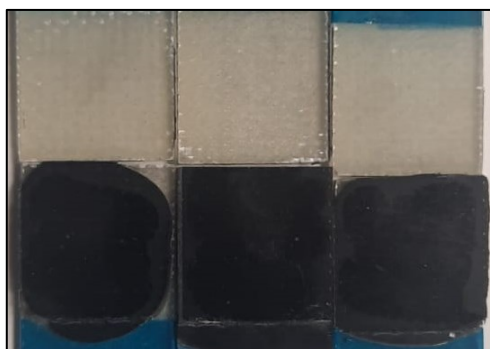


Figura 40 – Superfícies da junta (Vidro)



Figura 41 - Superfícies da juntas (Econostitch)

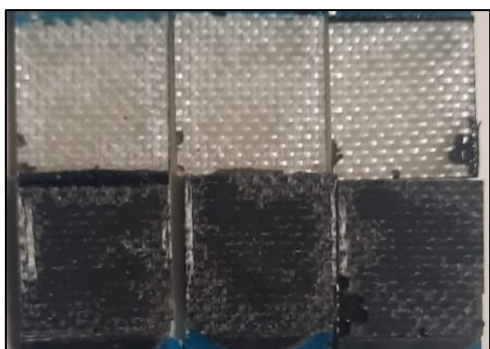


Figura 42 - Superfícies da junta (Econolease)



Figura 43 - Superfícies da junta (Twill)

Relativamente à superfície Vidro a falha caracteriza-se pela falha adesiva e acontece na interface entre o adesivo e o substrato compósito. Este modo de falha sugere que a preparação da superfície é inadequada, o que é corroborado pela falta de rugosidade conferida a esta superfície.

Nas restantes superfícies o modo de falha foi relativamente o mesmo. É possível observar alguns pontos de falha adesiva e ligeiras falhas da fibra nas extremidades das juntas. Isto pode ser explicado pelo modo de corte na preparação dos provetes com a serra de fita que pode ter ligeiramente exposto algumas fibras nessas regiões.

No que se refere ao 2º ensaio de *Lap Shear* foi realizado o mesmo procedimento relativamente às juntas. Nas figuras 44 a 49 estão apresentadas as superfícies das juntas dos provetes testados.



Figura 44 - Superfícies das juntas (Twil_L1- 23°C)



Figura 45 - Superfícies das juntas (Twil_L1- 35°C)

Nas figuras das superfícies das juntas dos provetes da superfície Twill provenientes do laminado L1 o modo de falha é consistente em todos estes, mesmo nos provetes testados o adesivo aquecido. É possível observar falhas mistas, um combinação de falha coesiva e adesiva em vários pontos.



Figura 46 - Superfícies das juntas (Twil_L2- 23°C)



Figura 47 - Superfícies das juntas (Twil_L2- 35°C)

De novo, nas figuras 46 e 47 relativas à superfície Twill resultantes do laminado L2, são observados modos de falha mista, sendo que um provete também demonstra rutura de fibras na figura 46.

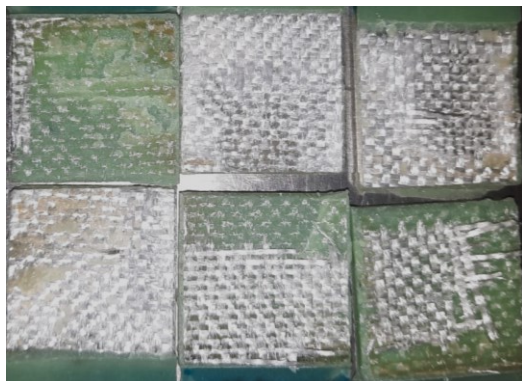


Figura 48 - Superfícies das juntas (Nylon - 23°C)



Figura 49 - Superfícies das juntas (Nylon - 35°C)

No que se refere aos provetes da superfície Nylon, os modos de falha identificados são, novamente falha mista em ambas as figuras. Embora, na figura 48 também é possível observar dois provetes com rutura de fibras.

4.5.2 SEM

Foram analisadas quatro amostras em relação aos provetes do 1º ensaio de *Lap Shear* com o equipamento de SEM. Foram escolhidas as superfícies de fratura dos provetes com o maior e menor valor de força máxima, com exceção da superfície Vidro. Logo, foram seleccionados os provetes das superfícies Econolease e Twill e analisadas as amostras.

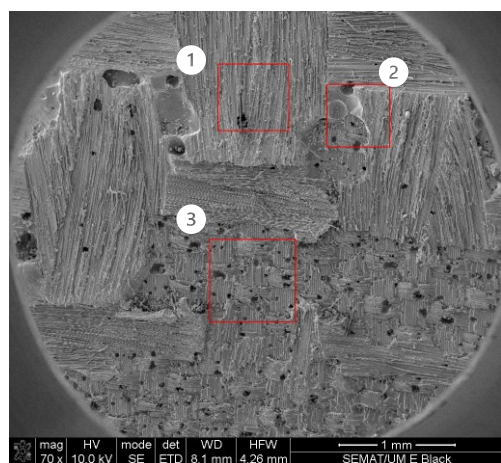


Figura 50 – Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo)

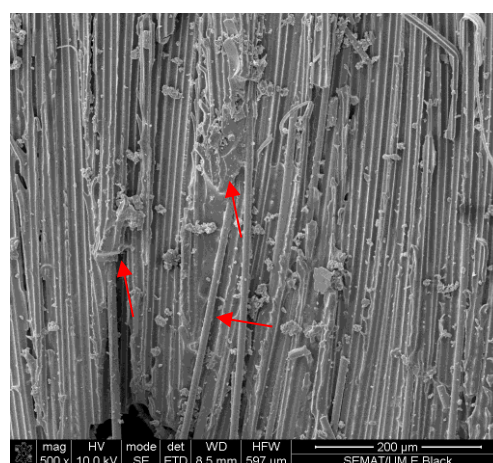


Figura 51 - Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo) Zona 1

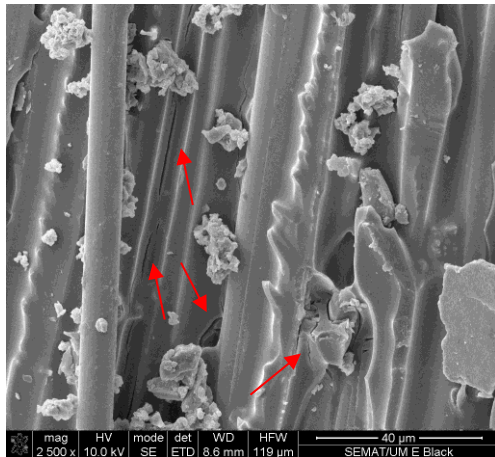


Figura 52 - Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo) Zona 1

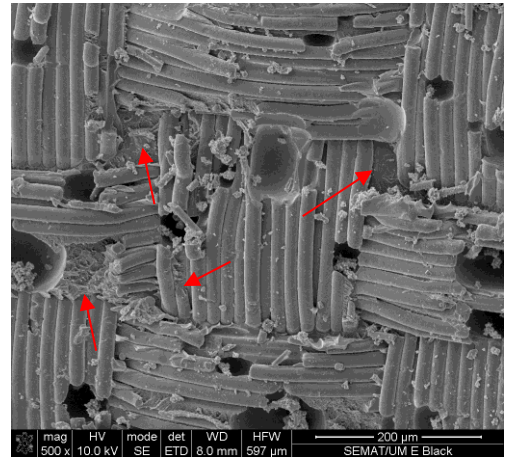


Figura 53 - Amostra SEM Econolease (Lado do adesivo) Zona 3

Com as imagens obtidas a partir da análise SEM é possível efetuar algumas observações iniciais. Na figura 50 foram destacadas as áreas de interesse da amostra Econolease relativas à superfície do adesivo. São visíveis vazios microscópicos na superfície que podem ser justificados pela aplicação do adesivo no momento de montagem dos provetes. É aparente o padrão presente na superfície que foi conferido pela morfologia do laminado preparado com o *peel ply* Econolease.

Relativamente à zona 1, na figura 51 são destacados vestígios da matriz polimérica bem como locais onde o adesivo apresenta uma maior elevação em volta das poucas fibras expostas na amostra, realçadas através das setas vermelhas. São de notar as fissuras formadas e visíveis na figura 52 que demonstram concentrações de tensões no material durante o teste.

Na zona 2 destacada da amostra são notáveis os vazios mais amplos e profundos. (figura 50)

São consideráveis as superfícies irregulares presentes na zona 3 da amostra bem como vestígios da matriz polimérica. É visível o padrão que ficou impresso no adesivo devido à morfologia do substrato e superfícies irregulares, assinadas com setas vermelhas, que sugere certa plasticidade exibida pelo adesivo devido às forças de corte durante o teste (figura 53)

Na figura 54 foram destacadas as áreas de interesse da amostra Econolease relativas à superfície das fibras. São novamente visíveis vazios microscópicos que podem ser devidos ao ar atrapado no adesivo no momento de adição do endurecedor, por ter alta viscosidade e é possível observar as camadas inferiores da fibra de vidro utilizada para fabricar o laminado. O mesmo é visível nas restantes áreas de interesse.

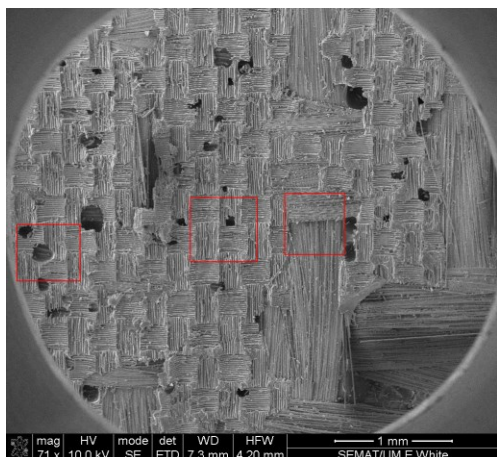


Figura 54 - Amostra SEM Econolease (Lado das fibras)

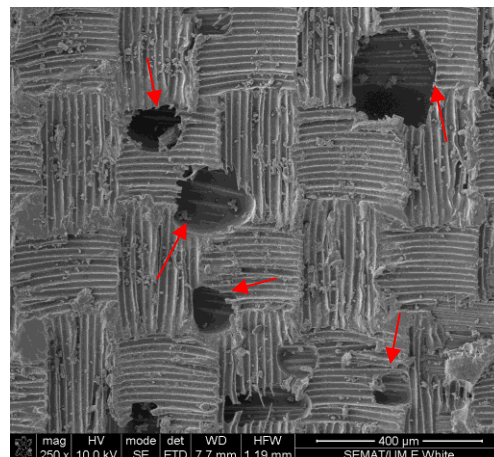


Figura 55 - Amostra SEM Econolease (Lado das fibras)

Nas figuras 56 a 62 estão representados os resultados da análise SEM relativos às superfícies de fratura da junta do provete Twill.

As zonas mais representativas foram numeradas como zona 1 e 2 (figura 56). Em toda a superfície é possível, de novo, observar vazios. A maior ampliação, figura 57, são visíveis rachaduras na superfície do adesivo na zona 1.

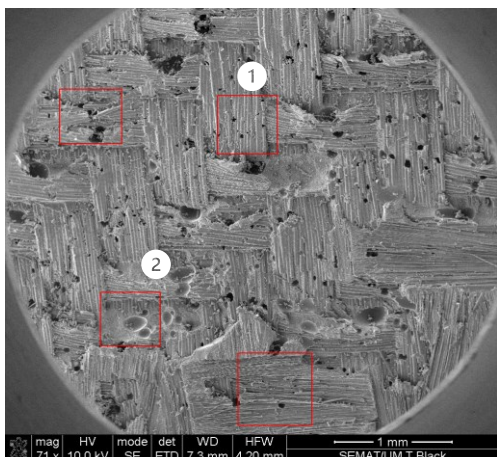


Figura 56 - Amostra SEM Twill (Lado do adesivo)

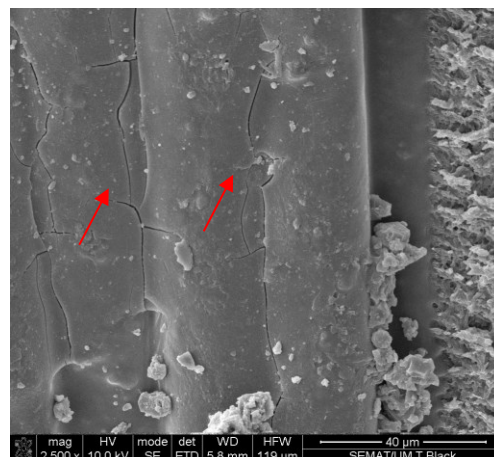


Figura 57 - Amostra SEM Twill (Lado do adesivo)
Zona 1

Na zona 2 a superfície do adesivo é irregular (figura 58), que pode dar a entender que o material sofreu deformação plástica, durante o ensaio de *Lap Shear*, no local específico antes da fratura total do provete.

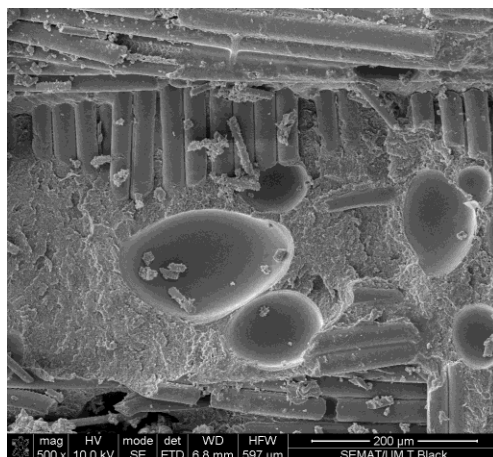


Figura 58 - Amostra SEM Twill (Lado do adesivo)
Zona 2

Na figura 59 foram destacadas as áreas de interesse da amostra Twill relativas à superfície das fibras, numeradas zonas 1, 2 e 3.

Na zona 1 é possível observar um vazio rodeado por fibras orientadas e no inferior do mesmo um depósito de resina com a superfície lisa. Quando são utilizados *peel plies* com padrões de tecelagem mais soltos, nos cantos de reunião das diferentes direções do padrão a resina pode ser acumulada nestes pontos, durante o processo de infusão, e a superfície fica em contacto com o saco de infusão resultando numa superfície lisa como observada na figura 60.

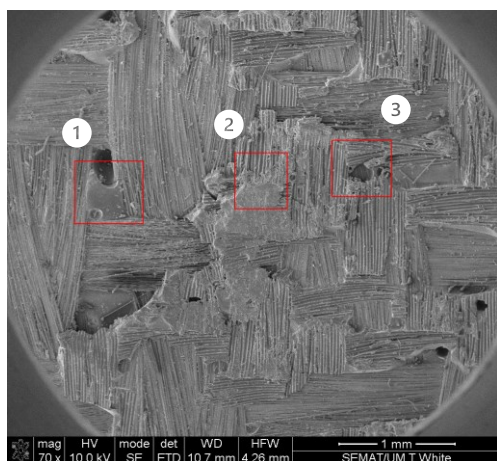


Figura 59 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras)

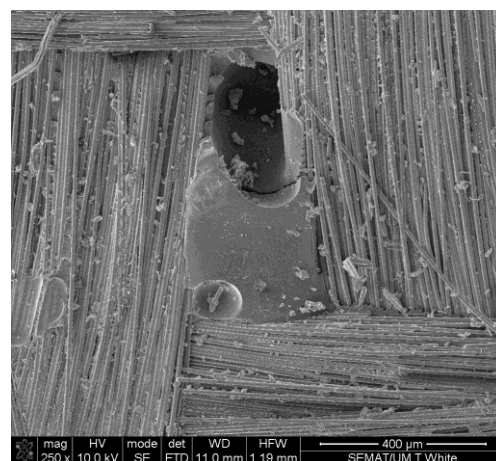


Figura 60 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras)
Zona 1

Na zona 2 observam-se fibras orientadas no lado esquerdo da imagem. Na restante área da amostra, é visível uma superfície de adesivo rugosa e não uniforme que demonstra uma zona de falha coesiva na camada do adesivo. (figura 61)

Na zona 3 são novamente observadas as fibras pertencentes a camadas inferior do substrato produzido devido a um vazio presente antes da fratura. (figura 62)

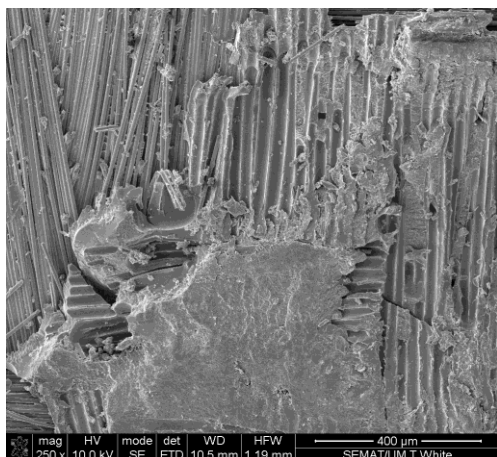


Figura 61 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras)
Zona 2

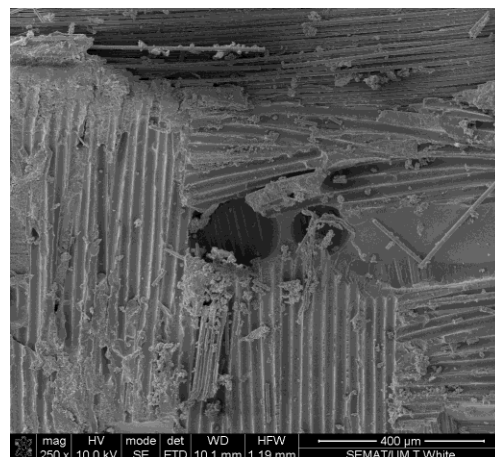


Figura 62 - Amostra SEM Twill (Lado das fibras)
Zona 3

Relativamente às fraturas do 2º ensaio de Lap Shear, foram analisadas duas amostras provenientes dos provetes mais representativos. Sendo destacadas as zonas de interesse. (figura 63 e 67)

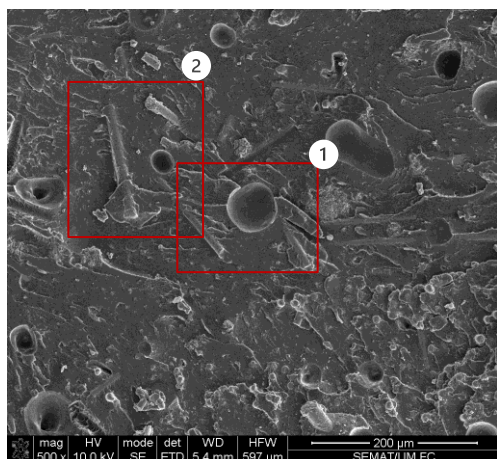


Figura 63 – Amostra 1 SEM 2ºensaio Lap Shear

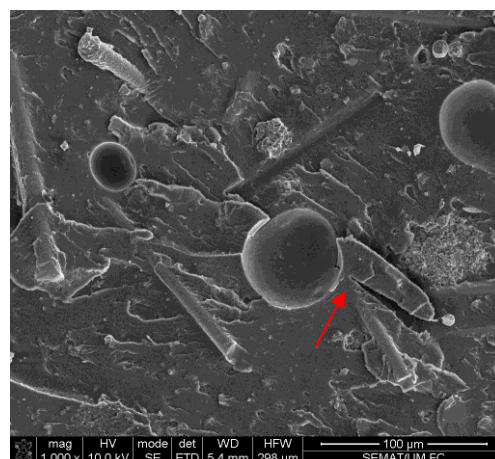


Figura 64 – Amostra 1 SEM 2ºensaio Lap Shear
Zona 1

São notáveis, como anteriormente, os vazios presentes na camada do adesivo. Na zona 1, figura 64, adjacente ao vazio, é notável o levantamento do adesivo. Na zona 2 são aparentes as fibras levantadas e quebradas, também visíveis na zona 1. (figuras 65 e 66) A superfície do adesivo é rugosa e não uniforme, o que demonstra uma resposta plástica durante a fratura.

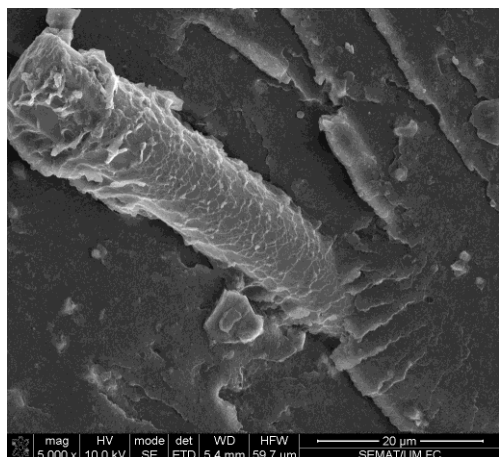


Figura 65 – Amostra 1 SEM 2º ensaio de Lap Shear Zona 2 a)

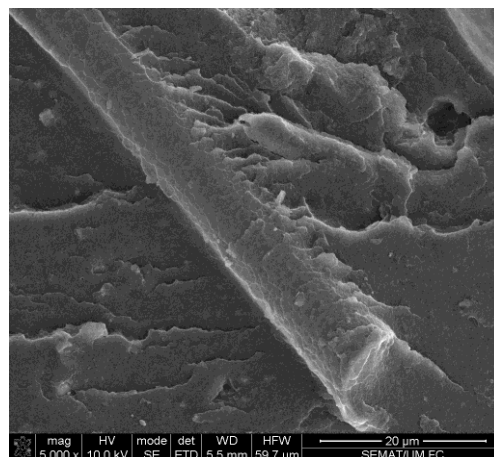


Figura 66 – Amostra 1 SEM 2º ensaio de Lap Shear Zona 2 b)

Relativamente à segunda amostra analisada, são visíveis fibras levantadas e partidas na zona 1, figura 68. Na zona 2 é notável, de novo, um vazio. A superfície do adesivo demonstra a mesma aparência que na amostra 1, sendo esta rugosa e não uniforme.

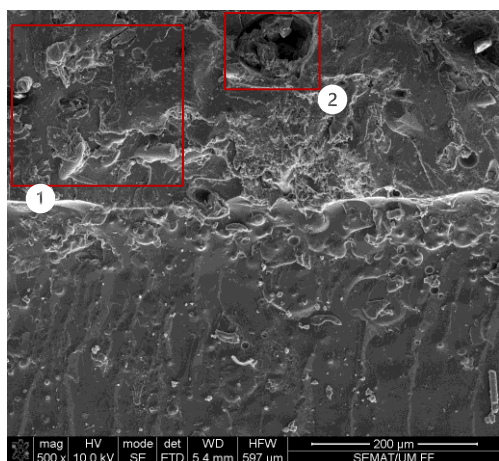


Figura 67 - Amostra 2 SEM 2º ensaio Lap Shear

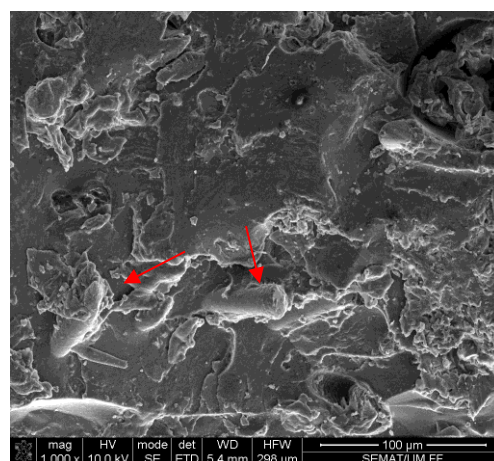


Figura 68 - Amostra 2 SEM 2º ensaio Lap Shear Zona 1

4.6 Determinação da Força de Adesão de Tintas Sobre o Substrato Compósito

4.6.1 Defeitos Superficiais

Depois da secagem da tinta todas as superfícies foram observadas e analisadas, com auxílio ao microscópio ótico, quanto a defeitos superficiais. Foram selecionadas as imagens mais representativas do estado superficial de cada grupo de amostras. Nas figuras 69 a 72 estão representadas as imagens dos defeitos superficiais nas amostras G1 e G2.

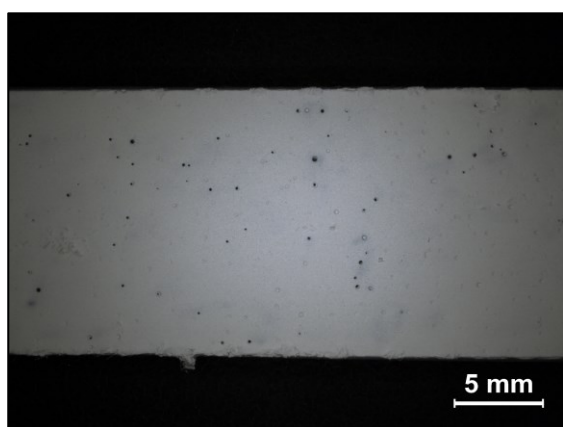


Figura 69 - Defeitos Superficiais (Amostra G1)

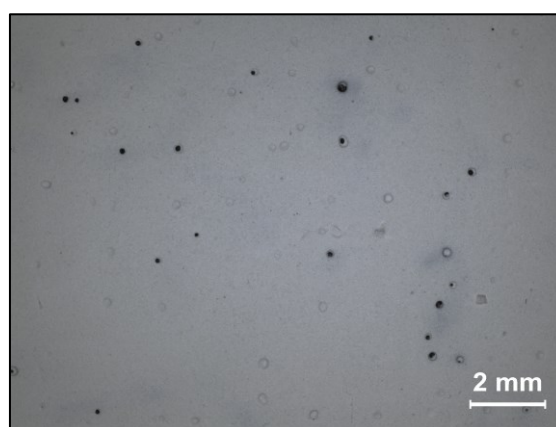


Figura 70 - Defeitos Superficiais (Amostra G2) Objetiva x1.6

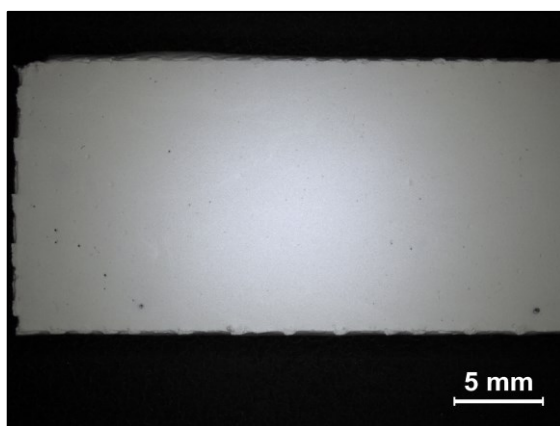


Figura 71 - Defeitos Superficiais (Amostra G2)

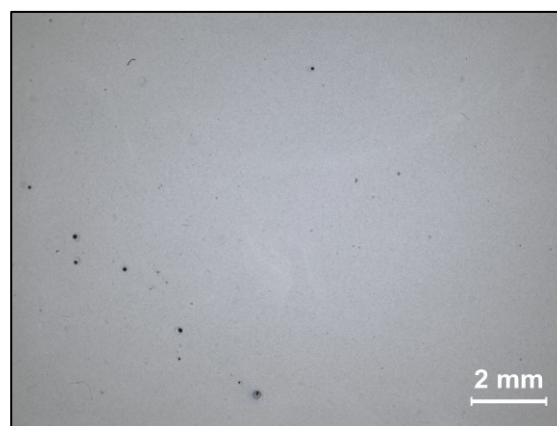


Figura 72 - Defeitos Superficiais (Amostra G2) Objetiva x1.6

Nas superfícies relativas às amostras G1 e G2, são observados poros e microvazios com variação na sua intensidade. Isto é explicado pela porosidade inerente de compósitos de matriz polimérica bem como a espessura de tinta aplicada nos provetes.

Relativamente às amostras em que foram aplicadas 3 camadas do material, G7 e G8, não são visíveis microvazios, enquanto que os poros são aparentes na mesma maneira que nas amostras anteriores, embora com menor reiteração, quando são comparados os resultados dos defeitos superficiais das amostras G1 e G2. Isto sugere que a aplicação de camadas subsequentes de tinta, ajuda a reduzir os microvazios que podem ser produzidos por aplicação não uniforme de tinta em combinação com a superfície heterogênea do compósito. Já os poros, que são aparentes em todas as amostras, podem ter relação ao tipo de tinta utilizada e as suas condições de secagem, as quais não foram controladas.

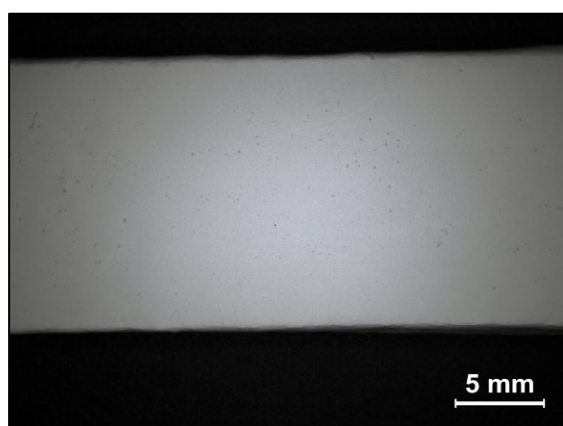


Figura 73 - Defeitos Superficiais (Amostra G7)

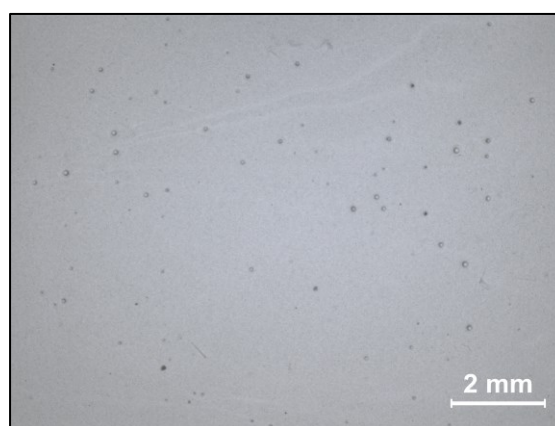


Figura 74 - Defeitos Superficiais (Amostra G7) Objetiva x1.6

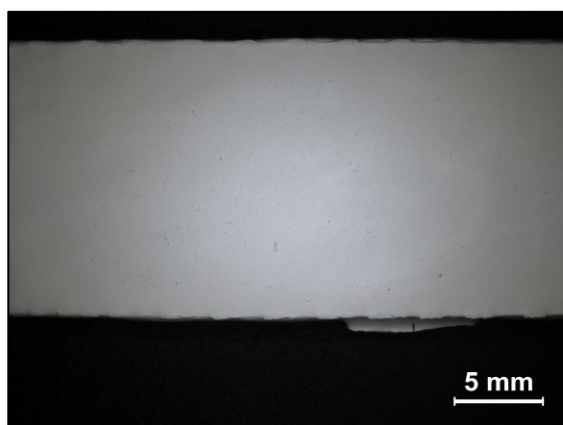


Figura 75 - Defeitos Superficiais (Amostra G8)

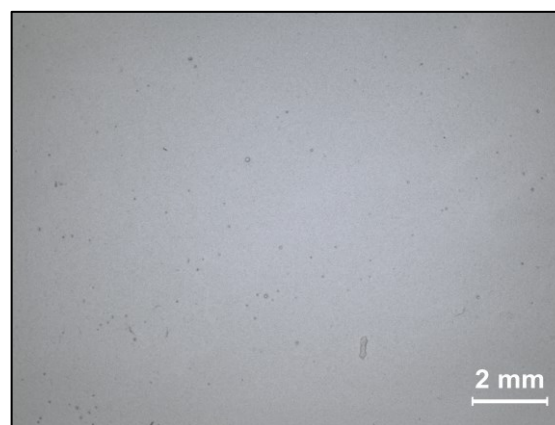


Figura 76 - Defeitos Superficiais (Amostra G8) Objetiva x1.6

De modo a obter uma análise mais completa foi medido o comprimento dos microvazios e poros de modo a encontrar uma correlação com as condições de pintura. Porém, isto não foi possível pois, os valores não assumem um padrão distinto ao longo das amostras. (tabela 12)

Tabela 12 - Tabela 12 - Médias dos valores dos comprimentos

Amostras	G1	G2	G7	G8
Média de dimensão máxima de microvazios (mm)	0,168	0,221	-	-
Média de dimensão máxima de poros (mm)	0,221	0,094	0,124	0,168

4.6.2 Ensaio de *Scratch*

Os resultados obtidos no ensaio de *Scratch* foram organizados em ordem a alguns parâmetros, sendo um dos mais importantes a Força Normal a que a carga critica inicial ocorre em cada um dos provetes. Na figura 77 é possível observar o desvio padrão deste parâmetro para cada uma das amostras. A azul estão representadas as amostras em que foi aplicada apenas 1 camada e a vermelho as amostras em que foram aplicadas 3 camadas.

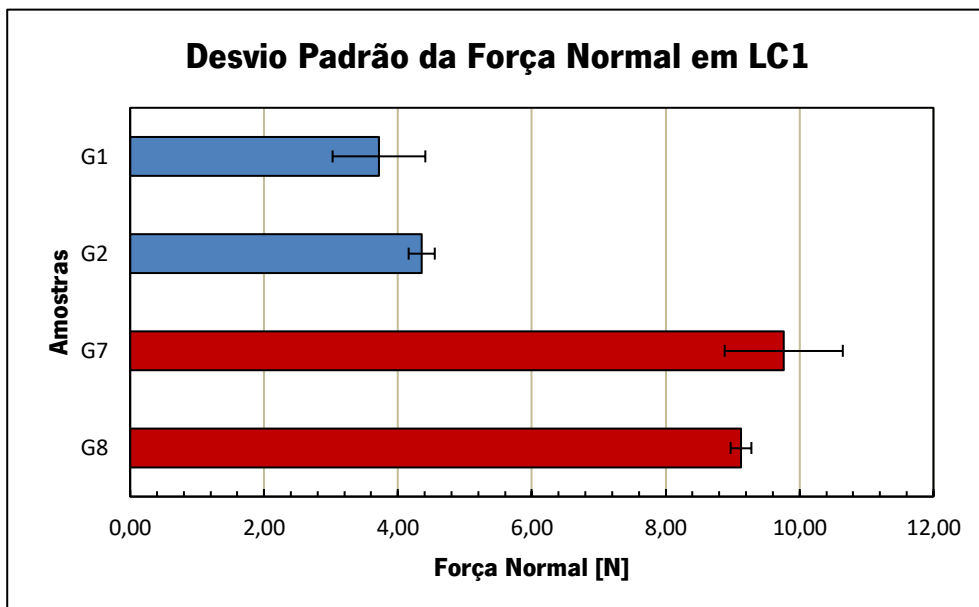


Figura 77 - Força Normal na Carga Crítica (LC1)

É de notar a diferença dos resultados obtidos entre as barras de cores diferentes. As amostras em que foi aplicada apenas 1 camada de tinta, G1 e G2, e as amostras em que foram aplicadas 3 camadas de tinta, G7 e G8, diferem muito na Força Normal a que se deu a carga critica inicial, LC1. Logo, a Força Normal necessária para levar ao primeiro sinal de rotura do material é menor nos provetes em que foi aplicada menor quantidade de tinta aplicada. Este resultado é expectável pois, nos provetes

preparados com 3 camadas de tinta existe mais material para resistir à ponta de diamante do equipamento, o que pode criar uma estrutura mais complexa que assiste na dissipação das forças aplicadas ao revestimento.

Não é possível determinar correlação entre a força necessária a que se dá a LC1 e a alteração da humidade do substrato compósito. Relativamente às amostras G1 e G2, tendo em conta o desvio padrão, não existem disparidades significativas do valor da Força Normal em que o primeiro sinal de rotura é registado. É de notar que as amostras com a maior percentagem de humidade apresentam menor desvio. É possível que o aumento da humidade na superfície do substrato melhore a molhabilidade da tinta o que resulta em valores mais aproximados.

A respeito das amostras em que foram aplicadas 3 camadas de tinta, é observada uma diferença maior da Força Normal registada a que se dá a LC1. Isto acontece devido à disparidade da espessura da tinta entre as amostras G7 e G8. Embora o modo de aplicação tenha sido o mais uniforme possível não é assegurada totalmente a mesma espessura em cada camada aplicada e é possível existirem partículas de pó entre camadas. Na figura 66 esta representado a Profundidade de Penetração registado no equipamento do ensaio de *Scratch*, onde é possível observar a disparidade da espessura mencionada anteriormente.

O valor da Profundidade de Penetração verificado para a amostra G1 não é exemplar da espessura da tinta pois, nos riscos realizados na amostra a ponta de diamante do equipamento atingiu o substrato compósito ao longo do ensaio. O mesmo aconteceu na amostra G2 porém, apenas no final do ensaio e com menos profundidade.

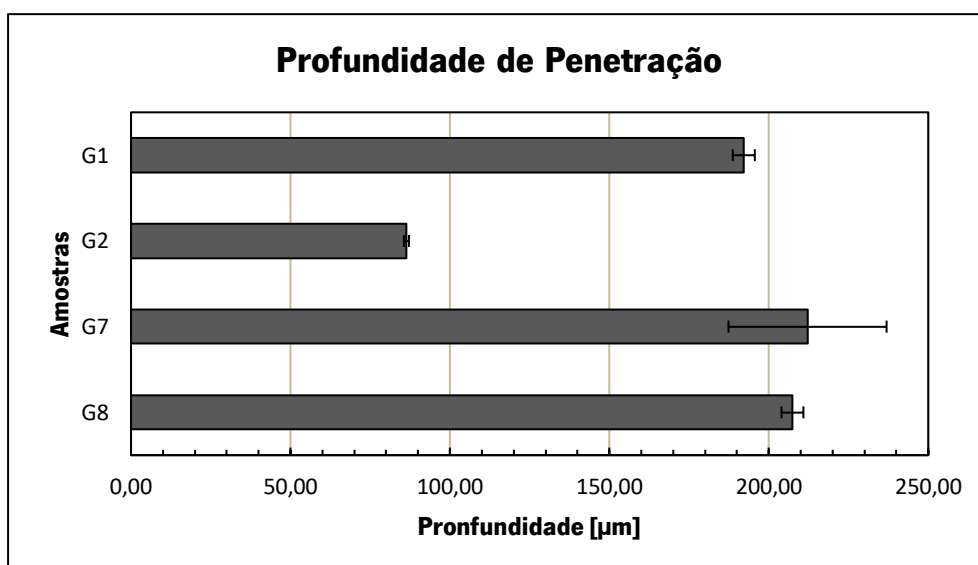


Figura 78 - Profundidade de Penetração

Com base nos resultados obtidos no ensaio realizado, é seguro afirmar que a aplicação de várias camadas de tintas é benéfico para melhorar a sua adesão ao substrato. A alteração da humidade dos substratos não produziu diferenças consideráveis de forma a estabelecer uma correlação entre esta e os parâmetros registados.

Foram divididos os valores de força normal pelos de profundidade de penetração correspondentes de forma a obter um esforço específico para cada uma das amostras. Os valores calculados, representados na figura 79, demonstram um parâmetro comparativo mais aproximado à realidade.

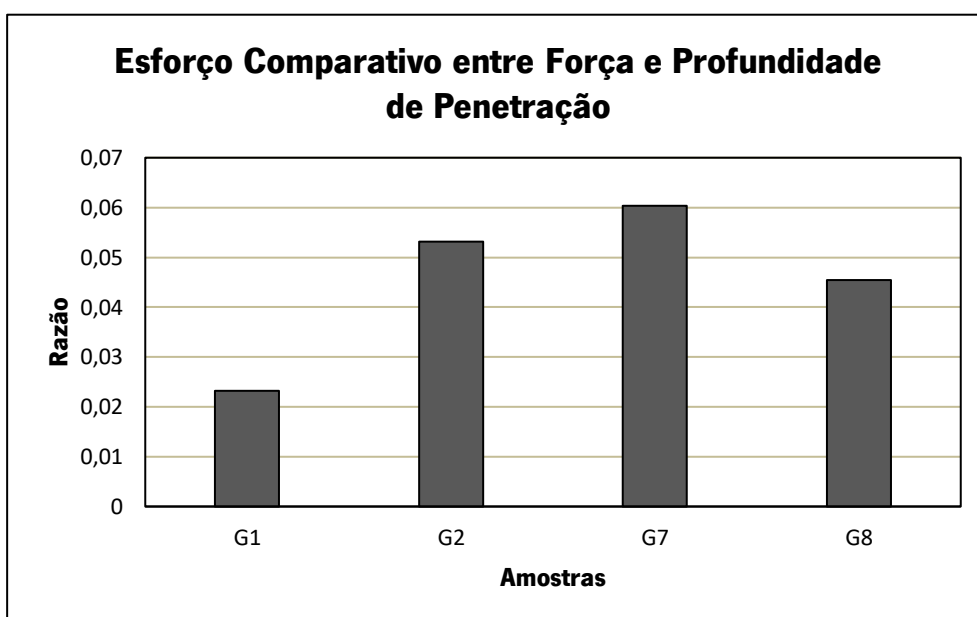


Figura 79 – Razão Força/Profundidade de Penetração

Tendo em conta os resultados obtidos em relação aos defeitos superficiais e adesão da tinta é de constatar que o modo de aplicação da tinta poderia ser melhorado de forma a obter camadas mais uniformes sob a superfície e deste modo atingir melhores resultados.

Nas figuras 80 a 89 estão é possível observar as imagens das LC1 relativas a cada ensaio efetuado nas amostras.

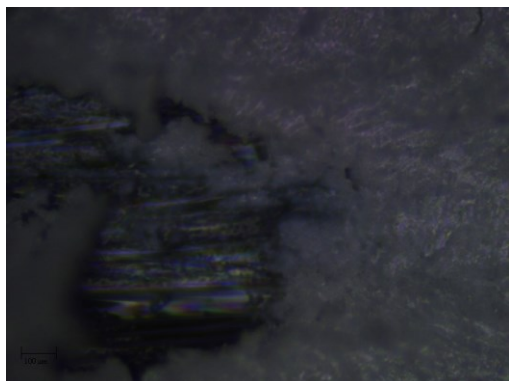


Figura 80 - LC1 (G1 Risco n°1)



Figura 81 - LC1 (G1 Risco n°2)

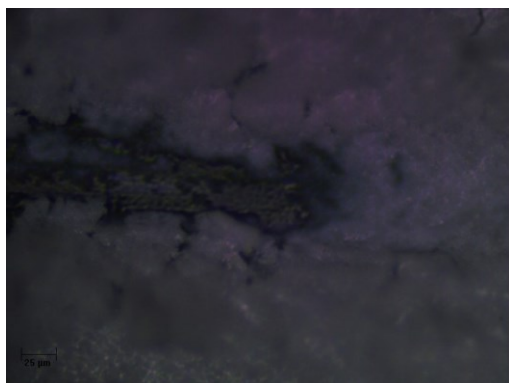


Figura 82 - LC1 (G1 Risco n°3)



Figura 83 - LC1 (G2 Risco n°1)

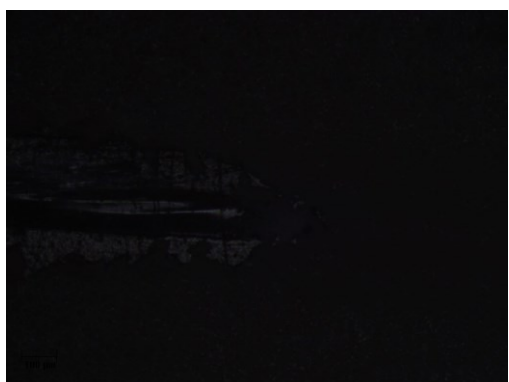


Figura 84 - LC1 (G2 Risco n°2)

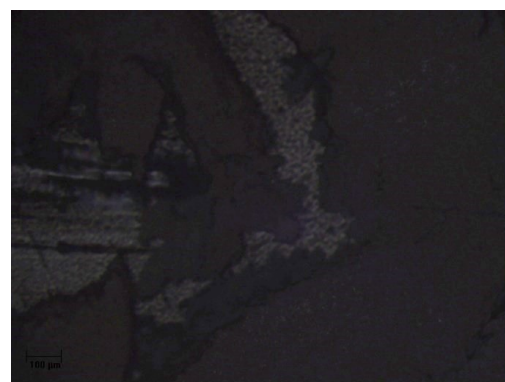


Figura 85 - LC1 (G7 Risco n°1)

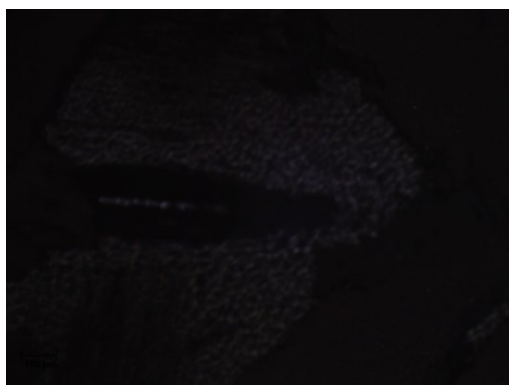


Figura 86 - LC1 (G7 Risco n°2)



Figura 87 - LC1 (G7 Risco n°3)

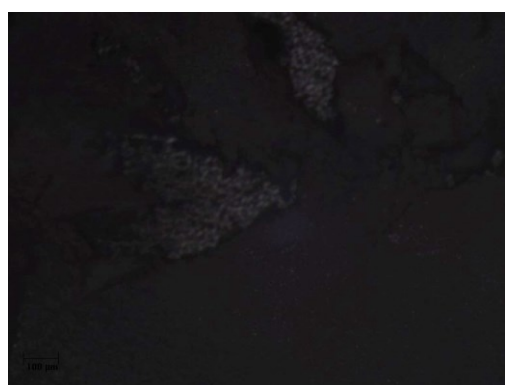


Figura 88 - LC1 (G8 Risco n°1)



Figura 89 - LC1 (G8 Risco n°2)

Nas amostras G1 e G2, as imagens dos riscos são mais claras e precisas devido à quantidade reduzida de material na superfície no substrato. Nas imagens relativas aos riscos nas amostras G7 e G8 apenas são aparentes diferenças de cor e textura na superfície, novamente, devido à maior quantidade de material. Estas imagens são ilustrativas e complementam o teste pois, indicam o local onde inicia o processo de rotura da camada da tinta na região interfacial.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo estudar as variáveis intervenientes nos processos de adesão quando aplicados adesivos estruturais e tintas em substratos compósitos, de forma a contribuir para a redução de perdas de material e custos, permitindo a eficiência da produção de pás eólicas e otimização do desempenho físico-mecânico das mesmas. Do presente estudo foi possível obter as seguintes conclusões.

Foi possível determinar, com o ensaio de caracterização superficial, que o nível de rugosidade de cada superfície preparada influenciou os dados obtidos na medição de ângulo de contacto que quantifica a molhabilidade dos substratos. Adicionalmente, a polaridade dos *peel plies* e das substâncias utilizadas também tem importância pois, em todas as medições, quando utilizado a substância apolar, diiodometano, o valor de ângulo de contacto diminui. A medição de ângulo de contacto da única superfície obtida a partir de um *peel ply* de poliéster foi relativamente baixa, tendo em conta a rugosidade conferida.

Foi determinado que não existe uma correlação direta entre a molhabilidade e a força de adesão com a realização do 1º ensaio de Lap Shear visto que, a superfície Econolease e Econostitch obtiveram valores relativamente similares de força necessária para a rotura de provetes embora, a molhabilidade da superfície Econolease ser definida como baixa com base na medição de ângulo de contacto. Com uma análise de variância foram definidas diferenças significativas entre as superfícies testadas pelo que, a rugosidade influencia, até um determinado ponto, a adesão entre o substrato e o adesivo.

No 2º ensaio de Lap Shear, através da análise de variância, foi concluído que as diferenças de rugosidade conferidas pelos *peel plies* utilizados, bem como a alteração da temperatura do adesivo proveniente da ENERCON, não apresentaram diferenças significativas relativamente à força necessária para a rotura dos provetes.

Com respeito aos resultados obtidos no ensaio de *Scratch* foi possível concluir que a aplicação de várias camadas de tinta melhorou a adesão da mesma ao substrato. As várias camadas formam uma estrutura complexa que é capaz de sustentar valores de força mais elevados. Não foi possível estabelecer uma correlação entre alteração da humidade do substrato e os parâmetros registados.

Em suma, os objetivos do presente estudo foram alcançados pelo que, visto ter sido avaliada, qualitativamente, a influência de diferentes variáveis intervenientes no processo de adesão, tendo sido estabelecida uma base sólida para uma otimização mais estruturada do processo de adesão de pás eólicas

Sugere-se para trabalhos futuros a medição da contração química dos adesivos utilizados, bem como diferentes modos de alteração de superfície como tratamento de plasma ou jateamento abrasivo. Relativamente à medição da força de adesão da tinta sugere-se a realização do ensaio experimental de *Pull-Off*. Pode ainda optar-se por testes de flexão e abrasão.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, e B. F. Sørensen, «Materials for Wind Turbine Blades: An Overview», *Mater. Basel Switz.*, vol. 10, n.º 11, p. 1285, nov. 2017, doi: 10.3390/ma10111285.
- [2] M. O. L. Hansen, «Aerodynamics of wind turbines», em *Aerodynamics of wind turbines*, New York, NY: Routledge, 2015, pp. 2–5.
- [3] R. Away, «Novo recorde no consumo global de energia solar e eólica», 13 de abril de 2023. [ONLINE]. Disponível em: <https://away.iol.pt/renovaveis/recorde/novo-recorde-no-consumo-global-de-energia-solar-e-eolica/20230413/64368ea90cf2665294de9e57>
- [4] W. D. Callister, «Materials Science and Engineering», em *Materials Science and Engineering*, 10.ª ed., New York: Wiley, 2019, pp. 634–680.
- [5] W. Tong, «Wind Power Generation and Wind Turbine Design», em *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press, 2010, pp. 417–423.
- [6] I. Lopes, «Estudo do Processo de Infusão a Vácuo em Materiais Compósitos», Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2009. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58809/1/000136169.pdf>
- [7] J. Xu, «Estudo de compósitos estruturais no processo de produção de pás eólicas», Universidade de Coimbra, Coimbra, 2019.
- [8] R. E. Murray, D. Swan, D. Snowberg, D. Berry, R. Beach, e S. Rooney, «Manufacturing a 9-Meter Thermoplastic Composite Wind Turbine Blade», em *American Society for Composites 2017*, DEStech Publications, Inc., nov. 2017. doi: 10.12783/asc2017/15166.
- [9] «Wind turbine blades: handbook», em *Wind turbine blades: handbook*, S.l.: Kirt x Thomsen, 2019, pp. 10–25.
- [10] C. Ashforth, G. G. Momm, W. Seneviratne, A. Trace, e L. Ilcewicz, «Aerospace structural bonding: Qualification, quality control, substantiation, and risk mitigation», em *Advances in Structural Adhesive Bonding*, Elsevier, 2023, pp. 779–806. doi: 10.1016/B978-0-323-91214-3.00029-6.
- [11] L. F. da Silva, A. Magalhães, e M. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. PUBLINDUSTRIA, 2007.
- [12] E. M. Petrie, *Handbook of adhesives and sealants*, 2. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2007.

- [13] P. Brøndsted, R. P. L. Nijssen, e S. Goutianos, Eds., «Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials», em *Advances in wind turbine blade design and materials*, Second edition., Cambridge, MA: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, 2023, pp. 288-317;417-422.
- [14] W. Abdallah, J. Buckley, e A. Carnegie, «Fundamentals of Wettability».
- [15] H. Butt, K. Graf, e M. Kappl, *Physics and Chemistry of Interfaces*, 1.^a ed. Wiley, 2003. doi: 10.1002/3527602313.
- [16] J. N. Israelachvili, «Intermolecular and Surface Forces», em *Intermolecular and Surface Forces*, Elsevier, 2011, pp. 3–22. doi: 10.1016/B978-0-12-391927-4.10001-5.
- [17] M. Żenkiewicz, «Methods for the calculation of surface free energy of solids», *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 1 de setembro de 2007.
- [18] L. C. R. Carpinetti, E. V. Gonçalves Filho, A. J. V. Porto, e R. G. Jasinevicius, «Rugosidade Superficial: Conceitos e princípios de medição». EESC/USP, 1996. [Em linha]. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/7522>
- [19] ASTM, *Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding*, ASTM D5868-01 (2023) ASTM D5868-01 (2023), 2023.
- [20] P. R. Griffiths, «Fourier Transform Infrared Spectrometry», *Science*, vol. 222, n.º 4621, pp. 297–302, out. 1983, doi: 10.1126/science.6623077.
- [21] J. Eysseltová e R. Bouaziz, «IUPAC-NIST Solubility Data Series. 93. Potassium Sulfate in Water», *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 41, n.º 1, pp. 013103-013103–48, mar. 2012, doi: 10.1063/1.3679678.
- [22] Q. Bénard, M. Fois, e M. Grisel, «Peel ply surface treatment for composite assemblies: Chemistry and morphology effects», *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, n.º 11, pp. 1562–1568, nov. 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.02.012.
- [23] M. Szalóki, Z. Szabó, R. Martos, A. Csik, G. J. Szóllósi, e C. Hegedűs, «The Surface Free Energy of Resin-Based Composite in Context of Wetting Ability of Dental Adhesives», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 21, p. 12061, nov. 2023, doi: 10.3390/app132112061.
- [24] N. Slepickova Kasalkova, P. Slepicka, Z. Kolska, e V. Svorcik, «Wettability and Other Surface Properties of Modified Polymers», em *Wetting and Wettability*, M. Aliofkhazraei, Ed., InTech, 2015. doi: 10.5772/60824.

- [25] «“What is a Contact Angle?”», Brighton Science. Acedido: 17 de novembro de 2023. [ONLINE]. Disponível em: <https://www.brighton-science.com/what-is-contact-angle>
- [26] S. Chang, «Analysis of Polymer Standards by Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Attenuated Total Reflectance and Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectroscopy and the Creation of Searchable Libraries.» 10 de agosto de 2012.
- [27] M. Kanerva e O. Saarela, «The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: A review», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 43, pp. 60–69, jun. 2013, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.01.014.
- [28] L. M. Connely, «Introduction to Analysis of Variance (ANOVA).», vol. 30, May/Jun2021.
- [29] T. K. Kim, «Understanding one-way ANOVA using conceptual figures», *Korean J. Anesthesiol.*, vol. 70, n.º 1, pp. 22–26, fev. 2017, doi: 10.4097/kjae.2017.70.1.22.

ANEXOS

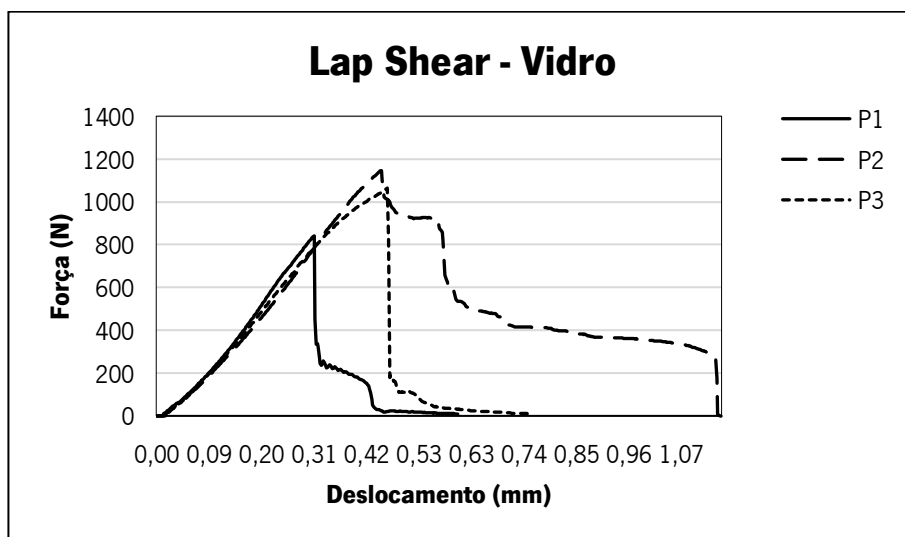
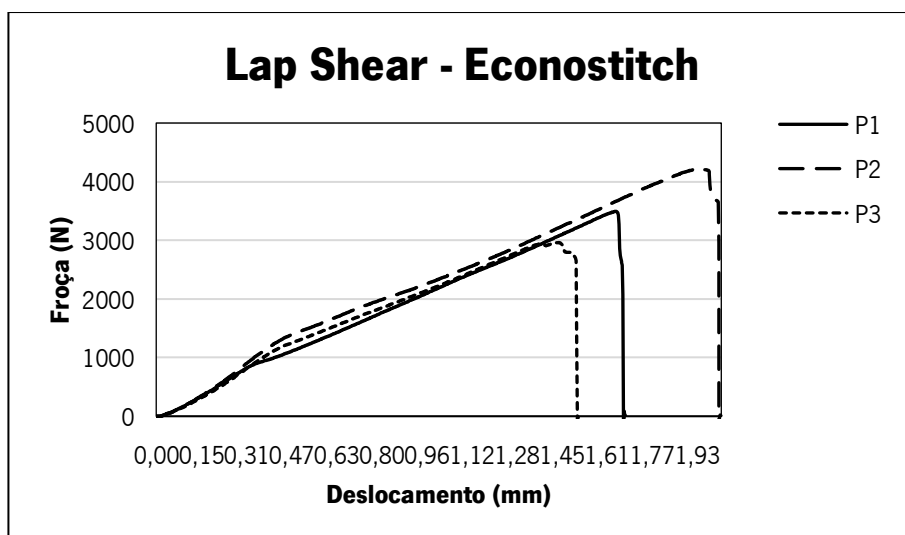
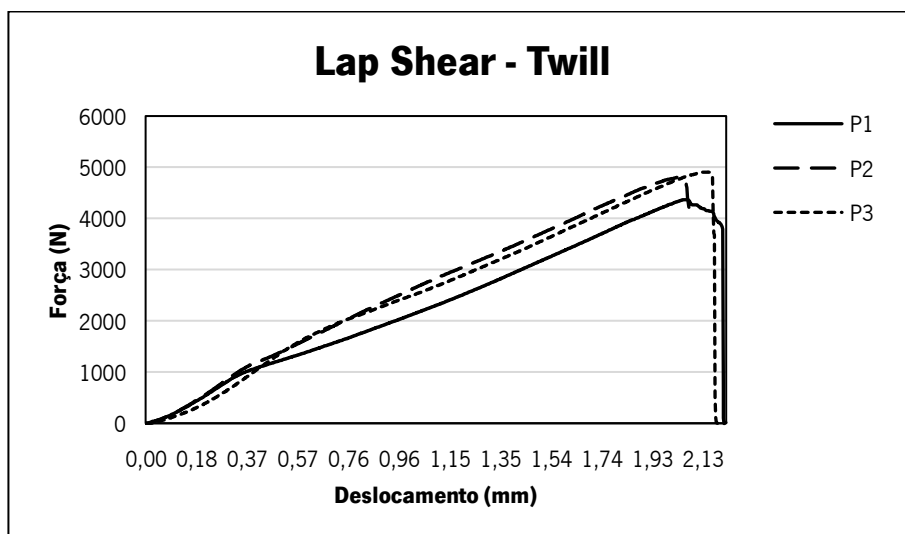
Anexo 1 - Componentes dispersivas e polares do líquidos

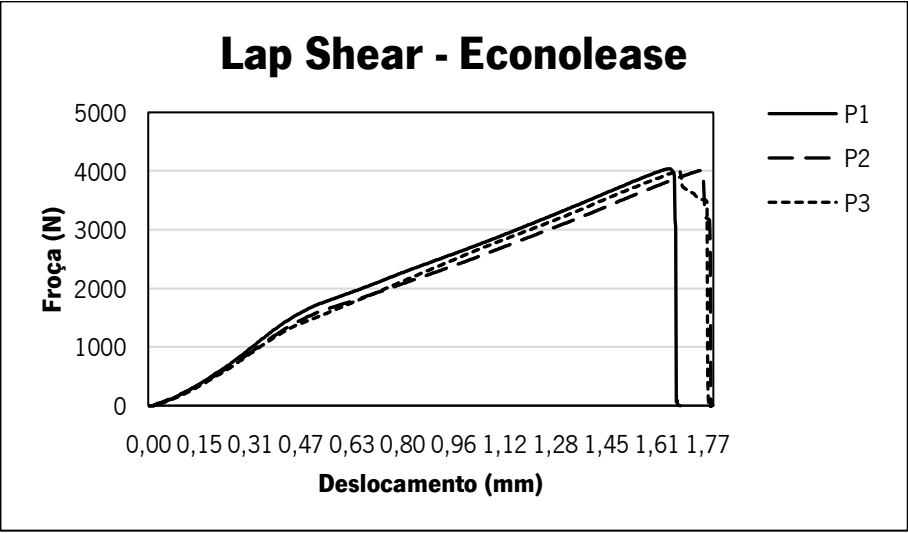
Líquido	γ_l^D [mN/m]	γ_s^P [mN/m]	γ_s [mN/m]
Água	21,9	51	72,8
Diiodometano	50,8	0	50,8

Anexo 2 – Valores de força máxima (*Lap Shear*)

Superfície	Twill	Econolease	Econostitch	Vidro
Força Máxima P1	4370,14	4038,38	3491,16	840,85
Força Máxima P2	4804,59	4009,82	4223,64	1145,49
Força Máxima P3	4907,70	3994,69	2964,70	1064,45

Anexo 3 – Gráficos de *Lap Shear* de cada superfície





Anexo 4 – Gráficos de *Lap Shear* de cada superfície

