

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jorge Filipe da Costa Alves

Otimização do processo de pintura monocura UV com tinta reciclada

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Professor Fernando Moura Duarte
Engenheira Mafalda Costa

outubro 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jorge Filipe da Costa Alves

Otimização do processo de pintura monocura UV com tinta reciclada

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Professor Fernando Moura Duarte
Engenheira Mafalda Costa

outubro 2023

Despacho RT - 31 /2019 - Anexo 3

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.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

[Esta é a mais restritiva das nossas seis licenças principais, só permitindo que outros façam download dos seus trabalhos e os compartilhem desde que lhe sejam atribuídos a si os devidos créditos, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais.]

Agradecimentos

A conclusão de um ciclo acadêmico é um momento de celebração e reflexão, mas também uma oportunidade para expressar gratidão a todos que desempenharam um papel fundamental no nosso crescimento e sucesso ao longo desta jornada. Neste contexto, gostaria de dedicar este espaço para expressar os meus sinceros agradecimentos às pessoas e organizações que foram fundamentais na minha jornada acadêmica e profissional.

Em primeiro lugar, gostaria de manifestar a minha gratidão à Fehst Componentes, onde tive o privilégio de realizar o meu estágio curricular. Agradeço a toda a equipa da Fehst pelo acolhimento, orientação e pela oportunidade de crescimento profissional que me proporcionaram.

Ao meu orientador, Professor Fernando Duarte, cuja orientação foi crucial para o desenvolvimento da minha investigação. O seu apoio e disponibilidade foram fundamentais para o sucesso deste projeto.

À minha orientadora da Fehst, Engenheira Mafalda Costa, quero expressar a minha profunda gratidão. A sua experiência, paciência e apoio foram inestimáveis durante o meu estágio. As suas orientações moldaram a minha compreensão do campo profissional e contribuíram de forma significativa para o meu crescimento enquanto engenheiro.

Não posso deixar de mencionar os meus colegas de estágio, Lucas, José, Maria, Águeda e Sara, por todos os momentos partilhados e pela troca de conhecimento.

Aos meus amigos Nandos, que me acompanharam nestes cinco anos, por todos os momentos inesquecíveis e pelo incentivo nos momentos menos bons. Sem vocês, teria sido certamente bem mais difícil.

Ao Engenheiro Miguel Gomes e ao Doutor João Brandão Coelho, que partilharam o seu conhecimento e experiência comigo, agradeço por serem uma fonte constante de inspiração e aprendizagem.

À minha namorada, Mariana, um agradecimento especial por todo o carinho, compreensão e apoio. Sou eternamente grato por te ter ao meu lado.

Por fim, mas não menos importante, quero expressar a minha gratidão aos meus pais e à minha família. O vosso amor, apoio incondicional e sacrifícios ao longo dos anos foram os pilares da minha jornada. Vocês são a minha inspiração e o meu maior orgulho.

A todos, o meu sincero obrigado!

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 em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Na Fehst Componentes, para além da cura térmica, também é utilizada a cura por radiação UV (ultravioleta) no processo de pintura das peças injetadas. Esta tecnologia consiste na conversão do filme de tinta do estado líquido para o estado sólido quando submetido a radiação ultravioleta. As principais vantagens da cura UV em relação às técnicas de cura convencionais incluem baixas emissões de compostos orgânicos voláteis (*VOC's*), menor tempo de cura, menor consumo de energia e uma elevada resistência dos filmes.

A aplicação de tinta por pulverização (*spray*) apresenta uma taxa de transferência de cerca de 65% da tinta para a superfície da peça, o que significa que os restantes 35% da tinta, tipicamente denominado como *overspray*, ficam retidos nas paredes e na tina de retenção da cabine de pintura. Isto constitui um problema para a empresa, com implicações económicas e ambientais. No entanto, no caso da tinta UV, esta só cura (formação da película sólida) quando exposta à radiação ultravioleta, o que significa que a tinta permanece líquida mesmo após a pulverização, podendo ser facilmente recolhida.

O objetivo principal deste trabalho foi validar a viabilidade de reincorporar a tinta no sistema de pintura numa peça de produção em série, por meio de testes de *cross-cut*, resistência ao risco, estabilidade térmica, resistência a ciclo ambiental, hidrólise, resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão, gota e resistência a cremes, seguindo as normas do fabricante original (OEM). Para alcançar este objetivo, foi selecionada a melhor concentração de tinta recolhida, tinta virgem e diluente tendo em conta aspetos económicos e ambientais. Foi também necessário o ajuste das variáveis operatórias do processo de pintura até à obtenção do acabamento superficial desejado. As formulações selecionadas nos estudos preliminares foram reintegradas com êxito no sistema de pintura e aplicadas numa peça de produção em série, sem que tenha ocorrido a degradação das propriedades da tinta virgem. No entanto, é necessário a realização de um estudo com a utilização de malhas com diferentes micragens no processo de filtração da tinta, uma vez que a percentagem de refugo por inclusões não foi viável para aplicação em produção normal.

Palavras-chave: *pintura, cura UV, overspray, tinta reciclada*

Abstract

At Fehst Components, in addition to thermal curing, UV (ultraviolet) curing is also used in the painting process of injected parts. This technology consists of converting the paint film from a liquid state to a solid state when subjected to ultraviolet radiation. The main advantages of UV curing over conventional curing techniques include low emissions of volatile organic compounds (VOCs), shorter curing time, lower energy consumption and high film strength.

Spray paint has a transfer rate of about 65% of the paint to the surface of the part, which means that the remaining 35% of the paint, typically referred to as *overspray*, is retained on the walls and in the spray booth retention vat. This is a problem for the company, with economic and environmental implications. However, in the case of UV ink, it only cures (solid film formation) when exposed to ultraviolet radiation, which means that the paint remains liquid even after spraying and can be easily collected.

The main objective of this work was to validate the feasibility of reincorporating the paint in the paint system in a series production part, through *cross-cut* tests, scratch resistance, thermal stability, resistance to environmental cycle, hydrolysis, chemical resistance and behavior in exposure to abrasion, drop and cream resistance, following the standards of the original manufacturer (OEM). To achieve this goal, the best concentration of collected paint, virgin ink and thinner was selected, taking into account economic and environmental aspects. It was also necessary to adjust the operative variables of the painting process until the desired surface finish was obtained. The formulations selected in the preliminary studies were successfully reintegrated into the painting system and applied to a series production part, without degrading the properties of the virgin paint. However, it is necessary to carry out a study with the use of meshes with different microns in the paint filtration process, since the percentage of scrap due to inclusions was not feasible for application in normal production.

Keywords: *painting, UV curing, overspray, recycled paint*

Lista de Abreviaturas e Siglas

OEM – Original Equipment Manufacturer

IATF – International Automotive Task Force

ISO – International Organization for Standardization

UV - Ultraviolet

HVLP – High Volume Low Pressure

VOC's – Volatile Organic Compound

IR - Infrared

TL 226 – Padrão de teste para o efeito de tintas em materiais internos de veículos

PC – Polycarbonate

ABS - Acrylonitrile butadiene styrene

TGR – Taxa de Gestão de Resíduos

NOK – Não OK

Índice

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Apresentação da empresa	1
1.2. Enquadramento e Motivação.....	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Metodologia.....	4
Capítulo 2 – Estado de Arte.....	7
2.1. Tinta	7
2.2. Vantagens do processo de pintura monocura UV.....	9
2.3. Etapas do processo de pintura.....	10
2.3.1. Carga e descarga de peças.....	11
2.3.2. Preparação da superfície	11
2.3.3. Cabine de pintura automática	13
2.3.4. <i>Flash-off</i>	15
2.3.5. Unidade de cura UV.....	15
2.3.6. Circuito da tinta	17
2.4. Variáveis/parâmetros operatórios do processo de pintura	18
2.5. Desempenho do filme.....	24
2.5.1. Espessura	24
2.5.2. Adesão	25
2.5.3. Dureza	26
2.5.4. Durabilidade	26
Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme	28
3.1. Medição de espessura	28
3.2. <i>Cross-cut</i>	29
3.3. Resistência ao risco: Caneta <i>Erichsen</i>	29
3.4. Teste de hidrólise	30
3.5. Estabilidade térmica e resistência a ciclo ambiental.....	31

3.6. Resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão.....	31
3.7. Teste da gota.....	33
3.8. Resistência a cremes.....	34
Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura	35
4.1. Recolha, filtração e caracterização da tinta	35
4.2. Preparação e otimização da tinta	37
4.3. Pintura das amostras de ensaio.....	38
4.4. Análise e discussão de resultados.....	39
4.4.1. Medidor de espessura.....	40
4.4.2. <i>Cross-cut</i>	41
4.4.3. Resistência ao risco	43
4.4.4. Hidrólise.....	44
4.4.5. Inspeção visual.....	47
4.5. Seleção das amostras.....	48
Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada	51
5.1. Peça selecionada e defeitos característicos.....	51
5.2. Caracterização das misturas e pintura das peças em série	53
5.3. Ajuste das variáveis operatórias	55
5.4. Avaliação do consumo e refugo da tinta	57
5.5. Resultados dos testes de caracterização.....	58
5.5.1. Medição de espessura	59
5.5.2. <i>Cross-cut</i>	60
5.5.3. Resistência ao risco	61
5.5.4. Hidrólise.....	61
5.5.5 Estabilidade térmica	63
5.5.6. Resistência a ciclo ambiental	64
5.5.7. Resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão.....	66
5.5.8. Teste da gota.....	67

5.5.9. Resistência a cremes.....	68
Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros	71
Referências bibliográficas	74
Anexos.....	77
Anexo 1 – Layout da linha de pintura monocura UV <i>SPRIMAG</i>	77
Anexo 2 - Aspirador industrial KARCHER IVS 100/75 M Z22	77
Anexo 3 – Instrução de trabalho para medição de viscosidade da tinta	78
Anexo 4 – Malha filtrante	79
Anexo 5 – Contaminações depositadas nos filtros	79
Anexo 6 – Instrução de Trabalho de utilização do aparelho de medição de espessura	80
Anexo 7 – Instrução de trabalho do teste de aderência.....	81

Índice de Figuras

Figura 1. Instalação da empresa Fehst Componentes, Lda [1].....	2
Figura 2. Modelo atual de economia linear e modelo pretendido de economia circular	3
Figura 3. Fluxograma de atividades.....	5
Figura 4. Formação de radicais livres [8]	8
Figura 5. Formação do radical iniciador da cadeia [8]	8
Figura 6. Adição sucessiva dos monómeros [8].....	8
Figura 7. Reações bimoleculares entre radicais [8].....	8
Figura 8. Formação de um radical peróxido não reativo [12]	9
Figura 9. Esquema ilustrativo do processo de linha utilizado para a aplicação da tecnologia de cura UV e cura térmica (adaptado de [14]).....	10
Figura 10. Etapas do processo de pintura monocura UV da <i>SPRIMAG</i>	11
Figura 11. Método de limpeza de superfície por jato de CO ₂ (adaptado de [17])	12
Figura 12. Funcionamento de um espalhador (a) <i>DeVILBISS GTI PRO High Efficiency TE40</i> (adaptado de [22]), (b) Esquema da secção transversal (adaptado de [23])	13
Figura 13. Esquema ilustrativo do funcionamento de uma agulha na pistola de pulverização [20]	14
Figura 14. Eficiência de transferência dos diferentes métodos de aplicação de tinta (adaptado de [23])	15
Figura 15. Espectro eletromagnético (adaptado de [29])	16
Figura 16. Profundidade de penetração dos raios UVC, UVB, UVA e UVV (adaptado de [29]).....	16
Figura 17. Esquema ilustrativo e respetivos componentes do sistema de circulação de tinta da <i>SPRIMAG</i> (adaptado de [19])	17
Figura 18. Eficiência de remoção ao longo do tempo para diferentes valores de pressão (adaptado de [31])	18
Figura 19. Efeito da atomização no tamanho das partículas de tinta (adaptado de [33]).....	20
Figura 20. Efeito dos 5 fatores mais significativos na espessura do filme de tinta (adaptado de [34]) .	20
Figura 21. Influência do ângulo da pistola de pulverização na espessura do filme de tinta.....	22
Figura 22. Peça selecionada para o estudo em questão	22
Figura 23. Variação da eficiência de transferência em função da distância da pistola à peça [31]	23
Figura 24. Método de corrente parasita sensível à amplitude (adaptado de [38])	25
Figura 25. Imagem de referência do teste <i>cross-cut</i> (adaptado de [39])	26
Figura 26. Medição da espessura do filme da chapa metálica com o <i>Elcometer</i>	28

Figura 27. Equipamento utilizado no teste de <i>cross-cut</i>	29
Figura 28. Caneta <i>Erichsen elcometer 3092 sclerometer hardness tester</i>	30
Figura 29. Camara climática <i>aralab</i>	30
Figura 30. Equipamento utilizado no teste de abrasão - <i>Crockmeter</i>	32
Figura 31. Referência de avaliação do teste de abrasão numa placa de amostra pintada	32
Figura 32. Aplicação do líquido na superfície da peça	33
Figura 33. Aplicação do creme na superfície da peça	34
Figura 34. Fluxograma de atividades dos estudos preliminares.....	35
Figura 35. Recolha do <i>overspray</i> depositado na tina de retenção da cabine de pintura.....	36
Figura 36. Processo de filtração das tintas	36
Figura 37. Cronómetro e copo metálico de 4 mm	37
Figura 38. Disposição das peças de ensaio no tabuleiro	39
Figura 39. Relação entre a espessura do filme e o tempo de escoamento das 5 misturas.....	41
Figura 40. Fluxograma de atividades da aferição em série.....	51
Figura 41. Peça <i>Deckel 8"</i> e tablier do modelo <i>Volkswagen T-Roc</i>	52
Figura 42. Principais dimensões da <i>Deckel 8"</i>	52
Figura 43. Refugo da <i>Deckel 8"</i> no período de 6 meses em 2022	53
Figura 44. Disposição das peças <i>Deckel 8"</i> no tabuleiro.....	55
Figura 45. Quantidade de defeitos da produção com a condição A90 e B90	58
Figura 47. Quantidade de defeitos da produção com a condição A60 E B60.....	58
Figura 49. Relação entre a espessura do filme e o tempo de escoamento das misturas A60 e B60 ...	59

Índice de Tabelas

Tabela 1. Percentagem dos componentes das 5 formulações e respetivo tempo de escoamento	38
Tabela 2. Variáveis operatórias significativas no acabamento superficial e respetivos valores	39
Tabela 3. Espessura medida nas 5 amostras com o <i>Elcometer</i> e respetiva média e desvio padrão.....	40
Tabela 4. Resultados do teste <i>cross-cut</i> para os 5 ensaios.....	42
Tabela 5. Resultados do teste de resistência ao risco para os 5 ensaios	43
Tabela 6. Resultados do teste <i>cross-cut</i> após hidrólise para os 5 ensaios	45
Tabela 7. Resultados do teste de resistência ao risco após hidrólise para os 5 ensaios	46
Tabela 8. Custo da tinta recolhida, tinta virgem e diluente	48

Tabela 9. Custo total e poupança das 5 condições relativamente à tinta virgem.....	49
Tabela 10. Condições definidas para a validação numa peça de produção em série	49
Tabela 11. Valor da TGR a cobrar desde 2015 até 2025 [43].....	50
Tabela 12. Condições utilizadas no processo de validação da tinta reciclada	53
Tabela 13. Percentagem dos componentes das formulações A e B e respetivo tempo de escoamento	54
Tabela 14. Ajuste das variáveis operatórias do processo de pintura para as condições A60 e A90	55
Tabela 15. Ajuste das variáveis operatórias do processo de pintura para as condições B60 e B90	56
Tabela 16. Espessura medida nas amostras A60 e B60 com o <i>Elcometer</i> e respetiva média e desvio padrão	59
Tabela 17. Resultados do teste <i>cross-cut</i> para os ensaios A60 e B60	60
Tabela 18. Resultados do teste de resistência ao risco para os ensaios A60 e B60	61
Tabela 19. Resultados do teste <i>cross-cut</i> após hidrólise para os ensaios A60 e B60	62
Tabela 20. Resultados do teste de resistência ao risco após hidrólise para os ensaios A60 e B60	62
Tabela 21. Resultados do teste de <i>cross-cut</i> após estabilidade térmica para os ensaios A60 e B60....	63
Tabela 22. Resultados do teste de resistência ao risco após estabilidade térmica para os ensaios A60 e B60.....	64
Tabela 23. Resultados do teste de <i>cross-cut</i> após resistência a ciclo ambiental para os ensaios A60 e B60.....	65
Tabela 24. Resultados do teste de resistência ao risco após resistência a ciclo ambiental para os ensaios A60 e B60	66
Tabela 25. Resultados do teste de resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão para os ensaios A60 e B60.....	67
Tabela 26. Resultados do teste da gota para os ensaios A60 e B60	67
Tabela 27. Resultados do teste <i>cross-cut</i> após resistência a cremes para os ensaios A60 e B60.....	68
Tabela 28. Resultados do teste de resistência ao risco após resistência a cremes para os ensaios A60 e B60.....	69

Capítulo 1 – Introdução

O presente capítulo tem como propósito introduzir o contexto em que o projeto de mestrado foi desenvolvido. Inicialmente, será apresentada a empresa em que o trabalho foi realizado, abordando um pouco da sua história e área de atuação na indústria. Em seguida, será elaborada uma breve contextualização do tema abordado, destacando a sua importância e relevância no âmbito académico e profissional. Será também discutida a motivação que levou à escolha do tema e os objetivos a serem alcançados. Por fim, será descrita a metodologia adotada na pesquisa, evidenciando a abordagem teórica e empírica utilizada para recolher e analisar dados, e a estrutura da dissertação.

1.1. Apresentação da empresa

A presente dissertação de mestrado foi realizada na Fehst Componentes, uma empresa sediada em Braga, dedicada à produção de peças plásticas decorativas para o interior de automóveis. Fundada em 1995, a empresa tem crescido ao longo dos anos, tornando-se uma referência nesta indústria em Portugal, exportando 95% da sua produção para outros países da Europa e tendo como principais OEMs a Audi, Volkswagen, Mercedes-Benz, SEAT, Renault e Stellantis. Tem como foco a melhoria contínua, cumprindo as normas e requisitos da indústria automóvel, sendo detentora dos certificados IATF 16949, ISO 9001 e ISO 14001. Com uma grande preocupação em inovar e melhorar os seus processos de produção, em 2008 a Fehst incorporou a pintura de alto brilho e em 2013 implementou uma linha de montagem automática, assim como a injeção tri-material. Em 2014, adicionaram uma linha de pintura com cura ultravioleta, e em 2016, lançaram uma linha de cromagem seletiva para acabamento de peças plásticas. A empresa oferece uma solução completa aos seus clientes, incluindo o desenvolvimento de produtos, gestão de projetos, garantia da qualidade e entrega. O seu principal objetivo é ser reconhecido como um dos melhores parceiros no fornecimento de peças termoplásticas, sempre com o compromisso de uma oferta de produtos de qualidade, assim como um aconselhamento para soluções criativas [1].

Capítulo 1 – Introdução



Figura 1. Instalação da empresa Fehst Componentes, Lda [1]

1.2. Enquadramento e Motivação

A tecnologia de cura por radiação UV tem registado um aumento significativo na produção de monómeros e resinas na indústria. Esta tecnologia utiliza lâmpadas de radiação UV para iniciar reações químicas em materiais orgânicos, resultando na formação de materiais poliméricos reticulados. É amplamente utilizada na indústria de acabamentos de madeira e tem vindo a expandir-se para outras áreas, incluindo o tratamento de superfície em plásticos, metais, fios, tubos, pavimentos de vinil, revestimento de fibras óticas, adesivos, produtos dentários e compósitos [2]. A evolução desta tecnologia, tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico, oferece diversas vantagens em relação ao processo de cura térmica. Destacam-se, entre elas, uma cura mais rápida, menor consumo de energia, baixas emissões de compostos orgânicos voláteis, custos reduzidos e uma elevada resistência dos filmes de tinta. A principal limitação desta tecnologia está relacionada com a cura de filmes espessos e peças com geometrias complexas, assim como o uso de tintas com determinadas cores ou com pigmentação elevada [3][4].

A Fehst Componentes ambiciona implementar práticas de produção e encontrar formas de eliminar os resíduos perigosos inerentes ao processo. Indesejavelmente, ainda é praticado um modelo de economia linear no que toca ao fim de vida dos resíduos de tinta. Esta abordagem resulta numa quantidade significativa de resíduos, causando não só desperdício de recursos naturais, mas também perdas financeiras. No caso da tinta UV, uma vez que a cura ocorre apenas quando exposta à radiação ultravioleta, esta permanece líquida após a pulverização. Assim, a principal motivação da presente

Capítulo 1 – Introdução

dissertação passa por avaliar o potencial de reaproveitamento do desperdício de tinta gerado no processo de pintura, de forma a integrar um modelo de economia circular no ciclo de vida das tintas, como ilustrado na Figura 2.

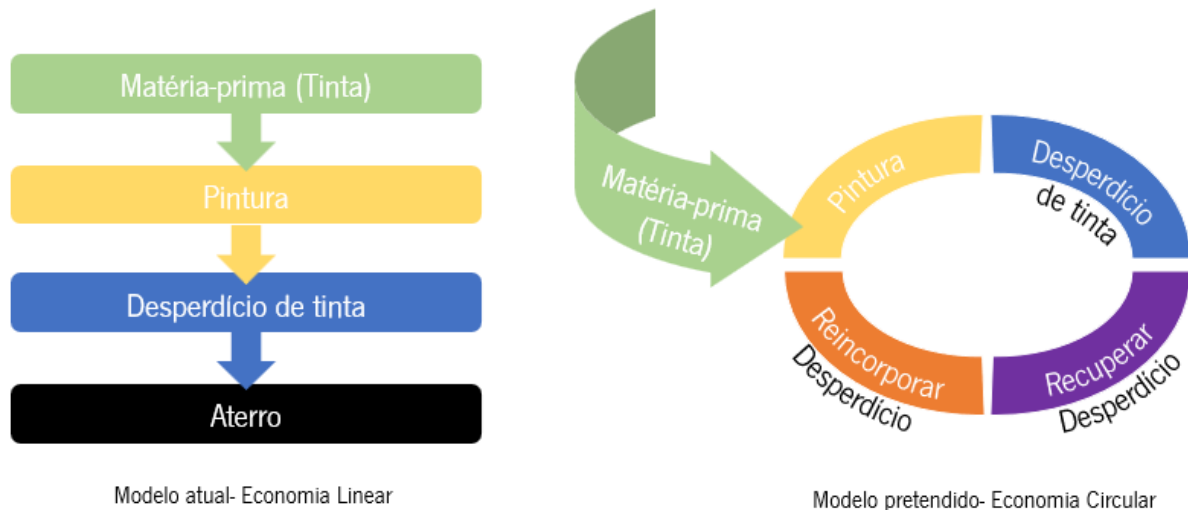


Figura 2. Modelo atual de economia linear e modelo pretendido de economia circular

1.3. Objetivos

Este estudo tem como principal objetivo estudar e otimizar o processo de pintura de uma peça de produção em série, utilizando tinta proveniente do *overspray* gerado na etapa de pintura, isto é, tinta recolhida. Para o efeito, serão avaliadas variáveis de mistura, como a percentagem de diluente e/ou tinta virgem a adicionar ao desperdício com o objetivo de obter uma tinta reciclada que possa ser reintegrada no sistema de pintura, sem a degradação das propriedades da tinta virgem que garantem o cumprimento dos requisitos de qualidade definidos pelo cliente. Outro objetivo passa por ajustar as variáveis operatórias inerentes do processo de pintura, de forma a obter o acabamento superficial desejado e, assim, viabilizar a validação da tinta reciclada na peça selecionada. Este projeto resume-se em três pontos principais:

- Seleção da concentração de tinta recolhida, tinta virgem e diluente, com base nos resultados mais promissores obtidos nos testes de caracterização do filme;
- Otimização das variáveis operatórias do processo de pintura;
- Validação do processo numa peça de produção em série da empresa.

Capítulo 1 – Introdução

1.4. Metodologia

De modo a atingir os objetivos estabelecidos, a tinta depositada na tina de retenção após a pulverização será recolhida com o auxílio de um aspirador industrial, uma vez que ainda não ocorreu a cura. Numa primeira fase, cada amostra será filtrada com uma malha filtrante de forma a eliminar impurezas provenientes da tina de retenção. Para além disso é necessário medir o tempo de escoamento da tinta recolhida, medida indireta da viscosidade.

Sabe-se que a tinta proveniente do *overspray* apresenta valores de viscosidade extremamente elevados. Desta forma, serão preparadas várias amostras com diferentes percentagens de tinta recolhida, diluente e/ou tinta virgem, tendo em consideração aspetos económicos e ambientais. Nesta fase, todas as misturas serão reincorporadas no sistema de pintura e aplicadas em placas de PC/ABS injetadas nas instalações da Fehst Componentes, com as variáveis operatórias definidas. Assim que o filme se encontre totalmente curado, serão realizados os principais testes de caracterização do filme de tinta, nomeadamente: medição de espessura, *cross-cut*, hidrólise e resistência ao risco. Além disso, será realizada uma inspeção visual para identificar possíveis não conformidades. Com base nos resultados obtidos, selecionam-se as amostras com as melhores propriedades, para posteriormente serem validadas. Será selecionada uma peça de produção em série da empresa para ser pintada com as amostras de tinta e as variáveis operatórias previamente definidas. Prevê-se que posteriormente seja necessário afinar o processo de pintura, de forma a obter um acabamento superficial adequado. Para tal, as variáveis operatórias com influência na qualidade final do produto serão ajustadas de modo a obter um filme de tinta que cumpra todos os requisitos exigidos. Durante a produção, serão também avaliados o refugo e o consumo das misturas selecionadas. Por fim, os testes de caracterização do filme de tinta serão realizados de acordo com a norma estabelecida a fim de validar o processo de pintura com tinta reciclada. A Figura 3 mostra o fluxograma de atividades que serão realizadas ao longo do projeto e que foram previamente explicadas.

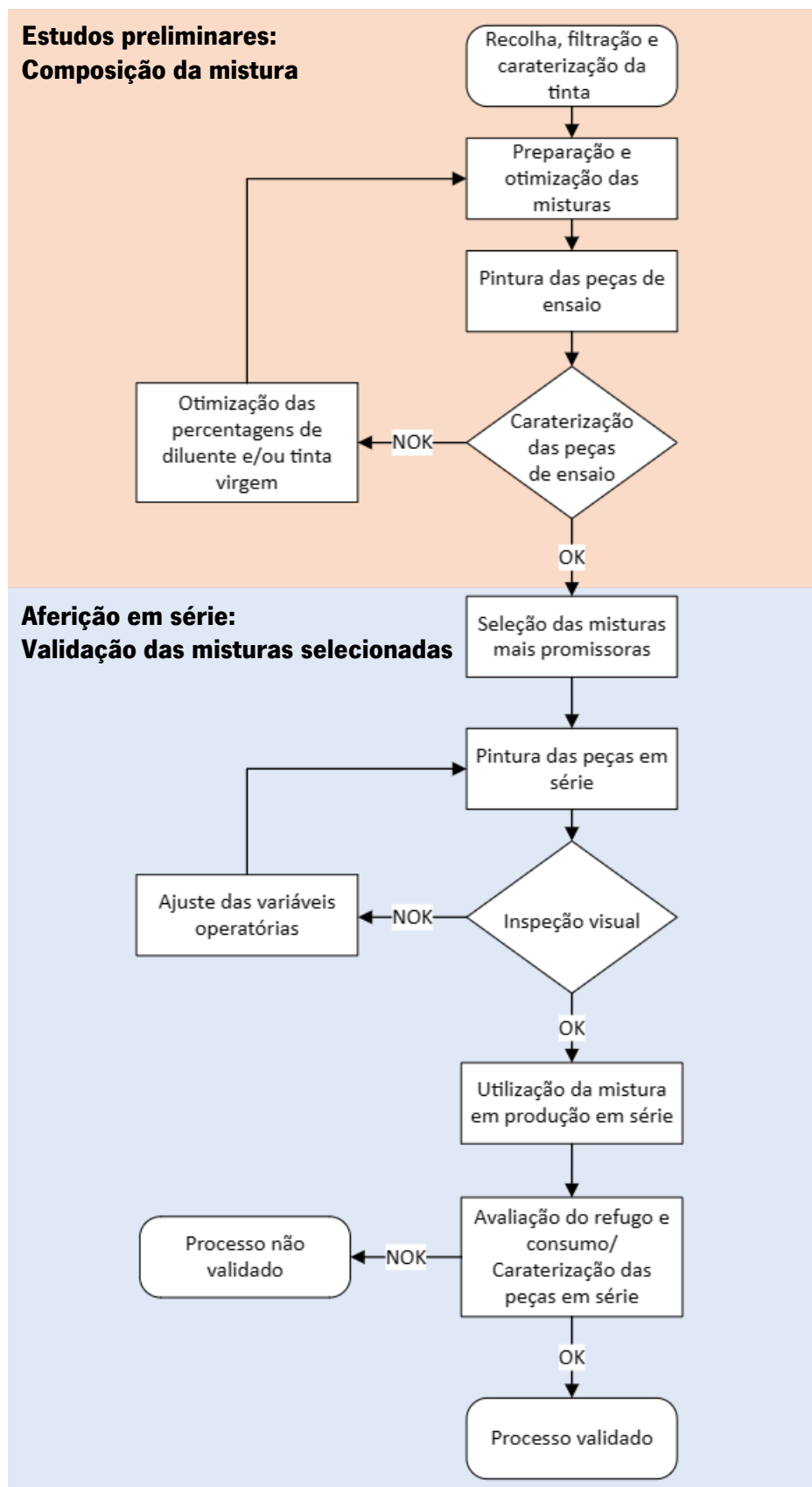


Figura 3. Fluxograma de atividades

Capítulo 1 – Introdução

1.5. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 etapas:

O Capítulo 1, intitulado “Introdução”, tem como objetivo contextualizar o tema abordado, assim como apresentar a empresa, a motivação que deu origem a este estudo, os objetivos a serem alcançados e a metodologia adotada. No Capítulo 2, denominado “Estado de Arte”, é apresentada uma análise abrangente do conhecimento atualmente disponível na área de estudo abordada nesta dissertação. No capítulo 3, “Técnicas de caracterização do filme”, foram descritos os procedimentos realizados em cada teste de caracterização da norma TL 226, nos capítulos 4 e 5 da presente dissertação. O Capítulo 4, “Estudos preliminares: Composição da mistura”, tem como objetivo otimizar a proporção de diluente e/ou tinta virgem adicionada à tinta recolhida, tendo em conta os aspetos ambientais, económicos e requisitos do cliente. O Capítulo 5, intitulado “Aferição em série: Validação da mistura selecionada” tem como foco a validação do processo de pintura com tinta reciclada numa peça de produção em série, através do ajuste das variáveis operatórias com impacto no acabamento superficial e tendo em conta os requisitos do cliente. No Capítulo 6, “Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros”, são expostas as principais conclusões derivadas do trabalho desenvolvido, sugestões de melhoria e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Estado de Arte

Este capítulo apresenta uma revisão do estado de arte relevante na temática abordada nesta dissertação e estabelece o enquadramento necessário para os trabalhos que serão descritos nos capítulos subsequentes. Uma vez que o objetivo deste trabalho é validar a utilização de tinta reciclada na pintura de peça de produção em série, será feita uma contextualização do processo de pintura monocura UV utilizado na Fehst Componentes, assim como uma descrição dos diversos estudos realizados na otimização das variáveis e parâmetros operatórios inerentes. Vale ressaltar que, devido à natureza altamente competitiva e sigilosa da indústria de pintura de peças automóveis, há uma escassez de artigos científicos com aplicação direta ao estudo realizado, sendo que alguns desenvolvimentos não correspondem a estudos publicados.

2.1. Tinta

Na pintura de peças em plástico, a seleção da tinta é um dos pontos com maior relevância, uma vez que, dependendo da sua composição, irá influenciar todo o processo e condicionar o ajuste de parâmetros/variáveis, assim como o desempenho do produto e a sua vida útil [5]. O uso de tintas UV tem crescido significativamente nos últimos anos devido à sua elevada produtividade, baixo impacto ambiental e facilidade de aplicação. Estas tintas consistem tipicamente em oligómeros, monómeros, fotoiniciadores, pigmentos, solvente (ainda que numa percentagem muito reduzida comparativamente às tintas de cura térmica) e uma variedade de aditivos [6][7][8]. Os oligómeros e os monómeros são responsáveis por determinar as propriedades e a aparência do filme. Para além disso, os monómeros também atuam como diluentes reativos para reduzir a viscosidade da tinta. Já os fotoiniciadores têm a função de absorver a radiação UV e dar origem aos radicais livres, responsáveis pelo início da polimerização [7][8][9]. Os pigmentos são um dos componentes mais utilizados nas formulações de tintas, pois conferem cor e opacidade, podendo esconder possíveis defeitos. O solvente, assim como os monómeros, controla a viscosidade e dissolve todos os componentes de forma que a tinta apresente uma massa homogênea. Outros aditivos podem ser adicionados com a finalidade de fornecer propriedades específicas à tinta [10]. Todos estes elementos presentes nas formulações de tintas UV representam um papel crucial na qualidade final do filme de tinta, tanto a um nível estético como funcional.

O processo da solidificação do filme de tinta por radiação ultravioleta ocorre por meio de reações de fotopolimerização radicalar e divide-se em três principais etapas: iniciação, propagação e terminação. A fase de iniciação é dividida em duas partes. Inicialmente, os fotoiniciadores absorvem a luz na gama UV e geram uma grande quantidade de radicais livres.

Capítulo 2 – Estado de Arte

Na segunda parte, ocorre a adição do radical ao primeiro monómero, formando assim o radical iniciador da cadeia. Este processo é descrito pela Figura 4 e Figura 5, em que C corresponde ao fotoiniciador, $h\nu$ à luz na gama UV, R^\bullet ao radical iniciador, M ao monómero e M^\bullet ao radical iniciador da cadeia. O k_d e o k_i representam, respetivamente, a constante de velocidade para a dissociação do fotoiniciador e a constante de velocidade para a etapa de iniciação [8][11][12][13].

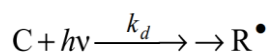


Figura 4. Formação de radicais livres [8]

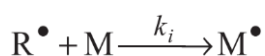


Figura 5. Formação do radical iniciador da cadeia [8]

De seguida, ocorre a etapa de propagação, que consiste no crescimento do radical iniciador da cadeia (M^\bullet) por adição sucessiva de monómeros e oligómeros. Estas adições encontram-se indicadas na Figura 6, em que M_n^\bullet e M_{n+1}^\bullet representam a cadeia polimérica com o radical iniciador com n e n+1 unidades repetitivas, respetivamente, e o k_p a constante de propagação da cadeia [8][11][12][13].

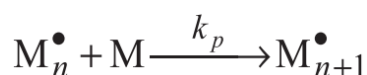


Figura 6. Adição sucessiva dos monómeros [8]

Na etapa de terminação, ocorre a aniquilação dos centros radicais através de uma reação bimolecular entre radicais, impossibilitando assim o crescimento da cadeia. Os radicais podem reagir entre si através dos dois métodos representados na Figura 7, em que M_m^\bullet corresponde a uma cadeia polimérica com o radical iniciador com m unidades repetitivas e k_{tc} e k_{td} são as constantes de velocidade de terminação pelos diferentes métodos [8][11][12][13].

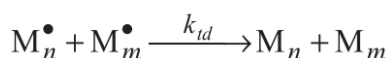
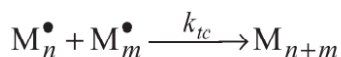


Figura 7. Reações bimoleculares entre radicais [8]

Capítulo 2 – Estado de Arte

A polimerização induzida por luz (fotopolimerização) é afetada pela presença de oxigénio, dado que este pode reagir com os radicais, formando um radical peróxido não reativo, impedindo assim o crescimento da cadeia. Este processo é representado na Figura 8, em que O_2 corresponde a uma molécula de oxigénio e $M_n-OO\cdot$ ao radical peróxido [12].

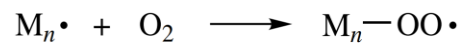


Figura 8. Formação de um radical peróxido não reativo [12]

Com o intuito de minimizar a inibição do oxigénio, o processo de cura pode ocorrer numa atmosfera inerte, constituída maioritariamente por azoto. Desta forma, a quantidade de oxigénio é reduzida, permitindo que a reação de cura ocorra com eficiência [11].

2.2. Vantagens do processo de pintura monocura UV

Devido às suas capacidades de reticulação, os revestimentos curáveis por UV são escolhas naturais para o setor automóvel, sobretudo quando se trata de peças plásticas decorativas do habitáculo. As tecnologias disponíveis variam desde acabamentos transparentes até pigmentados. Esses revestimentos proporcionam uma resistência superior a riscos e abrasão, além de terem a capacidade de resistir ao ataque de produtos químicos, cremes e produtos de limpeza diários. Aliado às vantagens técnicas do revestimento, a técnica de processamento com cura UV possui benefícios significativos em comparação à pintura convencional. Uma das principais vantagens é o tempo de processamento consideravelmente reduzido, o que possibilita um fluxo de produção mais ágil e eficiente. Além disso, estes revestimentos permitem a criação de designs de linha mais compactos, otimizando o espaço utilizado. Num processo típico de aplicação de tinta curável por radiação UV, o tempo necessário é de cerca de 10 a 20 minutos, incluindo as etapas de pulverização do revestimento, *flash-off* e cura por meio de luz ultravioleta. Essa rápida cura permite que o material atinja as propriedades ideais num curto período [14][15][16]. A Figura 9 apresenta um esquema ilustrativo do processo de linha utilizado para a aplicação das duas tecnologias.

Capítulo 2 – Estado de Arte

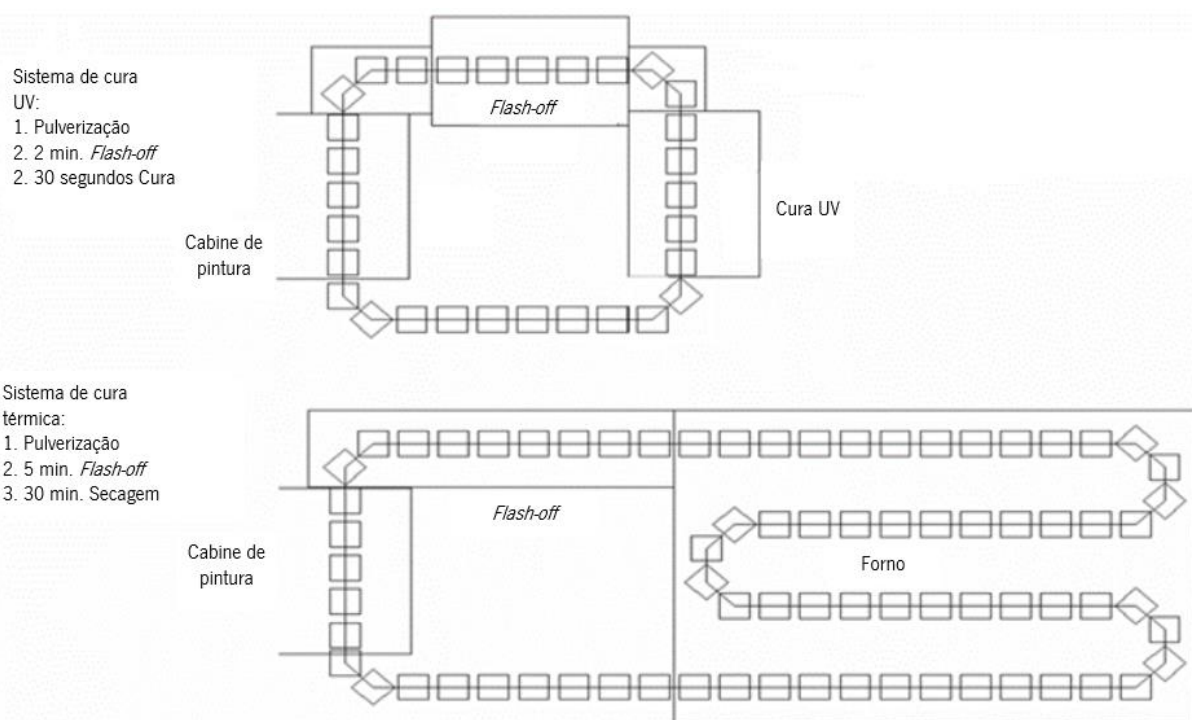


Figura 9. Esquema ilustrativo do processo de linha utilizado para a aplicação da tecnologia de cura UV e cura térmica (adaptado de [14])

2.3. Etapas do processo de pintura

Na Figura 10, é possível observar as diferentes etapas do processo de pintura monocura UV, característico da empresa. Cada divisão foi projetada tendo em conta o tipo, tamanho, geometria e número de peças a serem pintadas, assim como as propriedades da tinta utilizada. O layout da linha de pintura da máquina *SPRIMAG* encontra-se ilustrado no anexo 1. É importante realçar que cada uma destas etapas afeta a qualidade do filme de tinta. Com a matéria-prima, pré-tratamento, equipamento de aplicação e sistema de cura adequados é possível obter o acabamento superficial desejado [5].

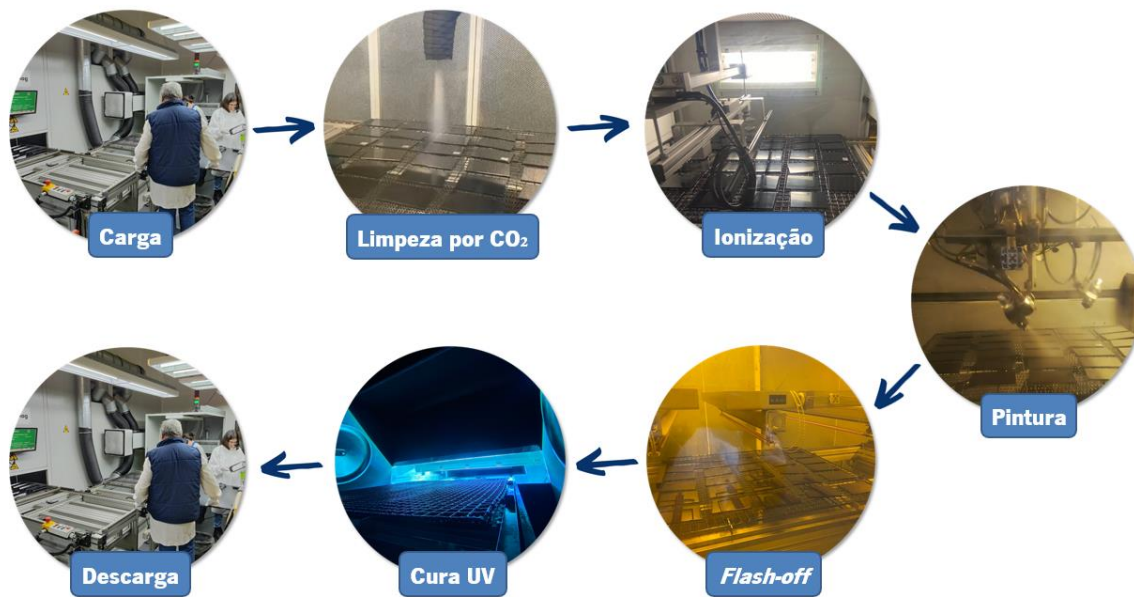


Figura 10. Etapas do processo de pintura monocura UV da *SPRIMAG*

2.3.1. Carga e descarga de peças

A inspeção visual de peças pintadas é um processo crucial na garantia da qualidade do filme de tinta. Normalmente, operam três funcionários neste posto ao mesmo tempo. Enquanto um dos operadores coloca as peças injetadas em tabuleiros específicos antes de entrarem na máquina, os outros dois inspecionam as peças já pintadas de forma a detetar defeitos que não se encontrem dentro dos limites estabelecidos pelo cliente. As peças não conformes são separadas de acordo com o tipo de defeito, podendo este ser classificado como: covas, inclusões, casca de laranja, excesso de tinta, falta de tinta, brilhos, queimados (UV), contaminações e riscos provenientes do processo de injeção e outros.

2.3.2. Preparação da superfície

A limpeza das peças injetadas é uma etapa crucial no processo de pintura, na medida em que a adesão filme/substrato e a aparência final do produto estão diretamente relacionadas com uma limpeza adequada. Antes de ser aplicada a tinta, as peças podem conter uma variedade de contaminações provenientes do seu processamento, armazenamento e manuseamento. A presença destas impurezas pode levar a defeitos no filme de tinta, resultando em custos adicionais para empresa e retrabalho para corrigir tais problemas [5].

Capítulo 2 – Estado de Arte

Unidade de limpeza por CO₂

A limpeza por CO₂ é bastante utilizada na indústria, visto que se trata de um método de limpeza rápido, não abrasivo e que não produz resíduos químicos. Este processo consiste num jato de partículas de CO₂ a uma temperatura negativa (gelo seco), sujeito a uma aceleração elevada, que no impacto com a superfície da peça provoca um choque térmico e consequentemente, faz com que a sujidade contraia e fissure. O ar comprimido remove a sujidade das peças e estas ficam limpas. A Figura 11 ilustra este processo [10][17][18].

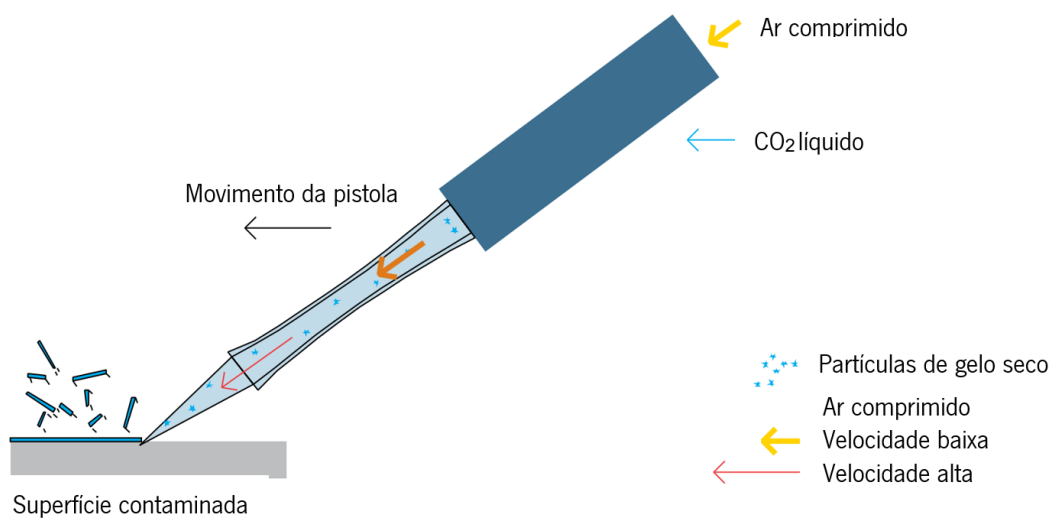


Figura 11. Método de limpeza de superfície por jato de CO₂ (adaptado de [17])

Cabine de limpeza com ar ionizado

Os termoplásticos são caracterizados por apresentarem baixa condutividade elétrica, ou seja, são isolantes elétricos. Com o seu manuseamento, estes acumulam cargas positivas e, consequentemente, atraem cargas negativas, como pó e sujidade. De forma a eliminar estas cargas, é necessário descarregar as peças através de um sopro de ar ionizante. Neste processo de preparação de superfície, o equipamento de pintura possui um ionizador anterior à unidade de limpeza por CO₂, garantindo maior eficácia. Como o CO₂ acrescenta carga estática às peças, estas ainda passam por outra cabine de ionização com a finalidade de eliminar a eletricidade estática presente. É importante que o intervalo entre este processo e a pintura não seja muito longo, para evitar que as partículas voltem a acumular sujidade [10][19].

Capítulo 2 – Estado de Arte

2.3.3. Cabine de pintura automática

Após os métodos de preparação e limpeza de superfície, a peça avança para a cabine de pintura. Na Fehst Componentes, utiliza-se o método de pintura por *spray HVLP*, sigla para *High Volume Low Pressure*. Nesta etapa, a tinta no estado líquido é transformada em pequenas partículas através da pressão do ar gerada por uma pistola de pulverização - atomização pneumática [20][21]. Esta cabine é composta por duas pistolas de pulverização automáticas com ângulo ajustável, movidas com o auxílio de um braço mecânico com movimentação de um eixo. O uso de equipamentos automáticos resulta numa produção em maior volume, mais consistente e com custos inferiores devido à redução do consumo da matéria-prima, assim como da mão de obra [5]. As pistolas de pulverização contêm um espalhador com diversos orifícios onde passa tinta e ar comprimido. A Figura 12 mostra o funcionamento de um espalhador, assim como o modelo utilizado pela empresa na pintura monocura UV.

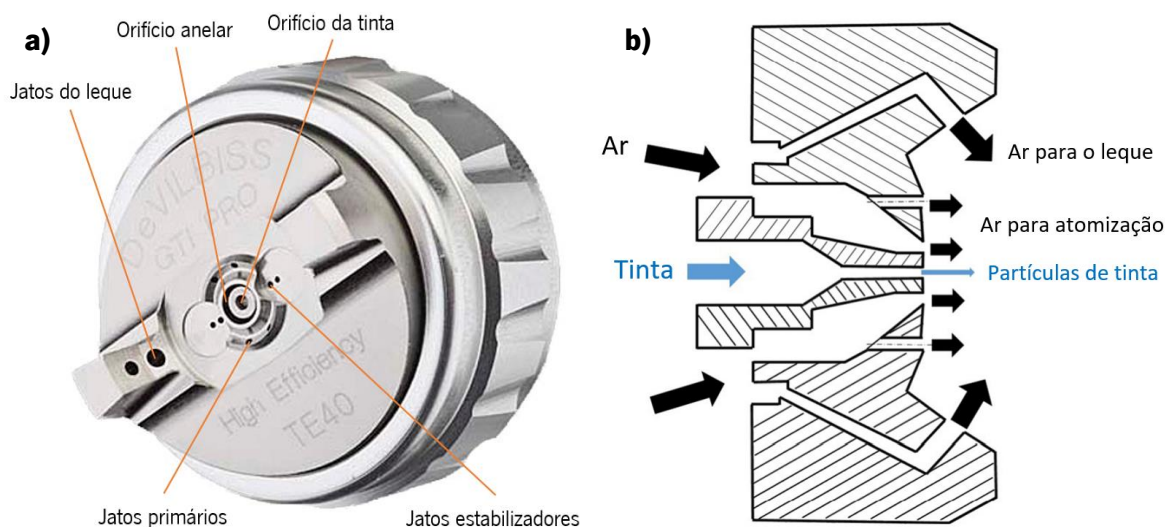


Figura 12. Funcionamento de um espalhador (a) *DeVILBISS GTI PRO High Efficiency TE40* (adaptado de [22]), (b) Esquema da secção transversal (adaptado de [23])

O diâmetro do orifício central está diretamente relacionado com o caudal da tinta, uma vez que, para um diâmetro maior do mesmo, maior o caudal do fluido. O orifício anelar do espalhador tem como função atomizar a tinta que sai pelo orifício central e transportar as partículas para a superfície da peça. Os jatos primários também participam na atomização da tinta e mantêm a superfície do espalhador limpa. Os jatos do leque conferem ao *spray* a sua forma elíptica característica. Por último, os jatos estabilizadores controlam a velocidade de expansão do *spray* e mantêm a superfície dos jatos do leque limpa [24][25]. As pistolas de pulverização também possuem uma agulha que permite o controlo do caudal da tinta, representada na Figura 13.

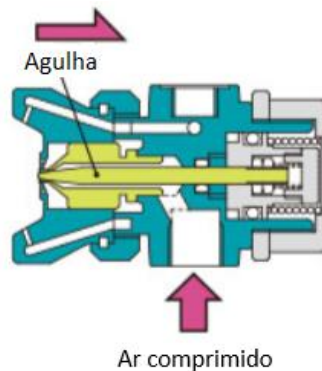


Figura 13. Esquema ilustrativo do funcionamento de uma agulha na pistola de pulverização [20]

Quando a pressão de ar é aplicada, a agulha retrai permitindo a passagem da tinta pelo orifício central. Assim que deixa de ser aplicada pressão a mesma contrai e bloqueia a passagem do fluido [26]. A relação entre a quantidade de tinta depositada nas peças e a quantidade que é expelida pelas pistolas de pulverização representa a eficiência de transferência da tinta [26]. Uma eficiência de transferência elevada reduz o custo da matéria-prima, o descarte de resíduos, as emissões de compostos orgânicos voláteis (*VOC's*), a necessidade de manutenção da cabine de pintura e a substituição dos filtros. As partículas de tinta que não são depositadas nas peças ficam retidas nas paredes e na tina de retenção da cabine de pintura. Este fenómeno designa-se por *overspray* e pode ocorrer devido a diversos fatores como a geometria, composição e posição da peça, variáveis/parâmetros operatórios, humidade, temperatura do ar, tecnologia de atomização e propriedades da tinta [23].

A Figura 14 representa a percentagem de eficiência de transferência da tinta nos diferentes métodos de pulverização. É possível observar que, nos métodos de pulverização convencionais, apenas uma pequena percentagem das partículas de tinta é depositada na superfície das peças, ao contrário do método *HVLP*, que apresenta uma eficiência de transferência da tinta de cerca de 65-80%. A principal diferença entre as pistolas de pintura por *spray* com ar convencional e as *HVLP* (*High Volume Low Pressure*) é que as últimas, como o nome indica, utilizam um elevado volume de ar para atomizar a tinta a pressões baixas, produzindo assim partículas de maior tamanho, resultando numa maior transferência de tinta para a peça [27].

Capítulo 2 – Estado de Arte

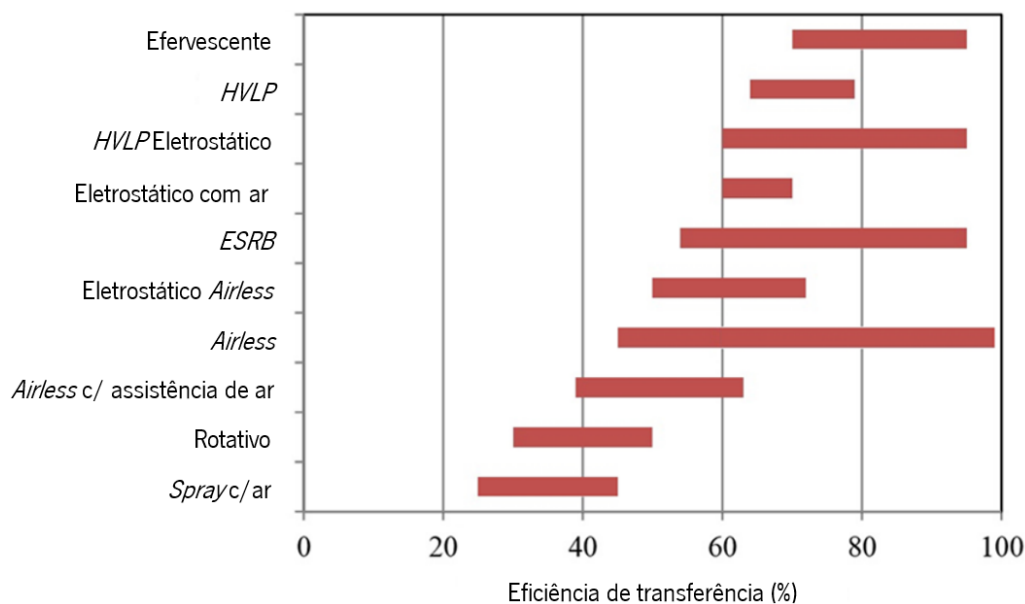


Figura 14. Eficiência de transferência dos diferentes métodos de aplicação de tinta (adaptado de [23])

2.3.4. Flash-off

Posteriormente à pintura das peças, é necessária uma unidade de *flash-off* de forma a obter um bom acabamento superficial. No caso específico deste equipamento, esta unidade contém lâmpadas que emitem radiação IR (infravermelha) com a função de aquecer as peças, evaporando o solvente e outros compostos voláteis presentes na tinta e nivelando o filme, resultando numa espessura mais uniforme. O tempo que as peças permanecem nesta etapa e a intensidade da radiação infravermelha emitida são definidos para cada aplicação, tendo em conta diversos fatores como a espessura do filme, temperatura ambiente, humidade e tipo de solvente [5].

2.3.5. Unidade de cura UV

Por fim, a peça prossegue para a fase de cura, na qual o filme de tinta passa do estado líquido para o estado sólido por meio de reações de polimerização, com as etapas de iniciação, propagação e terminação, mencionadas anteriormente no capítulo 2.1, quando expostas a lâmpadas que emitem radiação ultravioleta. No mercado, as lâmpadas de mercúrio são as mais utilizadas, uma vez que 35% da radiação emitida encontra-se na gama UV [7]. Esta energia ultravioleta emitida pelas lâmpadas é caracterizada pela irradiância, densidade energética e espectro de emissão. A irradiância representa a potência da radiação emitida pela lâmpada que chega à superfície por unidade de área. Esta é afetada por diversos fatores, nomeadamente a saída da radiação, eficiência e geometria da lâmpada, geometria do refletor, refletância, foco e a distância em relação ao substrato. A densidade energética, por sua vez,

Capítulo 2 – Estado de Arte

é a energia radiante que chega à superfície por unidade de área. Assim, esta quantifica os fótons que atingem a superfície da peça, sendo proporcional ao tempo de exposição e ao número de lâmpadas. Relativamente à distribuição espectral, é necessário que esta coincida com o espectro de absorção do fotoiniciador, caso contrário a cura não ocorrerá. A radiação UV é emitida pelas lâmpadas em diferentes comprimentos de onda, classificadas como UVC, UVB, UVA e UVV. Estes estão representados na Figura 15, dentro do espectro eletromagnético onde se encontram [4][28][29][30].

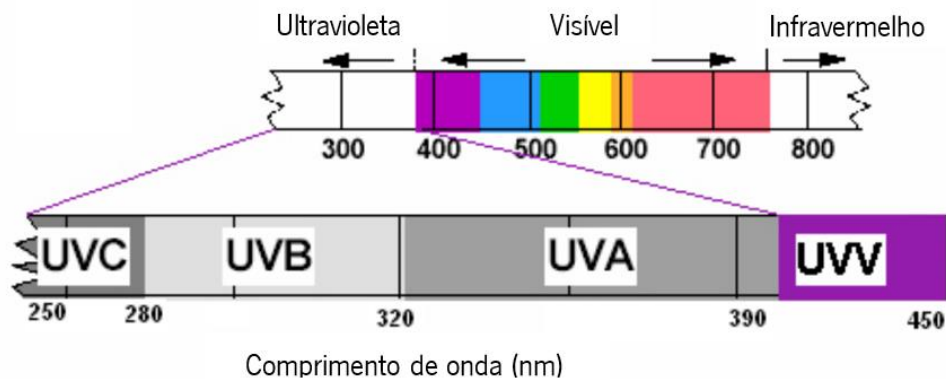


Figura 15. Espectro eletromagnético (adaptado de [29])

A Figura 16 mostra como o comprimento de onda da radiação UV determina a profundidade de penetração do filme, sendo que comprimentos de onda superiores resultam numa penetração mais profunda, enquanto comprimentos de onda inferiores resultam numa penetração mais superficial [30].

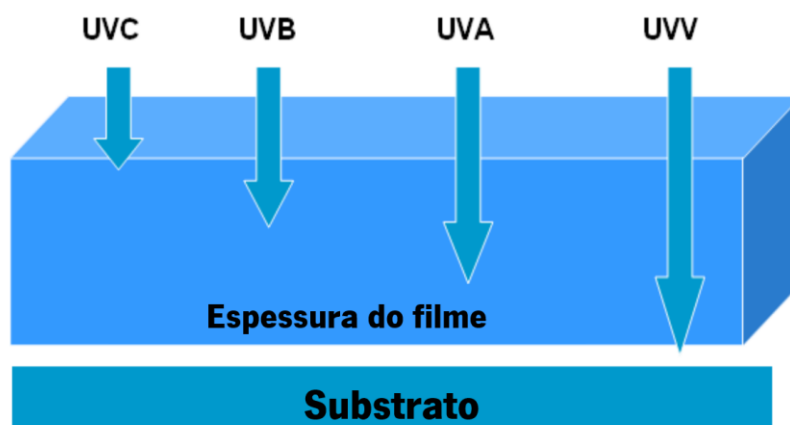


Figura 16. Profundidade de penetração dos raios UVC, UVB, UVA e UVV (adaptado de [29])

A radiação no comprimento de onda de 200 a 280 nm é classificada como UVC e confere resistência à abrasão ao filme de tinta, enquanto a UVB representa o intervalo de 280-320 nm e promove

Capítulo 2 – Estado de Arte

a dureza do filme. Já a UVA e a UVV correspondem a um comprimento de onda de 320 a 395 nm e 395 a 455 nm, respetivamente, e são responsáveis por grande parte das propriedades de adesão do filme ao substrato [29][30].

2.3.6. Circuito da tinta

As pistolas de pulverização são abastecidas com tinta através de sistemas de circulação, conforme representado na Figura 17. A tinta é armazenada numa divisão denominada “*Painting Kitchen*”, no interior de um depósito (A), equipado com um agitador (B) com o intuito de manter a tinta homogénea e prevenir a sedimentação. A tinta é enviada por uma bomba (C), a uma pressão de cerca de 4 bar, pelos tubos de circulação (G), passando por um filtro (D) de modo a eliminar possíveis contaminações que possam resultar em defeitos no filme de tinta. Em seguida, os reguladores de pressão (E) despressurizam o material para cerca de 2 bar, garantindo uma descarga uniforme do material a uma viscosidade constante. Após o abastecimento das pistolas, o excesso de tinta é despressurizado por um regulador de contrapressão (F) e volta para o circuito por meio de uma válvula (H). Desta forma, é garantido que o circuito se encontra totalmente preenchido com tinta, evitando a presença de ar na tubagem [19].

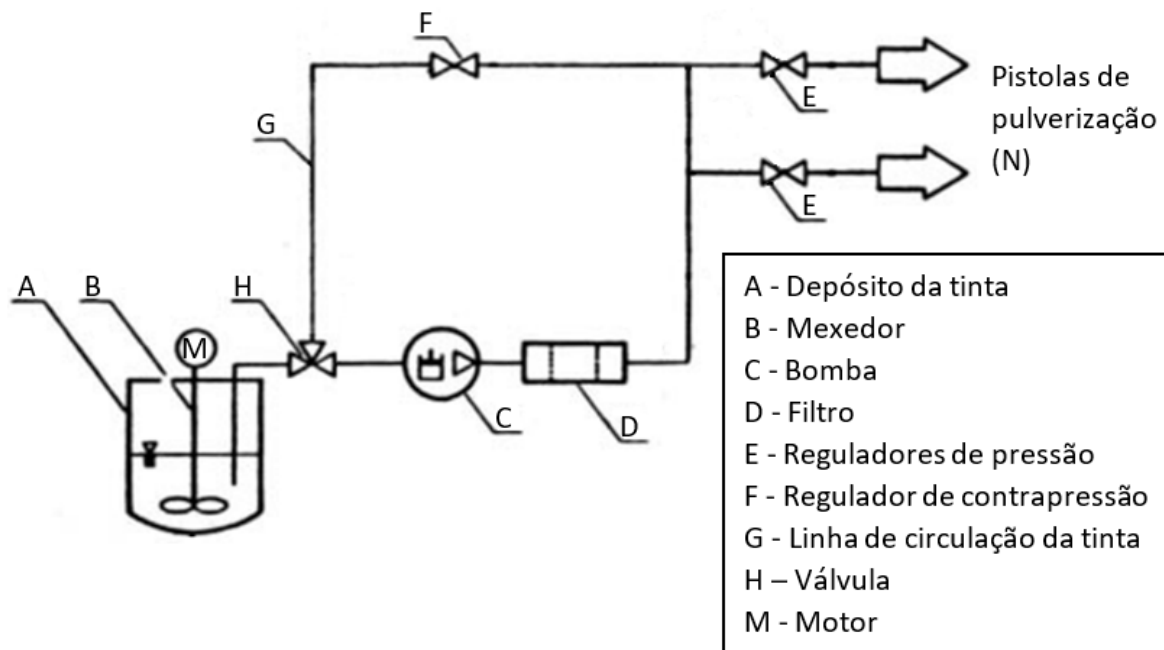


Figura 17. Esquema ilustrativo e respetivos componentes do sistema de circulação de tinta da *SPRIMAG* (adaptado de [19])

Capítulo 2 – Estado de Arte

2.4. Variáveis/parâmetros operatórios do processo de pintura

Um controle das variáveis e parâmetros operatórios do processo de pintura é fundamental para a obtenção de um filme de tinta com as propriedades desejadas. No que diz respeito à linha de pintura *SPRIMAG* da Fehst Componentes, é possível destacar as seguintes variáveis/parâmetros:

Pressão de ar comprimido do CO₂

A pressão de ar comprimido do CO₂ é um dos fatores significativos que afetam a qualidade da limpeza da superfície da peça injetada. Um estudo realizado por Yi-Hung Liu, Hiroyuki Maruyama e Shuji Matsusaka acerca da eficiência de remoção de contaminações com limpeza por CO₂ mostrou que esta eficiência aumenta significativamente ao longo do tempo, com o aumento da pressão local, como demonstra a Figura 18. Os valores do tempo necessário para remover 50% das contaminações da superfície para pressões de 2, 6 e 10 kPa, foram, respetivamente, 2.2, 1.6 e 0.9 segundos [31].

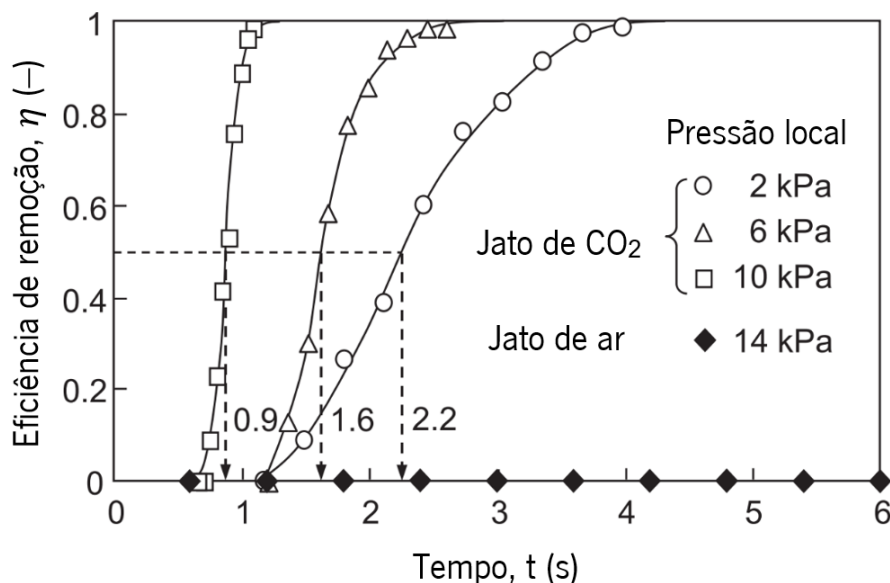


Figura 18. Eficiência de remoção ao longo do tempo para diferentes valores de pressão (adaptado de [31])

Este aumento da eficiência de remoção de contaminações deve-se, principalmente, ao aumento da densidade do CO₂ quando a pressão é aumentada. No entanto, nem sempre é benéfico aumentar a pressão do jato, pois isso resultará em maiores custos de investimento e operação. É importante garantir que o bocal da pistola não se encontre obstruído com gelo seco para manter uma pressão constante do jato. Além disso, neste ensaio, um jato de ar comprimido também foi utilizado com o intuito de estudar

Capítulo 2 – Estado de Arte

o impacto das partículas de gelo seco. Analisando o gráfico, comprova-se que o jato de ar comprimido não é eficaz na remoção das partículas, mesmo quando a pressão local é superior à do jato de CO₂ [31].

Viscosidade da tinta

A viscosidade da tinta é uma propriedade reológica que descreve a resistência de um fluido ao escoamento. Esta propriedade demonstra uma influência significativa no processo de pintura, afetando a atomização da tinta e a forma como a mesma se distribui na superfície da peça [5]. O tamanho das partículas de tinta formadas durante o processo de atomização é influenciado pela viscosidade. Para valores de viscosidade elevados, a tinta apresenta uma maior resistência à atomização, originando partículas com dimensão superior e um filme mais espesso e com propriedades não aceitáveis. Por outro lado, valores de viscosidade reduzidos originam partículas pequenas que podem gerar uma quantidade de *overspray* excessiva [19]. O tempo de escoamento representa uma medida indireta da viscosidade e pode ser medido através do tempo necessário para uma determinada quantidade de tinta fluir através de um orifício de um “viscosímetro” (copo metálico). Existem copos com orifícios de diferentes diâmetros para formulações com viscosidade diferente a uma determinada temperatura. Assim, é importante verificar as especificações do fornecedor de tinta, de modo a determinar o tempo de escoamento recomendado para cada tinta. Se necessário, a viscosidade da tinta é ajustada antes da aplicação, adicionando diluentes adequados para reduzir a mesma. Além disso, a temperatura ambiente e a humidade também podem afetar esta propriedade e, como tal, devem ser levadas em consideração durante o processo de pintura [5][32].

Pressão de atomização

A pressão de ar utilizada na atomização apresenta grande impacto na velocidade e no tamanho das partículas de tinta. Se esta pressão for muito elevada, para além de gerar partículas com dimensão inferior, a velocidade do *spray* será maior, o que resultará numa eficiência de transferência menor. Pelo contrário, se a pressão de ar for muito baixa, as partículas vão apresentar uma dimensão superior, podendo resultar em defeitos do filme de tinta, como casca de laranja. Assim, é necessário um valor de pressão adequado para obter um filme com bom acabamento superficial, mas que não gere uma grande quantidade de *overspray* [5][33]. A Figura 19 mostra a influência da pressão de atomização no tamanho das partículas.

Capítulo 2 – Estado de Arte

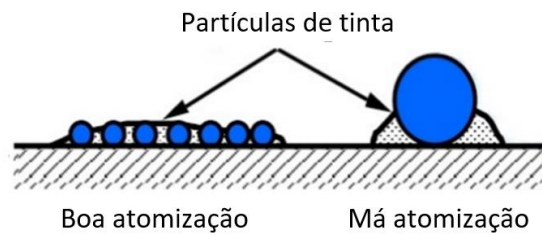


Figura 19. Efeito da atomização no tamanho das partículas de tinta (adaptado de [33])

Pressão de tinta nas pistolas

A pressão da tinta nas pistolas define a quantidade do fluido que é transferido para a superfície das peças. Tal como a pressão de atomização, quanto maior for a pressão da tinta, menor será o tamanho das partículas. Uma pressão muito baixa também pode provocar problemas de cobertura, na medida em que reduz a quantidade de tinta aplicada na peça [5]. Num estudo realizado por V. P. C. Fernandes, sobre a influência das variáveis operatórias do processo de pintura com cura UV na espessura do filme de tinta, foi possível constatar que para um valor de pressão de tinta nas pistolas máximo, a espessura do filme obtida foi maior, como se pode verificar na Figura 20 [34].

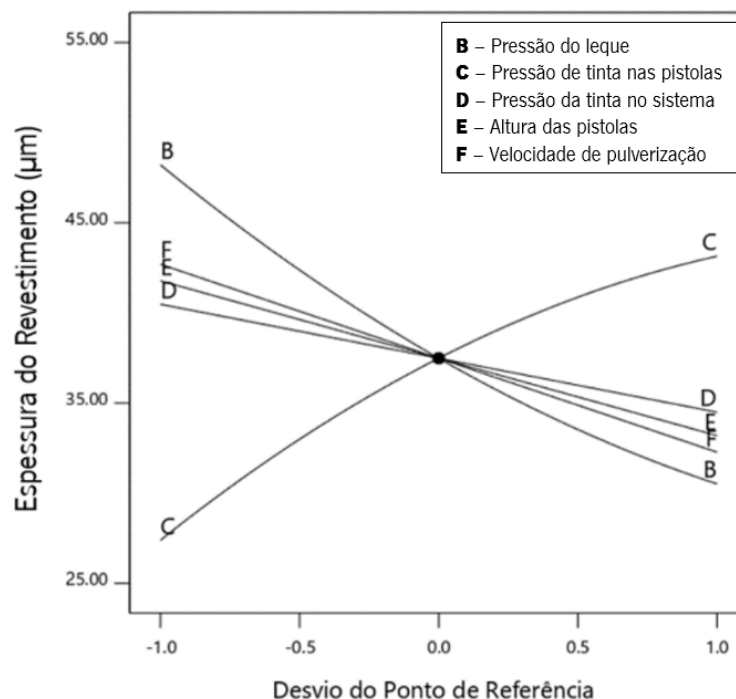


Figura 20. Efeito dos 5 fatores mais significativos na espessura do filme de tinta (adaptado de [34])

Uma das variáveis que mais influencia a resposta é o fator C (pressão de tinta nas pistolas), cuja alteração do nível mínimo (-1) para o nível máximo (+1) implica um aumento de cerca de 37% na

Capítulo 2 – Estado de Arte

espessura do filme de tinta. Isto deve-se ao facto de, ao ser aplicada uma maior pressão, a quantidade de tinta debitada pelas pistolas ser superior, resultando num filme com maior espessura [34].

Pressão do leque

Os jatos de leque são responsáveis por moldar o padrão de pulverização, conferindo-lhe um formato elíptico. A pressão do jato de leque afeta a largura do leque de pulverização, a taxa de transferência e a espessura do filme. O formato elíptico é desejado, sendo que distribui melhor as partículas de tinta pela superfície das peças, resultando em espessuras mais uniformes [35]. Na Figura 20, relativa ao estudo elaborado por V. P. C. Fernandes, determinou-se que quanto maior for o valor da pressão do leque, menor é a espessura do filme. Uma mudança do nível mínimo (-1) para o nível máximo (+1) resulta numa redução de cerca de 37% na espessura do filme. Este fenómeno ocorre devido a pressões mais elevadas originarem uma área do leque maior e uma concentração de partículas menor [34].

Ângulo da pistola

O ângulo da pistola de pulverização refere-se ao ângulo entre a superfície a ser pintada e a direção da pistola. Este pode ser ajustado de acordo com o tipo de superfície a ser pintada e pode variar entre 0 e 90 graus. Num trabalho elaborado por J. P. F. Carvalho acerca dos parâmetros com maior influência na espessura do filme de tinta, concluiu-se que um ângulo de 45 graus da pistola de pulverização, para uma superfície plana, garante o perfil de espessuras mais homogêneo, garantindo o cumprimento de todos os requisitos em toda a superfície da peça [36]. Neste estudo, representado na Figura 21 a pistola de pulverização foi posicionada em diferentes ângulos (0°, 22.5°, 45° e 67.5°) para pintar a peça ilustrada na Figura 22. A medição de espessura foi realizada em três zonas distintas da peça. Analisando o gráfico da zona 1, constata-se que o valor máximo de espessura ocorre quando o ângulo da pistola é 0 graus, verificando-se uma diminuição progressiva à medida que o ângulo aumenta. No entanto, nas restantes zonas, ocorre o efeito contrário, com um aumento da espessura até atingir o pico quando a pistola é posicionada a 45 graus. Desta forma, conclui-se que o ângulo de 45 graus é o mais favorável, garantindo um compromisso entre as três zonas da peça.

Capítulo 2 – Estado de Arte

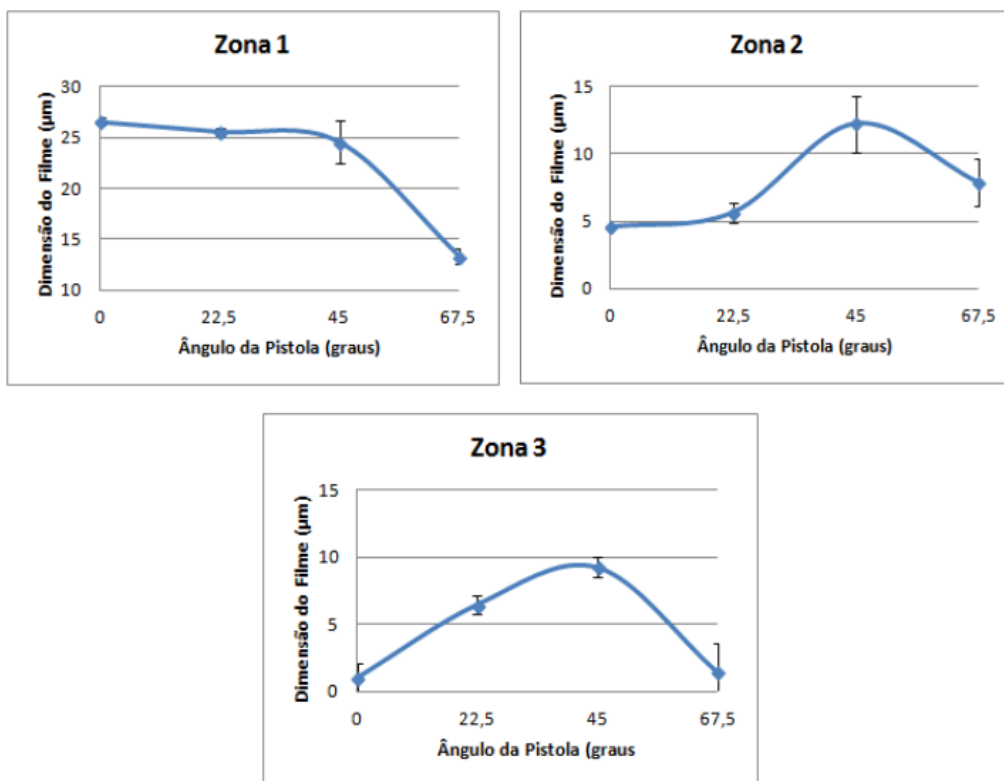


Figura 21. Influência do ângulo da pistola de pulverização na espessura do filme de tinta

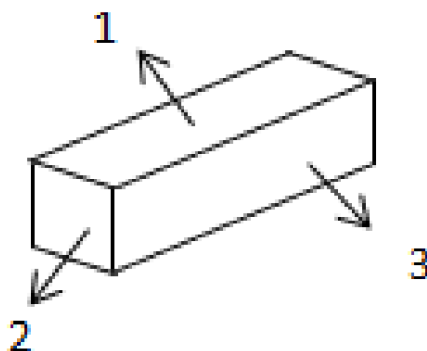


Figura 22. Peça selecionada para o estudo em questão

Distância da pistola à peça

A distância da pistola à superfície da peça a ser pintada também afeta a qualidade do filme. Por um lado, uma distância reduzida resulta em partículas de tinta mais húmidas e, conseqüentemente, menos viscosas, enquanto para uma distância superior, as partículas ficam mais secas, uma vez que demoram mais tempo a atingir a superfície [19]. De acordo com um estudo realizado por M. W. Plesniak, P. E. Sojka e A. K. Singh, sobre a influência das variáveis operatórias do processo de pintura na eficiência de transferência de tinta, revelou que esta diminui à medida que a distância da pistola à peça aumenta, visto que que o *spray* pode ficar muito disperso. Na Figura 23 é possível observar que, tanto na condição

Capítulo 2 – Estado de Arte

15.30 como na 15.60, em que apenas varia o ângulo do *spray*, a eficiência de transferência diminui à medida que a distância da pistola à peça aumenta de 30 a 45 cm [37].

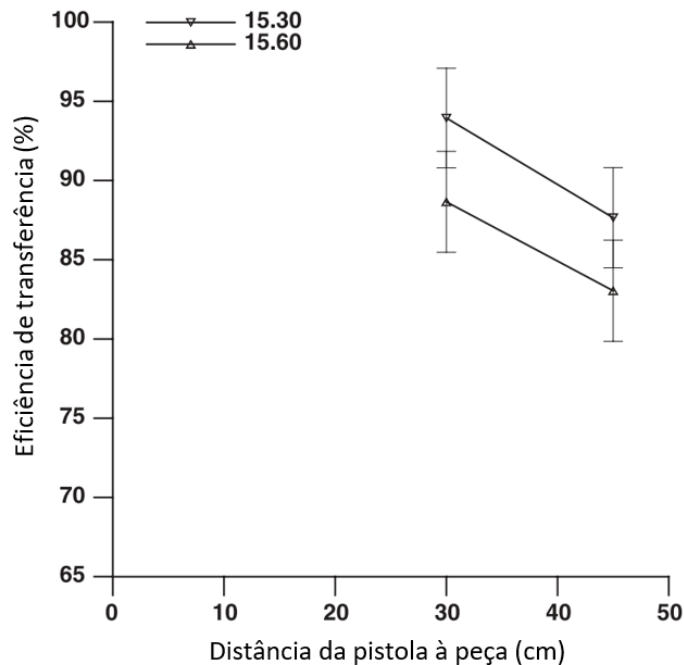


Figura 23. Variação da eficiência de transferência em função da distância da pistola à peça [31]

Flash-off- Potência das lâmpadas IR e Velocidade de transporte

A potência das lâmpadas IR define a quantidade de energia infravermelha emitida, que afeta diretamente a velocidade de evaporação dos solventes presentes na formulação das tintas. Se esta for muito baixa, os solventes podem não ser totalmente evaporados quando a peça chegar à unidade de cura UV. Em contrapartida, se a potência for muito elevada, os solventes podem evaporar muito rápido, o que pode resultar no aparecimento de defeitos, como a casca de laranja [5].

A velocidade de transporte dos tabuleiros no *flash-off* tem uma grande influência na qualidade do acabamento e na produtividade do processo. Se esta for muito elevada, o tabuleiro irá permanecer menos tempo na cabine, o que pode levar a um mau acabamento superficial, já que parte dos solventes presentes na formulação das tintas podem não evaporar. Caso a velocidade seja muito lenta, a produtividade do processo pode ser comprometida. Assim, é importante encontrar um equilíbrio na velocidade de transporte, para garantir que as peças permanecem tempo suficiente na cabine, de modo a evaporar os solventes, e que o processo seja eficiente [5].

Capítulo 2 – Estado de Arte

Potência das lâmpadas UV

A potência das lâmpadas UV tem uma influência significativa no processo de cura da tinta. Se a potência for muito baixa, a tinta pode não curar completamente, o que pode levar a problemas como falta de adesão com o substrato. Por outro lado, se a potência for muito alta, podem surgir queimados na superfície da peça, comprometendo assim, a qualidade do acabamento [3].

2.5. Desempenho do filme

Assim que o processo de cura tiver terminado e o filme de tinta se encontrar totalmente solidificado, é necessário que este cumpra uma série de requisitos, no que diz respeito ao seu desempenho. Deste modo, são realizados testes de qualidade padrão que avaliam as propriedades do filme com maior relevância. Alguns destes testes também têm como finalidade determinar se a peça irá cumprir as condições a que estará sujeito durante a sua vida útil [5].

2.5.1. Espessura

A espessura é uma das características mais importantes do filme, dado que influencia o processo, custo e qualidade da peça. É exigido por parte do cliente um intervalo de valores em que a espessura do filme de tinta se deve encontrar. Sabe-se que uma espessura elevada garante uma cobertura adequada da superfície da peça, assim como uma boa proteção contra agentes externos. No entanto, valores de espessura demasiado elevados podem ser prejudiciais uma vez que a radiação UV não atinge as camadas inferiores do filme no processo de cura, para além de se traduzir em custos mais elevados para a empresa. Uma espessura muito reduzida também é prejudicial, podendo resultar numa aparência irregular, falta de proteção e menor durabilidade [19]. Na indústria, esta propriedade é geralmente medida através de métodos não destrutivos, com equipamentos que se baseiam nas propriedades dos materiais constituintes do filme e a sua dependência na espessura do mesmo [19]. O método de corrente parasita sensível à amplitude é bastante utilizado devido à sua simplicidade. Esta técnica realiza medições em materiais eletricamente condutores, mas não magnetizáveis, como o cobre e o alumínio, com um revestimento que seja isolante elétrico, como é o caso dos termoplásticos [38]. A Figura 24 representa os princípios físicos do funcionamento destes equipamentos.

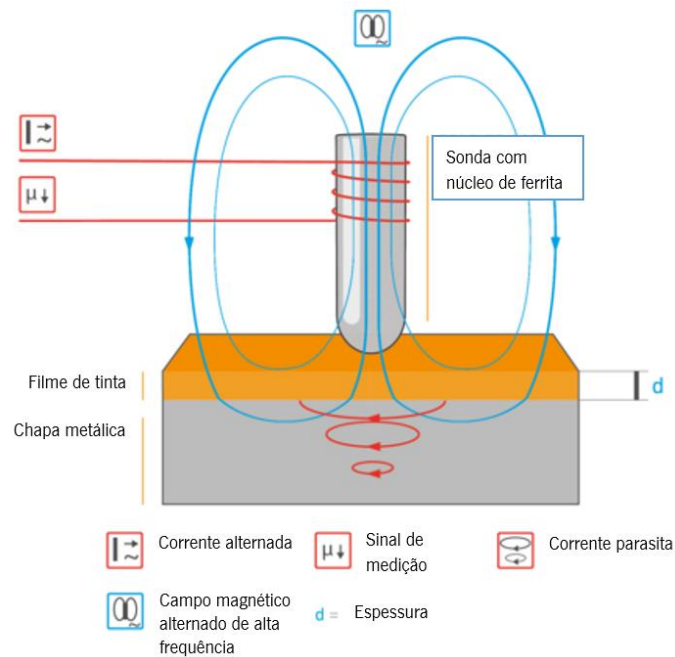


Figura 24. Método de corrente parasita sensível à amplitude (adaptado de [38])

As sondas dos equipamentos de medição de espessura são compostas por um núcleo de ferrita com uma bobina enrolada, onde passa uma corrente alternada de alta frequência, criando assim um campo magnético alternado de alta frequência. Ao aproximar a sonda ao metal, é induzida uma “corrente parasita” que dá origem a outro campo magnético alternado. Este campo atenua o campo magnético original, uma vez que são opostos. A atenuação entre os dois campos reflete-se na distância entre a sonda e o metal, correspondendo à espessura do filme de tinta. Este sinal é medido e comparado com uma curva característica armazenada no equipamento [38]. Outro método que pode ser utilizado para medir a espessura do filme de tinta é a microscopia ótica. Esta técnica permite ampliar a imagem da secção transversal da peça, através da luz visível e um sistema de lentes de vidro.

2.5.2. Adesão

A adesão entre dois corpos ocorre quando existem forças capazes de manter uma interface estável. Esta é uma propriedade muito importante no acabamento superficial de peças injetadas, nomeadamente na pintura. A tensão superficial representa a força que atua sobre a superfície por unidade de comprimento da área perpendicular à força, e para que exista adesão, é preciso que a tensão superficial do substrato (termoplástico) seja superior à do líquido (tinta) [10]. As tensões de corte e mudanças de temperatura às quais os polímeros são submetidos durante o seu processamento e pintura podem originar uma má adesão na interface. Deste modo, é necessário a realização de testes que

Capítulo 2 – Estado de Arte

quantifiquem o grau de adesão [39]. Um dos testes mais utilizado na indústria é o *cross-cut*, uma vez que se trata de um método simples e que fornece resultados reproduzíveis. A aparência da peça resultante deste teste define a qualidade da adesão e é comparada com a imagem de referência ilustrada na Figura 25. A classificação Gt0 corresponde a uma adesão perfeita, e o nível Gt1 (5% de tinta removida) é o máximo aceite na indústria automóvel [19][39].

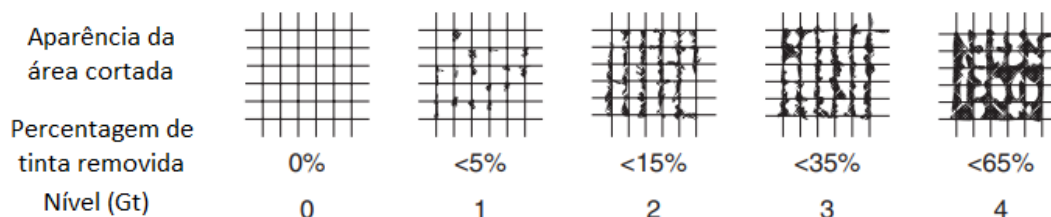


Figura 25. Imagem de referência do teste *cross-cut* (adaptado de [39])

2.5.3. Dureza

A dureza do filme de tinta é definida como a capacidade do mesmo de resistir à deformação permanente ou à penetração, por exemplo, quando um indentador é aplicado. Esta propriedade desempenha um papel crucial para garantir um bom desempenho do filme [19]. Um tempo de cura do filme excessivo ou muito reduzido irá afetar esta propriedade [5]. Existem diferentes métodos que determinam a dureza de um material sendo o teste de resistência ao risco um dos mais utilizados na indústria dos revestimentos. Para avaliar esta propriedade, é utilizada uma caneta *Erichsen* na superfície da peça. Esta consiste num tubo cilíndrico onde é inserida uma mola de tensão ajustável que atua na ponta da mesma [19].

2.5.4. Durabilidade

As peças pintadas estão sujeitas a diferentes condições climáticas durante o seu transporte, armazenamento e uso, o que pode ter influência na durabilidade do filme de tinta. A radiação ultravioleta proveniente do sol, variações de temperatura, humidade e chuva são os elementos com maior influência na qualidade da matéria-prima, uma vez que alteram as suas propriedades através de reações fotoquímicas, degradação hidrolítica e térmica, contração e expansão. A mudança de cor, a redução do brilho, o aparecimento de bolhas, fissuras e a perda de adesão ao substrato são as principais consequências das suas condições de utilização [19]. Deste modo, é necessário estudar os efeitos das condições climáticas no desempenho do filme de tinta, a fim de avaliar a necessidade de efetuar alterações caso este não cumpra algum dos requisitos exigidos pelo cliente. Na indústria automóvel, são

Capítulo 2 – Estado de Arte

bastante utilizadas câmaras climáticas para simular o comportamento das propriedades do filme quando sujeito a condições de temperatura e humidade extremas [40].

2.5.5. Resistência à abrasão

A resistência à abrasão do filme de tinta é um aspeto crucial, uma vez que fornece informações sobre a sua capacidade de resistir à influência de materiais abrasivos como areia, sujidade, escovas, entre outros. Está diretamente relacionada às propriedades elásticas e às forças de coesão caracterizadas pelas ligações moleculares e interações polares. Devido à dificuldade de quantificar estas forças os testes realizados não têm como objetivo determinar indicadores físicos definidos, mas sim simular o comportamento da peça à abrasão [19]. Um equipamento bastante utilizado na indústria para simular a ação de abrasão repetida numa área específica da peça é o *crockmeter*. Este teste tem como foco determinar a quantidade de material depositado no tecido do *crockmeter* ou redistribuído para uma área diferente da amostra. As amostras são testadas antes e depois do ensaio, e são feitas comparações dos resultados [41].

2.5.6. Resistência química

A resistência química descreve a capacidade do filme de tinta resistir à degradação causada pela exposição a produtos químicos. Os testes de resistência química desempenham um papel crucial na avaliação do desempenho do filme de tinta, abrangendo tanto as suas propriedades visuais como as funções de proteção. Existe uma variedade de testes para determinar a resistência química dos revestimentos, cada um com as suas respetivas abordagens. Estes testes podem ser realizados utilizando gotas, por imersão ou através de equipamentos específicos que envolvam temperatura e/ou pressão. É necessário seleccionar as substâncias adequadas para a aplicação específica. As mais utilizadas incluem combustíveis, lubrificantes, anticongelantes, detergentes, óleos e soluções aquosas como ácido clorídrico, ácido sulfúrico e hidróxido de sódio [19][42].

Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme

A avaliação do desempenho do filme de tinta requer a realização de uma série de testes. O resultado destes testes deve atender a todos os requisitos estabelecidos pelo cliente. Assim, foi definida uma norma, intitulada TL 226, que exige a realização dos seguintes testes: cross-cut, resistência ao risco, hidrólise, estabilidade térmica, resistência a ciclo ambiental, resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão, teste da gota e resistência a cremes. Este capítulo tem como objetivo descrever o procedimento que foi realizado em cada um destes testes nos capítulos 4 e 5 da presente dissertação. Também será mencionada a técnica de medição de espessura, uma vez que foi efetuada de modo a obter um maior controle do processo.

3.1. Medição de espessura

A medição de espessura do filme de tinta foi realizada seguindo a instrução de trabalho presente no anexo 6, utilizando o medidor de espessura *Elcometer Coating Thickness Gauge*. Uma vez que este equipamento não permite a medição direta da espessura do filme, esta foi executada nas chapas metálicas colocadas nas peças, após a cura da tinta, como pode ser visualizado na Figura 38. A sonda do equipamento foi posicionada na vertical em relação à superfície das amostras, encostando a parte móvel externa e mantendo-a fixa até o aparelho indicar a medida efetuada. Foram realizadas cinco medições em cada chapa, e foi calculada uma média de maneira a obter resultados mais precisos. O processo encontra-se ilustrado na Figura 26.



Figura 26. Medição da espessura do filme da chapa metálica com o *Elcometer*

Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme

3.2. *Cross-cut*

De modo a quantificar o grau de adesão entre a tinta e o substrato polimérico, foi realizado o teste de *cross-cut* de acordo com a instrução de trabalho exibida no anexo 7. Com o auxílio do equipamento ilustrado na Figura 27, foram executados dois cortes perpendiculares entre si na superfície das peças, penetrando até ao substrato. A área assinalada foi cuidadosamente limpa com uma escova apropriada, removendo todas as partículas de tinta causadas pelo corte. De seguida, aplicou-se uma fita adesiva (*Tesa Tape 4657*) sobre a área com os cortes, evitando a formação de bolhas de ar. A fita foi removida, seguindo um movimento vertical. A avaliação é realizada através de observação visual após a remoção da fita, sendo o resultado atribuído de acordo com a escala Gt observada no capítulo 2.5.2. O nível Gt1 é o máximo aceite na indústria automóvel.



Figura 27. Equipamento utilizado no teste de *cross-cut*

3.3. Resistência ao risco: Caneta *Erichsen*

Foi utilizada a caneta *Erichsen*, ilustrada na Figura 28, designada *elcometer 3092 sclerometer herdes tester*, para medir a resistência ao risco do filme de tinta, seguindo a instrução de trabalho presente no anexo 8. Colocou-se este equipamento numa posição vertical em relação à superfície das peças, com a ponta virada para baixo, e fez-se um risco com aproximadamente 5-10 mm de comprimento a uma velocidade de 10 mm/s. É permitido apenas um risco visível, resultado da força aplicada na superfície, sem a remoção de tinta. Este teste foi executado utilizando uma força da caneta de 10 N.

Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme

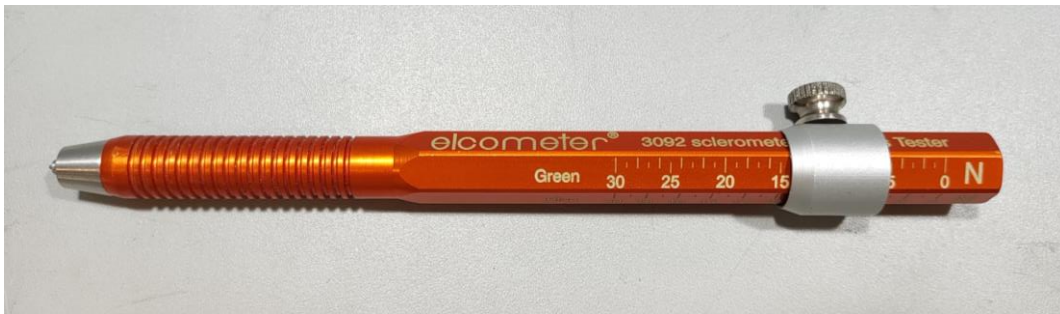


Figura 28. Caneta *Erichsen elcometer 3092 sclerometer hardness tester*

3.4. Teste de hidrólise

O teste de hidrólise foi realizado na camara climática *aralab*, ilustrada na Figura 29, de forma a avaliar o desempenho e durabilidade das peças quanto expostas a condições extremas de temperatura e humidade. No teste, as foram expostas a uma temperatura de (90 ± 2) °C e com humidade relativa de $(95\pm 3)\%$ durante 72 horas. As peças devem manter a sua aparência e propriedades táteis inalteradas. Por fim, foram realizados novamente testes de *cross-cut* e resistência ao risco, de forma a verificar se ocorreu alguma alteração na capacidade de adesão da tinta ao substrato após a exposição a valores de temperatura e humidade extremos.



Figura 29. Camara climática *aralab*

Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme

3.5. Estabilidade térmica e resistência a ciclo ambiental

Estes testes são utilizados para avaliar o desempenho e durabilidade das peças sob condições extremas de temperatura. O método de estabilidade térmica consiste em colocar as peças na câmara climática, ilustrada na Figura 29, por um período de 240 horas a uma temperatura de (90 ± 2) °C. Já no teste de resistência a ciclo ambiental, as peças permanecem expostas a ciclos de temperatura entre os 80 °C e os -40 °C durante 96 horas. Após o período estipulado, as peças são retiradas da câmara e são realizados novamente testes de *cross-cut* e da caneta *Erichsen*. Estas devem manter a sua aparência e propriedades táteis inalteradas, para além de cumprir as especificações dos resultados do teste de adesão ($\leq Gt1$) e resistência ao risco (sem remoção de tinta).

3.6. Resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão

A fim de avaliar a eficácia da adesão do filme de tinta quando submetido à abrasão, com ou sem adição de produtos químicos, recorreu-se ao equipamento *crockmeter* ilustrado na Figura 30. Neste ensaio, as superfícies das peças foram submetidas a múltiplos ciclos de fricção através da passagem de um instrumento coberto por um tecido, com uma força constante de 10 N. Devido à incompatibilidade da geometria da peça em estudo com o suporte do equipamento, este teste apenas pode ser realizado em placas de ensaio. Foram realizadas diversas condições para cada amostra, com um número distinto de passagens (*strokes*) e produtos químicos diferentes no tecido, nomeadamente:

- 100 *strokes*, com tecido seco;
- 100 *strokes*, com adição de água destilada no tecido;
- 2000 *strokes*, com tecido seco;
- 10 *strokes*, com adição de detergente lava-loiça no tecido;
- 10 *strokes*, com adição de detergente limpa-vidros no tecido;
- 10 *strokes*, com adição de gasolina/gasóleo no tecido;
- 10 *strokes*, com adição de álcool no tecido;
- 10 *strokes*, com adição de solução de suor artificial A no tecido;
- 10 *strokes*, com adição de solução de suor artificial B no tecido.

Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme



Figura 30. Equipamento utilizado no teste de abrasão - *Crockmeter*

A avaliação visual da superfície da peça pintada foi realizada de acordo com as classificações ilustradas na Figura 31. Cada grau corresponde a uma determinada representação:

- Grau 1: **Nenhuma alteração visível**, sem vestígios de abrasão;
- Grau 2: **Pequena alteração**, vestígios de abrasão quase indetetáveis;
- Grau 3: **Alteração percetível**, mudança de cor, danos à superfície;
- Grau 4: **Alteração pronunciada**, o material do substrato torna-se visível.

Na indústria automóvel, o grau 2 é o máximo aceite para ensaios de 2000 *strokes*, enquanto que para ensaios de 100/10 *strokes*, o limite aceitável é o grau 1.

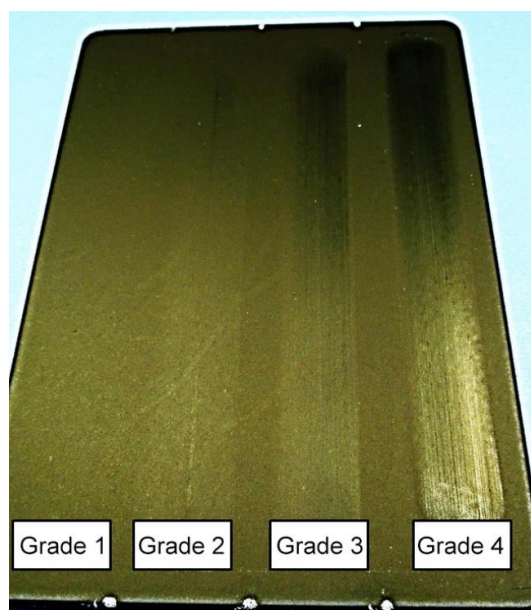


Figura 31. Referência de avaliação do teste de abrasão numa placa de amostra pintada

Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme

3.7. Teste da gota

O teste da gota foi realizado com o intuito de avaliar a capacidade do filme de tinta resistir à degradação causada pela exposição a produtos químicos. A Figura 32 ilustra o procedimento, no qual uma pipeta foi utilizada para aplicar 0,1 ml dos seguintes líquidos na superfície das peças:

- Detergente lava-loiça;
- Detergente limpa-vidros;
- Gasolina/gasóleo;
- Álcool;
- Solução de suor artificial A;
- Solução de suor artificial B.

As peças foram expostas à temperatura ambiente por um período de 10 minutos, seguido de 30 minutos à temperatura de 60 °C na camara climática mostrada na Figura 29. De seguida, foram retiradas e a superfície foi limpa com tecido limpo e água destilada. Após a limpeza, as peças permaneceram em condições normais de temperatura e humidade por 24 horas e foram avaliadas visualmente de modo a identificar possíveis sinais de degradação do filme. Não pode ocorrer alteração de aparência ou propriedades táteis na superfície pintada.

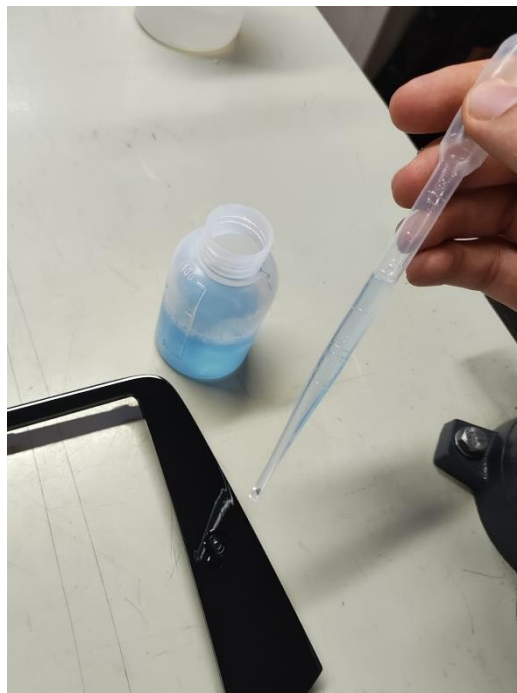


Figura 32. Aplicação do líquido na superfície da peça

Capítulo 3 – Técnicas de caracterização do filme

3.8. Resistência a cremes

Este teste tem como objetivo avaliar a capacidade do filme de tinta resistir à degradação causada pela exposição a cremes ou produtos similares que possam entrar em contacto com as peças do automóvel durante a sua utilização. Inicialmente, foi aplicado um quadrado de gaze na superfície das peças, seguido de uma camada fina do creme selecionado (creme de mãos e protetor solar), com o auxílio de uma espátula, conforme ilustrado na Figura 33. Em seguida, as peças com o creme foram colocadas na câmara climática, mostrada na Figura 29, e mantidas a uma temperatura de 80 °C durante 24 horas. Após este período, estas foram removidas e limpas com um tecido limpo e detergente. Passadas 4 horas, realizou-se uma avaliação da superfície através do aspeto ótico, teste de *cross-cut* e teste de resistência ao risco. É necessário que as peças mantenham a sua aparência e propriedades táteis inalteradas, apresentem um nível máximo de Gt1 no teste de adesão e não demonstrem remoção de tinta com a aplicação da caneta *Erichsen*.



Figura 33. Aplicação do creme na superfície da peça

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

O objetivo deste capítulo consiste em avaliar e otimizar a proporção de diluente e/ou tinta virgem a ser adicionada à tinta recolhida. Essa avaliação terá em consideração tanto os aspetos ambientais quanto os económicos, para garantir que sejam cumpridos todos os requisitos estipulados pelo cliente. Vale ressaltar que, apesar deste estudo ter sido feito de maneira sequencial, os resultados são apresentados em conjunto para facilitar a sua comparação.

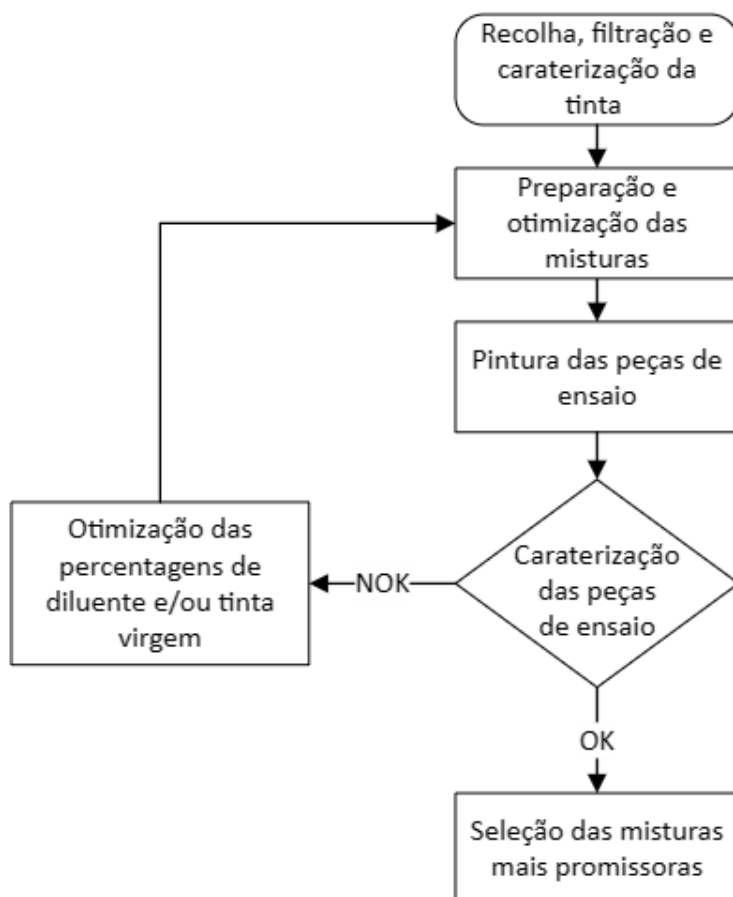


Figura 34. Fluxograma de atividades dos estudos preliminares

4.1. Recolha, filtração e caracterização da tinta

Como referido anteriormente, uma quantidade significativa de *overspray*, proveniente da tinta *CYCON UV-HighGloss 757-10 0944*, fica depositado na tina de retenção da cabine de pintura. Inicialmente, a fim de estimar a eficiência de transferência, toda a tinta presente na tina foi recolhida e pesada ao final de uma semana, totalizando 110 kg. Durante essa semana, foram utilizadas 17 latas de tinta, cada uma com 20 kg, resultando num total de 340 kg. Assim, a eficiência de transferência é de 67%, coincidindo com o intervalo de valores apresentado no capítulo 2.3.3 para o método de pulverização

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

HVLP. A Figura 35 ilustra o procedimento de recolha das tintas, realizado com o auxílio do aspirador industrial *KARCHER IVS 100/75 M Z22*, conforme mostrado no anexo 2.



Figura 35. Recolha do *overspray* depositado na tina de retenção da cabine de pintura

Todas as amostras foram sujeitas a um processo de filtração utilizando uma malha filtrante de 90 μm , conforme ilustrado na Figura 36, com o propósito de eliminar possíveis sujidades provenientes da tina de retenção da cabine de pintura. A malha utilizada e as contaminações depositadas das amostras encontram-se apresentados no anexo 4 e 5, respetivamente.



Figura 36. Processo de filtração das tintas

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

De seguida, procedeu-se à medição do tempo de escoamento da tinta, o qual representa uma medida indireta da viscosidade, com o objetivo de determinar se o valor era viável para aplicação. Esta medição foi efetuada seguindo a norma ISO 2431 e a instrução de trabalho demonstrada no anexo 3. Inicialmente, o copo metálico de 4mm foi totalmente imerso na lata de tinta. Posteriormente, retirou-se o mesmo da lata e, nesse momento, iniciou-se o cronómetro. Quando a tinta fluiu completamente através do copo, a contagem foi interrompida e registou-se o tempo de escoamento. O equipamento utilizado nesta medição é ilustrado na Figura 37. Os valores obtidos revelaram-se significativamente superiores aos 13 segundos de aplicação da tinta virgem, excedendo os 11 minutos. Este fenómeno pode ser atribuído à evaporação do solvente presente na tinta após a sua pulverização, o que resulta num aumento do teor de sólidos da formulação e, por consequência, numa viscosidade mais elevada.



Figura 37. Cronómetro e copo metálico de 4 mm

4.2. Preparação e otimização da tinta

Face aos valores extremamente elevados do tempo de escoamento da tinta recolhida, foi necessária a adição de diluente e tinta virgem a fim de reduzir viscosidade da mesma. Esta etapa foi dividida em três fases distintas, representadas na Tabela 1.

Na Fase A, com o objetivo de determinar a melhor concentração da mistura, foram preparadas duas amostras. Na primeira amostra, foi incorporado diluente até que o tempo de escoamento atingisse os 13 segundos, valor recomendado pelo fornecedor para a aplicação da tinta virgem. Já na segunda amostra, foi adicionada 50% de tinta virgem e 50% de tinta recolhida e, novamente, adicionou-se diluente até obter o mesmo tempo de escoamento da primeira amostra. Posteriormente, procedeu-se à realização os testes de caracterização do filme de tinta nas duas condições e prosseguiu-se para a Fase B.

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

Na Fase B, com base nos resultados obtidos nos testes de caracterização, foram preparadas mais duas condições. Considerando os resultados positivos em ambas as condições, na terceira amostra optou-se por adicionar metade da quantidade de diluente presente na primeira amostra, de forma a estudar a possibilidade de redução dos custos de matéria-prima, mantendo simultaneamente um bom acabamento superficial. Por sua vez, na quarta amostra, com o propósito idêntico à amostra anterior, para a mesma quantidade de tinta recolhida e tinta virgem, foi incorporada metade da quantidade de diluente adicionada na amostra 2. Novamente, efetuaram-se os testes de caracterização nas duas condições, passando então para a Fase C.

Na Fase C, com o intuito de estudar a possibilidade de eliminar o uso de diluente para reduzir a viscosidade da tinta, na quinta amostra, foi adicionada tinta virgem à tinta recolhida até que a mistura atingisse um valor de tempo de escoamento de 16 segundos. Este valor foi determinado com base nos resultados dos testes de caracterização da amostra 4, uma vez que esta condição obteve resultados positivos, ao contrário da amostra 3, que apresentou não conformidades fora dos limites estabelecidos, causadas pelo elevado tempo de escoamento. A Tabela 1 ilustra as percentagens de tinta recolhida, tinta virgem e diluente presentes nas cinco amostras.

Tabela 1. Percentagem dos componentes das 5 formulações e respetivo tempo de escoamento

Fase	Ensaio	Tinta recolhida (%)	Tinta virgem (%)	Diluente (%)	Tempo de escoamento (s)
A	1	60.6	–	39.4	13
	2	37.7	37.7	24.5	13
B	3	75.5	–	24.5	20
	4	43.0	43.0	14.0	16
C	5	27.8	72.2	–	16

4.3. Pintura das amostras de ensaio

As peças foram distribuídas em cinco tabuleiros, sendo que cada tabuleiro representa um ensaio. Cada uma destas peças foram identificadas numericamente de acordo com a sua posição, como se pode observar na Figura 38. Por questões de reprodutibilidade, a posição de cada amostra no tabuleiro foi mantida constante em todos os ensaios. Foram preparadas 30 peças em cada tabuleiro, totalizando 150 peças. Cada peça consiste numa placa de PC/ABS com dimensões 118x90 mm, injetada nas instalações da Fehst Componentes. Para medir a espessura do filme de tinta pelo processo abordado no capítulo 3.1, foi aplicada uma chapa metálica de 21x19 mm nas placas 11, 12, 13, 14 e 15. Antes do ensaio,

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

todas as peças foram limpas com um pano embebido em álcool, com o intuito de eliminar possíveis contaminantes contidos da superfície.

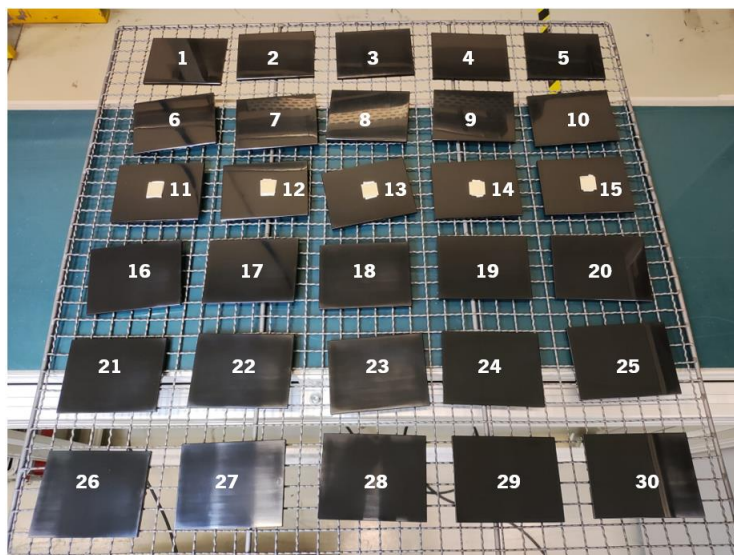


Figura 38. Disposição das peças de ensaio no tabuleiro

Antes de iniciar o processo de pintura, foram selecionadas as variáveis operatórias com maior influência no acabamento superficial das peças. Estas incluem a pressão da tinta, a pressão dos jatos de leque e a pressão dos jatos de atomização, as quais controlam, respectivamente, a quantidade de tinta expelida, a forma do *spray* e o tamanho das partículas de tinta. Além destas variáveis, também foram consideradas a potência das lâmpadas infravermelhas (IR) e a velocidade de transporte no *flash-off*. Os valores de cada uma destas variáveis foram definidos em função da geometria da peça e podem ser observados na Tabela 2. Todas as outras variáveis operatórias do processo de pintura foram mantidas constantes e, por motivos de reprodutibilidade, foram as mesmas nos quatro ensaios.

Tabela 2. Variáveis operatórias significativas no acabamento superficial e respectivos valores

Variável operatória	Unidade	Valor
Pressão do material	bar	2.0
Pressão dos jatos de leque	bar	1.1
Pressão dos jatos de atomização	bar	1.8
Velocidade do transporte no <i>flash-off</i>	m/min	1.1
Potência das lâmpadas IR	%	60

4.4. Análise e discussão de resultados

Uma vez que esta se trata de uma etapa experimental, optou-se por efetuar apenas os testes de caracterização mais críticos, nomeadamente: medição de espessura, *cross-cut*, resistência ao risco e

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

hidrólise. Esta seleção foi feita tendo em conta que a tinta não seria considerada como apta caso não passasse nestes testes. Apesar dos testes de *cross-cut* e resistência ao risco terem sido realizado em diversas peças, apenas é apresentada uma imagem de cada ensaio, dado que os resultados foram idênticos. Também foi realizada uma inspeção visual com o intuito de detetar possíveis não conformidades mencionadas no capítulo 2.3.1. Com os resultados que se seguem, pretende-se estudar a influência das diferentes misturas efetuadas na qualidade final do filme, com o objetivo de identificar a condição mais promissora para aplicar numa peça de produção em série da empresa.

4.4.1. Medidor de espessura

Na Tabela 3 encontram-se os valores da espessura medidos nas peças 11, 12, 13, 14 e 15 de cada ensaio, assim como a respetiva média e desvio padrão. A tinta recolhida é representada por TR, a tinta virgem por TV, e o diluente por D. Para uma análise comparativa dos resultados obtidos, a Figura 39 exibe esses dados num gráfico juntamente com os valores de tempo de escoamento da respetiva mistura.

Tabela 3. Espessura medida nas 5 amostras com o *Elcometer* e respetiva média e desvio padrão

Ensaio	Composição	Espessura (μm)					Média e desvio padrão (μm)
		Amostra 11	Amostra 12	Amostra 13	Amostra 14	Amostra 15	
1	61%TR + 39%D	28.04	26.50	25.86	25.00	23.30	25.74 \pm 1.57
2	38%TR + 38%TV + 24%D	27.92	28.30	28.74	31.00	31.02	29.40 \pm 1.22
3	75%TR + 25%D	32.92	31.12	33.94	32.88	31.10	32.39 \pm 1.11
4	43%TR + 43%TV + 14%D	33.12	35.94	35.46	35.50	33.68	34.74 \pm 1.12
5	28%TR + 72%TV	34.94	32.02	32.12	37.60	35,88	34.51 \pm 2.17

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

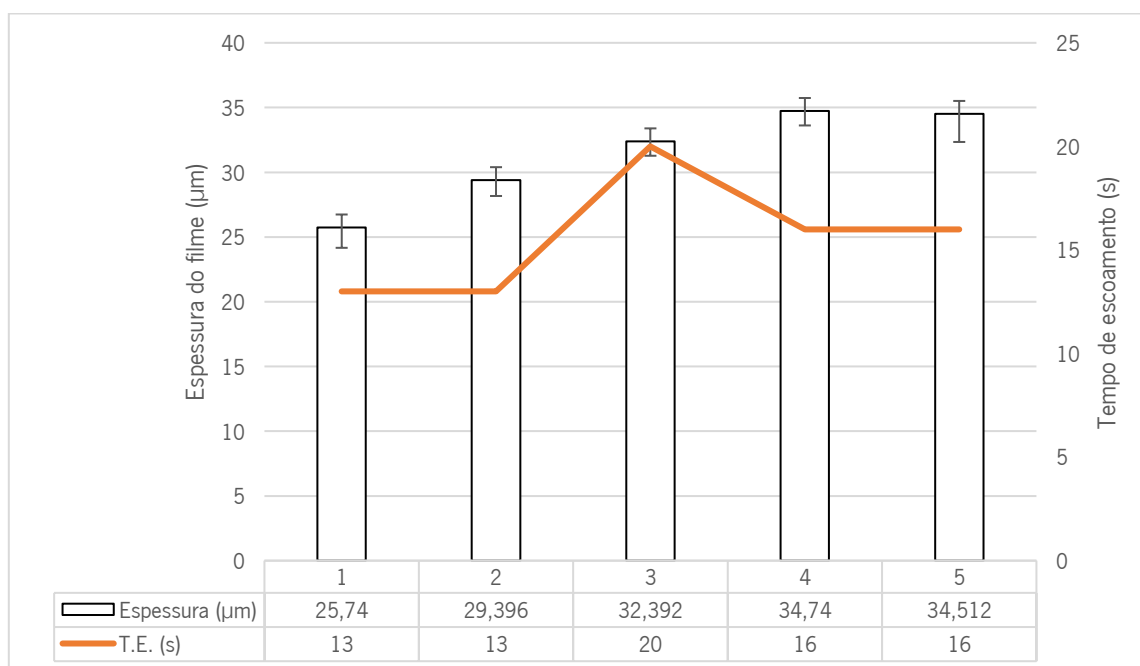


Figura 39. Relação entre a espessura do filme e o tempo de escoamento das 5 misturas

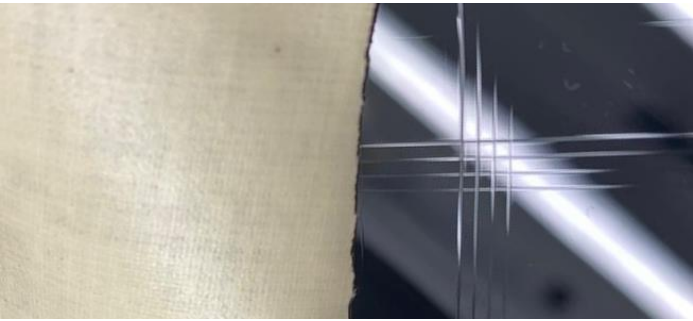
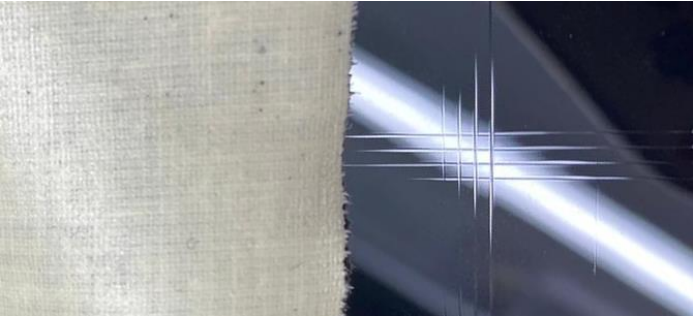
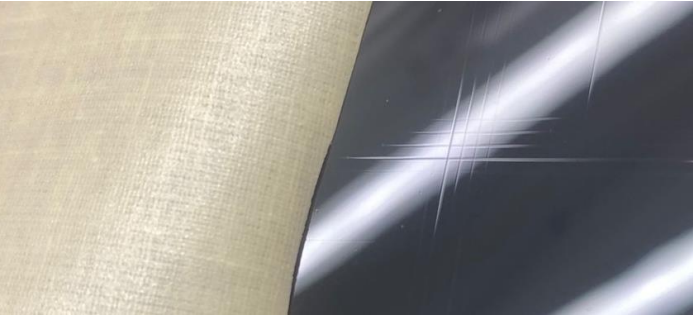
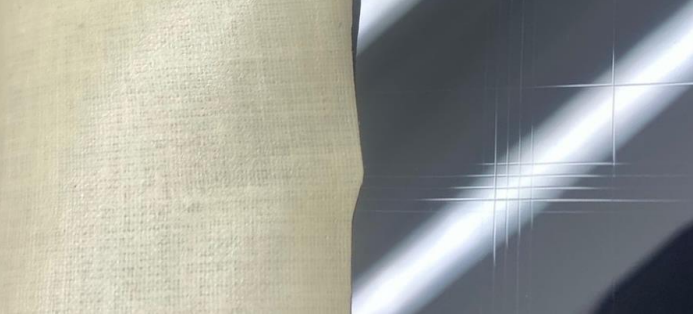
Analisando os valores de espessura das quatro condições, é possível aferir que todos os valores se encontram dentro dos limites exequíveis definidos pelos técnicos de pintura da empresa (mínimo 18 μm e máximo 38 μm). Conclui-se também que as misturas que apresentaram menor tempo de escoamento (1 e 2) obtiveram valores de espessura menores. Este fenómeno seria expectável pois, como referido no capítulo 2.4, para valores de viscosidade baixos, a tinta tende a espalhar-se mais facilmente sobre a superfície da peça, resultando num filme mais fino. Por sua vez, as condições com valores de tempo de escoamento mais elevados (3, 4 e 5) apresentaram um filme com espessura superior. No entanto, seria de esperar que as peças das condições 4 e 5 exibissem uma espessura superior às da condição 3, uma vez que os tempos de escoamento são inferiores nestas amostras. Isto pode dever-se ao facto dos ensaios terem sido realizados em dias diferentes, considerando fatores como troca de pistolas e condições atmosféricas, que podem influenciar o resultado.

4.4.2. *Cross-cut*

A Tabela 4 mostra a aparência da superfície das peças após os ensaios de *cross-cut*, juntamente com o respetivo nível (Gt). À esquerda de cada imagem é retratada a fita adesiva empregue no ensaio, enquanto à direita é mostrada a superfície da peça após o corte ser efetuado. O realce em branco visível à direita da imagem é uma representação da iluminação utilizada para uma melhor visualização do corte. Este teste foi efetuado nas peças 1, 2, 3, 4 e 5 de cada ensaio.

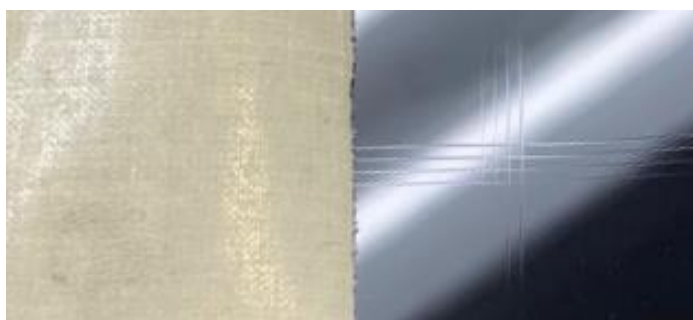
Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

Tabela 4. Resultados do teste *cross-cut* para os 5 ensaios

Ensaio	Aparência	Nível (Gt)	Resultado
1		Gt0	OK
2		Gt0	OK
3		Gt0	OK
4		Gt0	OK

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

5



Gt0

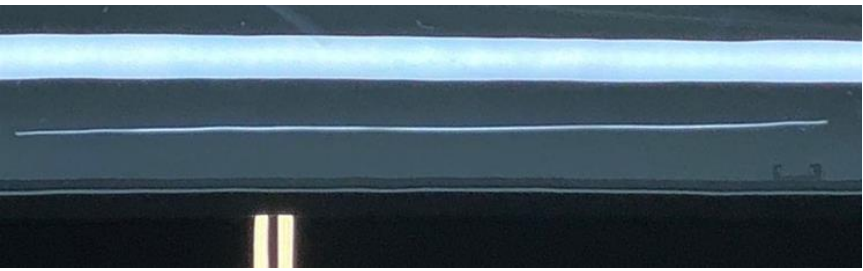

OK

Analisando os resultados do ensaio, conclui-se que todas as amostras passaram no teste, dado que o nível Gt0 corresponde a uma adesão perfeita entre o substrato e o filme de tinta.

4.4.3. Resistência ao risco

A aparência e o resultado dos ensaios de resistência ao risco para as 5 condições estão representados na Tabela 5. Este teste foi realizado nas peças 6, 7, 8, 9 e 10 de cada ensaio. O realce em branco visível na imagem é uma representação da iluminação utilizada para uma visualização mais nítida do risco.

Tabela 5. Resultados do teste de resistência ao risco para os 5 ensaios

Ensaio	Aparência	Resultado
1		OK
2		OK

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

3



OK

4



OK

5



OK

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que as cinco amostras atenderam às especificações do cliente, considerando que, apesar do risco causado pela caneta ser visível, não houve remoção da tinta.

4.4.4. Hidrólise


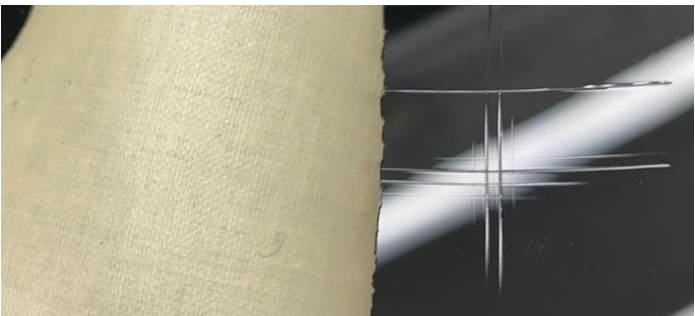
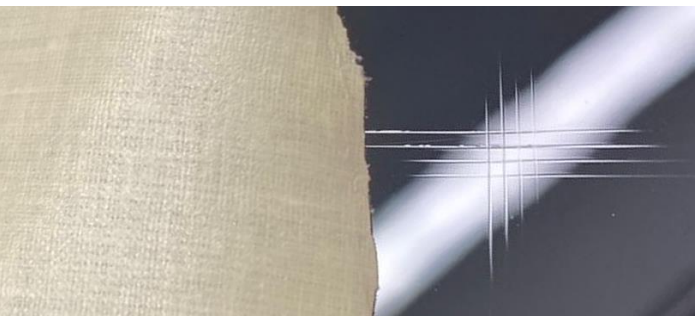

Este teste foi realizado nas peças 16, 17, 18, 19 e 20 de cada ensaio. Após estas terem sido retiradas da câmara climática, não se verificou nenhuma alteração na aparência ou nas propriedades táteis do filme de tinta.

Cross-cut


Na Tabela 6 encontra-se ilustrado o resultado dos ensaios de *cross-cut* após hidrólise, assim como o respetivo nível (Gt).

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

Tabela 6. Resultados do teste *cross-cut* após hidrólise para os 5 ensaios

Ensaio	Aparência	Nível (Gt)	Resultado
1		Gt0	OK
2		Gt0	OK
3		Gt0	OK
4		Gt0	OK

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

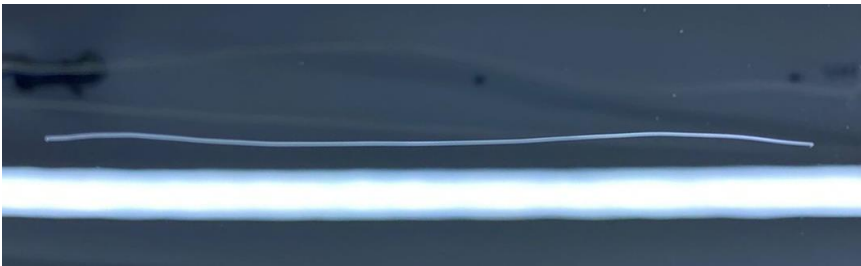
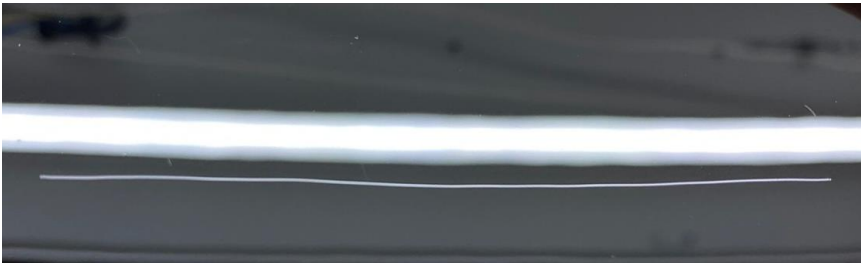
5		Gt0	OK
---	------------------------------------------------------------------------------------	-----	----

Após a análise das imagens referentes aos resultados deste teste, pode-se concluir que o filme de tinta das diferentes amostras apresentou uma excelente adesão ao substrato (nível Gt0), mesmo após as peças terem sido submetidas a condições extremas de temperatura e humidade. Estes resultados indicam que o filme é capaz de suportar condições adversas sem comprometer a sua eficácia.

Resistência ao risco

Na Tabela 7 encontram-se ilustrados os resultados dos ensaios de resistência ao risco após hidrólise.

Tabela 7. Resultados do teste de resistência ao risco após hidrólise para os 5 ensaios

Ensaio	Aparência	Resultado
1		OK
2		OK

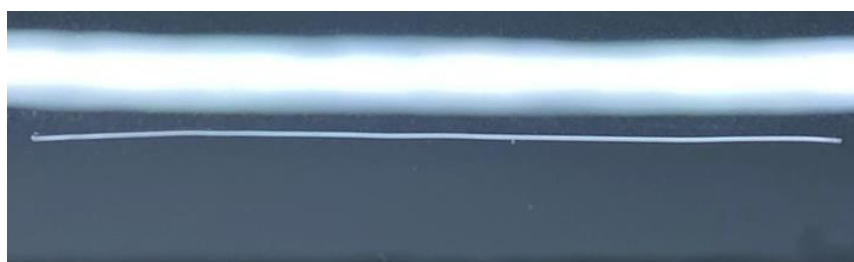
Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

3



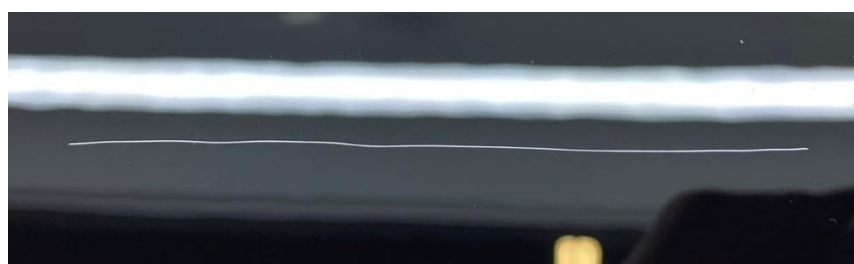
OK

4



OK

5



OK

Assim como os resultados obtidos no teste de *cross-cut* após hidrólise, o teste de resistência ao risco apresentou bons resultados em todas as condições testadas.

4.4.5. Inspeção visual

Da análise visual das peças pintadas com tinta reciclada, é possível identificar dois tipos principais de defeitos, presentes nos cinco ensaios: o excesso de tinta (*frame*) e as inclusões. As inclusões consistem em pequenas saliências no filme e têm como causa provável a presença de contaminações e/ou ar nas tubagens. É comum o aparecimento destas inclusões, com um refugo médio de cerca de 15%, na pintura UV de alto brilho. Já o *frame* é caracterizado por um excesso de tinta nas arestas da peça e o seu aparecimento está relacionado com as condições do processo. Outro defeito perceptível, no entanto, dentro dos limites aceitáveis definidos pelo cliente, é a casca de laranja. Esta não conformidade consiste na formação de uma superfície com textura irregular, semelhante a uma casca de laranja, e é

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

mais evidente nas condições 3, 4 e 5, particularmente na condição 3, em que o tempo de escoamento é mais elevado. Isto deve-se ao facto de uma viscosidade mais elevada resultar num processo de atomização menos eficiente, o que promove um espalhamento não uniforme da tinta na superfície da peça. Na condição 3 também surgiram covas em determinadas peças, as quais não atendem aos requisitos estipulados pelo cliente. Estas apresentam-se como pequenas depressões circulares no filme de tinta e podem ter a mesma origem da casca de laranja. Uma viscosidade alta pode dificultar uma distribuição uniforme da tinta na superfície da peça e, conseqüentemente, é formada uma camada mais espessa em determinadas áreas, enquanto outras ficam menos cobertas. Para além disso, isto também pode dificultar a saída de bolhas de ar ou diluente durante a aplicação da tinta, dando origem ao defeito em causa.

4.5. Seleção das amostras

As condições 1, 2, 4 e 5 passaram em todos os testes de caracterização do filme de tinta. Apesar da condição 3 não passar na inspeção visual, devido ao aparecimento de covas, esta ainda será considerada, visto que este defeito pode ser corrigido com o ajuste das variáveis operatórias. Inicialmente, através do custo de cada componente presente nas misturas, representado na Tabela 8, foi feita uma análise financeira de cada condição.

Tabela 8. Custo da tinta recolhida, tinta virgem e diluente

Produto	Preço (€/kg)
Tinta recolhida	—
Tinta virgem	22.93
Diluente	5.11

A Tabela 9 exhibe o custo total e a poupança proporcionada pelas cinco condições comparativamente à tinta virgem. Vale ressaltar que não foi atribuído um valor ao custo da tinta recolhida, uma vez que esta é enviada para aterro.

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

Tabela 9. Custo total e poupança das 5 condições relativamente à tinta virgem

Amostra	Tinta virgem (€/kg)	Diluyente (€/kg)	Custo total (€/kg)	Poupança (€/kg)
Base	22.9	0.00	22.9	–
1	0.00	2.0	2.0	20.9
2	8.7	1.3	9.9	13.0
3	0.0	1.3	1.3	21.7
4	9.9	0.7	10.6	12.4
5	16.6	0.0	16.6	6.4

Analisando a Tabela é possível observar que a condição 5 é a que apresenta uma poupança menor comparativamente à tinta virgem. No entanto, tendo em conta que a eficiência de transferência da tinta ronda os 67%, esta é a única condição viável para aplicação em produção em série, uma vez que nunca será possível a obtenção de mais de 33% de tinta recolhida. Isto, pois, o objetivo da empresa, por motivos de viabilidade prática, consiste em aplicar toda a tinta recolhida ao longo da produção, e não apenas em referências específicas. Assim, a condição 5 foi selecionada para a validação da tinta numa peça de produção em série. Com o propósito de facilitar os cálculos, um valor aproximado desta condição (A) foi definido e encontra-se representado na Tabela 10.

No entanto, a condição 5 apresenta uma percentagem de solventes mais baixa comparativamente à tinta virgem, dado que estes evaporaram totalmente na tinta recolhida. Assim, com o intuito de obter uma condição o mais semelhante possível à tinta virgem, foi estabelecida uma nova condição em que a percentagem de solvente da mistura é a mesma. Para tal, os 25% de tinta recolhida foram mantidos, e foi adicionado diluyente até que a mistura apresentasse uma percentagem de solventes de 35%. Este valor encontra-se na ficha de dados de segurança da tinta CYCON-UV-HighGloss 757-10, exibida no anexo 9, e representa o teor dos componentes orgânicos voláteis presentes na formulação. Esta condição (B) é ilustrada na Tabela 10, assim como os valores do custo total e da poupança relativamente à tinta virgem das duas condições.

Tabela 10. Condições definidas para a validação numa peça de produção em série

Amostra	Tinta recolhida (%)	Tinta virgem (%)	Diluyente (%)	Custo total (€)	Poupança (€)
A	25,00	75,00	–	17,20	5,73
B	25,00	61,00	14,00	14,70	8,23

Capítulo 4 – Estudos preliminares: Composição da mistura

Importa salientar que o tratamento deste resíduo implica um custo de 145 € por tonelada (49.3 € por semana), com o acréscimo de uma taxa de gestão de resíduos sujeita a variações anuais. Este valor é ilustrado na Tabela 11, em cada ano. Neste sentido, quanto maior for a capacidade da empresa de recuperar e reutilizar tinta, maiores serão os seus ganhos financeiros.

Tabela 11. Valor da TGR a cobrar desde 2015 até 2025 [43]

Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Valor da TGR (€/ton resíduos)	5,5	6,6	7,7	8,8	9,9	11	22	22	25	30	35

Apesar deste valor não ser economizado todas as semanas, uma vez que não foi realizado um estudo relativo à quantidade de ciclos que a tinta recolhida pode ser reincorporada no sistema de pintura sem que se verifique a perda das suas propriedades, este representa uma poupança significativa para a empresa.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Este capítulo tem como objetivo a validação do processo de pintura, com as misturas selecionadas no capítulo anterior, numa peça de produção em série da empresa. Com a finalidade de afinar o processo, as variáveis operatórias com influência no acabamento superficial da peça serão ajustadas de modo a obter um filme de tinta que cumpra os requisitos exigidos. É de referir que, tal como no capítulo anterior, apesar deste estudo ter sido realizado de forma sequencial, os resultados são apresentados em conjunto para facilitar a sua comparação.

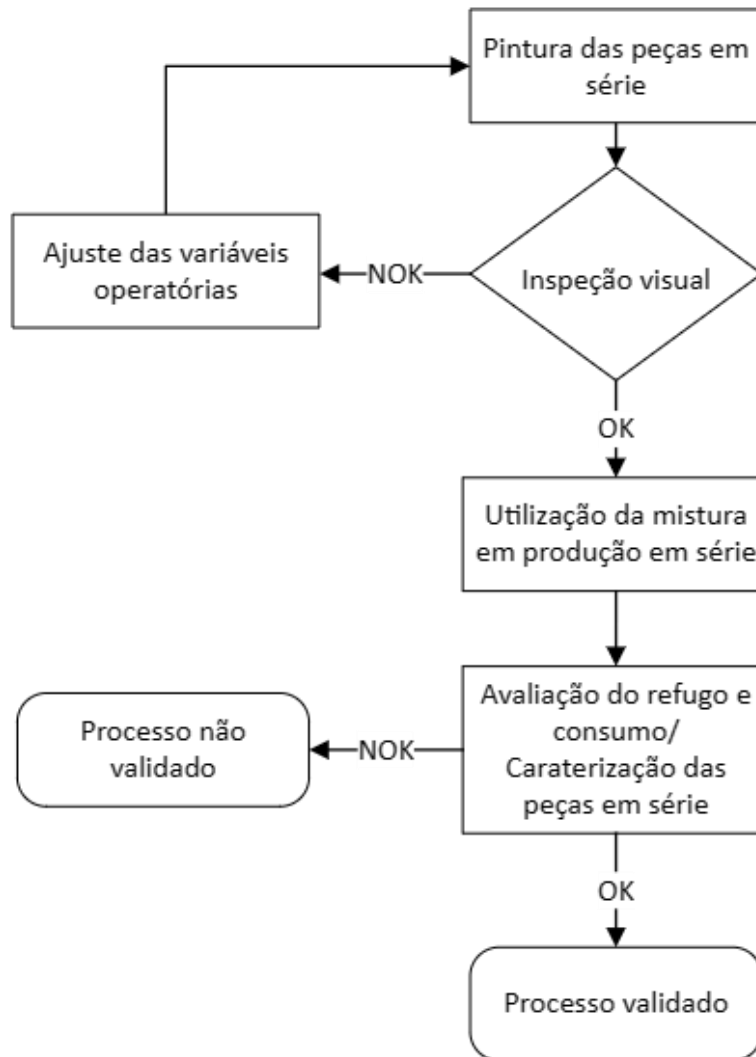


Figura 40. Fluxograma de atividades da aferição em série

5.1. Peça selecionada e defeitos caraterísticos

A peça da Fehst Componentes selecionada para a validação do processo de pintura com tinta reciclada, é a *Deckel 8"*. Trata-se de uma peça decorativa injetada na empresa exclusivamente para o interior do modelo automóvel *T-Roc* da *Volkswagen*, ilustrada na Figura 41, juntamente com o painel de instrumentos do veículo. É produzida em série e possui requisitos óticos exigentes, devido à sua posição

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

no interior do automóvel, sendo um dos elementos visuais com maior destaque. As principais dimensões desta peça são representadas na Figura 42.

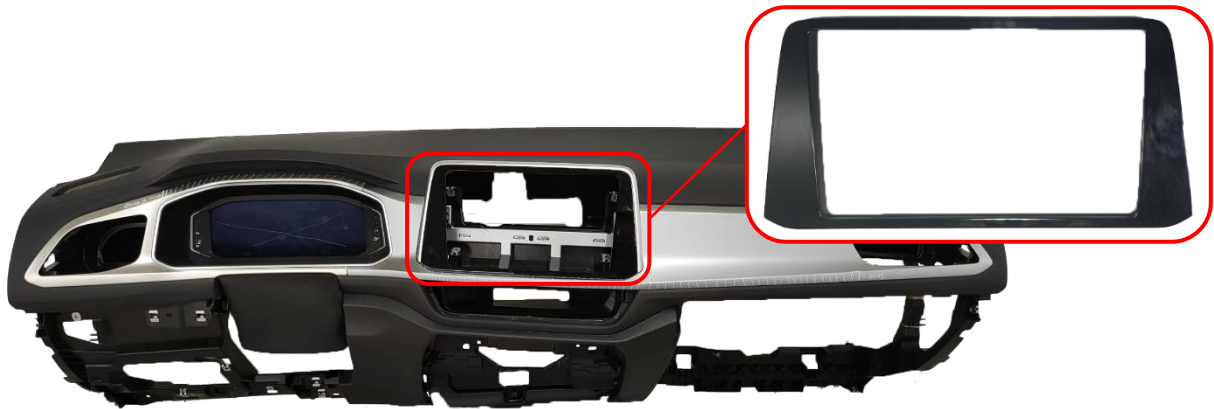


Figura 41. Peça *Deckel 8''* e tablier do modelo *Volkswagen T-Roc*

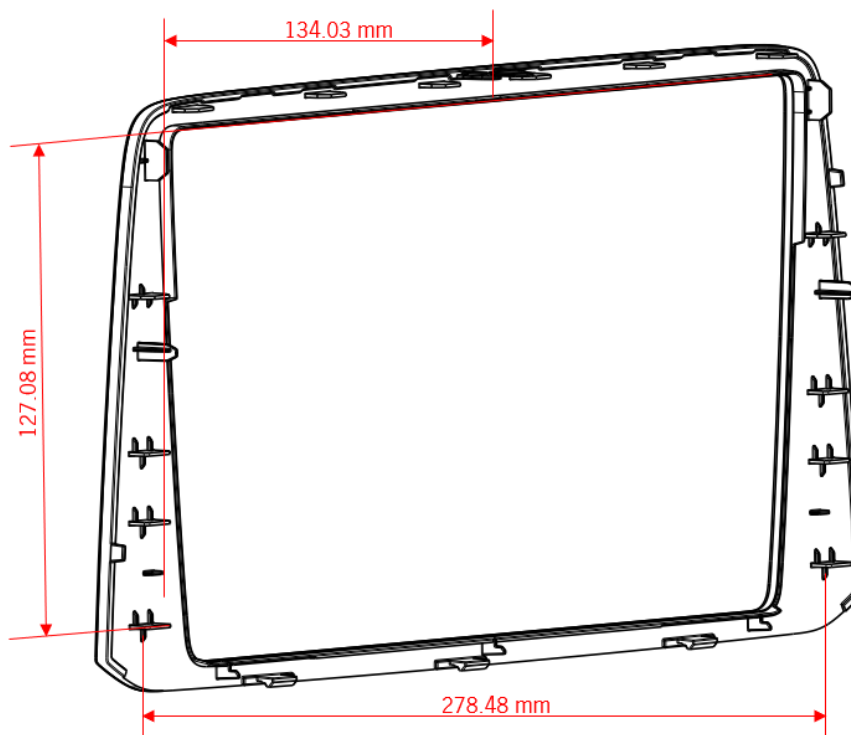


Figura 42. Principais dimensões da *Deckel 8''*

A Figura 43 demonstra o refugo, expresso em percentagem, da peça *Deckel 8''* da Fehst Componentes ao longo de um período de seis meses no ano de 2022.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

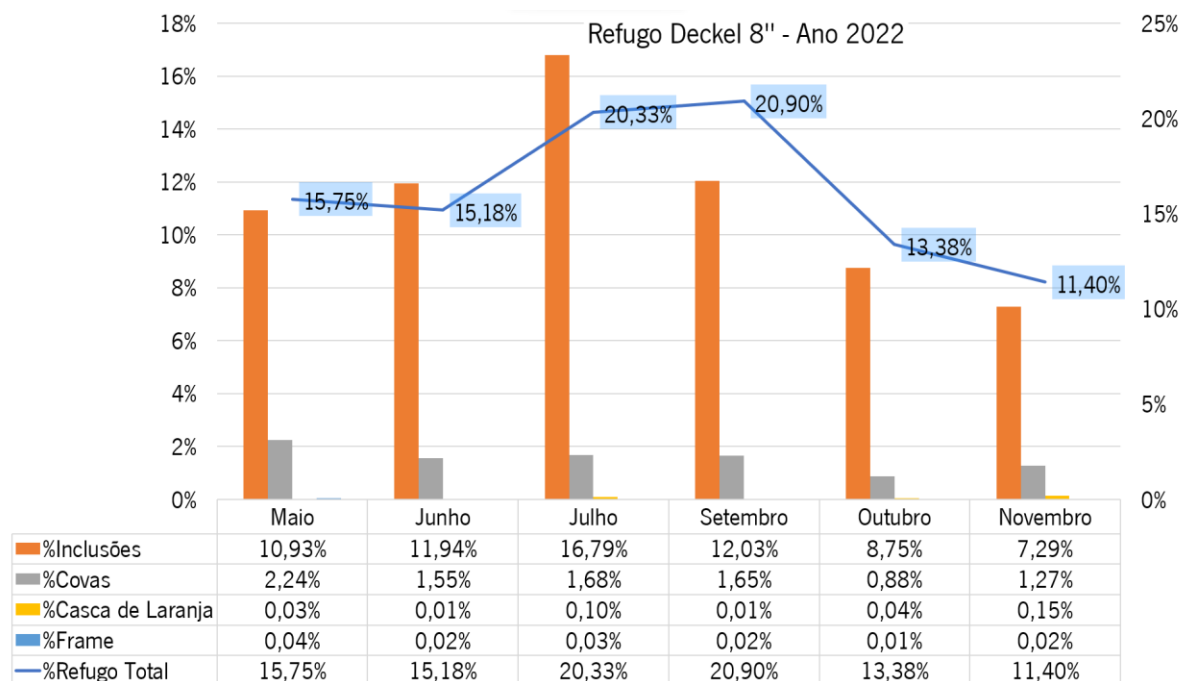


Figura 43. Refugio da *Deckel 8"* no período de 6 meses em 2022

Para além do refugio total, também se encontra representado o refugio dos principais defeitos desta peça, nomeadamente: inclusões, covas, casca de laranja e *frame*. Relativamente às inclusões e covas, estas representam não conformidades associadas ao processo de pintura. A *Deckel 8"* é uma peça plana com uma abertura central ampla e margens estreitas, o que dificulta a sua pintura, constituindo um problema no compromisso entre os tipos de defeito casca de laranja e *frame*.

5.2. Caracterização das misturas e pintura das peças em série

Tal como no capítulo 4, ambas as misturas passaram por um processo de filtração com o objetivo de eliminar os resíduos provenientes da tina de retenção da cabine de pintura. Com o propósito de compreender a influência da micragem utilizada no acabamento superficial da peça, optou-se por utilizar uma malha de 90 μm e outra de 60 μm para as misturas A e B, resultando num total de quatro condições distintas. A designação destas condições é representada na Tabela 12.

Tabela 12. Condições utilizadas no processo de validação da tinta reciclada

Condição	Malha filtrante 60 μm	Malha filtrante 90 μm
A	A60	A90
B	B60	B90

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

As misturas de tinta recolhida, tinta virgem e diluente preparadas foram caracterizadas através da medição do tempo de escoamento, através do método referido no capítulo 4.1. Os valores medidos para cada mistura encontram-se representados na Tabela 13. Nesta fase não foi feita a distinção das misturas filtradas com a malha de 60 μm e 90 μm , uma vez que os resultados de tempo de escoamento foram os mesmos em ambas. Como seria de esperar, a condição B apresentou o mesmo valor de tempo de escoamento que a tinta virgem, uma vez que ambas as formulações possuem o mesmo teor de componentes orgânicos voláteis.

Tabela 13. Percentagem dos componentes das formulações A e B e respetivo tempo de escoamento

Amostra	Tinta recolhida (%)	Tinta virgem (%)	Diluente (%)	Tempo de escoamento (s)
A	25.00	75.00	—	16
B	25.00	61.00	14.00	13

Inicialmente, procedeu-se à pesagem das latas correspondentes a cada uma das quatro condições, para posteriormente ser estimado o consumo de tinta. Com o intuito de avaliar a qualidade da aparência das peças em termos de nivelamento de tinta, cada condição foi carregada no sistema e procedeu-se à pintura de um tabuleiro com peças *Deckel 8"*. Neste processo, aplicou-se a ficha técnica da peça, representada na Tabela 2, no capítulo 4.3. Caso o aspeto da superfície não fosse idêntico ao modelo padrão de uma peça pintada com tinta virgem, seria necessário o ajuste das variáveis operatórias e novamente, a aplicação da mistura nas peças com a ficha técnica definida. Este procedimento foi repetido até à obtenção do acabamento superficial desejado. De seguida, para cada condição, foi pintada uma produção completa, com as variáveis definidas e com os operadores a inspecionar as peças e a separá-las em peças conformes e não conformes, consoante o tipo de defeito. Este procedimento permitiu simular o processo normal de produção, de modo a avaliar e comparar o refugo. Nesta etapa de produção, foram pintados 14 tabuleiros com peças *Deckel 8"*, cuja distribuição está ilustrada na Figura 44. Adicionalmente, dado que as peças não eram compatíveis com o equipamento utilizado nos testes de abrasão, também foi pintado um tabuleiro com placas de ensaio, tal como no capítulo 4.3., onde foram colocadas as chapas metálicas utilizadas no processo de medição de espessura.

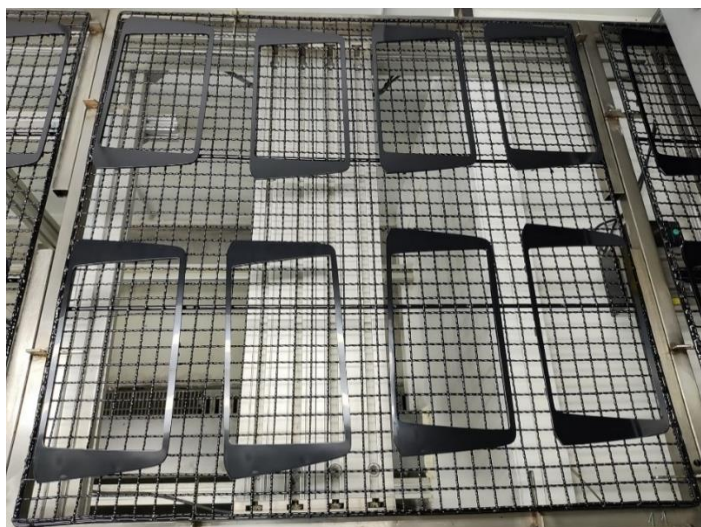


Figura 44. Disposição das peças *Deckel 8''* no tabuleiro

Após a pintura, as latas correspondentes a cada condição foram pesadas novamente e calculou-se o consumo de tinta através da fórmula representada na seguinte equação:

$$\text{Consumo de tinta} = \frac{\text{Peso da tinta (kg)}}{\text{N}^\circ \text{ de tabuleiros pintados}} \quad \text{(Eq.1)}$$

5.3. Ajuste das variáveis operatórias

Numa primeira fase, foram selecionadas as variáveis operatórias com maior influência no nivelamento da tinta, de modo a obter um filme que apresentasse um bom compromisso entre os defeitos casca de laranja e *frame*. Neste sentido, foram efetuados ajustes apenas na pressão de material, pressão do leque e pressão de atomização. A Tabela 14 mostra os diferentes ajustes que foram efetuados para as condições A60 e A90 até à obtenção do acabamento superficial desejado.

Tabela 14. Ajuste das variáveis operatórias do processo de pintura para as condições A60 e A90

Ajuste	Variáveis operatórias			Defeitos	
	Pressão de Material (bar)	Pressão do Leque (bar)	Pressão de Atomização (bar)	<i>Frame</i>	Casca de laranja
1	1.8	1.1	1.8	NOK	NOK
2	1.8	1.5	3.0	OK	NOK
3	2.0	1.5	3.0	OK	NOK
4	2.1	1.5	3.0	OK	OK

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Inicialmente, o tabuleiro com as peças *Deckel8*” foi pintado com a ficha técnica da peça, caracterizado na Tabela como Ajuste 1. Com estas variáveis, o filme de tinta apresentou de forma bastante evidente os dois defeitos. Para corrigir estas não conformidades, procedeu-se ao Ajuste 2, aumentando a pressão de atomização de 1.8 para 3.0. Como mencionado no capítulo 2.4., sabe-se que pressões de atomização reduzidas resultam em partículas de dimensão superior, causando uma textura irregular do filme de tinta, conhecida como casca de laranja. Relativamente ao defeito *frame*, a pressão do leque foi aumentada de 1.1 para 1.5 no Ajuste 2. Esta medida teve como objetivo conferir um formato mais elíptico ao leque de tinta, distribuindo-a de forma mais uniforme, evitando que esta não permaneça tão concentrada na área da peça. Este fenómeno vai de encontro ao que foi dito no capítulo 2.4. Com este ajuste, apesar do *frame* ter reduzido significativamente, o filme de tinta ainda apresentava uma casca de laranja que não se encontrava dentro dos limites definidos pelo cliente. Deste modo, no Ajuste 3, a pressão de material foi alterada de 1.8 para 2.0. Uma vez que o aumento da pressão da tinta resulta numa dimensão inferior das partículas, e consequentemente, numa textura superficial mais uniforme, o filme apresentou um decréscimo significativo no defeito casca de laranja. Contudo, este ajuste não foi o suficiente para que a peça apresentasse o nivelamento da tinta adequado. Deste modo, no Ajuste 4, a pressão de material foi novamente aumentada para 2.1, obtendo assim o acabamento superficial desejado. O mesmo procedimento foi executado para as condições B60 e B90, sendo que os diversos ajustes efetuados encontram-se ilustrados na Tabela 15.

Tabela 15. Ajuste das variáveis operatórias do processo de pintura para as condições B60 e B90

Ajuste	Variáveis operatórias			Defeitos	
	Pressão de Material (bar)	Pressão do Leque (bar)	Pressão de Atomização (bar)	<i>Frame</i>	Casca de laranja
1	1.8	1.1	1.8	NOK	NOK
2	2.1	1.5	3.0	OK	OK

Numa primeira fase, o tabuleiro com as peças foi pintado com a ficha técnica da peça *Deckel 8*”, caracterizado na Tabela por Ajuste 1. Tal como nas condições A60 e A90, os defeitos casca de laranja e *frame* eram bastante evidentes. Assim, no Ajuste 2, foram aplicados os mesmos valores de pressões definidos no Ajuste 4 da Tabela 14. Com estes valores as peças pintadas com as condições B60 e B90 exibiram um acabamento superficial que se encontrava em conformidade com os requisitos estabelecidos pelo cliente, idêntico a uma peça padrão pintada com tinta virgem. Desta forma, não foi necessário a realização de mais ajustes.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

5.4. Avaliação do consumo e refugo da tinta

Através da fórmula representada na Equação 1, foi calculado o consumo de tinta para ambas as produções. Nesta fase não foi feita a distinção das misturas filtradas com a malha de 60 μm e 90 μm , uma vez que os consumos foram idênticos em ambas. O cálculo resultou nos seguintes valores:

- Consumo (Condição A) = 0.097 kg
- Consumo (Condição B) = 0.122 kg

Como seria de esperar, o consumo da produção em que foi aplicada a condição A foi inferior ao da condição B, uma vez que esta última apresenta uma viscosidade inferior. Este fenómeno ocorre, pois, tintas mais viscosas tendem a apresentar uma taxa de fluxo mais lenta, o que implica uma menor quantidade de tinta debitada pelas pistolas, resultando em consumos inferiores. A partir dos dados registados pelos operadores encarregues da inspeção das peças, procedeu-se ao cálculo do refugo das quatro produções, resultando nos seguintes valores:

- Refugo (Condição A90) = 72.32%
- Refugo (Condição B90) = 83.04%
- Refugo (Condição A60) = 48.21%
- Refugo (Condição B60) = 58.93%

Este valor foi bastante elevado nas condições filtradas com a malha de 90 μm , quando comparado aos índices de refugo apresentados na Figura 43, que variam de 11% a 21%. Deste modo, estas condições não se mostram viáveis para aplicação em produção normal. Por outro lado, ao empregar uma malha de 60 μm no processo de filtração, apesar do refugo permanecer relativamente elevado, observa-se uma diminuição do refugo na ordem dos 24% em ambas as condições. Esta redução sustenta a constatação de que a micragem da malha empregue no processo de filtração da tinta exerce um papel determinante na quantidade de inclusões presentes no filme de tinta. A Figura 45 e a Figura 46 representam, respetivamente, a quantidade dos defeitos encontrados na produção de peças pintadas com as condições A90 e B90 e as condições A60 e B60.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

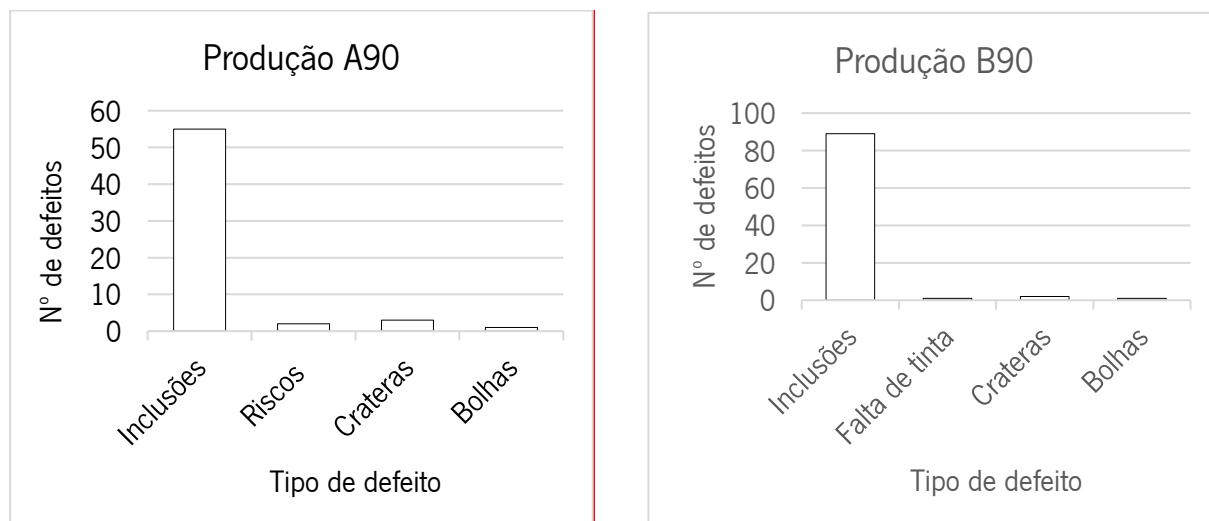


Figura 45. Quantidade de defeitos da produção com a condição A90 e B90

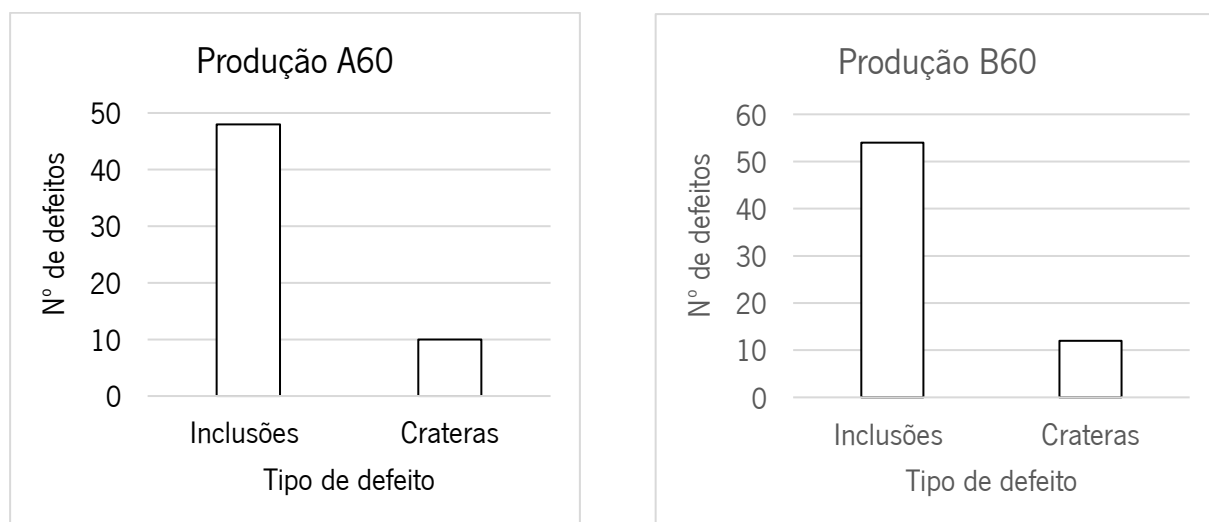


Figura 46. Quantidade de defeitos da produção com a condição A60 E B60

Analisando os gráficos da Produção A90 e Produção B90, é possível constatar que em ambas as condições estudadas, o refugo é maioritariamente atribuído à presença de inclusões no filme de tinta. Este fenómeno, por sua vez, poderá estar associado a um processo de filtração da tinta ineficiente, permitindo a passagem de partículas de sujidade indesejadas. Já nos gráficos da Produção A60 e B60, é possível concluir que, apesar da redução do refugo, este continuou a dever-se principalmente à presença de inclusões. Neste sentido, impõe-se a necessidade de otimizar o processo de filtração, visando a mitigação desta não conformidade.

5.5. Resultados dos testes de caracterização

Nesta etapa de validação da mistura numa peça de produção em série, foram realizados todos os testes especificados na norma TL 226, referidos no capítulo 3, para as peças nas quais foram

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

aplicadas as condições A e B em que foi utilizada a malha de 60 μm no processo de filtração. A medição de espessura e a inspeção visual não fazem parte da norma, no entanto serão efetuadas de modo a obter um maior controlo do processo. Apesar dos testes de *cross-cut* e resistência ao risco terem sido realizado em diversas peças, apenas é apresentada uma imagem de cada ensaio, dado que os resultados foram idênticos.

5.5.1. Medição de espessura

Os valores de espessura medidos em cada amostra dos dois ensaios, juntamente com a respetiva média e desvio padrão, são apresentados na Tabela 16. A tinta recolhida é representada por TR, a tinta virgem por TV, e o diluente por D Para uma melhor comparação dos valores obtidos, a Figura 47 mostra esses dados num gráfico, assim como os valores de tempo de escoamento da respetiva condição.

Tabela 16. Espessura medida nas amostras A60 e B60 com o *Elcometer* e respetiva média e desvio padrão

Ensaio	Composição	Espessura (μm)					Média e desvio padrão (μm)
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	
A60	25% TR + 75% D	32.3	33.2	33.8	33.3	33.7	33.26 \pm 0.51
B60	25% TR + 61% TV. + 14% D	28.3	28.7	28.5	29.6	28.1	28.66 \pm 0.53

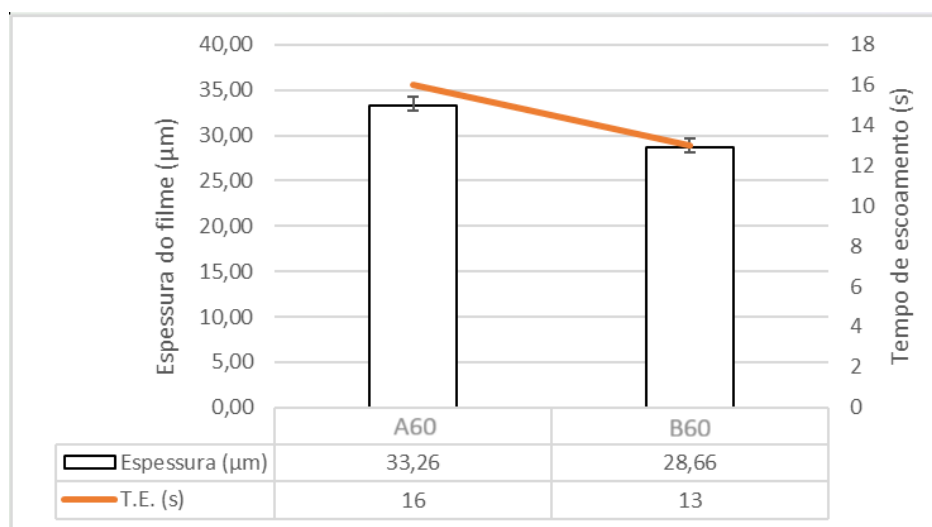


Figura 47. Relação entre a espessura do filme e o tempo de escoamento das misturas A60 e B60


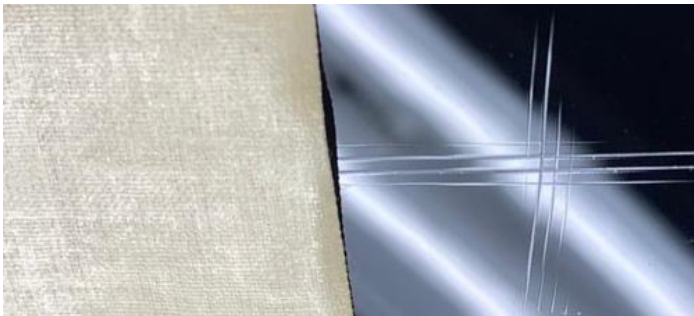
Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Analisando os valores medidos, é possível constatar que a condição A60 exibiu uma espessura superior à condição B60, uma vez que esta última apresenta um valor de tempo de escoamento inferior. Este fenómeno está em consonância com o que foi abordado no capítulo 2.4., no qual se referiu que, para valores de viscosidade reduzidos a tinta tende a espalhar-se mais facilmente sobre a superfície da peça, resultando num filme mais fino. Para além disso, estes valores de espessura permanecem dentro dos limites estabelecidos pelos técnicos da empresa, situando-se entre o valor mínimo de 18 μm e o valor máximo de 38 μm .

5.5.2. *Cross-cut*

Na Tabela 17 é representado o nível (Gt) das duas condições, juntamente com a respetiva imagem da aparência da superfície das peças. À esquerda de cada imagem é retratada a fita adesiva empregue no ensaio, enquanto à direita é mostrada a superfície da peça após o corte ser efetuado. O realce em branco visível à direita da imagem é uma representação da iluminação utilizada para uma melhor visualização do corte. Analisando os resultados, é possível concluir que ambas as amostras passaram no teste, uma vez que o nível Gt0 indica uma adesão perfeita entre o substrato e o filme de tinta.

Tabela 17. Resultados do teste *cross-cut* para os ensaios A60 e B60



Ensaio	Aparência	Nível (Gt)	Resultado
A60		Gt0	OK
B60		Gt0	OK

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

5.5.3. Resistência ao risco

A aparência e os resultados dos ensaios de resistência ao risco das duas condições são representados na Tabela 18. O realce em branco visível na imagem é uma representação da iluminação utilizada para uma visualização mais nítida do risco. Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que ambas as amostras cumpriram as especificações da norma. Apesar do risco causado pela caneta ser visível, não houve remoção da tinta na superfície da peça.

Tabela 18. Resultados do teste de resistência ao risco para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Aparência	Resultado
A60		OK
B60		OK

5.5.4. Hidrólise

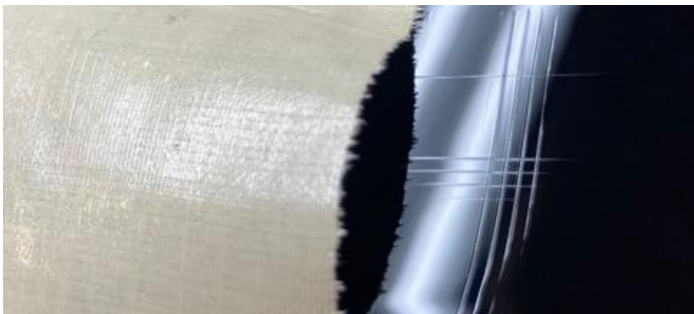

No teste de hidrólise, após as peças terem sido retiradas da câmara climática, não ocorreu alteração de aparência ou propriedades táteis na sua superfície.

Cross-cut

Na Tabela 19 é apresentado o resultado dos ensaios de *cross-cut* após hidrólise, juntamente com o nível (Gt) correspondente. Após a análise das imagens, conclui-se que os filmes de tinta das amostras A60 e B60 apresentaram uma adesão excelente ao substrato, quando sujeitos a condições extremas de temperatura e humidade, uma vez que obtiveram um nível de Gt0 em ambas as condições.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Tabela 19. Resultados do teste *cross-cut* após hidrólise para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Aparência	Nível (Gt)	Resultado
A60		Gt0	OK
B60		Gt0	OK

Resistência ao risco

Os resultados dos ensaios de resistência ao risco após hidrólise são ilustrados na Tabela 20, juntamente com a aparência do filme de tinta. Analisando os resultados, o teste de resistência ao risco apresentou resultados OK em ambas as condições, uma vez que não houve remoção de tinta.

Tabela 20. Resultados do teste de resistência ao risco após hidrólise para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Aparência	Resultado
A60		OK

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

B60



OK


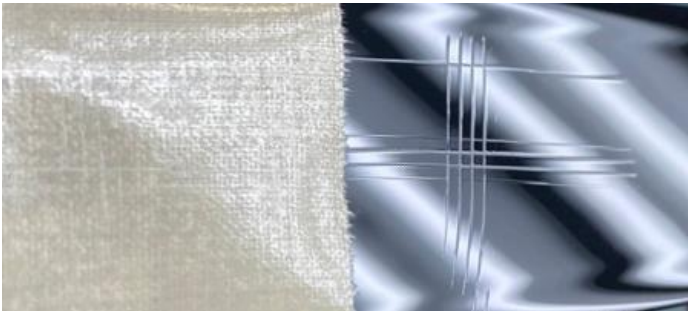
5.5.5 Estabilidade térmica

Tal como no teste de hidrólise, as peças pintadas com as condições A60 e B60 não exibiram alteração de aparência ou propriedades táteis no teste de estabilidade térmica.

Cross-cut

Na Tabela 21 é ilustrado o resultado dos ensaios de *cross-cut* após o teste de estabilidade térmica, assim como o respetivo nível (Gt).

Tabela 21. Resultados do teste de *cross-cut* após estabilidade térmica para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Aparência	Nível (Gt)	Resultado
A60		Gt0	OK
B60		Gt0	OK



Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Após a análise das imagens referentes aos resultados deste teste, é possível concluir que os filmes de tinta de ambas as amostras apresentaram uma excelente adesão ao substrato (nível Gt0), quando sujeitos a condições extremas de temperatura.

Resistência ao risco

Na Tabela 22 são ilustrados os resultados dos ensaios de resistência ao risco após o teste de estabilidade térmica.

Tabela 22. Resultados do teste de resistência ao risco após estabilidade térmica para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Aparência	Resultado
A60		OK
B60		OK

Analisando a tabela, a capacidade de resistência ao risco em ambos os ensaios manteve-se após a exposição das peças a condições de temperatura extremas.

5.5.6. Resistência a ciclo ambiental

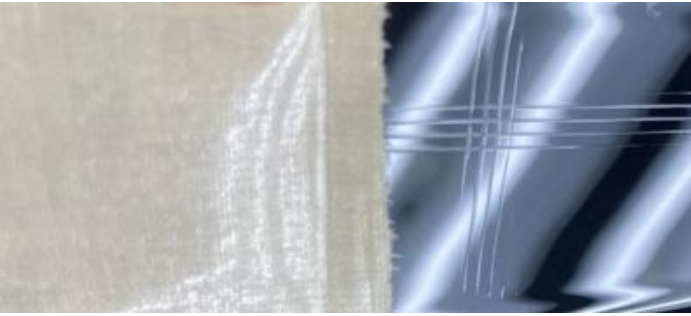
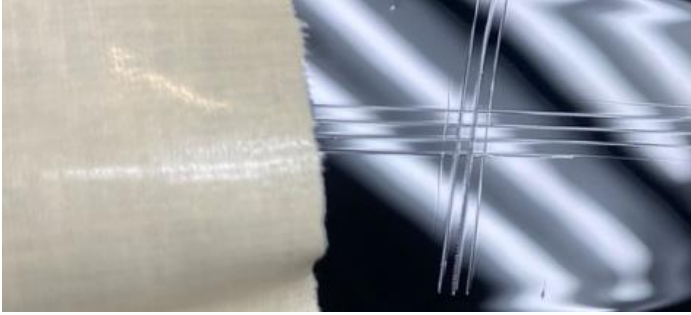
As peças submetidas ao teste de resistência a ciclo ambiental não apresentaram alteração de aparência ou propriedades táteis.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Cross-cut

Na Tabela 23 é ilustrado o resultado dos ensaios de *cross-cut* após o teste de resistência a ciclo ambiental, assim como o respectivo nível (Gt).

Tabela 23. Resultados do teste de *cross-cut* após resistência a ciclo ambiental para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Aparência	Nível (Gt)	Resultado
A60		Gt0	OK
B60		Gt0	OK



Analisando as imagens referentes aos resultados deste teste, conclui-se que após as peças terem sido submetidas a ciclos de temperatura, ambas as amostras apresentaram um nível de adesão Gt0.

Resistência ao risco

Na Tabela 24 são ilustrados os resultados dos ensaios de resistência ao risco após o teste de resistência a ciclo ambiental. Dado que não houve remoção de tinta em nenhum dos ensaios, é possível afirmar que ambos cumpriram as especificações da norma.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Tabela 24. Resultados do teste de resistência ao risco após resistência a ciclo ambiental para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Aparência	Resultado
A60		OK
B60		OK

5.5.7. Resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão

A Tabela 25 mostra os resultados do teste de abrasão das duas condições para as diferentes condições definidas, assim como o respetivo grau. Esta classificação foi atribuída de acordo com a placa de referência ilustrada no capítulo 3.6. Analisando a Tabela, é possível aferir que as peças pintadas com as formulações A60 e B60 passaram com distinção no teste de abrasão. Estas obtiveram uma classificação de Grau 1 em todas as condições testadas, dado que as peças não apresentavam nenhuma alteração visível na superfície pintada, sendo o máximo aceite na indústria automóvel o Grau 2 para ensaios de 2000 *strokes* e o Grau 1 para ensaios de 100/10 *strokes*.

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Tabela 25. Resultados do teste de resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Condições	Classificação	Resultado
A60	100 <i>strokes</i> , tecido seco	Grau 1	OK
	100 <i>strokes</i> , água destilada	Grau 1	OK
	2000 <i>strokes</i> , tecido seco	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , detergente lava-loiça	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , detergente limpa-vidros	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , gasolina/gasóleo	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , álcool	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , suor artificial A	Grau 1	OK
B60	10 <i>strokes</i> , suor artificial B	Grau 1	OK
	100 <i>strokes</i> , tecido seco	Grau 1	OK
	100 <i>strokes</i> , água destilada	Grau 1	OK
	2000 <i>strokes</i> , tecido seco	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , detergente lava-loiça	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , detergente limpa-vidros	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , gasolina/gasóleo	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , álcool	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , suor artificial A	Grau 1	OK
	10 <i>strokes</i> , suor artificial B	Grau 1	OK

5.5.8. Teste da gota

Os resultados do teste da gota para os diferentes produtos químicos utilizados são representados na Tabela 26.

Tabela 26. Resultados do teste da gota para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Produto químico	Resultado
A60	Detergente lava-loiça	OK
	Detergente limpa-vidros	OK
	Gasolina/Gasóleo	OK
	Álcool	OK
	Solução de suor artificial A	OK
	Solução de suor artificial B	OK
B60	Detergente lava-loiça	OK
	Detergente limpa-vidros	OK
	Gasolina/Gasóleo	OK
	Álcool	OK
	Solução de suor artificial A	OK
	Solução de suor artificial B	OK

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

Dado que não ocorreu alteração de aparência ou propriedades táteis na superfície pintada, é possível afirmar que o filme de tinta de ambos os ensaios, apresentou uma boa capacidade de resistência à degradação causada pela exposição a produtos químicos, cumprindo assim as especificações da norma.



5.5.9. Resistência a cremes

Os filmes de tinta de ambos os ensaios não apresentaram alteração de aparência ou propriedades táteis após terem sido sujeitos às condições impostas pela norma no teste de resistência a cremes.

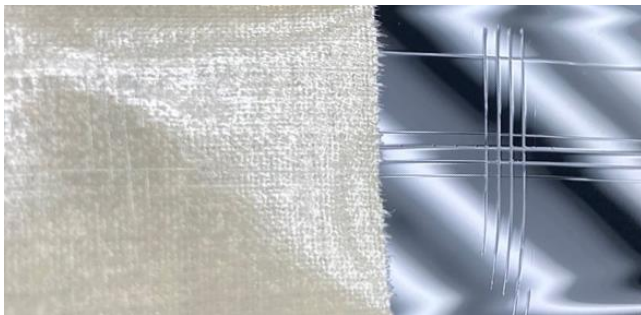

Cross-cut

Na Tabela 27 são ilustrados os resultados do teste de *cross-cut*, assim como o respectivo nível (Gt), após o teste de resistência ao creme de mãos e protetor solar. Após analisar as imagens relativas aos resultados deste teste, é possível afirmar que os filmes de tinta do ensaio A60 e B60 apresentaram uma adesão excelente ao substrato (nível Gt0), posteriormente a terem sido sujeitas à aplicação do creme de mãos e protetor solar e às condições de temperatura da camara climática.

Tabela 27. Resultados do teste *cross-cut* após resistência a cremes para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Creme	Aparência	Nível (Gt)	Resultado
A60	Creme das mãos		Gt0	OK
B60	Creme das mãos		Gt0	OK


Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

A60	Protetor solar		Gt0	OK
B60	Protetor solar		Gt0	OK

Resistência ao risco

Na Tabela 28 é apresentado o resultado do teste de resistência ao risco para ambos os ensaios, após o teste de resistência a cremes. Assim como os resultados obtidos no teste de *cross-cut* após hidrólise, o teste de resistência ao risco apresentou bons resultados em todas as condições testadas, após as peças com os cremes aplicados terem sido expostas às condições de temperatura impostas pela norma.

Tabela 28. Resultados do teste de resistência ao risco após resistência a cremes para os ensaios A60 e B60

Ensaio	Creme	Aparência	Resultado
A60	Creme das mãos		OK

Capítulo 5– Aferição em série: Validação da mistura selecionada

B60

Creme
das
mãos



OK

A60

Protetor
solar



OK

B60

Protetor
solar



OK

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Neste capítulo, é fornecida uma descrição geral do trabalho realizado ao longo da dissertação em consonância com os objetivos delineados no Capítulo 1. Além disso, serão apresentadas recomendações para trabalhos futuros, com o objetivo de dar continuidade ao estudo realizado neste projeto.

Conclusão

A realização deste estudo teve como propósito avaliar a viabilidade de reaproveitamento dos resíduos de tinta gerados no processo de pintura, com o intuito de incorporar um modelo de economia circular no ciclo de vida das tintas. Para atingir este objetivo, este projeto foi dividido em duas etapas principais.

Na primeira etapa, intitulada “Estudos preliminares: Composição da mistura”, procedeu-se à avaliação e otimização da percentagem de diluente e/ou tinta virgem a ser adicionada à tinta recolhida. Neste contexto, foram tidos em conta os aspetos ambientais e económicos, assegurando simultaneamente a conformidade com os requisitos delineados pelo cliente. Inicialmente, mediu-se o tempo de escoamento da tinta recolhida por meio de um copo metálico, o que confirmou um valor do mesmo extremamente elevado. Consequentemente, foi necessário a adição de diluente e/ou tinta virgem à tinta recolhida. Na medição de espessura do filme de tinta, as amostras não apresentaram desvios significativos em comparação às peças pintadas com tinta virgem. Relativamente aos resultados dos ensaios de *cross-cut*, concluiu-se que existe uma forte adesão entre as tintas e o substrato polimérico, uma vez que todas as amostras passaram no teste com o nível Gt0. Com base nos resultados obtidos no teste de resistência ao risco, é possível afirmar que as cinco amostras cumpriram as especificações do cliente, considerando que não ocorreu remoção da tinta. O teste de hidrólise não revelou nenhuma alteração na aparência, propriedades táteis, capacidade de adesão e resistência ao risco. Por fim, através da análise visual das peças, apenas as peças pintadas com a condição 3 apresentaram não conformidades (covas) que não se encontravam dentro dos limites estabelecidos pelo cliente. Este defeito pode ter surgido como consequência de uma viscosidade alta comparativamente à tinta virgem. Relativamente à seleção das amostras para aplicação em peças de produção em série, foi escolhida a amostra composta por 25% de tinta recolhida e 75% de tinta virgem. Esta formulação era a única condição viável para aplicação em produção em série, dada a restrição de não ser possível exceder os 33% de tinta recolhida. Para além desta, foi também estabelecida uma nova condição, na qual a percentagem de solvente da mistura equivale à percentagem de solvente da tinta virgem. A sua composição consiste em 25% de tinta recolhida, 61% de tinta virgem e 14% de diluente.

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Na segunda fase, denominada “Aferição em série: Validação da mistura selecionada”, foi validado o processo de pintura, com as misturas selecionadas, numa peça de produção em série da empresa. Para tal, foi necessário o ajuste das variáveis operatórias com maior impacto no acabamento superficial da peça. Nas produções em que foram aplicadas as condições filtradas com a malha de 90 μm , foi possível constatar que o refugo foi consideravelmente elevado, principalmente devido à presença de inclusões no filme de tinta. Com a adição de uma malha de micragem inferior (60 μm), no processo de filtração da tinta, registou-se uma redução do refugo de 24%. Esta tendência positiva valida a importância de considerar a micragem da malha como um fator crítico na otimização do processo de pintura com tinta reciclada. Os resultados dos testes de caracterização de medição de espessura, *cross-cut*, resistência ao risco e hidrólise, mostraram-se consistentes com os resultados obtidos nos estudos preliminares, atendendo a todos os requisitos estipulados. Para além disso, os resultados dos testes de estabilidade térmica e resistência a ciclo ambiental foram idênticos aos resultados do teste de hidrólise, não se verificando nenhuma alteração na aparência, propriedades táteis, capacidade de adesão e de resistência ao risco do filme de tinta. No teste de resistência química e ao comportamento em exposição à abrasão, as peças não manifestaram nenhuma alteração visível na superfície pintada, obtendo uma classificação de Grau 1 em todas as condições testadas, cumprindo, deste modo, os requisitos estabelecidos. No que diz respeito aos resultados do teste da gota, constatou-se que o filme de tinta nas condições A60 e B60 revelou uma boa capacidade de resistência à degradação causada pela exposição aos diversos produtos químicos. Esta constatação deve-se ao facto de que nenhuma alteração da sua aparência ou propriedades táteis foi observada na superfície pintada. Adicionalmente, o teste de resistência a cremes também produziu resultados positivos em ambas as condições testadas, considerando os cremes utilizados. Neste capítulo confirmou-se a complexidade na decisão entre as condições testadas e a utilização de tinta virgem. Embora as condições A60 e B60 proporcionam uma poupança significativa de 7,5€ e 11€ por quilograma de tinta, respetivamente, em relação à tinta virgem, é crucial ponderar esta decisão, tendo em conta o aumento do refugo associado a essas condições.

Em suma, é possível concluir que, mediante a metodologia definida, foi possível alcançar os resultados desejados. As formulações selecionadas nos estudos preliminares foram reintegradas com êxito no sistema de pintura e aplicadas numa peça de produção em série sem que ocorresse a degradação das propriedades da tinta virgem, as quais garantem o cumprimento dos requisitos de qualidade estabelecidos pelo cliente.

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Sugestões de trabalhos futuros:

Com o intuito de otimizar o processo de pintura monocura UV, são apresentadas as seguintes propostas:

- Realização de um estudo sobre o impacto do uso de malhas com diferentes micragens no processo de filtração da tinta, na quantidade de inclusões presentes no filme de tinta;
- Investigação dos ciclos de reaproveitamento da tinta: análise da quantidade de ciclos que a tinta recolhida pode ser reincorporada no sistema de pintura sem que ocorra a perda das suas propriedades;
- Análise dos métodos disponíveis para o reaproveitamento da tinta, visando a identificação e implementação das abordagens mais eficazes para garantir a sustentabilidade e a eficiência do processo.

Referências bibliográficas

- [1] Website Fehst. (6 de janeiro de 2022). Retirado de <https://www.fehstgroup.com/pt/>
- [2] J. Fouassier, J. Rabek, Radiation curing in polymer science and technology, terceira ed., Springer, Netherlands, 1993. ISBN 978-1851669299
- [3] S. Peter Pappas, Radiation curing: Science and Technology, primeira ed., Springer, New York, 1992. ISBN 978-0-306-43999-5
- [4] J. Coelho, Effect of exposure conditions on UV-curable coatings films performance, Tese de Doutorado, Braga, 2018.
- [5] R. Talbert, Paint Technology Handbook, primeira ed., CRC Press, Boca Raton, 2007. ISBN 978-1-57444-703-3
- [6] Polymer Database. UV-Curable Resins. (10 de janeiro de 2022). Retirado de: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/UV%20Curing%20Resins.html>
- [7] Reinhold. Schwalm, UV coatings : basics, recent developments and new applications. Elsevier, 2007.
- [8] M. R. Rodrigues, M. G. Neumann, Fotopolimerização: Princípios e Métodos, Instituto de Química de São Carlos. 13(4):276-286 (2003).
- [9] C. Ruiz, L. Machado, Influência Da Taxa de Dose e da Velocidade de Processo na Cura de Revestimentos por Radiação UV/EB, IPEN.
- [10] F. Duarte, “Adesivos e revestimentos”, 2017.
- [11] M. Kaur and A. K. Srivastava, Photopolymerization: A review, Journal of Macromolecular Science - Polymer Reviews. 42(4):481–512 (2002).
- [12] G. Odian, Principles of Polymerization, quarta ed., John Wiley & Son Inc, Staten Island New York, 2004. ISBN 9780471478751
- [13] Malcom P. Stevens, Polymer Chemistry: An Introduction, terceira ed., Oxford University Press, 1998. ISBN 978-0195124446
- [14] UVEB Technology. UV-Curable Coating Options for Interior Automotive Applications. (19 de janeiro de 2023). Retirado de: <https://uvebtech.com/articles/2023/uv-curable-coating-options-for-interior-automotive-applications/>
- [15] UVEB Technology. Viscosity Control of Spray Applied Coatings - Balancing Environmental Compliance and Performance. (19 de Janeiro de 2023). Retirado de: <https://uvebtech.com/articles/2019/viscosity-control-of-spray-applied-coatings-balancing-environmental-compliance-and-performance/>
- [16] Painting & Coating Industry. UV Coatings Improve Manufacturing Process, Sustainability Footprint and ROI for Mechanical Tube Manufacturers. (20 de Janeiro de 2023). Retirado de:

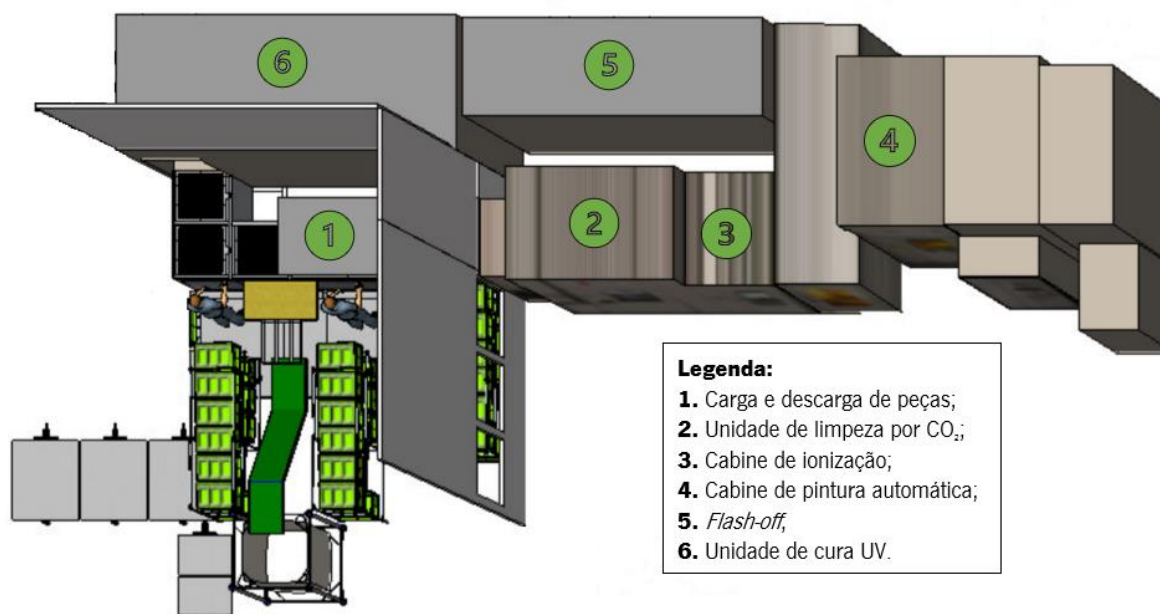
<https://www.pcimag.com/articles/108530-uv-coatings-improve-manufacturing-process-sustainability-footprint-and-roi-for-mechanical-tube-manufacturer>

- [17] Linde. CRYOCLEAN snow. (12 de janeiro de 2022). Retirado de: https://www.linde-gas.com/en/processes/cleaning_polishing_grinding/cryoclean_cleaning_solutions/cryoclean_snow/index.html
- [18] R. Sherman, D. Hirt, R. Vane, Surface cleaning with the carbon dioxide snow jet, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 12(4): 1876–1881(1994).
- [19] A. Goldschmidt, H.J. Streitberger, BASF handbook on basics of coating technology, terceira ed., Vincentz Network, Hannover Germany, 2007. ISBN 978-3-86630-903-6
- [20] A. H. Lefebvre, V. G. McDonnell, Atomization and Sprays Second Edition Atomization and Sprays, segunda ed., CRC Press, Boca Raton, 2017. ISBN 978-1-4987-3625-1
- [21] H. Liu, Science and Engineering of Droplets: fundamentals and applications, primeira ed., Noyes Publications, Norwich New York, 2000. ISBN 0-8155-1436-0
- [22] Spraygunshop, DeVilbiss PROLite Pressure TE40 High Efficiency Air Cap and Ring. (13 de janeiro de 2022). Retirado de: <https://www.spraygunshop.co.uk/product/gti-pro-lite-pressure-te40-high-efficiency-air-cap-and-ring/>
- [23] S. Poozesh, N. Akafuah, K. Saito, Effects of automotive paint spray technology on the paint transfer efficiency – a review, *Journal of Automobile Engineering*. 23(2):282–301 (2018).
- [24] Spray Finishing Store, Devilbiss Air Cap/Air Nozzle Selection Chart & Overview. (13 de janeiro de 2022). Retirado de: https://sprayfinishingstore.com/spray_gun/devilbiss-air-cap-and-air-nozzle-selection-chart/
- [25] X. Xie, Y. Wang, Research on distribution properties of coating film thickness from air spraying Gun-Based on numerical simulation, *Coatings*. 9(11):721 (2019).
- [26] Lumina, Structure and Use of Automatic Spray Guns. (13 de janeiro de 2022). Retirado de: <https://www.fusoseiki.co.jp/en/column/knowledge/223.html>
- [27] Y. Tan, M. Flynn, Experimental Evaluation of a Mathematical Model for Predicting Transfer Efficiency of a High Volume-Low Pressure Air Spray Gun, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*. 15(10):785-793 (2000).
- [28] RADTECH. GLOSSARY OF TERMS Terminology Used for Ultraviolet (UV) Curing Process Design and Measurement. (14 de março de 2023). Retirado de: <https://radtech.org/uv-glossary/>
- [29] DDU Enterprises, UV ABC's. (15 de março de 2023). Retirado de: <https://www.doctoruv.com/difference-between-uva-uvb-uvc-uvv>
- [30] Nandini Choudhury, Value Added Printing - With UV Ink Key Opportunities & Consideration, DIC India Limited (2016).
- [31] Y. H. Liu, H. Maruyama, S. Matsusaka, Effect of particle impact on surface cleaning using dry ice jet, *Aerosol Science and Technology*. 45(12):1519–1527 (2011).

- [32] Rhopoint Instruments. ISO 2431 and ASTM D5125 Viscosity Flow Cup. (4 de março de 2023). Retirado de: <https://www.rhopointamericas.com/product/iso-2431-and-astm-d5125-viscosity-flow-cup/>
- [33] N. K. Akafuah, S. Poozesh, A. Salaimah, G. Patrick, K. Lawler, K. Saito, Evolution of the automotive body coating process-A review, *Coatings*.6(2):24 (2016).
- [34] V. Fernandes, Estudo do efeito dos parâmetros de pintura na variação da espessura de revestimento em peças plásticas, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2019.
- [35] C. Gnecco, R. Mariano, F. Fernandes, Tratamento de superfície e pintura, Série manual de construção em aço, Rio de Janeiro, 2003. ISBN 85-89829-01-4
- [36] J. Carvalho, Definição de condições de pintura de peças para autorrádio, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2013.
- [37] M. W. Plesniak, P. E. Sojka, A. K. Singh-Purdue University, Transfer Efficiency for Airless Painting Systems, *Journal of Coatings Technology and Research*. 1(2): 137-145 (2004).
- [38] Helmut Fischer. Amplitude Sensitive Eddy Current. (24 de fevereiro de 2023) Retirado de: <https://www.helmut-fischer.com/measurement-technologies-in-use/amplitude-sensitive-eddy-current>
- [39] A. A. Tracton, Adhesion Testing, em: Arthur A. Tracton (Eds), *Coatings technology handbook*, terceira ed., Taylor & Francis Group, 2005. ISBN 978-1-4200-2732-7
- [40] ARALAB, Câmaras Climáticas e Ambientes Controlados. (24 de janeiro de 2023). Retirado de: <https://www.aralab.pt/>
- [41] ASTM. Standard Test Method for Determination of Abrasion and Smudge Resistance of Images Produced from Business Copy Products (Crockmeter Method). (23 de abril de 2023). Retirado de: <https://www.astm.org/f1319-94r00.html>
- [42] Special Chem. Chemical Resistance Coatings: Types and Standard Tests. (9 de março de 2023). Retirado de: <https://coatings.specialchem.com/coatings-properties/chemical-resistance>
- [43] Agência Portuguesa do Ambiente. Valor da TGR. (2 de maio de 2023). Retirado de: <https://apambiente.pt/residuos/valor-da-tgr>

Anexos

Anexo 1 – Layout da linha de pintura monocura UV *SPRIMAG*



Anexo 2 - Aspirador industrial KARCHER IVS 100/75 M Z22



Anexo 3 – Instrução de trabalho para medição de viscosidade da tinta



INSTRUÇÃO DE TRABALHO IT013.19.02



CARACTERÍSTICA ESPECIAL

SIM

NÃO

DESCRIÇÃO

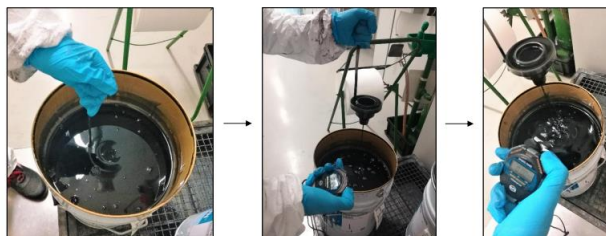
VISCOSIDADE



Medição da Viscosidade da Tinta

1	Ferramentas necessárias à medição:
	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosímetro DIN 53 211 Ø = 4mm Nº 11/366 • Cronómetro Nº 357 CE_IHM

2	Procedimento:
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mergulhar completamente o viscosímetro na lata de tinta; 2. De seguida, retirar o viscosímetro da lata, e, imediatamente após, ligar o cronómetro para começar a medir o tempo de escoamento da tinta pelo viscosímetro; 3. Quando a tinta escoar completamente pelo viscosímetro, parar o cronómetro e registar o tempo de escoamento. As seguintes imagens ilustram o procedimento.



Processo: Pintura
Revisão: 02
FM048.8

Data: 25/03/2021

Cliente: Vários
Descrição: Colocação da Descrição

Projeto: Vários

Pág. 1/1

Nº Cliente: Vários
Elaborado: Q. Silva

Nº FCL: Vários
Aprovado: N. Freitas

Anexos

Anexo 4 – Malha filtrante



Anexo 5 – Contaminações depositadas nos filtros



Anexo 6 – Instrução de Trabalho de utilização do aparelho de medição de espessura

FEHST		INSTRUÇÃO DE TRABALHO		Pág. 1 De: 1
N.º 082.08.01		DATA: 05-04-2016		
PROCESSO: PINTURA	CLIENTE: _____		PROJETO: _____	
DESIGNAÇÃO: UTILIZAÇÃO APARELHO DE MEDIÇÃO	N.º CLIENTE: _____		N.º FCL: _____	
CARACTERÍSTICA ESPECIAL		SIM <input checked="" type="checkbox"/>	NÃO <input type="checkbox"/>	DESCRIÇÃO ESPESSURA

Utilização do aparelho de medição de espessura ELCOMETER

Ligar o aparelho pressionando a tecla Laranja
 O aparelho indica no display o último valor medido e no canto superior direito indica o contador de medidas efetuadas.
 Esperar que o aparelho apite 2 vezes antes de efetuar qualquer medida.
 Efetuar a calibração do aparelho
 Para efetuar uma medida de espessura colocar a sonda na vertical da superfície a medir, encostando a parte móvel exterior da sonda na superfície e mantendo-a fixa até o aparelho indicar a medida efetuada (apito sonoro).
 O aparelho desliga-se automaticamente.

Procedimento para calibração

Calibração do Zero

- Pressione **BASE**
- Utilizando a placa de calibração fornecida (FERROUS ZERO PLATE) efetue várias leituras até o valor apresentado estar estável (sem variações, apresenta sempre o mesmo valor).
- Ajustar o valor medido para o valor desejado (ex. se o valor medido for 0,1 deveremos ajustar, através das teclas < e >, até ao valor de 0) e efetuar **ENTER**.

Calibração do valor 24,0 µm

- Pressione **CAL**
- Utilizando a película padrão com espessura de 24,7 µm, efetue várias leituras até o valor apresentado estar estável (sem variações).
- Ajustar o valor medido para o valor desejado (ex. se o valor medido for 24,9 deve-se ajustar, através das teclas < e >, até ao valor de 24,7) e efetuar **ENTER**.

Após este procedimento o aparelho está pronto a utilizar.


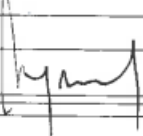
Verificação do estado da bateria:

- Pressionar **SETUP**
- Pressionar < ou > até aparecer no display **batt**, pressionar **ENTER**
- Se o valor indicado for inferior a 150, as baterias devem ser substituídas.

Lista de códigos de erro:

Erro	Causa	Ação a efetuar
E01	Calibração perdida	Efetuar nova calibração
E02	O erro da diferença do valor de CAL é demasiado grande ou demasiado pequeno	Calibrar CAL
E06	N.º de medidas superiores a 999	Deve-se pressionar CLEAR para limpar
E10	A memória está cheia	Carregar em DEL , selecionar com as setas o Batch 0 , e pressionar ENTER
E11	Não foram efetuadas nenhuma leituras antes de tentar base ou cal	Efetuar medidas
E15	A sonda não está ligada ou não responde	Verificar se sonda está corretamente inserida.
E18	Erro de calibração	Repetir o processo de calibração







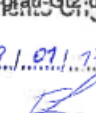
Existem outros códigos de erro que deverão ser comunicados à Eng.º de Processo

Elaborado:	Aprovado:
Departamento: Eng. Processo	Departamento: Dir. Produção
Nome: Ana Moreira Ass. 	Nome: Normando Freitas Ass. 

FM048.5


Anexos

Anexo 7 – Instrução de trabalho do teste de aderência

FEHST		INSTRUÇÃO DE CONTROLO	
N.º IC001.17.00		DATA: 19-01-2017	
PROCESSO: VÁRIOS	CLIENTE: VÁRIOS		
DESIGNAÇÃO: TESTE DE ADERÊNCIA	PROJETO: VÁRIOS		
N.º CLIENTE: VÁRIOS	N.º FCL:		
CARACTERÍSTICA ESPECIAL	SIM <input checked="" type="checkbox"/>	NÃO <input type="checkbox"/>	DESCRIÇÃO ADERÊNCIA
<p>1. Objetivo: Definição do procedimento para execução de teste de aderência.</p> <p>2. Periodicidade: Este teste deverá ser executado com a periodicidade definida nos planos de controlo e planos de ensaio.</p> <p>3. Campo de aplicação: Peças pintadas, cromadas, com tampografia e serigrafia, que apresentem área suficiente e geometria adequada que possibilite a execução do teste.</p> <p>4. Normas de referência: DIN EN ISO 2409; TL 226; TL528</p> <p>5. Metodologia:</p> <p>5.1. Corte reticular – Aplicável a peças pintadas, com tampografia e serigrafia</p> <p>a) A aderência é verificada com o auxílio de um aparelho de corte múltiplo (ELCOMETER Cross Hatch Cutter). Os cortes devem penetrar até ao substrato e a área onde se marcou esta grelha deverá ser limpa com escova adequada retirando todos os resíduos de tinta.</p> <p>b) Em seguida coloca-se uma fita (Tesa Tape 4657 ou equivalente) ref. FCL 66682000, sem se formarem bolhas de ar sobre a zona com os cortes.</p> <p>c) Retirar a fita com um movimento vigoroso e rápido no sentido vertical.</p> <p>d) A avaliação é feita por observação visual após remoção da fita. O resultado final será atribuído de acordo com a seguinte escala Gt :</p>			
GRAU	DESCRIÇÃO	IMAGEM	
Gt0	Os bordos de corte apresentam-se completamente lisos, a pintura não saltou em nenhum quadrado parcial.		
Gt1	Nos pontos de intersecção das linhas de corte, saltam pequenas lascas de pintura. A área que saltou é aproximadamente 5% dos quadrados parciais.		
Gt2	A pintura saltou ao longo dos bordos de corte e/ou nos pontos de intersecção das linhas de corte. A área que saltou é aproximadamente 15% dos quadrados parciais.		
Gt3	A pintura saltou total ou parcialmente em tiras largas, ao longo dos bordos de corte e/ou saltou total ou parcialmente em diversos quadrados parciais. A área que saltou é aproximadamente 35% dos quadrados parciais.		
Gt4	A pintura saltou total ou parcialmente em tiras largas ao longo dos bordos de corte e/ou saltou total ou parcialmente em diversos quadrados parciais. A área que saltou é aproximadamente 65% dos quadrados parciais.		
Gt5	A área que saltou é mais que 65% dos quadrados parciais.		
<p>e) Avaliação: Para se considerar que a aderência está conforme, não se pode ultrapassar o grau Gt2 da tabela de cortes de grelha. O resultado terá de ser registado no formulário correspondente.</p>			
		<p>FEHST - Comon... Documents Original Data: 19.01.17 Pábrica: </p>	

Anexo 8 – Instrução de trabalho do ensaio de resistência ao risco

INTERNO

FEHST		INSTRUÇÃO DE CONTROLO		
N.º IC009.18.00		DATA: 09-03-2018		
PROCESSO:	Pintura	CLIENTE:	Vários	
DESIGNAÇÃO:	ENSAIO DA RESISTÊNCIA AO RISCO	PROJETO:	Vários	
N.º CLIENTE:	Vários	N.º FCL:	VÁRIOS	
CARATERÍSTICA ESPECIAL	SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/>	DESCRIÇÃO	RESISTÊNCIA AO RISCO	
<p>Objetivo: Descrição do método de utilização do teste de resistência.</p> <p>Campo de aplicação: Requisito aplicável nas peças com acabamento de superfície.</p> <p>Norma de referência: TL 226</p> <p>Método:</p> <p>1 - Verificar qual a força especificada pelo Cliente para a execução do teste (Desenho, Norma, etc.)</p> <p>2 - Ajustar (aplicar) a mola em função da força especificada.</p> <p>3 - Colocar o aparelho verticalmente com a ponta sobre a área que se quer controlar, faz-se um risco aproximadamente com 5-10mm de comprimento e velocidade de 10mm/s (ver figura).</p> <p>4 - Avaliação: A superfície testada pode ficar com marca de risco mas sem remover a tinta. Admite-se apenas um risco visível causado pela força exercida na superfície.</p>				
				
Revisão	Data	Descrição	Elaborado	Aprovado
0	09/03/2018	Elaboração Instrução de Controlo para execução do teste de resistência	M. Oliveira	E. Lourenço

Anexos

Anexo 9 – Teor dos *VOC's* da tinta CYCON-UV-HighGloss 757-10 (Ficha de Segurança)

Componentes orgânicos voláteis. : Directiva 2010/75/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de Novembro de 2010 , relativa às emissões industriais (prevenção e controlo integrados da poluição)
Teor dos componentes orgânicos voláteis: 35,43 %, 349 g/l
Conteúdo VOC excluindo a água