

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CAROLINE CARLOS CARVALHO

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA, TEMPO DE CURA E ESPESSURA DE
CAMADA DO CLEARCOAT NO PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA

BELO HORIZONTE

2020

CAROLINE CARLOS CARVALHO

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA, TEMPO DE CURA E ESPESSURA DE
CAMADA DO CLEARCOAT NO PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de
Materiais

Orientador: Marcello Rosa Dumont

BELO HORIZONTE

2020

CAROLINE CARLOS CARVALHO

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA, TEMPO DE CURA E ESPESSURA DE
CAMADA DO CLEARCOAT NO PROCESSO DE PINTURA AUTOMOTIVA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de
Materiais

Aprovado em: 01/12/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont – Orientador

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Dr. Wellington Lopes

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer, primeiramente, a minha família e meu namorado pelo apoio, incentivo e compreensão.

Aos meus amigos, por me encorajarem e incentivarem a seguir meus sonhos.

Ao Prof. Marcello, pela orientação e compartilhamento de conhecimento.

Aos meus professores, pelos ensinamentos e dedicação ao que fazem.

E principalmente, aos meus queridos amigos Augusto, Edimar, Nayara e toda a equipe do Laboratório de Materiais, que tiveram extrema importância para a execução e conclusão desse trabalho. Sem vocês isso não seria possível. Muito Obrigada!!

RESUMO

Em uma montadora de veículos, uma das etapas é o revestimento da carroceria. Ela consiste em diferentes camadas de tintas que proporcionarão diferentes tipos de propriedades, como aderência do revestimento, elasticidade, resistência a batida de pedras, propriedades visuais e dureza do material. Uma das camadas do revestimento é o *topcoat*, composto pelo *basecoat*, responsável pela cor e *clearcoat*, responsável pela proteção, brilho, resistência a riscos e resistência aos raios UV. Esses revestimentos devem ser curados em uma determinada temperatura e tempo. Alterações na cura e na espessura de tinta podem promover mudança nas propriedades da tinta. Esse trabalho apresenta um estudo com uso de um Planejamento de Experimento – DOE – por Análise de Experimento Fatorial no qual foi utilizado três fatores, sendo temperatura de cura do *topcoat* de 120 °C a 150 °C, tempo de cura de 15 minutos a 30 minutos e espessura da camada de verniz de 3 à 6 demãos. No total, foram construídas nove condições de aplicações e todas foram testadas para saber qual a influência desses fatores nas propriedades do revestimento. O nível de confiança utilizado foi de 95%. Os resultados obtidos mostraram que a variação na espessura da camada de verniz influenciou na dureza Persoz e na resistência ao impacto de pedras ao material. Nos demais ensaios, os fatores não foram suficientes para influenciar nas propriedades do revestimento, como aderência à novo, aderência após imersão em água, aderência após exposição a umidade, cor, brilho, resistência ao envelhecimento acelerado, resistência ao embutimento e ao estiramento, apesar de algumas variações encontradas.

Palavras-chave: revestimento, Planejamento de Experimento, cura, temperatura, tempo, espessura.

ABSTRACT

In a vehicle manufacturer, one of the steps is the lining of the body. It consists of different layers of paints that will provide different types of properties, such as coating adhesion, elasticity, resistance to stone striking, visual properties and material hardness. One of the layers of the coating is the topcoat, composed of the basecoat, responsible for the color and clearcoat, responsible for the protection, brightness, resistance to scratches and resistance to UV rays. These coatings must be cured at a certain temperature and time. Changes in the curing and thickness of the paint can promote a change in the properties of the paint. This work presents a study using an Design of Experiments - DOE - by Factorial Design of Experiment in which three factors were used, with topcoat cure temperature from 120 ° C to 150 ° C, cure time from 15 minutes to 30 minutes and varnish layer thickness from 3 to 6 coats. In total, nine application conditions were built and all of them were tested to determine the influence of these factors on the coating properties. The confidence level used was 95%. The results obtained showed that the variation in the thickness of the varnish layer influenced Persoz hardness and the impact resistance of stones to the material. In the other tests, the factors were not sufficient to influence the coating properties, such as adhesion to the new, adhesion after immersion in water, adhesion after exposure to moisture, color, gloss, resistance to accelerated aging, resistance to embedding and stretching, despite of some variations found.

Keywords: coating, Design of Experiments, cure, temperature, time, thickness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Composição básica das tintas	15
Figura 2 – Sistema de revestimento <i>wet-on-wet</i> de <i>basecoat/clearcoat</i>	19
Figura 3- Sequência de pré-tratamento de uma carroceria	19
Figura 4 – Processo de Eletrodeposição	20
Figura 5 - Pistola de pintura convencional	22
Figura 6– Relação da viscosidade, com o peso molecular e o teor de sólidos com a formação de um revestimento	23
Figura 7 – Secagem Física de um revestimento	24
Figura 8 – Cura química	25
Figura 9– Espaço de cor do CIE-LAB.....	27
Figura 10 – Cratera ou olho de peixe	29
Figura 11 – Sujeira na pintura	30
Figura 12 – Deslocamento	30
Figura 13 – Escorrimento	31
Figura 14 – Fervura	32
Figura 15 – Casca de Laranja	33
Figura 16 – Corpos de Prova após o banho de E-coat na linha de produção	35
Figura 17 – Fluxograma geral do procedimento experimental.....	36
Figura 18 – Aplicação direta com uma pistola convencional em uma cabine de pintura	37
Figura 19 – Classificação da aderência do revestimento.....	39
Figura 20 – Regiões realizadas a dureza do material	40
Figura 21 – Mandril Cônico	43
Figura 22 – Espessura da camada de verniz	44
Figura 23 – Imagem das adesões realizadas em corpos de prova à novo.....	45
Figura 24 – Gráfico de Pareto para Aderência Inicial do revestimento	46
Figura 25 – Gráfico de Pareto para a Dureza do revestimento.....	48
Figura 26 – Análise de cor considerando a condição 9 como padrão	49
Figura 27 – Gráfico de Pareto para a Cor do revestimento	50
Figura 28 – Gráfico de Pareto para o Brilho do revestimento.....	51
Figura 29 - Imagem das adesões realizadas em corpos de prova após o teste de água 24 h à 60 °C.....	52
Figura 30 – Gráfico de Pareto para aderência do revestimento após imersão em água à 60 °C por 24 h.....	53

Figura 31 - Imagem das adesões realizadas em corpos de prova após o teste de umidade por 500 h	54
Figura 32 – Gráfico de Pareto para aderência do revestimento após exposição a umidade por 500 h	55
Figura 33 – Imagem dos corpos de prova após QUV 400 h.....	56
Figura 34 – Gráfico de Pareto para a cor (dEcmc) das amostras após QUV 200 h e 400 h.....	58
Figura 35 - Gráfico de Pareto para o amarelamento (db*) das amostras após QUV 200 h e 400 h	58
Figura 36 – Análise da cor após exposição ao Weather Ometer após 750 h e 1500 h.....	60
Figura 37 – Gráfico de Pareto resposta para a cor (dEcmc) das amostras após Weather Ometer 750 h e 1500 h	61
Figura 38 – Batida de Pedras	62
Figura 39 – Gráfico de Pareto para a batida de pedras	63
Figura 40 – Resultado Estiramento	63
Figura 41 – Gráfico de Pareto para Estiramento	64
Figura 42 – Embutimento	64
Figura 43 – Gráfico de Pareto para Embutimento	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo de planejamento de experimento utilizado.....	38
Tabela 2 – Classificação para o teste de batida de pedras	42
Tabela 3 – Resultado da adesão inicial e análise visual do revestimento.....	46
Tabela 4 – Dureza Persoz dos revestimentos	47
Tabela 5 – Avaliação de cor	49
Tabela 6 – Brilho das amostras.....	50
Tabela 7 – Resultado da adesão após imersão em água durante 24 h à 60 °C e análise visual do revestimento	52
Tabela 8 – Resultados após teste de umidade por 500 h	54
Tabela 9 – Medição da mudança de cores após o teste de QUV 200 h e 400 h.....	57
Tabela 10 - Medição da mudança de cores após o teste de Weather Ometer 750 h e 1500 h..	59
Tabela 11- Resultado Batida de Pedras	61
Tabela 12 - Média dos valores de embutimento.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivos Gerais	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Matéria-prima.....	15
3.1.1 Resinas.....	15
3.1.2 Solventes.....	16
3.1.3 Pigmentos	17
3.1.4 Plastificantes.....	17
3.1.5 Aditivos	18
3.2. Pintura Automotiva	18
3.2.1 Pré-tratamento	19
3.2.2 E-coat.....	20
3.2.3 Primer	20
3.2.4 Topcoat	21
3.3 Método de aplicação de pinturas automotivas.....	21
3.4 A Formação do Filme.....	22
3.4.1 Secagem Física	24
3.4.2 Cura química	24
3.5 Propriedades do revestimento.....	25
3.5.1 Aderência.....	26
3.5.2 Elasticidade.....	26
3.5.3 Dureza.....	26
3.5.4 Propriedades Visuais	26

3.6 Descontinuidades.....	28
3.6.1 Branqueamento.....	28
3.6.2 Crateras ou olho de peixe	28
3.6.3 Riscos de lixamento.....	29
3.6.4 Diferenças de tonalidade	29
3.6.5 Sujeira em cores lisas e metálicas.....	29
3.6.6 Perda de Aderência.....	30
3.6.7 Craqueamento ou trincas	30
3.6.8 Escorrimento durante a aplicação.....	31
3.6.9 Fervura.....	31
3.6.10 Baixa cobertura ou falta de tinta no acabamento.....	32
3.6.11 Enrugamento.....	32
3.6.12 Manchas em cores metálicas	32
3.6.13 Casca de laranja.....	33
3.7 Planejamento de Experimento (DOE) – Análise de Experimento Fatorial.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 Materiais utilizados	35
4.2 Métodos	35
4.3 Planejamento do Experimento.....	37
4.4 Ensaios realizados.....	39
4.4.1 Aderência do revestimento	39
4.4.2 Ensaio de dureza.....	39
4.4.3 Medida de cor e brilho.....	40
4.4.4 Ensaios de envelhecimentos	40
4.4.5 Ensaios de resistência mecânica	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Espessura da camada de verniz	44

5.2 Aderência após aplicação	45
5.3 Dureza do revestimento	47
5.4 Cor e brilho após aplicação	48
5.5 Resistência à água.....	51
5.6 Resistência à umidade	53
5.7 Resistência a raios UV.....	55
5.8 Resistência ao envelhecimento acelerado.....	58
5.9 Resistência à batida de pedras	61
5.10 Resistência ao estiramento.....	63
5.11 Resistência ao embutimento	64
6. CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Desde a introdução dos primeiros carros no mundo, o processo de pintura automotiva vem sofrendo constantes mudanças. Comparando com o processo de pintura da metade do século passado, a necessidade de produzir automóveis cada vez mais rápido, levaram o incremento da tecnologia desse setor (STREITBERGER, 2008).

A cura da tinta, por exemplo, passou por diferentes etapas. Nas décadas de 1920 a 1940, carro ainda eram construídos com carrocerias de madeira e revestidos por vernizes. A cura desse material demorava semanas, uma vez que eram curadas ao ar. Além disso, um período grande de tempo era necessário para o lixamento e polimento do filme (AKAFUAL, 2016).

A partir da modificação das carrocerias, com a utilização de metais na estrutura, surgiu a necessidade de proteção à corrosão, melhor desempenho do filme e cura mais rápida desse material. Nesse momento, os fabricantes passaram a utilizar equipamentos de pulverização, gerando uma melhor uniformidade do revestimento (AKAFUAL, 2016).

Além de mudanças na forma de cura do material, introduzir novos tipos de resinas permitiu a utilização de diferentes pigmentos. Isso possibilitou a formação de várias cores com diversos efeitos. Além disso, a utilização de primer gerou melhor proteção mecânica do revestimento (STREITBERGER, 2008).

Outro importante marco para a indústria automotiva foi a eletrodeposição do filme. Inicialmente, era realizado por eletrodeposição anódica, que foram introduzidas nos anos de 1960 utilizando óleos naturais maleinizados. Entretanto, em meados dos anos de 1970, a eletrodeposição catódica por imersão ganha força, já que geravam maior deposição de revestimento com menor corrente, maior proteção contra corrosão e melhor confiabilidade no processo (AKAFUAL, 2016).

Nessa mesma época, um novo tipo de revestimento é introduzido, possibilitando melhora ainda maior na aparência e na durabilidade do filme. O chamado *wet-on-wet* é empregado até os dias de hoje, uma vez que utiliza camadas de *basecoat* e verniz. Esse processo apresentou constantes mudanças, como a automatização do processo, da limpeza e da aplicação de tintas cada vez mais moderna (STREITBERGER, 2008).

Apesar de ser um processo difundido do século passado, linhas automotivas estão em constantes mudanças. Cada vez mais, há necessidade de diminuir o tempo de fabricação de um

veículo para gerar maior produtividade. Além disso, a performance do revestimento também é um fator importante para a confiabilidade do processo. Dessa forma, é necessário conhecer as influências no processo de pintura para que a performance do revestimento seja alcançada e gere maior satisfação do consumidor.

Assim, com a intenção de investigar qual a influência da temperatura de cura do *topcoat*, o tempo de cura e a espessura da camada de *clearcoat*, foi realizado este trabalho a partir de um Planejamento de Experimento – DOE – por Análise de Experimento Fatorial. A partir de diferentes ensaios para avaliar as propriedades do filme, os fatores foram analisados com o uso de gráficos de Pareto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Analisar influência da temperatura de cura do *topcoat* e o tempo de cura de pintura automotivas, assim como a influência da espessura da camada do verniz nas propriedades de aderência, dureza, cor, resistência ao envelhecimento e resistência mecânica.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um Planejamento de Experimento – DOE – por Análise de Experimento Fatorial utilizando os pontos extremos e central.
- Confeccionar corpos de prova variando a temperatura de cura de 120°C a 150°C, tempo de cura de 15 minutos a 30 minutos e espessura da camada de verniz de 3 demãos a 6 demãos.
- Analisar a influência desses três fatores das propriedades dos revestimentos automotivos.
- Analisar os resultados com uso de gráfico de Pareto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Matéria-prima

A composição de uma tinta pode ser representada a partir da figura 1. Ela apresenta substâncias voláteis e não voláteis, que darão às tintas suas propriedades principais (SOUZA,2015).

Figura 1- Composição básica das tintas



Fonte: SOUZA, 2015.

3.1.1 Resinas

Resina é a parte não volátil da tinta. Sua função é aglomerar as partículas de pigmentos. Existem vários tipos de resinas utilizadas na composição das tintas. As principais empregadas nas pinturas internas em veículos automotivos são as resinas acrílicas e as resinas poliuretânicas (FAZENDA, 2009).

Resinas acrílicas

A resina acrílica é um copolímero composta por monômeros de acrilatos e metacrilatos e seus ésteres. Suas características e propriedades são definidas pela mistura desses monômeros e pelos seus pesos moleculares (FAZENDA, 2009).

Existem algumas resinas acrílicas utilizadas na pintura interna de veículos. As principais delas são as resinas acrílicas termoplásticas e as resinas acrílicas termoconversíveis. As resinas acrílicas termoplásticas são as bases para as lacas acrílicas, nos quais formam filme através da evaporação do solvente. Já as resinas acrílicas termoconversíveis apresentam excelente aspecto

do revestimento curado e excelente resistência química e a solventes. São resinas que permitem diferentes combinações monométricas que, associados a diferentes agentes reticulantes, possibilita a obtenção de esmaltes com propriedades e características de amplo aspecto de uso (FAZENDA, 2009).

Resinas poliuretânicas

São resinas formadas através da reação do grupo isocianato com o grupo hidroxílico, comumente denominada reação uretânica. O grupo cianeto presente na resina participa do processo de cura do revestimento, isto é, na obtenção de uma estrutura tridimensional. Com isso, as tintas podem ser apresentadas na forma de mono ou bicomponentes. No primeiro caso, o grupo cianeto está bloqueado, sendo liberado no momento da cura para reagir com outros componentes do sistema de resina. Além disso, ele possui facilidade de reagir com a umidade do ar formando os chamados vernizes poliuretânicos de cura por umidade do ar. Já o sistema de bicomponentes são os mais utilizados, uma vez que podem reagir com os grupos cianatos presentes nos outros polímeros ou adutos que fazem parte da composição das tintas (FAZENDA, 2009).

Resinas melamínicas

São resinas obtidas a partir da reação da melamina com formaldeído. São utilizadas na produção de esmaltes de qualidade, aplicadas em acabamentos de termoconversíveis para automóveis. Apresentam propriedades como dureza, estabilidade ao calor, durabilidade, etc. (FAZENDA, 2009).

3.1.2 Solventes

Solventes são líquidos compressíveis de um ou mais componentes que são voláteis sob uma condição específica de secagem e podem dissolver ou solubilizar outros materiais, como as resinas, sem reações químicas. São líquidos com baixa viscosidade, o que proporciona uma viscosidade adequada para que se aplique a tinta em um substrato (GOLDSCHMIDT, 2007).

Para utilizar um solvente de maneira adequada, deve-se compreender as propriedades físico-químicas do mesmo. Dentre essas propriedades pode-se destacar: poder de solvência; taxa de evaporação; ponto de fulgor; estabilidade química; tensão superficial; cor; odor; toxicidade e biodegradação (FAZENDA, 2009).

3.1.3 Pigmentos

Os pigmentos, em geral, irão conferir cor e opacidade ao revestimento. Além disso, melhora algumas propriedades do material como efeito óptico, dureza e resistência mecânica (GOLDSCHMIDT, 2007).

São considerados pigmentos inorgânicos todos os pigmentos brancos, as cargas e uma grande faixa de pigmentos coloridos, sintéticos ou naturais. As características e propriedades são de cada tipo de pigmento, e sua aplicação está relacionado ao tipo de material (FAZENDA, 2009).

Os pigmentos orgânicos são corantes insolúveis no meio em que estão sendo utilizadas e normalmente não possui características e funções anticorrosivas. Apresentam-se na forma de pequenos cristais e possuem uma alta energia superficial. Eles encontram-se associados, e não de maneira isolada. Esse tipo de organização favorece para a diminuição dessa energia (FAZENDA, 2009).

Os pigmentos de efeito metálico, especialmente difundido em tintas automotivas, são utilizados com o objetivo de fornecer características de brilho metálico e alterações de reflexão de luz segundo o ângulo de observação da camada de tinta aplicada. Esses efeitos ópticos são responsáveis por transmitir diferentes sensações, traduzindo-se por velocidade, audácia, modernidade, segurança, beleza, individualidade, etc. (FAZENDA, 2009).

Os pigmentos pretos são compostos principalmente de negro de fumo. São utilizados para escurecimento de outras composições pigmentadas, uma vez que possui o maior nível de absorbância de luz dentro de todo o espectro visível (FAZENDA, 2009).

Os pigmentos anticorrosivos são economicamente importantes por diversas razões. As atividades desses pigmentos estão relacionadas com os processos químicas no processo de corrosão entre a interface do metal e do revestimento (GOLDSCHMIDT, 2007).

3.1.4 Plastificantes

Os plastificantes nas tintas são substâncias químicas que possuem a função de aumentar a flexibilidade afim de suportar o trabalho mecânico, a aderência e outras propriedades que são necessárias ao revestimento. Em geral, são líquidos não secantes, de sólidos alto e baixo ponto de fusão (FAZENDA, 2009).

As propriedades típicas requeridas aos plastificantes são a compatibilidade, efetividade, permanência e estabilidade. A compatibilidade está relacionada com o tamanho e os grupos

funcionais da molécula. Assim, quanto maior a relação entre os grupos funcionais e o resto da molécula, maior será a compatibilidade dos plastificantes e resinas. A efetividade de um plastificante está relacionada à quantidade utilizada, ou seja, quanto menor a quantidade requerida de plastificante para alcançar suas propriedades desejadas, mais efetivo ele é. Já a permanência do plastificante influencia nas propriedades do revestimento como temperatura, compatibilidade, espessura da película, pressão de vapor e quantidade de ventilação. Assim, o ideal é o plastificante apresentar baixa volatilidade (FAZENDA, 2009).

Outro fator importante é a estabilidade do plastificante. Ele deve ser resistente à umidade, ao oxigênio, à luz, ao calor e a agentes químicos. Além disso, devem possuir baixa solubilidade em água (FAZENDA, 2009).

3.1.5 Aditivos

Os aditivos são adicionados aos revestimentos com o objetivo melhorar e/ou modificar as propriedades das tintas. Apesar de não ser um dos principais constituintes da tinta, uma pequena quantidade é suficiente para influenciar na manufatura, estabilidade, aplicabilidade, qualidade e aspecto do filme aplicado. Eles apresentam quatro mecanismos de atuação, nos quais são classificados em aditivos de cinética, aditivos de reologia, aditivos de processo e aditivos de preservação (FAZENDA, 2009).

Cineticamente, os aditivos atuam na secagem, na catalisação e na prevenção de formação de peles em tintas. Com relação às propriedades reológicas, os aditivos proporcionam ao produtor de tintas meios seguros e práticos para regular as características de fluidez do produto. Eles atuam na forma de espessantes e antiescorrimento (FAZENDA, 2009).

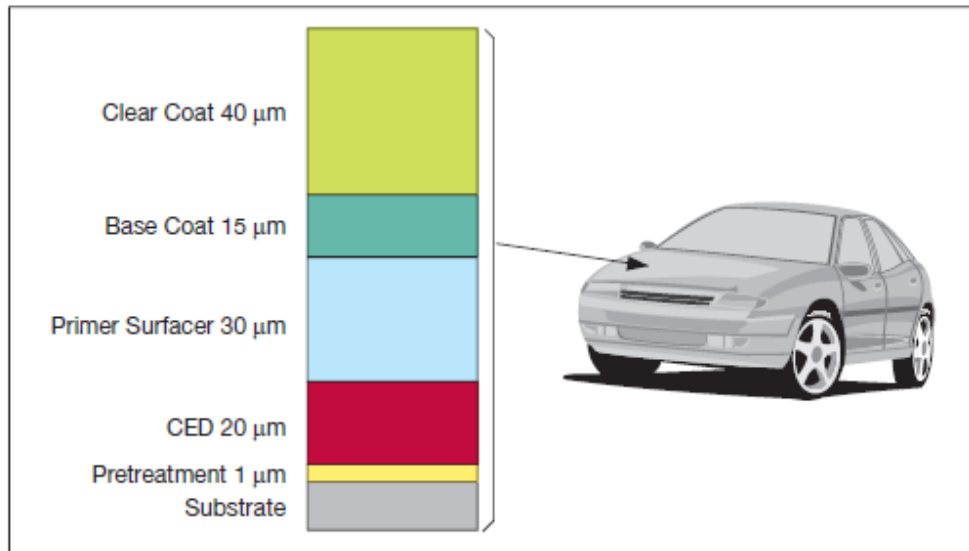
Os aditivos de processos são utilizados para facilitar o processo produtivo. Já os aditivos de preservação atuam no combate a crescimento de microrganismos associados a presença de compostos orgânicos nas tintas (FAZENDA, 2009).

3.2. Pintura Automotiva

Um sistema de revestimento automotivo é composto por camadas como ilustrado na Figura 2. Esse sistema é chamado de *wet-on-wet* de *basecoat/clearcoat*. Ele consiste na aplicação um basecoat pigmentado sobre uma superfície anteriormente revestida de primer. Após a evaporação do solvente, aplica-se um acabamento na forma de *clearcoat* transparente. Posteriormente, o conjunto é aquecido em uma estufa para que ocorra a reticulação do *basecoat*

e *clearcoat*. Esse processo dará as características do revestimento, sua cor e aparência (FAZENDA, 2009).

Figura 2 – Sistema de revestimento *wet-on-wet* de *basecoat/clearcoat*



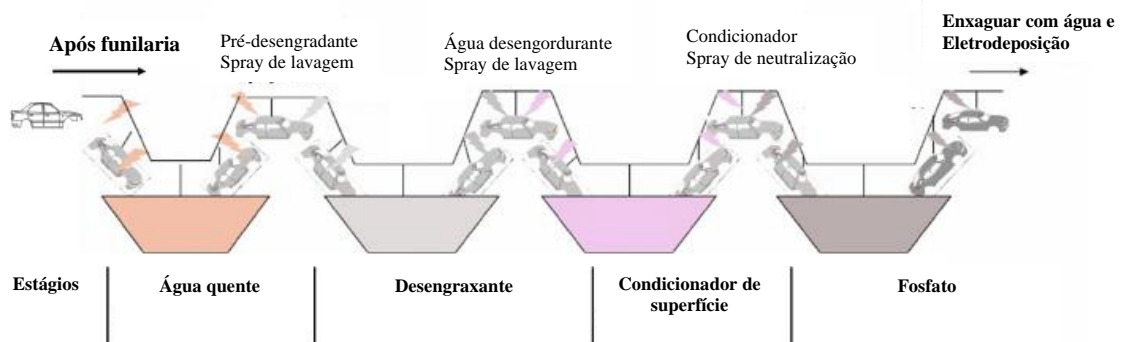
Fonte: SOUZA, 2008

3.2.1 Pré-tratamento

O pré-tratamento consiste na limpeza do substrato para a remoção de óleo decorrente do processo de estampagem e soldagem de uma carroceria. É a primeira camada de revestimento, uma vez que é depositado uma pequena camada inerte de fosfato a partir de um metal fosfático. Essa camada promove uma resistência à corrosão e auxilia a aderência do primer ao metal (AKAFUAL, 2016).

Na figura 3 está representado o processo de limpeza e a fosfatização da carroceria (AKAFUAL, 2016).

Figura 3- Sequência de pré-tratamento de uma carroceria

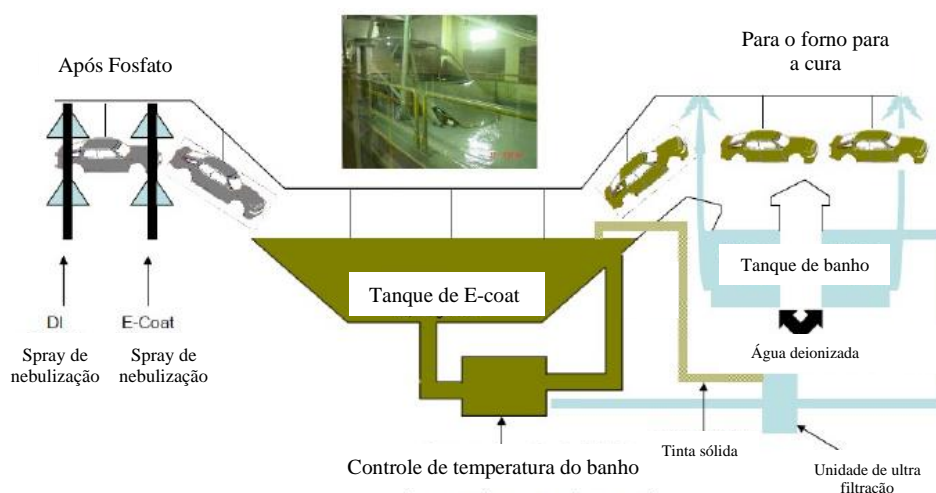


Fonte: AKAFUAL, 2016 (Modificado)

3.2.2 E-coat

E-coat ou a eletrodeposição é a principal camada que protege o metal da corrosão. Atualmente, o processo principal para a realização de eletrodeposição é por catodo, como mostrado na figura 4. A solução de *E-coat* consiste em uma mistura de resina, encadernador, uma pasta contendo pigmentos e solventes. Na eletrodeposição catódica, o metal é uma carga negativa e a tinta a carga positiva. No processo catódico, há uma redução da camada de tinta utilizada. Apesar disso, oferece uma boa performance e uma excelente resistência a corrosão. (AKAFUAL, 2016).

Figura 4 – Processo de Eletrodeposição



Fonte: AKAFUAL, 2016 (Modificado)

O processo de eletrodeposição envolve a imersão da carroceria em uma solução passiva de uma corrente elétrica. Devido à carga natural do processo de revestimento, a eletrodeposição penetra em regiões que um spray de tinta não conseguiria alcançar. Essa imersão promove uma camada de revestimento uniforme, insolúvel, aderente e com uma alta quantidade de sólidos (AKAFUAL, 2016).

Posteriormente, o revestimento é curado em uma temperatura de 160 °C por 10 minutos. Essa etapa é importante para promover uma alta resistência e uma aderência na carroceria. Uma cura incompleta poderá afetar a proteção contra a corrosão do metal (AKAFUAL, 2016).

3.2.3 Primer

A camada de primer consiste em um sistema polimérico hidroxilado, preferencialmente de poliéster saturado (FAZENDA, 2009). É uma tinta muito importante para garantir o aspecto final da peça pintada, além da possibilidade de utilizar a pintura eletrostática pois apresenta condutividade (SOUZA, 2015).

Suas principais funções são o nivelamento e preparação da superfície para camadas subsequentes; otimização da resposta do compósito a exigências mecânicas, principalmente a resistência a batidas de pedra; e proteção do revestimento catódico de possíveis ataques de radiação ultravioletas (FAZENDA, 2009). De acordo com Akafual, o primer também auxilia na aderência do *topcoat* no *E-coat*, além de ajudar na aparência final do revestimento.

Durante o desenvolvimento do primer, é importante que a tinta apresente boa elasticidade e uma boa dureza. A dureza é importante para evitar a ocorrência de marcas de lixamento, enquanto a medição da elasticidade indica um potencial proteção contra batida de pedras (AKAFUAL, 2016).

Um filme de primer possui, em média, uma espessura de 25 μm a 40 μm , e normalmente é curado a 140 °C durante 30 minutos (AKAFUAL, 2016).

3.2.4 Topcoat

A última etapa de revestimento de uma pintura automotiva é a camada de *topcoat*, composta pelo *basecoat* e o *clearcoat*. O *basecoat* é a tinta que precede a camada de primer. É a responsável pela cor da tinta, uma vez que em sua composição estão presentes os pigmentos. Além disso, protege a camada de primer (SOUZA, 2015).

Já o *clearcoat* representa uma combinação de resina, solvente e aditivos que resulta em um revestimento transparente. Normalmente, são utilizados após a aplicação de *basecoat* (GOLDSCHMIDT, 2007). O seu nome popular é verniz. Além de proporcionar atratividade e brilho para a peça, o *clearcoat* oferecem proteção a umidade, chuva ácida, sal nas estradas, pedras, altas e baixas temperaturas e luz ultravioleta (SOUZA, 2015).

Antes da aplicação do verniz, o *basecoat* passa por um período de *flash-shop*. O *flash-shop* consiste em um período necessário para que ocorra a evaporação de solventes compostos no *basecoat*. No processo *wet-on-wet*, a cura do *basecoat* e *clearcoat* ocorre simultaneamente de 20 minutos a 30 minutos e 125 °C. Esses valores de tempo e temperatura podem variar de acordo com a montadora de veículos e a marca da tinta (AKAFUAL, 2016).

3.3 Método de aplicação de pinturas automotivas

As técnicas de aplicação de pintura é um dos fatores mais importantes para a qualidade do revestimento e a decoração da peça. O primer e a *topcoat* são aplicados por aplicação direta. Essa aplicação pode ser realizada manualmente ou através de robô, dependendo do volume de carrocerias que deverão ser pintadas (VERTURE, 2008).

A técnica de aplicação direta mais utilizada é com a utilização de pistola de tinta, como ilustrada na figura 5. A pistola é o ponto chave do sistema de acabamento, no qual é encarregada de atomizar a tinta ou materiais pulverizáveis e de aplica-los sobre o suporte. Seu funcionamento é através de ar comprimido (VERTURE, 2008).

Figura 5 - Pistola de pintura convencional



Fonte: GOLDSCHMIDT, 2007

3.4 A Formação do Filme

Após a aplicação da tinta, a próxima etapa é a secagem e a cura do material. Essas etapas são essenciais para que o revestimento apresente uma boa aderência no substrato, além de apresentar uma boa aparência e continuidade. Mas, para isso, é necessário que o processo apresente um controle, para que as exigências feitas a longo prazo sejam alcançadas (GOLDSCHMIDT, 2007).

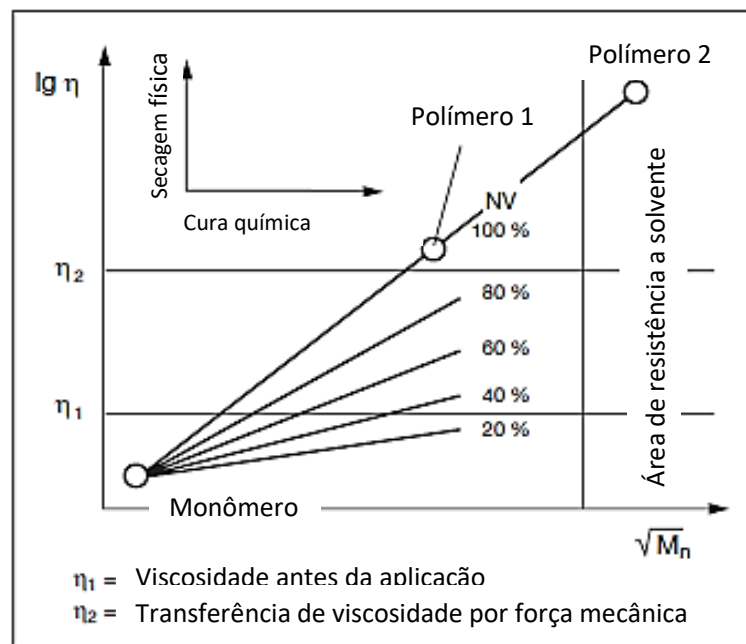
A temperatura característica e a reologia da tinta afetam diretamente nas características do revestimento. Propriedades reológicas são importantes para garantir a fluidez da tinta pela pistola de aplicação, além de realizar o preenchimento de irregularidades. A partir de uma fluidez correta, é possível alcançar a espessura desejada para o filme. Já a temperatura e o tempo de secagem e cura influenciam na evaporação do solvente, nas reações químicas com a formação de ligações cruzadas e nas propriedades finais do revestimento. Assim, é necessário

compreender como ocorre a secagem e a cura da tinta para entender como é realizado a transformação de um material em um revestimento

No estudo de caso realizado por Dickie 1997, indicou que ao utilizar uma temperatura de cura da resina acrílica-melamínica de 110 °C e 150 °C e um tempo de cura de até 40 minutos foi possível atingir algumas propriedades, como resistência a solventes, lascamento e ausência de descoloração (DICKIE, 1997).

A etapa para de transição de uma tinta líquida para o um revestimento com propriedades físicas adequadas, ocorre a partir das mudanças reológicas que podem ser observadas na figura 6 (GOLDSCHMIDT, 2007).

Figura 6– Relação da viscosidade, com o peso molecular e o teor de sólidos com a formação de um revestimento



Fonte: GOLDSCHMIDT, 2007

O gráfico acima apresenta a relação com a fórmula apresentada na equação 1:

$$\ln \eta = k \cdot \sqrt{Mn} \cdot NV \quad (1)$$

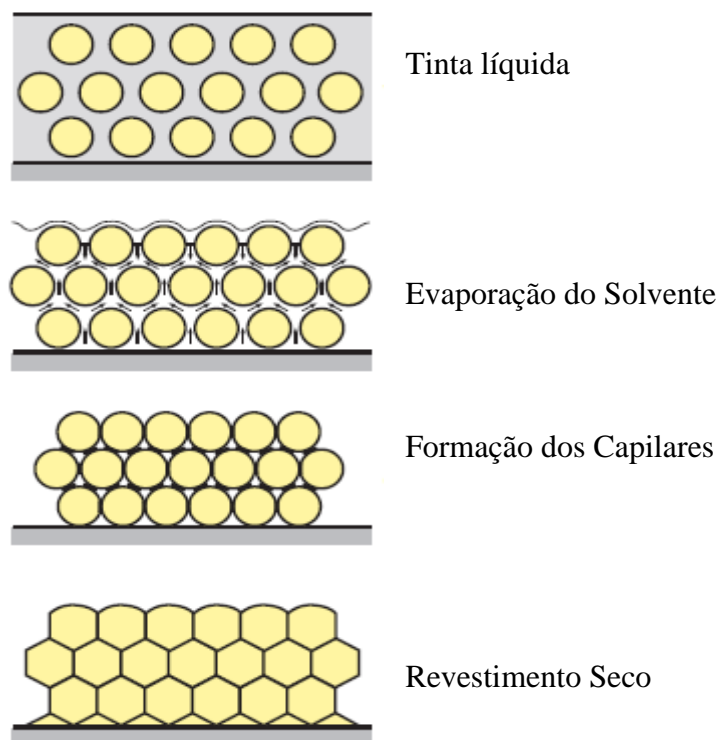
Sendo η a viscosidade da tinta, Mn o peso molecular e NM o teor de sólidos, observa-se que à medida que ocorre a evaporação do solvente e a formação de ligações cruzadas, há um aumento da viscosidade do filme e um aumento do peso molecular. Essa solidificação é possível devido à combinação de fatores físicos e químicos que ocorrem durante a secagem e a cura da tinta (GOLDSCHMIDT, 2007).

3.4.1 Secagem Física

A secagem física ocorre basicamente pela evaporação do solvente. Com citado anteriormente, uma tinta é composta por resina, solventes e pigmentos. Essa mistura líquida faz com que a interação entre resinas seja reduzida, tendo interação preferencial com o solvente. Entretanto, essa condição altera com a eliminação do solvente (GOLDSCHMIDT, 2007).

Ao diminuir a quantidade de solvente na mistura, moléculas de resinas começam a interagir, ficando cada vez mais entrelaçadas e solidificadas, tornando uma estrutura espacial. Essa interação promove uma diminuição do volume do filme e o choque de partículas repulsivas. Devido à convergência forçada, a barreira de repulsão é superada para que as forças de atração prevaleçam. No momento do contato, as forças superficiais são tão fortes que há uma unificação completa das várias partículas. Essas partículas que, inicialmente eram esféricas, são deformadas por essa força de atração. Tal comportamento pode ser observado na figura 7 (GOLDSCHMIDT, 2007).

Figura 7 – Secagem Física de um revestimento



Fonte: GOLDSCHMIDT, 2007 (Modificada)

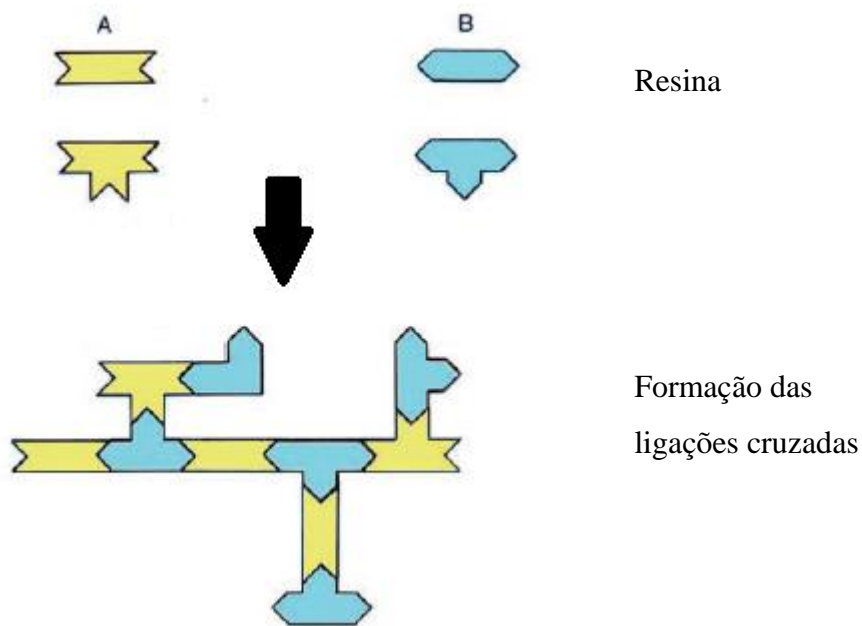
3.4.2 Cura química

Na etapa seguinte, ocorre a formação de ligações cruzadas. Embora na secagem física, o filme sofra mudança, é na cura que há uma combinação das resinas promovendo novas

ligações químicas. Na cura química há um aumento do peso molecular e aumento da resistência mecânica. A figura 8 apresenta o esquema de como ocorrem as ligações cruzadas no revestimento (GOLDSCHMIDT, 2007).

Nesta etapa, a temperatura tem a função de elevar a energia do sistema para que ocorra reações de policondensação, poliadição e polimerização. O tempo e a temperatura de cura são fatores importantes para as características do filme. Temperaturas excessivamente altas e tempos de cura excessivamente longos fazem com que o revestimento fique frágil devido ao exagero de reticulação, enquanto temperaturas excessivamente baixas e tempos de cura excessivamente baixos não atingem a dureza necessária para o desempenho do revestimento (GOLDSCHMIDT, 2007).

Figura 8 – Cura química



Fonte: GOLDSCHMIDT, 2007 (Modificada)

3.5 Propriedades do revestimento

Após a formação do filme, o revestimento deverá apresentar propriedades físicas e tecnológicas como a aderência, elasticidade e dureza, propriedades visuais como cor e brilho, e propriedades mecânicas. Essas propriedades dependem de vários fatores, dentre eles a temperatura e o tempo de cura, como citados anteriormente, e a espessura do filme (GOLDSCHMIDT, 2007).

A espessura do filme deve ter um valor ótimo, de acordo com a camada que está sendo aplicada. Filmes com espessura alta são desejáveis por apresentar boa cobertura, cobertura visual do substrato, boa proteção contra gases e vapores de água. Entretanto, pode afetar na deterioração de propriedades físicas e tecnológicas (GOLDSCHMIDT, 2007).

3.5.1 Aderência

A aderência é uma das principais propriedades que um revestimento deve apresentar. Caso a tinta não apresente uma aderência satisfatória ao substrato, seu desempenho estará comprometido, chegando a um deslocamento prematuro, propiciando a propagação da corrosão sob a película. Além disso, o acabamento não fica adequado gerando uma perda de propriedades visuais (KRÄNKEL, 2020).

3.5.2 Elasticidade

Os revestimentos estão sujeitos a diferentes tipos de aplicações de força, como alongamento, cisalhamento, compressão, flexão e torção. Tais forças estão presentes desde a vibração do motor, até ao impacto do asfalto. Apesar disso, o revestimento deve resistir sem a perda de desempenho como a aderência ao substrato. Nesse sentido, torna-se importante a elasticidade do revestimento (GOLDSCHMIDT, 2007).

No caso de pintura automotiva, a elasticidade é a capacidade que esse polímero tem de reorganizar reversivelmente suas moléculas e cadeias moleculares dos agentes formadores de película orgânica, com o armazenamento completo da energia de deformação a ser aplicada. Como o revestimento é um material polimérico, observa-se que há um comportamento elástico diferente com baixas e altas tensões. Além disso, existe uma dependência com a temperatura e o tempo de deformação. Assim, ao determinar propriedades elásticas de um revestimento, deve-se diferenciar entre elasticidade de flexão como deformação lenta e elasticidade de impacto, como deformação rápida (GOLDSCHMIDT, 2007).

3.5.3 Dureza

A dureza pode ser descrita como a propriedade mecânica de um revestimento que se manifesta na forma de resistência a um esforço mecânico. Apesar desse conceito ser mais adequado para materiais poliméricos, se for levada em consideração a influência da pressão, fricção e arranhões, ele pode ser utilizado em revestimentos (GOLDSCHMIDT, 2007).

3.5.4 Propriedades Visuais

Ao entregar um automóvel a um consumidor, uma das características perceptivas é a cor e o brilho do revestimento. Essas características estéticas garantem a venda e o sucesso do

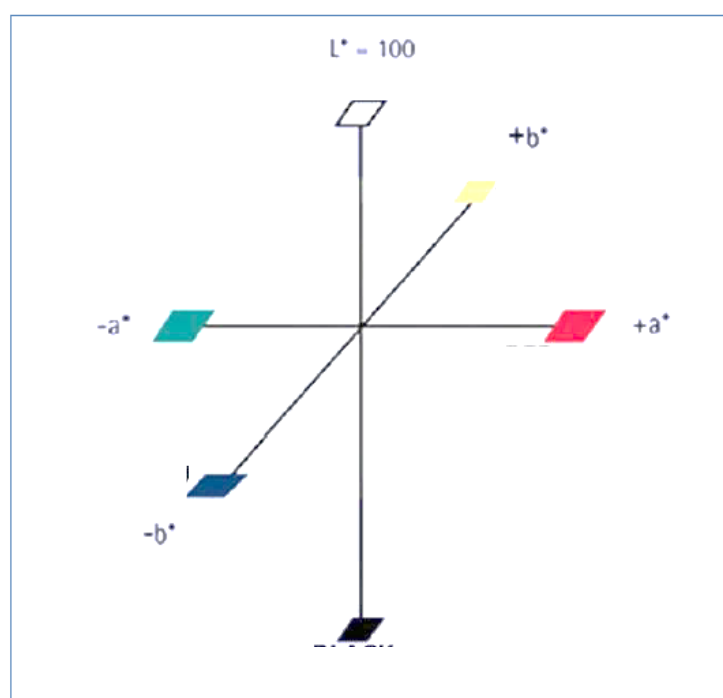
produto. Assim, é necessário que o revestimento apresente harmonia de cor, acabamentos estéticos e uma boa uniformidade do revestimento (MARCHETTI, 2018).

As propriedades visuais são o brilho e a cor do revestimento. O brilho consiste em uma luz refletida por um substrato captado por uma célula fotoelétrica (KRÄNKEL). Pode ser influenciado por vários fatores como a condição da superfície, a característica do substrato, o ângulo de irradiação/ reflexão, as dimensões da área medida e a planicidade da superfície. O Glossmeter é o equipamento mais utilizado para medir o brilho, no qual apresenta valores de 0 a 100. Usualmente, os valores medidos levam em consideração o local que o componente pintado será aplicado (MARCHETTI, 2018).

Já a determinação da cor é realizada por comparação com padrões. Para isso, deve ser realizada em condições de luz apropriadas, uma vez que graus de luminosidade influencia no resultado final (KRÄNKEL, 2020).

O espectrofotômetro é o equipamento utilizado para a medição de cor no qual apresenta uma esfera integrada capaz de promover a difusão da luz. A leitura é realizada levando em consideração a escala CIE-LAB, no qual calcula os valores de L^* , a^* , b^* . Essas siglas representam um plano cartesiano, com os pares de cores azul-amarelo, vermelho-verde e claro-escuro, como apresentado na figura 9 (BAIETTO, 2018).

Figura 9– Espaço de cor do CIE-LAB



Valores de Δa^* , Δb^* e ΔL^* correspondem a diferença entre os valores medidos na amostra e os valores do padrão. A diferença aceitável entre as duas medidas varia de acordo com o substrato no qual o revestimento foi aplicado (BAIETTO, 2018).

3.6 Descontinuidades

Durante o processo de pintura, as condições de aplicação, as características físicas e químicas das tintas e os defeitos de ordem geral podem promover falhas nas peças pintadas. A seguir, serão indicados os tipos de defeitos mais comum, a sua origem e como evitá-los (GOLDSCHMIDT, 2007).

3.6.1 Branqueamento

O branqueamento ocorre principalmente com a utilização de lacas acrílicas e nitrogenadas. Consiste em um aspecto esbranquiçado e sem brilho logo após a pulverização devido à condensação da umidade atmosférica sobre a película da tinta (FAZENDA, 2009).

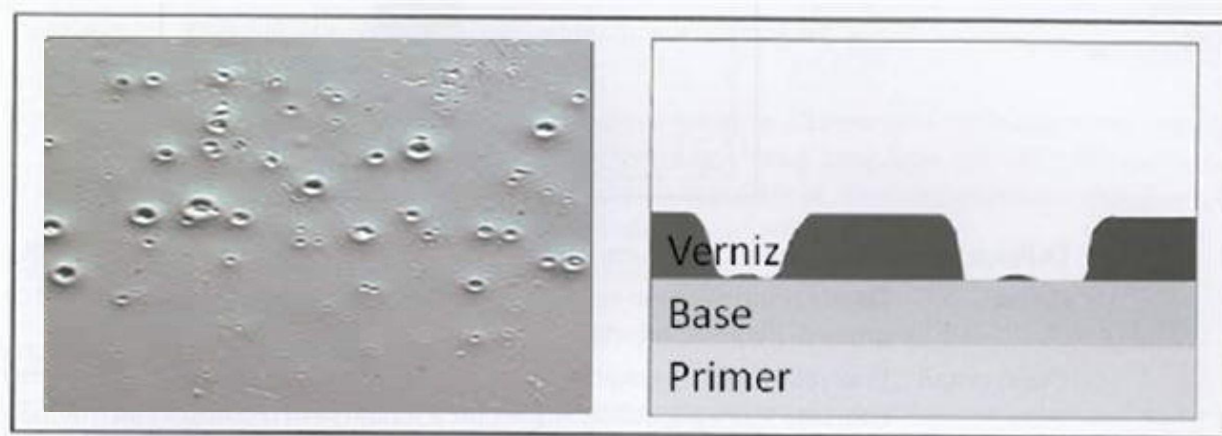
As principais causas são o uso de diluentes de evaporação muito rápido, pressão do ar comprimido alta, linha de ar contaminada com água ou temperatura ambiente muito baixa. Assim, para evita-los, deve utilizar retardador, reduzir a pressão do ar comprimido e, se possível, manter a temperatura ambiente a pelo menos 20°C (FAZENDA, 2009).

3.6.2 Crateras ou olho de peixe

Crateras, ou olho de peixe, são pequenos orifícios que surgem durante ou logo após a aplicação (FAZENDA, 2009). É um problema de aplicação que apresenta depressões na superfície que podem expor camadas anteriores da pintura, como mostrado na figura 10 (SOUZA, 2015).

São causados pela contaminação de óleos, silicones e ceras devido a limpeza inadequada ou por partículas presentes no ar. Algumas maneiras de evita-los seria manter a linha de ar, os equipamentos e as peças perfeitamente limpos (VETTORAZZI, 2013).

Figura 10 – Cratera ou olho de peixe



Fonte: CHEN-TREND, 2020 e FAZENDA, 2009

3.6.3 Riscos de lixamento

O uso de lixas de grana muito grossa, o uso de retardador e o lixamento do primer antes da sua secagem completa pode propiciar o aparecimento de riscos. Para evita-lo deve lixar o primer após o tempo adequado de secagem, utilizar o sistema de lixamento correto com o uso de lixas finas e não utilizar retardador em excesso. Outra possibilidade é aplicar a primeira demão do acabamento em uma camada mais espessa (VETTORAZZI, 2013).

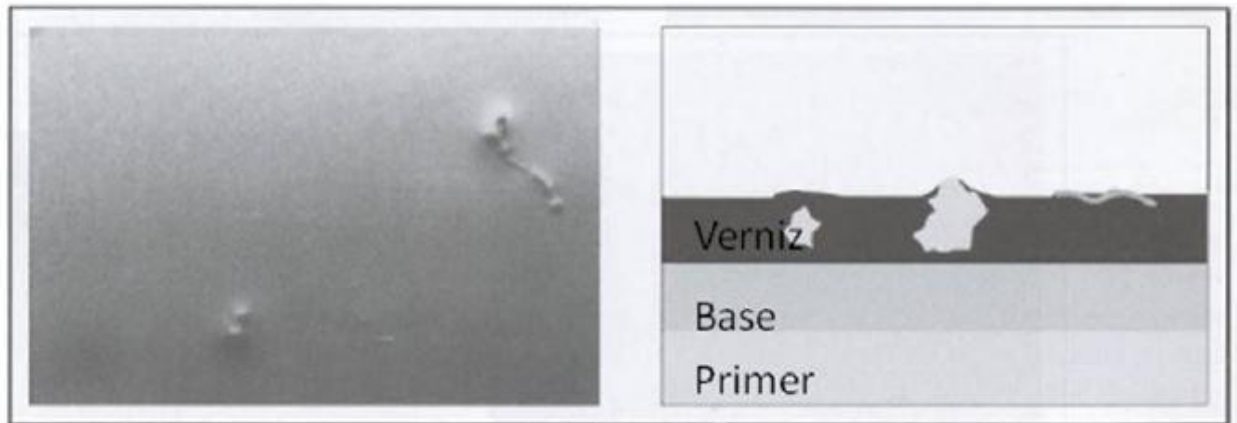
3.6.4 Diferenças de tonalidade

É comum o aparecimento de uma tonalidade diferente após a aplicação de uma tinta. Afim de evitar esse defeito, deve-se analisar a pintura a partir de um padrão pré-determinado. É necessário, sempre, realizar uma homogeneização correta e aplicar de maneira regular (FAZENDA, 2009).

3.6.5 Sujeira em cores lisas e metálicas

Sujeiras podem aparecer aleatoriamente a partir de objetos provenientes da própria tinta ou do ambiente durante a aplicação, penetrando ao revestimento, como mostrado na figura 11. Sujeiras em equipamentos, ambiente, do aplicador e da peça podem ocasionar esse tipo de defeito. Para evita-lo é necessário filtrar a tinta antes da aplicação, limpeza da peça e do ambiente, e checar os filtros da cabine de pintura (FAZENDA, 2009).

Figura 11 – Sujeira na pintura

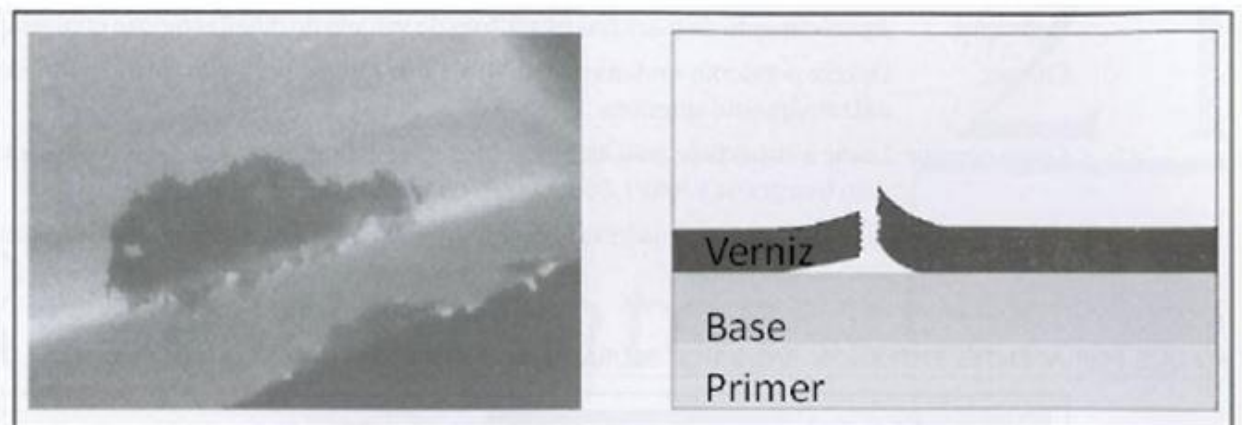


Fonte: FAZENDA, 2009

3.6.6 Perda de Aderência

A perda de aderência da peça promove um deslocamento das camadas de tinta, como ilustrado na figura 12. Pode ocorrer por excesso de camada de revestimento, produto de limpeza inadequado, falta de promotor de aderência, falta de agentes plastificantes, dentre outros. Para corrigir esse problema deve-se levar em consideração as suas causas e refazer o processo de pintura (FAZENDA, 2009).

Figura 12 – Deslocamento



Fonte: FAZENDA, 2009

3.6.7 Craqueamento ou trincas

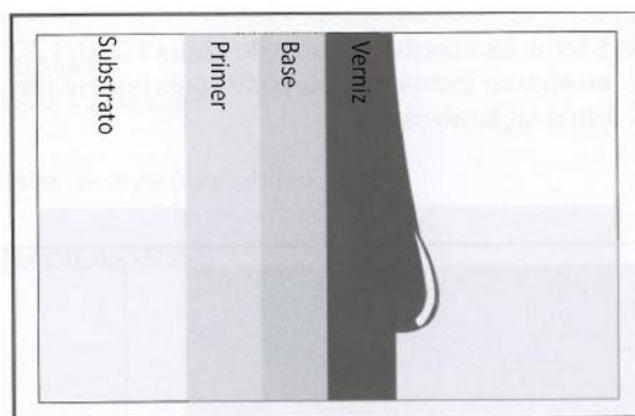
As trincas possuem a característica de serem profundas no acabamento. Ocorrem devido ao uso de diluentes inadequados, aplicação de camadas muito grossa ou falta de secagem dos produtos intermediários. Utilizar diluentes adequados e na quantidade correta, dar intervalo

correto entre as demãos e não aplicar camadas grossas de tinta evita o aparecimento de trincas (FAZENDA, 2009).

3.6.8 Escorrimento durante a aplicação

O acúmulo de tinta em uma determinada área provoca o escorrimento durante a aplicação. Esse tipo de defeito pode ser visto na figura 13. Ele ocorre devido ao uso de retardador em excesso, pressão de ar da pistola muito baixa, aplicação de camadas muito grossas e pequeno intervalo entre as demãos. Para evitar esse tipo de defeito, utiliza-se as mesmas recomendações do caso anterior (VETTORAZZI, 2013).

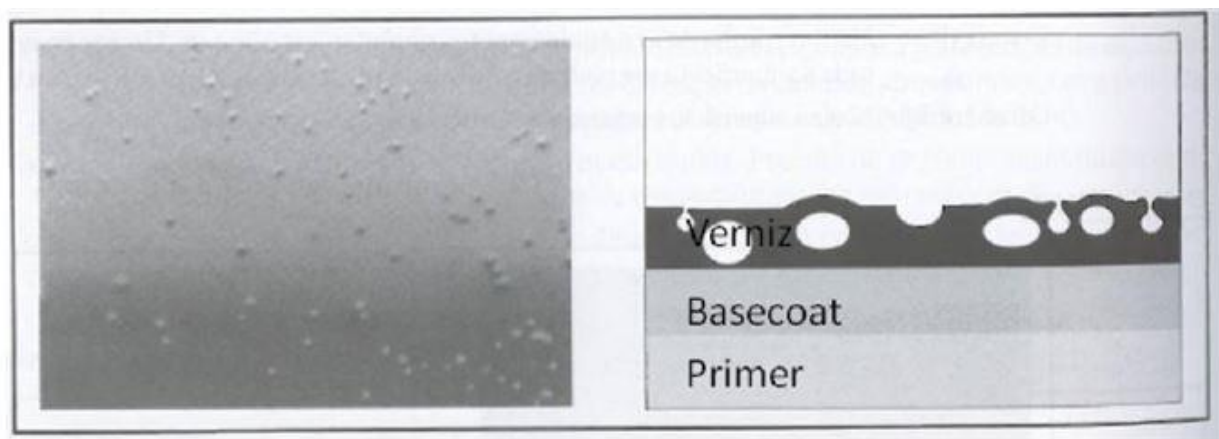
Figura 13 – Escorrimento



Fonte: FAZENDA, 2009

3.6.9 Fervura

Bolhas que aparecem na superfície da tinta e estouram que são detectadas após a aplicação e secagem. Na figura 14, observa-se o aspecto dessas bolhas e como elas ficam acopladas no revestimento. Usar diluentes com evaporação adequado e na temperatura ambiente, utilizar retardador, deixar a tinta secar alguns minutos a temperatura ambiente antes de iniciar a cura e respeitar o tempo de evaporação entre demãos evita o aparecimento de bolhas (VETTORAZZI, 2013).

Figura 14 – Fervura

Fonte: FAZENDA, 2009

3.6.10 Baixa cobertura ou falta de tinta no acabamento

É detectado quando se observa camadas anteriores a base como o primer. Ocorre devido à falta de homogeneização da tinta, excesso de diluentes ou falta de procedimento na linha de pintura. Implantar procedimento na pintura com orientação de uso, manuseio e preparação e controlar a diluição da tinta são procedimentos que evitam a falta de tinta no acabamento (KRÄNKEL, 2020).

3.6.11 Enrugamento

Enrugamento é observado em peças que necessitam de retoque. Consiste em uma mudança de cor entre a pintura original e esse retoque. Ocorre por falta de homogeneização do produto, aplicação incorreta, alteração da tinta original pelo tempo ou má preparação da tinta. Assim, é importante testar a cor antes da aplicação e pintar uma área maior que a danificada para disfarçar esse tipo de descontinuidade (FAZENDA, 2009).

3.6.12 Manchas em cores metálicas

Ocorre devido ao desalinhamento das partículas metálicas. Pode ser ocasionado pela inabilidade do pintor, aplicação de demão muito carregada, pressão de ar comprimido muito baixa ou muito alta, distância da pistola a peça pequena ou aplicação lenta, pequeno intervalo entre as demãos, temperatura ambiente alta, falta de homogeneização da tinta e o uso de retardador em quantidade excessiva (FAZENDA, 2009).

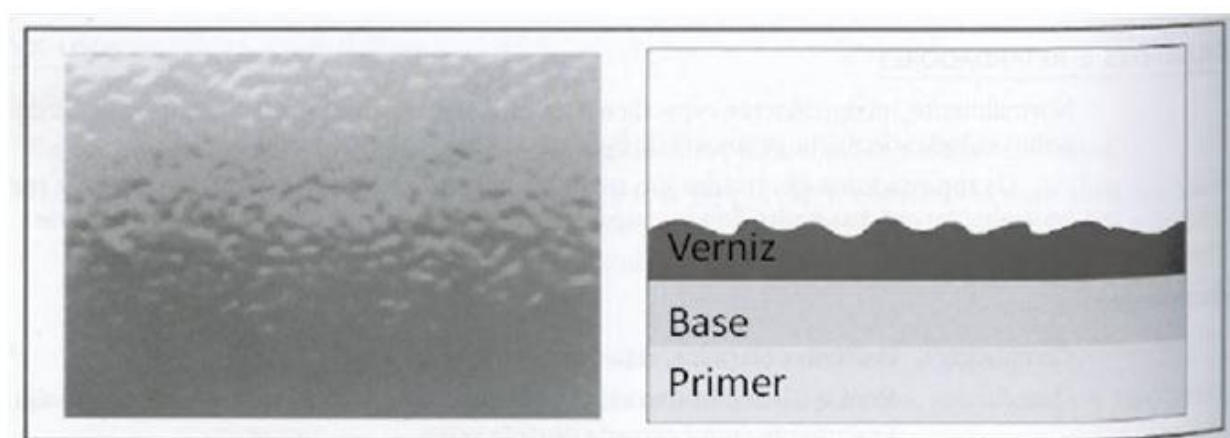
Como solução pode-se homogeneizar a tinta antes da pintura, manter distância e velocidade constante, respeitar a faixa de temperatura de diluição (18 a 30°C), ajustar a pressão do ar comprimido, dentre outros (FAZENDA, 2009).

3.6.13 Casca de laranja

Na figura 15, observa-se um aspecto de desnivelamento com ondulações semelhantes a uma casca de laranja. É gerado normalmente na aplicação, com a pistola mal regulada; com o uso de diluentes inadequadas quanto à qualidade e quantidade. Além disso, solventes muito voláteis, temperaturas elevadas, pressão de ar inadequada e camada de tinta excessiva também propicia esse tipo de defeito (VETTORAZZI, 2013).

Usar diluentes adequados e de boa qualidade, adicionar pequenas quantidades de retardador, regular a pistola de aplicação e verificar a temperatura durante o processo ajuda a evitar esse tipo de defeito (FAZENDA, 2009).

Figura 15 – Casca de Laranja



Fonte: FAZENDA, 2009

3.7 Planejamento de Experimento (DOE) – Análise de Experimento Fatorial

O planejamento de Experimento consiste em uma técnica para definir quais dados, em que quantidade e em quais condições devem ser coletados durante um determinado experimento buscando atender a melhor precisão estatística possível. São realizadas alterações propositalmente nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que possa avaliar as possíveis alterações da variável resposta, como também a razão dessas alterações (MONTGOMERY, 1991).

A análise de Experimento fatorial é aquela que envolve dois ou mais fatores. No projeto fatorial completo todos os fatores e suas combinações são investigados. Isso possibilita identificar o efeito principal e as interações entre os fatores (MONTGOMERY, 1991).

No trabalho de Ferreira (2016), três fatores foram avaliados para determinar o envelhecimento do aço BH22 por planejamento de experimento. A partir da variação da pré-

deformação plástica, temperatura e do tempo de aquecimento foi possível identificar que a temperatura altera o limite de escoamento do material. O trabalho em questão utilizou o planejamento a partir de uma superfície de resposta (FERREIRA, 2016).

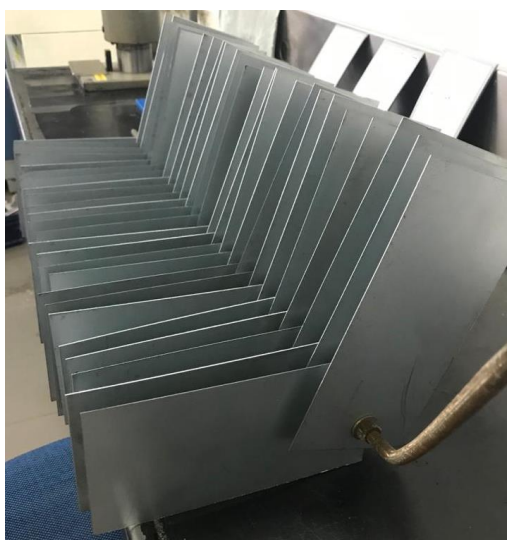
A utilização do método de planejamento de experimentos também foi utilizada para um melhoramento contínuo em uma linha de pintura automotiva. Nesse caso, o objetivo do estudo era identificar quais foram os defeitos mais recorrentes na linha de pintura, priorizar o problema, investigá-lo e implementar ações de melhoria. Através desse método, foi possível reduzir em 66,6 % a incidência dos defeitos encontrados (TREVIZAN, 2013).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados

Para a confecção de corpos de prova, foram utilizadas chapas de aço ASTM A620 laminados a frio, de dimensões 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 0,8 mm de espessura e dimensões de 150 mm de comprimento, 70 mm de largura e 0,8 mm de espessura. Esses corpos de prova passaram por uma fosfatização e banho de E-coat na linha produtiva da empresa, no qual esses parâmetros foram mantidos em sigilo. Tais corpos de prova podem ser vistos na figura 16.

Figura 16 – Corpos de Prova após o banho de E-coat na linha de produção



Fonte: próprio autor

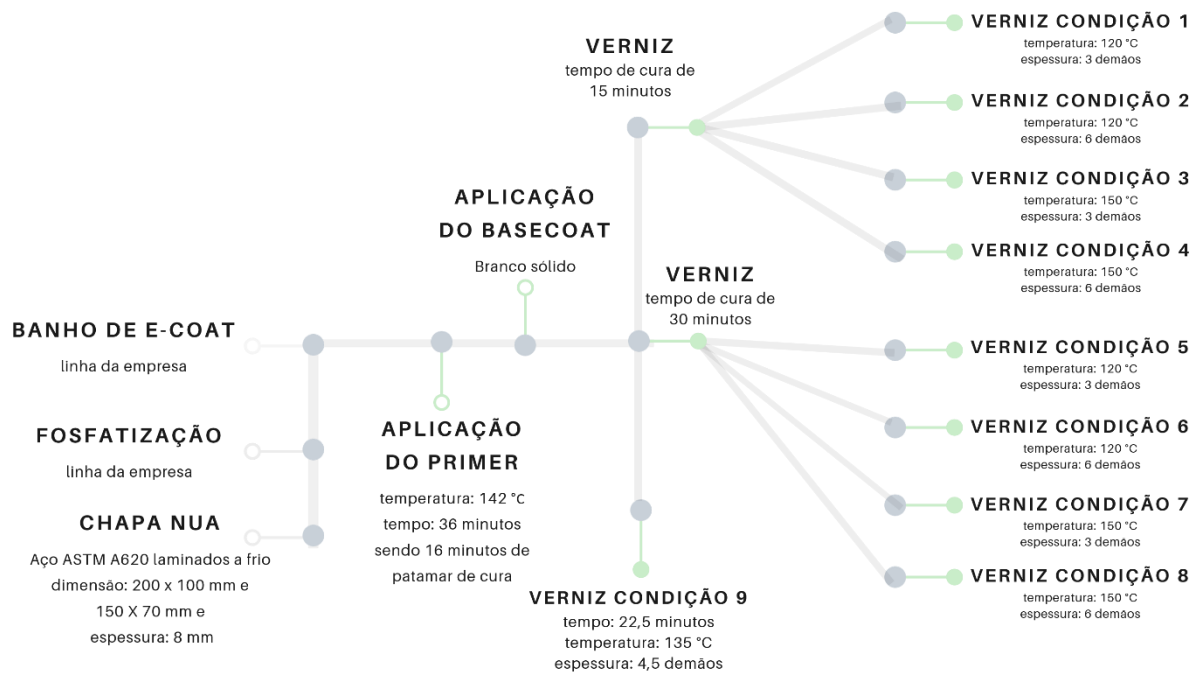
Os materiais utilizados nesse estudo foram o primer, o basecoat na cor Branco Sólido e o verniz de resina acrílica e melamínica.

4.2 Métodos

Na figura 17, observa-se o fluxograma geral das etapas realizadas na execução desse trabalho.

A pintura das camadas de primer, basecoat e verniz foram realizadas em laboratório, em uma cabine de pintura. Os corpos de prova foram limpos e alguns lixados, com o objetivo de retirar impurezas vinda da linha de produção. Feito isso, todas as placas foram pintadas com o primer por aplicação direta utilizando uma pistola convencional. A cura do primer foi realizada na temperatura de 142 °C durante 36 minutos. Esse tempo refere-se ao tempo final, considerando o patamar de cura de 16 minutos.

Figura 17 – Fluxograma geral do procedimento experimental



Fonte: próprio autor

Posteriormente, os corpos de prova foram pintados com o *basecoat* e verniz por uma aplicação direta utilizando uma pistola convencional, como observa-se na figura 18. Para a cura do material, foi utilizado uma estufa de secagem com circulação de ar da empresa Ethiktechnology e um termopar para o controle de temperatura na chapa.

Figura 18 – Aplicação direta com uma pistola convencional em uma cabine de pintura



Fonte: próprio autor

4.3 Planejamento do Experimento

Foi construído um Planejamento De Experimentos – *Designs Of Experiments* DOE – Por Análise De Experimento Fatorial com três fatores. As variáveis de entrada, ou seja, os fatores analisados, foram a temperatura de cura do *basecoat* e verniz, tempo de cura e espessura de camada do verniz.

Nos testes desenvolvidos, os extremos e o ponto central foram analisados neste estudo. Na tabela 1, é possível analisar todas as combinações das variáveis de influência. A faixa de temperatura analisada foi de 120 °C a 150 °C, o tempo de 15 minutos a 30 minutos e a espessura de 3 demãos a 6 demãos. A condição 9 representou a condição normal de aplicação utilizado no laboratório no qual o estudo foi realizado, sendo utilizado uma temperatura de cura do *basecoat* e verniz de 135 °C, tempo de cura de 22,5 minutos e demão de 4,5 (4 demãos completas e 1 passada mais rápida).

A temperatura mínima e tempo mínimo foram definidos a partir da temperatura mínima e tempo mínimo para que ocorresse as ligações cruzadas do filme. A temperatura máxima e o tempo máximo foram determinados a partir de um limite que não ocorresse um amarelamento visível do revestimento. A espessura mínima foi estipulada pela quantidade mínima para que

ocorre a cobertura total do *basecoat*, enquanto a espessura máxima foi atingida a partir de uma camada máxima no qual não ocorresse o escorrimento do verniz durante a aplicação.

Tabela 1 – Modelo de planejamento de experimento utilizado

Condição de Aplicação	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)	Espessura (demão)
Condição 1	120	15,0	3,0
Condição 2	120	15,0	6,0
Condição 3	150	15,0	3,0
Condição 4	150	15,0	6,0
Condição 5	120	30,0	3,0
Condição 6	120	30,0	6,0
Condição 7	150	30,0	3,0
Condição 8	150	30,0	6,0
Condição 9	135	22,5	4,5

Fonte: próprio autor

Com relação a espessura do verniz, devido a aplicação ser manual, foi utilizado como parâmetro o número de demão. Para checar a espessura do revestimento, foram realizadas medições através de um microscópico óptico do modelo Olympus BX60.

Além disso, foram gerados gráficos de Pareto para analisar qual a influência dos fatores em cada ensaio realizado. A linha de referência representa a significância estatística no qual é calculada a partir de uma margem de erro de acordo com a equação 2. O t representa o quartil $(1 - \alpha / 2)$ de uma distribuição- t . Como o grau de liberdade utilizado foi igual a 0, é necessário utilizar o pseudo erro padrão de Lenth, PSE. (MINITAB, 2019).

$$ME = t * PSE \quad (2)$$

Para calcular o valor de PSE, foi necessário primeiramente calcular o valor absoluto dos efeitos. Posteriormente, na segunda etapa, foi calculado o valor de S, sendo S descrito na equação 3. Logo em seguida, na etapa 3, foi realizado a mediana dos efeitos que são menores do que 2,5 multiplicado por S. Por último, foi calculado o PSE, que está descrito na equação 4.

$$S = 1,5 * \text{mediana dos efeitos na etapa 1} \quad (3)$$

$$PSE = 1,5 * \text{mediana calculada na etapa 3} \quad (4)$$

Na análise do experimento fatorial, foi utilizado um nível de confiança de 95 %, com um modelo de interação de ordem 3, abrangendo todos os fatores estudado. O valor de α gerado

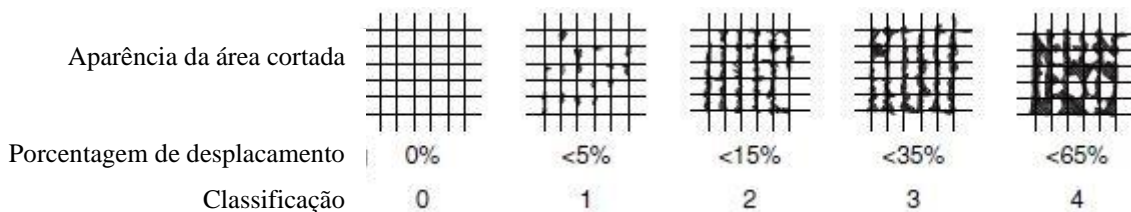
foi de 0,05. A linha de referência para cada gráfico de Pareto foi calculada a partir desses parâmetros.

4.4 Ensaios realizados

4.4.1 Aderência do revestimento

Para analisar a aderência do revestimento, foi utilizado o Teste de Corte Bruto, com uma lâmina de aço. A norma utilizada foi a ASTM D 3359 – 09. O teste consiste em promover cortes retangulares na tinta seca e testar a sua aderência através de uma fita adesiva TESA 4657. Esses cortes foram realizados utilizando um gabarito e a distância de cada corte foi de 2 mm, como descrito em norma. Após a realização do corte, foi colocado a fita adesiva sobre o corte com o auxílio de uma espátula de borracha e após 1 minuto, e essa fita foi puxada de maneira uniforme e contínua, com uma velocidade aproximada de 10 cm/s e um ângulo de 180°. Posteriormente, foi analisada a área ensaiada, sendo a mesma classificada através da porcentagem de deslocamento. Na figura 19 está demonstrada a classificação utilizada (ASTM, 2014).

Figura 19 – Classificação da aderência do revestimento



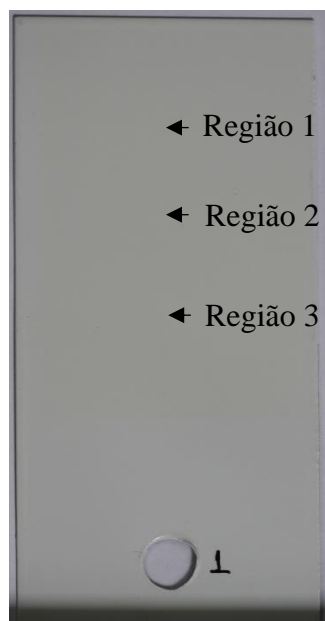
Fonte: TRACTON, 2006

4.4.2 Ensaio de dureza

A medição da dureza do revestimento a seco foi realizada pelo o método de pêndulo, no qual fornece a dureza Persoz. O equipamento utilizado foi da Braive Instruments com um pêndulo de 500 g. Ele fornece o número de oscilações em contato com o corpo de prova, devendo multiplicar esse número por 0,5. Esse valor corresponde à dureza Persoz do filme. A norma utilizada foi a ASTM D 4366 – 95. (ASTM, 1994).

Em cada corpo de prova, foram realizadas três medições, em três pontos diferentes, como demonstrado na figura 20. Posteriormente, foi calculada a média e o desvio padrão dos valores medidos.

Figura 20 – Regiões realizadas a dureza do material



Fonte: próprio autor

4.4.3 Medida de cor e brilho

Para a medição de cor foi utilizado um espectrofotômetro visível da marca BYK. O ângulo de incidência analisado foi de 45°, com o iluminante de luz média D65. O cálculo do ΔE_{cmc} foi realizado com uso da equação 5, sendo L^* o eixo claro-escuro, a^* o eixo vermelho-verde e b^* o eixo azul-amarelo. A norma utilizada foi a ASTM D 2244 – 05 (ASTM, 2005).

$$\Delta E_{cmc} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (5)$$

A medição do brilho das chapas foi realizada a partir de um *micro-gloss*, do modelo BYK Gloss Meter. Os ângulos de incidência de luz analisados foram de 20° e 60°.

4.4.4 Ensaios de envelhecimentos

Resistência a água

Os corpos de prova foram imersos em água na temperatura de 60 °C ± 2 °C, durante 24 h. Posteriormente, secou-se os corpos de provas e realizou-se uma análise visual em intervalos de 30 minutos durante 2 h. Finalmente, foi realizado um ensaio de aderência em cada amostra.

Resistência à umidade

Para analisar a resistência do revestimento em contato com a umidade, os corpos de prova foram inseridos em uma câmara climática da marca Corrotest CE-300 com controle de umidade relativa e temperatura. A umidade relativa utilizada foi de 95 % ± 5 %, em uma

temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 500 h. Posteriormente, os corpos de prova foram lavados, secados e para em seguida ser realizada uma análise visual em intervalos de 30 minutos durante 2 h, e em seguida foi realizado o ensaio de aderência em cada amostra.

Resistência aos raios UV

Para simular os danos causados ao revestimento durante a exposição à luz solar, os corpos de prova foram inseridos em uma câmara de teste de intemperismo acelerado QUV. O modelo utilizado foi o Atlas UV2000.

O ciclo utilizado foi 8 h, a uma radiação de $0,55\text{ W/m}^2$ e temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; e 4 horas no escuro, a uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os corpos de prova ficaram expostos a essas condições durante 200 h e 400 h.

Inicialmente, a cor de cada amostra foi medida e, após o teste, essa medição foi repetida com o objetivo de saber se houve variação de cor durante a realização do teste.

Resistência ao envelhecimento acelerado

Para os testes de envelhecimento acelerado, foi utilizado o equipamento Ci4000 Weather-Ometer da marca Atlas. O equipamento possui uma lâmpada de xenônio, e filtros de boro-silicato simulando o intemperismo natural.

O ciclo utilizado foi de 82 minutos a seco, a uma temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 18 minutos, com spray de água a uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante todo o ciclo, a radiação utilizada foi de $0,35\text{ W/m}^2$. Os corpos de prova foram expostos durante 750 h e 1500 h. Inicialmente, foi lida a cor de cada amostra e, após o teste, a cor de cada amostra foi medida, com o objetivo de determinar a variação de cor durante a realização do teste.

4.4.5 Ensaio de resistência mecânica

Resistência à batida de pedras

Para definir a resistência do revestimento a batida de pedras, foi utilizado um equipamento no qual dispara pedras nos corpos de prova, chamado gravelômetro Q.G.R da marca Q-Panel. As pedras utilizadas foram cascalho com granulometria variando entre 9,5 mm a 16 mm e uma pressão de lançamento de 4,5 bar. A massa total de pedras para cada ensaio é de 500 g (ASTM, 2003).

Para a realização desse ensaio, primeiramente foi colocado os corpos de prova no refrigerador por 2 h, uma vez que o teste deve ser realizado com a chapa a uma temperatura de

0 °C ± 2 °C. Posteriormente, foi realizado o teste como descrito acima, conforme a norma ASTM D 3170 – 03.

A análise do ensaio foi feita utilizando um gabarito quadricular, selecionando no mesmo o local onde ocorreu a maior incidência de pedras. A partir disso, foi realizada a contagem do número de pontos em que se observou o deslocamento do revestimento e a área do tamanho deste deslocamento. Essa classificação está descrita na tabela 2.

Tabela 2 – Classificação para o teste de batida de pedras

Classificação pelo número de batida de pedras		Tamanho da marcação			
10	Sem marcação	4	50-74	A	< 1 mm
9	1	3	75-99	B	1 – 3 mm
8	2-4	2	100-149	C	3 – 6 mm
7	5-9	1	150-250	D	> 6 mm
6	10-25	0	>250		
5	25-49				

Fonte: ASTM, 2003

Resistência ao estiramento

Para avaliar a flexibilidade do filme, foi realizado o teste de estiramento utilizando um mandril cônico, como da figura 21. O dobramento da chapa foi feito durante 15 segundos. A análise foi realizada a partir da medição do tamanho do deslocamento do revestimento, caso exista. Esse ensaio está descrito na norma ASTM D 522 – 93^a (ASTM, 1993).

Figura 21 – Mandril Cônico

Fonte: TKB Instruments, 1994

Resistência ao embutimento

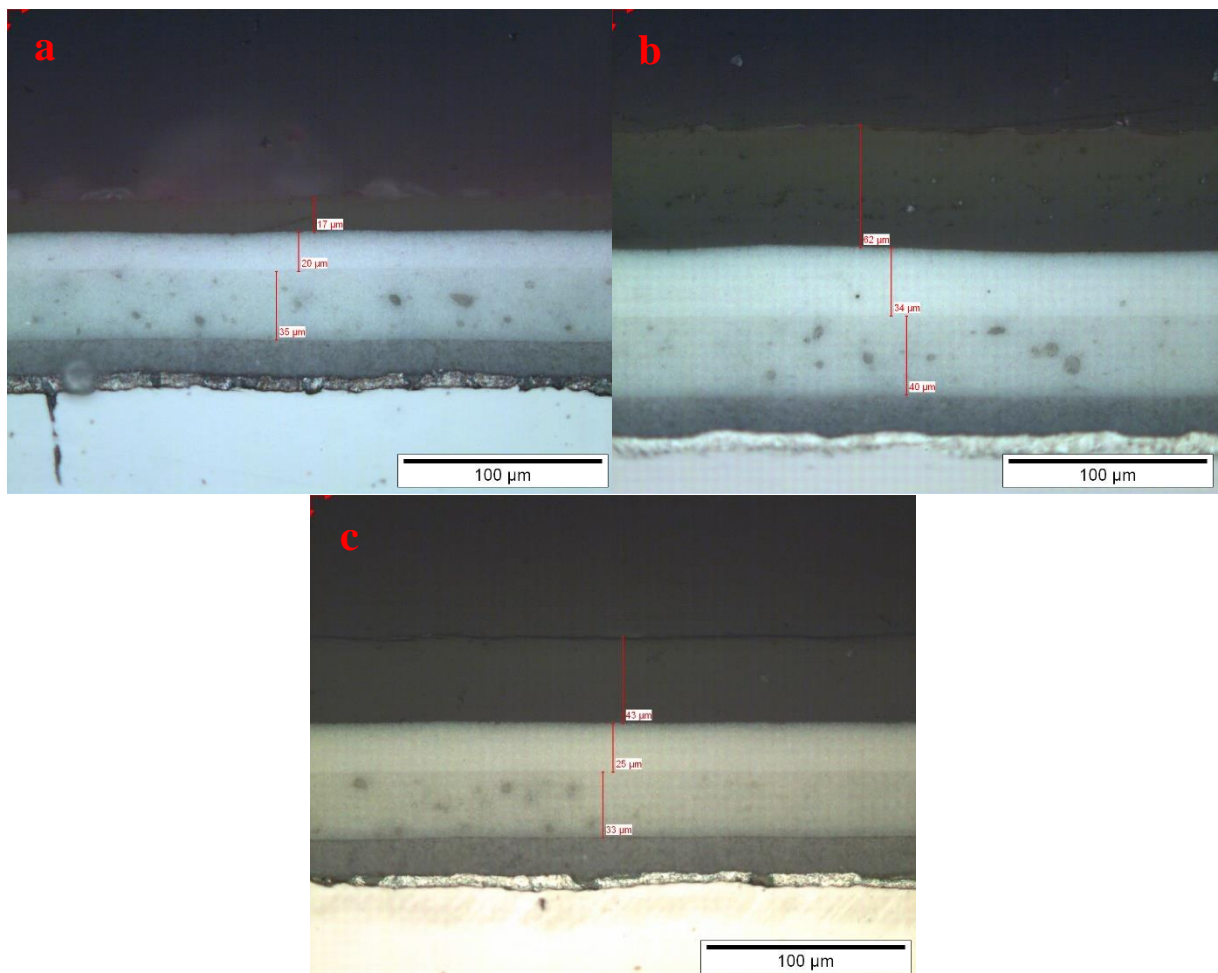
Os corpos de prova foram submetidos a um ensaio de embutimento utilizando uma máquina universal de ensaio de embutimento, da marca BYK. As amostras foram submetidas ao estiramento até o aparecimento de uma trinca no revestimento. O teste foi realizado em duplicata, e foi levado em consideração a medida em milímetros da deformação desses corpos de prova até o aparecimento dessas trincas. Foi realizado a média e o desvio padrão desses valores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Espessura da camada de verniz

A espessura da camada de verniz pode ser visualizada na figura 22. Foi constatado que a camada com número de demão igual a 3 possuiu 17 μm de espessura, número de demão igual a 6 obteve 62 μm e demão igual a 4,5 apresentou 43 μm . Com isso, apesar de ser utilizado uma aplicação manual no qual foi considerado o número de demãos, é possível afirmar que neste estudo foi considerado uma camada baixa de verniz, uma camada alta de verniz e uma camada média de verniz.

Figura 22 – Espessura da camada de verniz

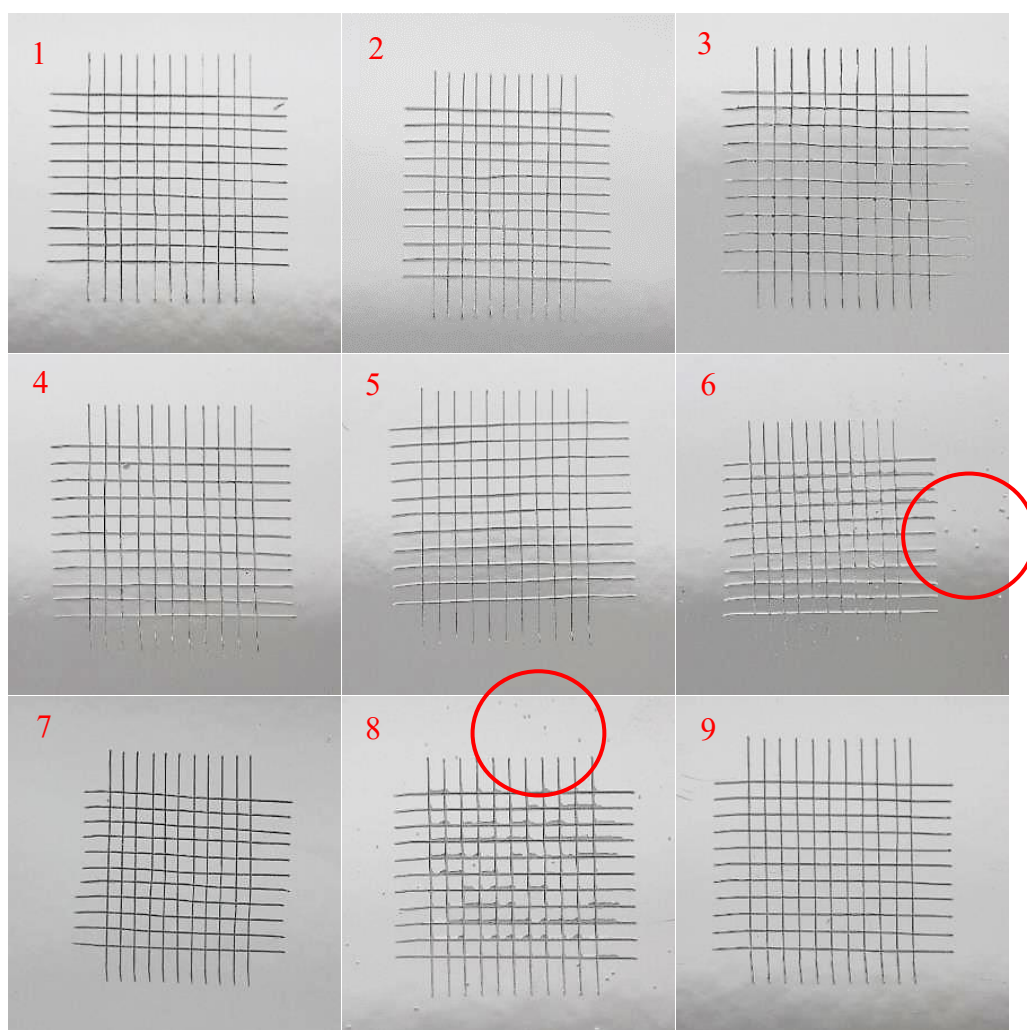


- (a) espessura mínima de 17 μm
 - (b) espessura máxima de 62 μm
 - (c) espessura média de 43 μm
- fonte: próprio autor

5.2 Aderência após aplicação

O resultado da aderência do revestimento após a aplicação pode ser observado na figura 23 e descrito na tabela 3. Foi observado o aparecimento de bolhas no filme nas condições de aplicação 6 e 8. Além disso, houve um deslocamento em ambas amostras, em que a condição 6 obteve um deslocamento de até 5%, sendo classificada como adesão 1 e a condição 8, com deslocamento de 10%, classificada como adesão 2, de acordo com a norma ASTM D 3359 – 09. Conforme descreveu Fazenda 2009, esses defeitos ocorrem devido ao excesso da camada de verniz, gerando o aprisionamento de solventes, e levando ao deslocamento do filme.

Figura 23 – Imagem das adesões realizadas em corpos de prova à novo



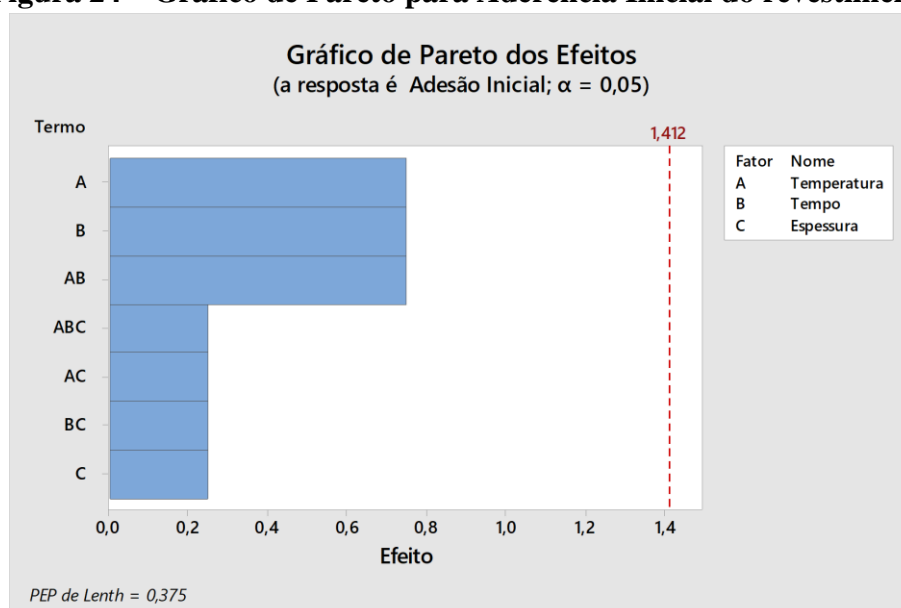
Fonte: próprio autor

Tabela 3 – Resultado da adesão inicial e análise visual do revestimento

Condição de Aplicação	Classificação adesão	Análise Visual
Condição 1	0	Ok
Condição 2	0	Ok
Condição 3	0	Ok
Condição 4	0	Ok
Condição 5	0	Ok
Condição 6	1	Fervura
Condição 7	0	Ok
Condição 8	2	Fervura
Condição 9	0	Ok

Fonte: próprio autor

A partir da análise do planejamento experimental para aderência inicial do revestimento na figura 24, foi constatado que a temperatura e a espessura do verniz influenciaram na fixação do verniz na camada do *basecoat* branco. O gráfico de Pareto indicou que a temperatura, o tempo e a combinação de tempo/temperatura, apresentou uma influência maior que com relação aos demais fatores. Entretanto, essa influência não foi significativa para a aderência do verniz, uma vez que não foi atingido a linha de referência em 1,412. Essa linha de referência foi calculada a partir da margem de erro, no qual o valor de t foi de 0,975 e o valor de PSE para os efeitos encontrados foi de 1,448.

Figura 24 – Gráfico de Pareto para Aderência Inicial do revestimento

Fonte: próprio autor

5.3 Dureza do revestimento

A medição da dureza Persoz em três regiões dos corpos de prova e a média e o desvio padrão desses valores estão descritos na tabela 4. A partir dessa média da dureza, obteve o gráfico de Pareto apresentado na figura 25. Foi observado que a espessura da camada de verniz exibiu maior influência na dureza do material. Tal fator é significativo para a propriedade do revestimento, uma vez que a barra do fator C no gráfico cruzou a linha de referência no valor de 1,412. Esse comportamento ocorreu porque ao variar a camada de verniz, o revestimento com menor camada apresentou uma dureza maior que o revestimento com maior camada, ao considerar a mesma temperatura e tempo de cura. Além disso, o tempo também influenciou na dureza do material, apesar de não ter cruzado a linha de referência.

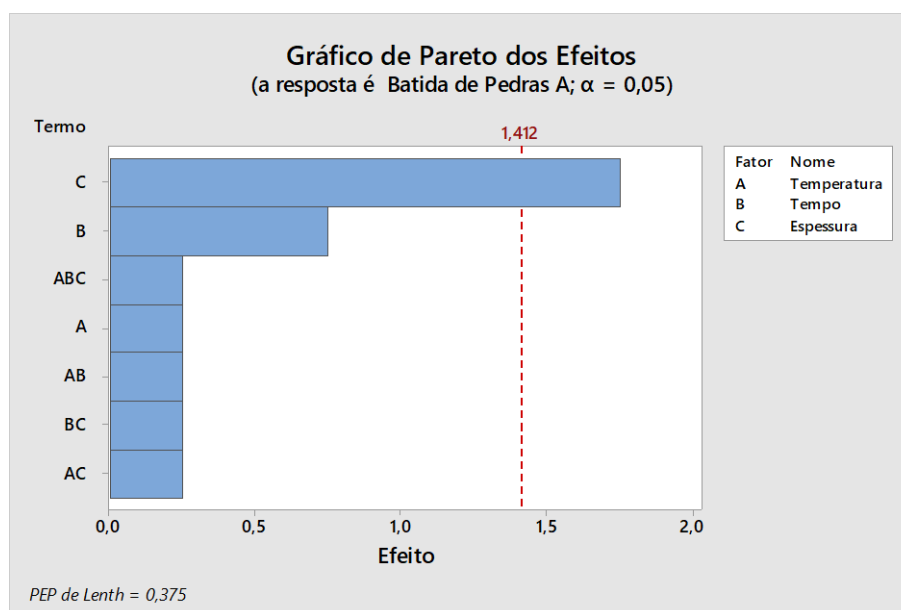
Essa diferença na dureza pode estar relacionada ao fato de que uma espessura maior requer uma maior carga térmica para atingir a cura do material, considerando a mesma temperatura e tempo.

Tabela 4 – Dureza Persoz dos revestimentos

Aplicação	Região 1 (Persoz)	Região 2 (Persoz)	Região 3 (Persoz)	Média (Persoz)	Desvio Padrão
Condição 1	123	118,5	115	119	4
Condição 2	102,5	104,5	101,5	103	2
Condição 3	230	250	245,4	242	10
Condição 4	228,5	234,5	234	232	3
Condição 5	140	149,5	154	148	7
Condição 6	115	119	119,5	118	2
Condição 7	259	247	268,5	258	11
Condição 8	229,5	224	226	227	3
Condição 9	212	210	209,5	211	1

Fonte: próprio autor

Figura 25 – Gráfico de Pareto para a Dureza do revestimento



Fonte: próprio autor

5.4 Cor e brilho após aplicação

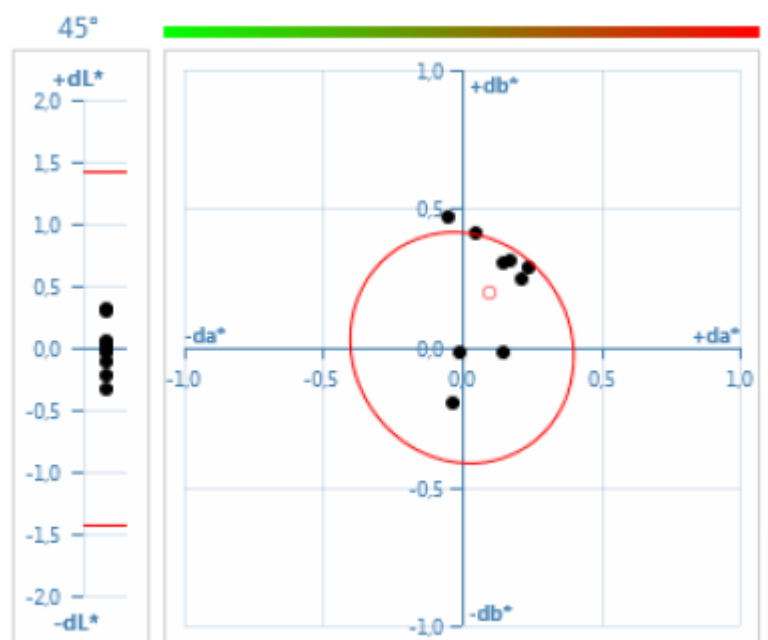
Para a análise de cor, foi considerada a Condição 9 como referência para as demais aplicações, uma vez que os parâmetros aplicados se referem ao ponto central do planejamento de experimento. Na tabela 5, está apresentado o valor das cores absolutas da condição 9 utilizando a escala CIE-LAB com os respectivos os valores de delta para as demais aplicações. A partir desses valores, foram gerados os gráficos da figura 26. Nesses gráficos foram possíveis identificar um círculo vermelho e linhas vermelhas à esquerda. Essas linhas referem-se a tolerância de $\Delta E_{cmc} = 0,5$ (KIRCHNER, 2012). A partir desses gráficos, foi observado que as cores estão dentro dessa tolerância, estando praticamente todos os pontos estão dentro desse círculo vermelho e entre as linhas vermelhas à esquerda.

Tabela 5 – Avaliação de cor

	$dE_{cmc} 45^\circ$	$L^* 45^\circ$	$a^* 45^\circ$	$b^* 45^\circ$
Valores absolutos (condição 9)	2,0:1,0	90,22	-1,95	2,99
Aplicação	$dE_{cmc} 45^\circ$	$dL^* 45^\circ$	$da^* 45^\circ$	$db^* 45^\circ$
Condição 1	0,43	0,32	0,21	0,25
Condição 2	0,42	0,03	0,15	0,31
Condição 3	0,19	-0,12	0,15	-0,02
Condição 4	0,51	-0,34	0,05	0,41
Condição 5	0,48	0,29	0,24	0,29
Condição 6	0,45	0,06	0,17	0,32
Condição 7	0,24	-0,03	-0,03	-0,20
Condição 8	0,57	-0,22	-0,05	0,48

Fonte: próprio autor

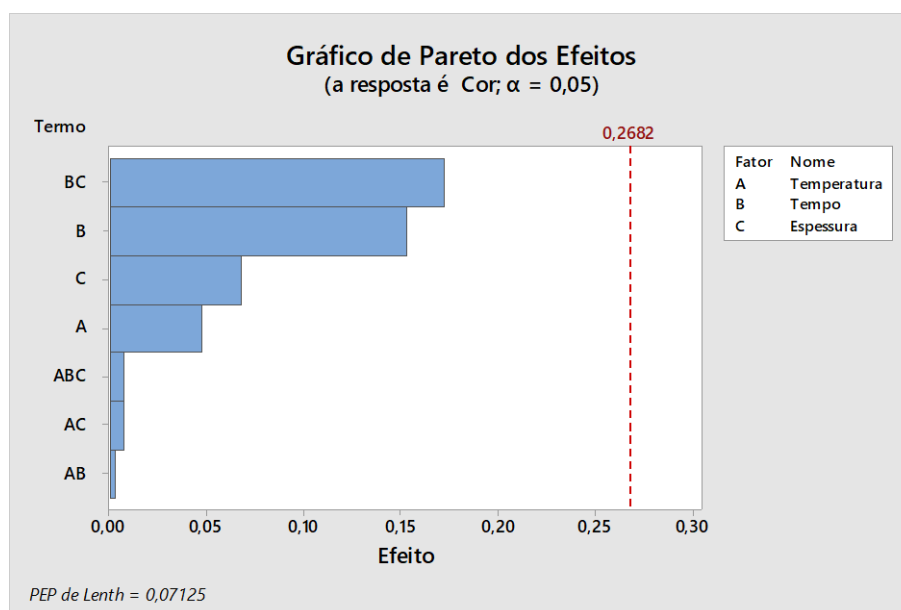
Figura 26 – Análise de cor considerando a condição 9 como padrão



Fonte: próprio autor

Considerando os fatores analisados no planejamento de experimento, ao observar o gráfico de Pareto na figura 27 foi possível indicar que apesar da combinação de tempo e a espessura de camada influenciarem na a cor do revestimento, o mesmo não foi significativo para modificar as propriedades do material.

Figura 27 – Gráfico de Pareto para a Cor do revestimento



Fonte: próprio autor

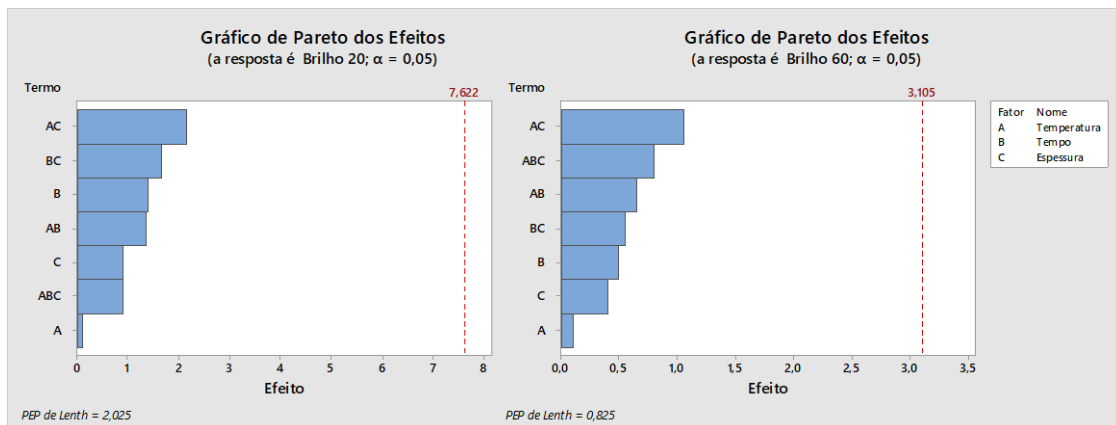
Na tabela 6 está apresentada a medição do brilho dos corpos de prova. Foram utilizados os ângulos de incidência de luz de 20° e 60°, no qual praticamente todos os valores medidos estão acima de 90. Por se tratar de alto brilho e possuírem valores acima de 70UB, os corpos de prova não apresentaram uma mudança visual perceptível. (HANSON,2006). Pelos gráficos de Pareto na figura 28 dos dois ângulos de incidência, foi possível concluir que a temperatura de cura, o tempo de cura e a espessura de camada de verniz não alteram a propriedade do material, uma vez que nenhum fator ultrapassou a linha de referência com valores de 7,622 e 3,705, respectivamente.

Tabela 6 – Brilho das amostras

Aplicação	20° (Ub)	60° (Ub)
Condição 1	90,3	95,6
Condição 2	89,6	95,7
Condição 3	92,6	97,3
Condição 4	93,4	96,9
Condição 5	92,1	96,9
Condição 6	92,3	96,7
Condição 7	88,3	94,9
Condição 8	93,6	97,4
Condição 9	93,7	97,5

Fonte: próprio autor

Figura 28 – Gráfico de Pareto para o Brilho do revestimento

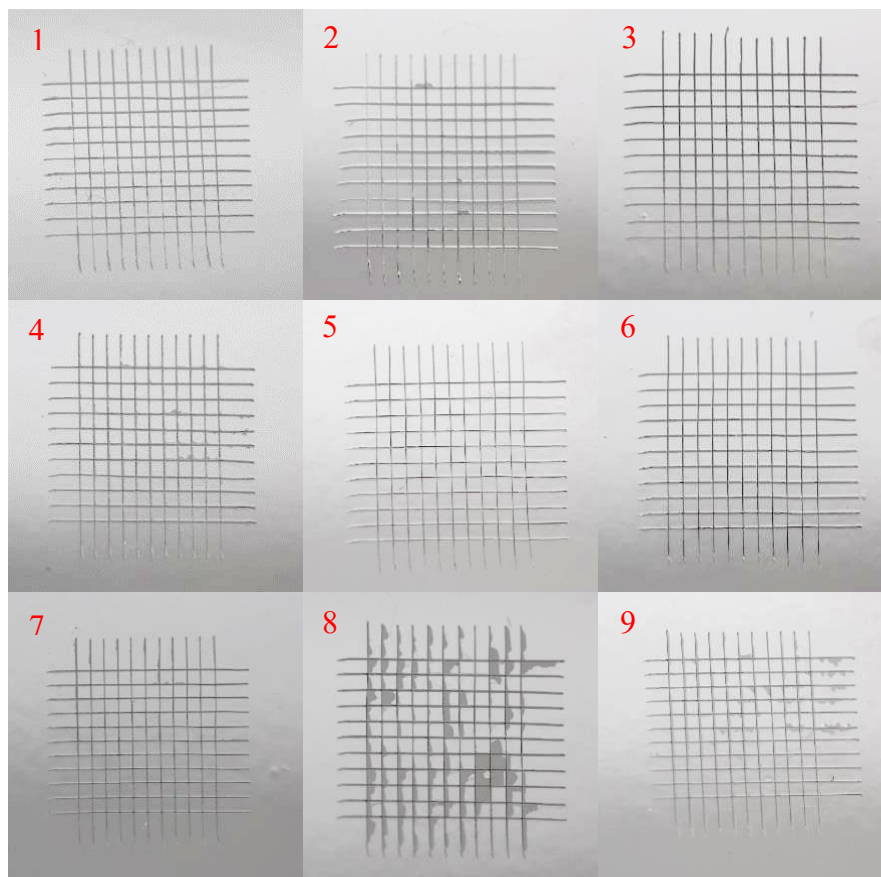


Fonte: próprio autor

5.5 Resistência à água

O teste de aderência após os corpos de prova ficarem imersos em água durante 24h à 60 °C podem ser observados na figura 29 e os resultados foram descritos na tabela 7. Na imagem, as condições de aplicação 2 e 4 apresentam um pequeno deslocamento em alguns pontos das incisões. Essas regiões correspondem a menos de 5 % da área total, sendo então toleradas de acordo com a norma ASTM D 3359 – 09. Entretanto, na condição 8, no qual foi utilizada a maior temperatura de cura, tempo de cura e espessura de camada, o corpo de prova apresentou um deslocamento em torno de 35 %. Assim, esses fatores combinados podem interferir na adesão do revestimento na chapa (ASTM, 2014). Além disso, foi observado um deslocamento no corpo de prova da condição 9 em torno de 10 %.

Figura 29 - Imagem das adesões realizadas em corpos de prova após o teste de água 24 h à 60 °C



Fonte: próprio autor

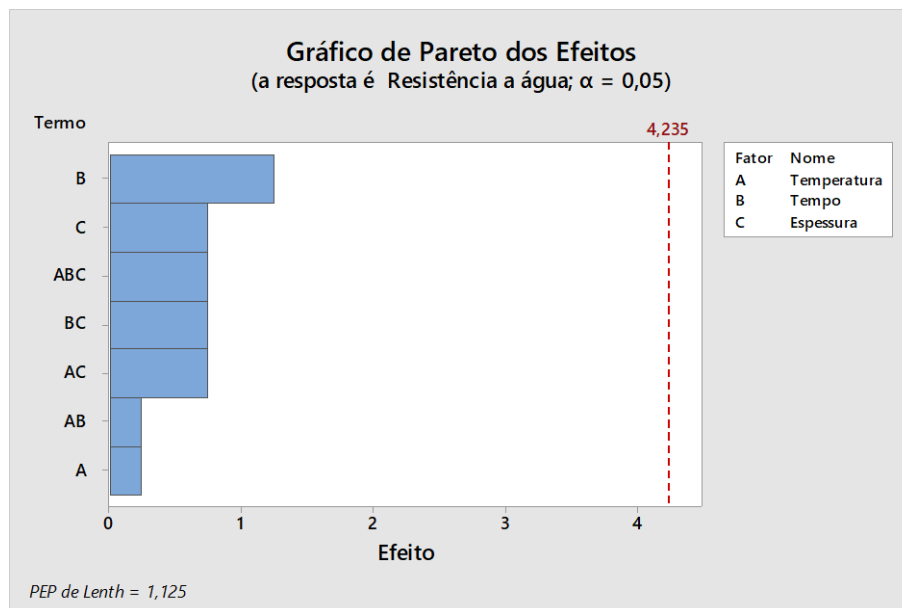
Tabela 7 – Resultado da adesão após imersão em água durante 24 h à 60 °C e análise visual do revestimento

Condição de Aplicação	Classificação adesão	Análise Visual
Condição 1	0	Ok
Condição 2	1	Ok
Condição 3	0	Ok
Condição 4	1	Ok
Condição 5	0	Ok
Condição 6	0	Ok
Condição 7	0	Ok
Condição 8	3	Ok
Condição 9	2	Ok

Fonte: próprio autor

Ao analisar o gráfico de Pareto da figura 30 para a resistência do revestimento em água, foi observado que os fatores não apresentaram influência nessa propriedade do material, mesmo a condição 8 tendo um deslocamento maior, ficando distante da linha de referência de 4,235. Isso pode ser explicado pelo fato da Condição 9, no qual é utilizada atualmente, também ter apresentado um deslocamento não tolerado. Assim, fatores externos podem ter contribuídos para esses deslocamento como alteração nas outras camadas do revestimento automotivo.

Figura 30 – Gráfico de Pareto para aderência do revestimento após imersão em água à 60 °C por 24 h

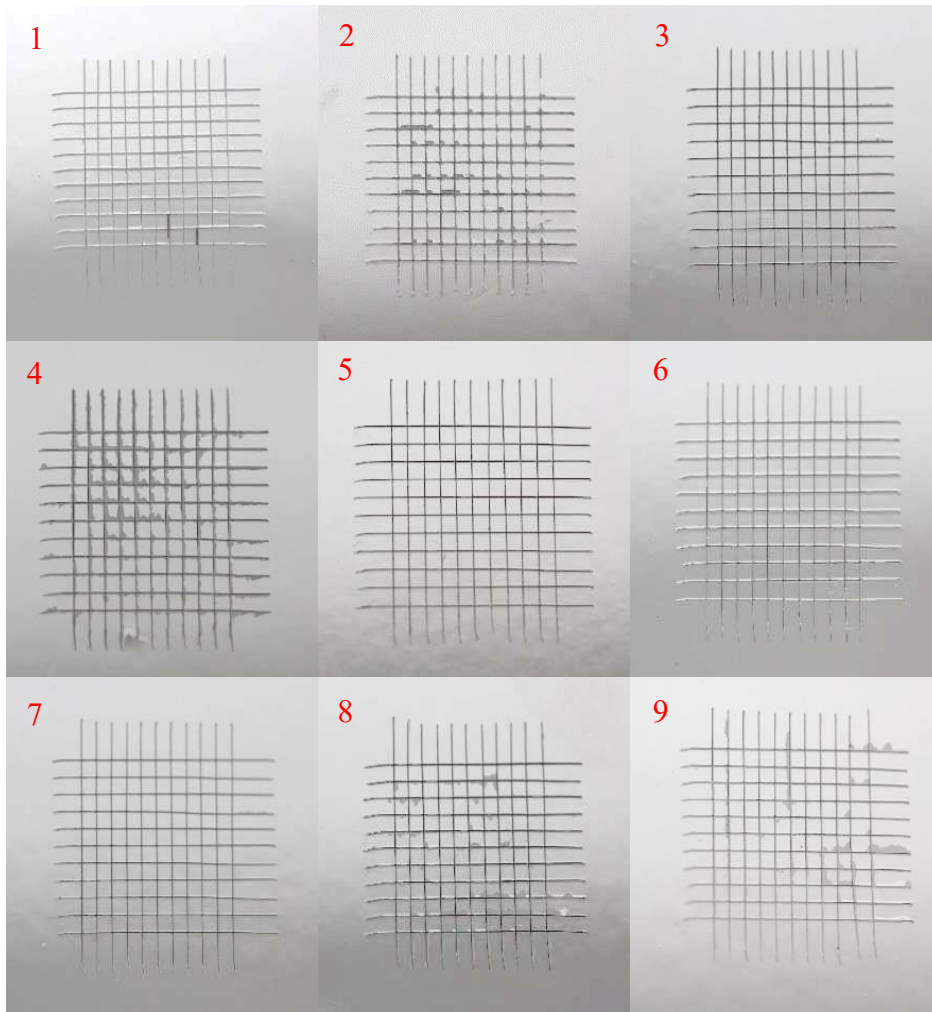


Fonte: próprio autor

5.6 Resistência à umidade

Os resultados para a resistência à umidade apresentaram similaridade com os resultados para resistência à água. Na figura 31, as condições de aplicação 2, 4, 8 e 9 possuíram um deslocamento em torno de 15% e a condição 1 obteve um deslocamento de 5 %, como classificado na tabela 8. Ao analisar o gráfico de Pareto na figura 32, o tempo de cura foi o fator que mais influenciou na aderência do revestimento. Porém, de acordo com o gráfico, esse fator não é significativo para alterar a propriedade do material, uma vez que a barra não cruzou a linha de referência em 4,235. Esse comportamento também pode ser explicado por fatores externos, como falta de limpeza do material, uma vez que foi observado deslocamento também na condição 9.

Figura 31 - Imagem das adesões realizadas em corpos de prova após o teste de umidade por 500 h



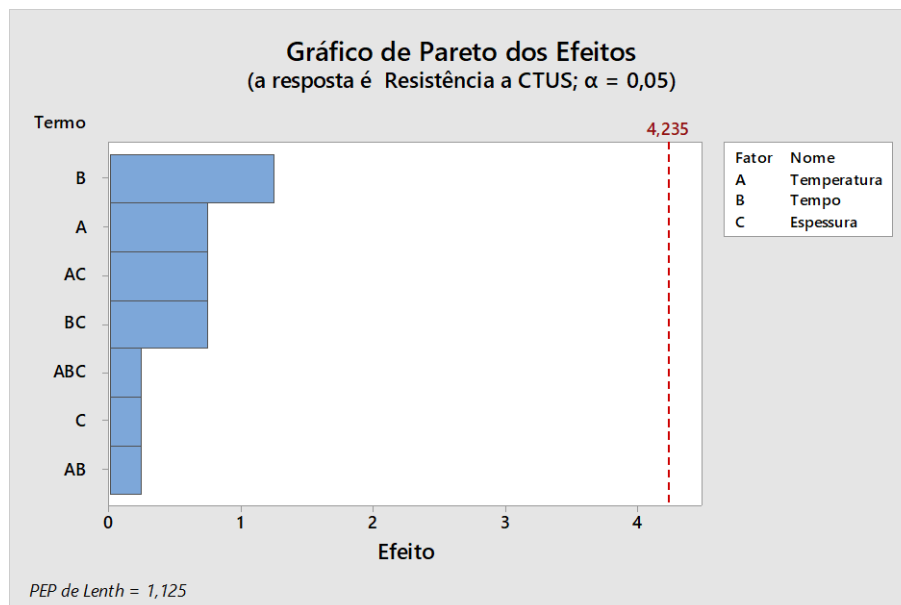
Fonte: próprio autor

Tabela 8 – Resultados após teste de umidade por 500 h

Condição de Aplicação	Classificação adesão	Análise Visual
Condição 1	1	Ok
Condição 2	2	Ok
Condição 3	0	Ok
Condição 4	2	Ok
Condição 5	0	Ok
Condição 6	0	Ok
Condição 7	0	Ok
Condição 8	2	Ok
Condição 9	2	Ok

Fonte: próprio autor

Figura 32 – Gráfico de Pareto para aderência do revestimento após exposição a umidade por 500 h



Fonte: próprio autor

5.7 Resistência a raios UV

A figura 33 apresenta os corpos de prova após exposição a luz UV por 400 h. Foi possível observar que houve um amarelamento das amostras após essa exposição. Esse amarelamento foi esperado, uma vez que o verniz em contato direto com a luz ultravioleta provoca o seu amarelamento, assim como em contato a exposição prolongada a luz solar. Estudos realizados por Batista (2004), indicam que o verniz melamínico quando exposto diretamente a luz UV apresenta elevada taxa de hidrólise que eleva a produção de formaldeído no revestimento. Essa molécula absorve luz UV e se dissocia em radicais livres. Esses radicais são responsáveis por catalisar o processo de foto-oxidação, gerando amarelamento. (BATISTA, 2004).

Figura 33 – Imagem dos corpos de prova após QUV 400 h

Fonte: próprio autor

Foi realizada duas leituras de cada amostra, uma após 200 h de exposição aos raios UV e outra após as 400 h. Esses valores foram apresentados na tabela 9. No caso, os valores de db^* , ou seja, no eixo de azul-amarelo, as amostras apresentaram um amarelamento esperado devido ao tempo de exposição no equipamento. Além disso, o ΔE_{cmc} , que engloba todos os eixos da escala CIE-LAB, apresentou uma elevação, que também é esperado para esse tipo de teste, devido aumento de db^* .

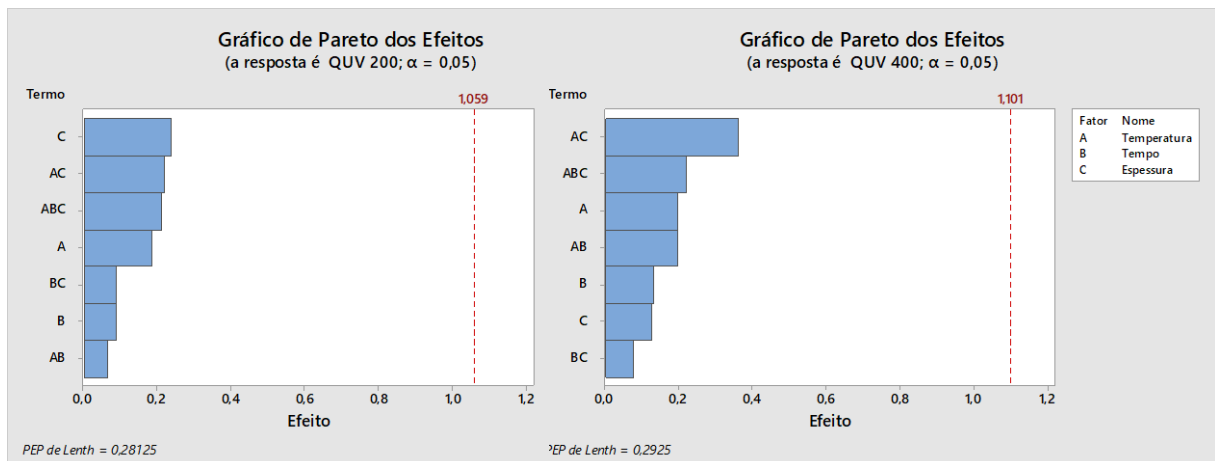
Tabela 9 – Medição da mudança de cores após o teste de QUV 200 h e 400 h

Aplicação	dEcmc 45°	dL* 45°	da* 45°	db* 45°
Condição 1 – Após QUV 200 h	2,51	-0,44	-0,58	2,05
Condição 1 – Após QUV 400 h	2,59	-0,55	-0,54	2,13
Condição 2 – Após QUV 200 h	2,19	-0,41	-0,56	1,77
Condição 2 – Após QUV 400 h	2,77	-0,51	-0,57	2,27
Condição 3 – Após QUV 200 h	2,19	-0,28	-0,44	1,78
Condição 3 – Após QUV 400 h	2,68	-0,37	-0,49	2,19
Condição 4 – Após QUV 200 h	2,47	-0,29	-0,57	2,07
Condição 4 – Após QUV 400 h	3,15	-0,34	-0,64	2,65
Condição 5 – Após QUV 200 h	2,77	-0,37	-0,60	2,28
Condição 5 – Após QUV 400 h	3,12	-0,57	-0,56	2,57
Condição 6 – Após QUV 200 h	2,74	-0,39	-0,60	2,29
Condição 6 – Após QUV 400 h	3,35	-0,57	-0,66	2,82
Condição 7 – Após QUV 200 h	2,44	-0,26	-0,56	2,02
Condição 7 – Após QUV 400 h	2,93	-0,36	-0,57	2,43
Condição 8 – Após QUV 200 h	2,16	-0,23	-0,54	1,82
Condição 8 – Após QUV 400 h	2,57	-0,32	-0,56	2,21
Condição 9 – Após QUV 200 h	2,43	-0,21	-0,57	2,01
Condição 9 – Após QUV 400 h	2,75	-0,09	-0,48	2,36

Fonte: próprio autor

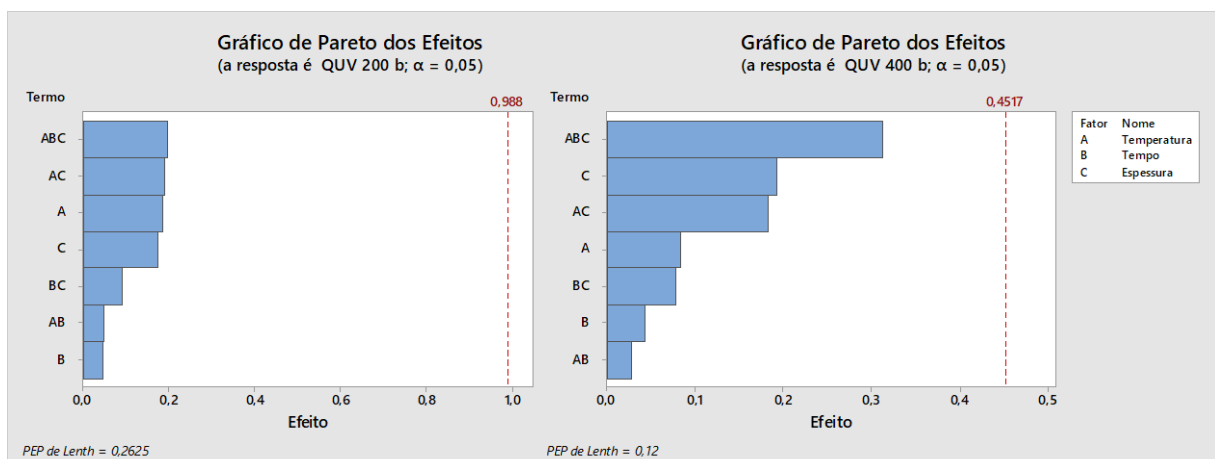
As figuras 34 e 35 mostram o gráfico de Pareto para o teste de QUV das amostras desse estudo. Como os valores de ΔE_{cmc} e db^* apresentaram maiores variações de cores após a exposição a luz UV, neste estudo foi focado nesses dois parâmetros. Ao analisar o ΔE_{cmc} , foi observado que a temperatura de cura e espessura de camada de verniz tiveram maior influência nas cores do revestimento. Já no db^* , todos os fatores foram determinantes para o amarelamento das amostras. Entretanto, esses valores não foram significativos para modificar a propriedade do material.

Figura 34 – Gráfico de Pareto para a cor (dEcmc) das amostras após QUV 200 h e 400 h



Fonte: próprio autor

Figura 35 - Gráfico de Pareto para o amarelamento (db*) das amostras após QUV 200 h e 400 h



Fonte: próprio autor

5.8 Resistência ao envelhecimento acelerado

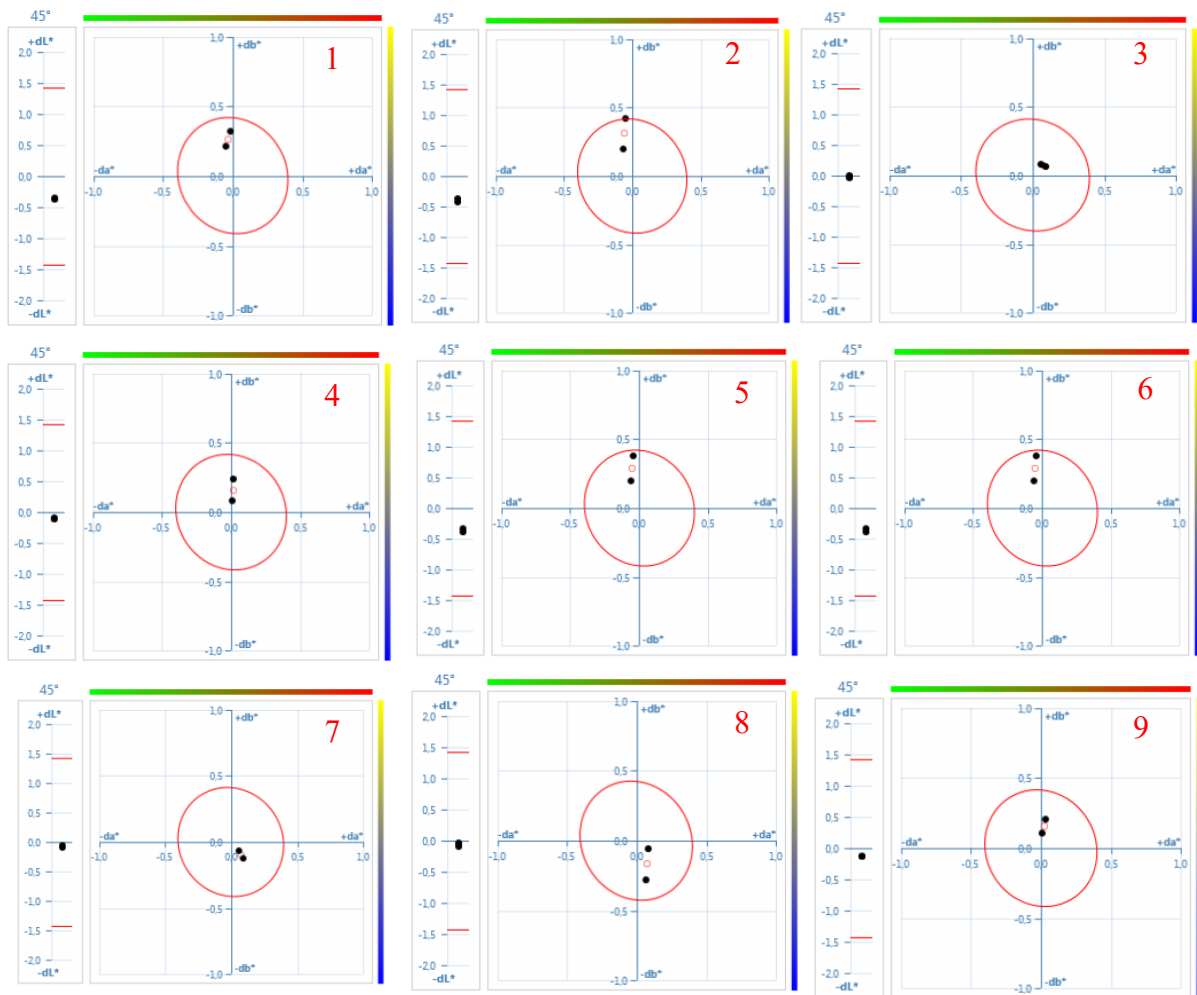
Para o teste de Envelhecimento Acelerado, foi lido a cor dos corpos de prova após 750 h e 1500 h no equipamento. De acordo com a tabela 10, não houve variação significativa dos valores medidos nesses dois períodos de tempo. Além disso, a variação de cor após os corpos de prova ficarem expostos também não foi significativa, ficando dentro de uma margem de tolerância de 0,5, como pode ser visto na figura 36.

Tabela 10 - Medição da mudança de cores após o teste de Weather Ometer 750 h e 1500 h

Aplicação	dEcmc 45°	dL* 45°	da* 45°	db* 45°
Condição 1 – Após WO 750 h	0,29	-0,35	-0,05	0,22
Condição 1 – Após WO 1500 h	0,40	-0,38	-0,02	0,32
Condição 2 – Após WO 750 h	0,27	-0,36	-0,07	0,20
Condição 2 – Após WO 1500 h	0,53	-0,42	-0,05	0,43
Condição 3 – Após WO 750 h	0,13	0,00	0,06	0,08
Condição 3 – Após WO 1500 h	0,14	-0,04	0,09	0,06
Condição 4 – Após WO 750 h	0,11	-0,11	0,01	0,08
Condição 4 – Após WO 1500 h	0,29	-0,10	0,01	0,24
Condição 5 – Após WO 750 h	0,21	-0,26	-0,03	0,15
Condição 5 – Após WO 1500 h	0,24	-0,34	0,00	0,17
Condição 6 – Após WO 750 h	0,27	-0,33	-0,06	0,20
Condição 6 – Após WO 1500 h	0,46	-0,39	-0,05	0,38
Condição 7 – Após WO 750 h	0,11	-0,05	0,06	-0,07
Condição 7 – Após WO 1500 h	0,19	-0,10	0,09	-0,13
Condição 8 – Após WO 750 h	0,33	-0,04	0,07	-0,28
Condição 8 – Após WO 1500 h	0,12	-0,08	0,09	-0,06
Condição 9 – Após WO 750 h	0,14	-0,14	0,01	0,11
Condição 9 – Após QUV 400 h	0,26	-0,14	0,04	0,21

Fonte: próprio autor

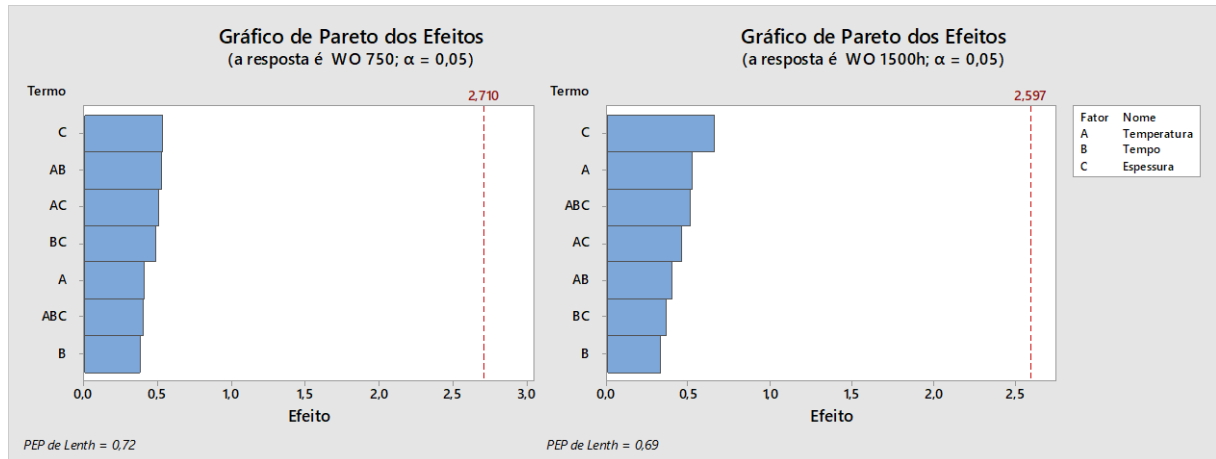
Figura 36 – Análise da cor após exposição ao Weather Ometer após 750 h e 1500 h



Fonte: próprio autor

Considerando que o dL^* , da^* e db^* apresentaram uma variação similar, para a análise do experimento fatorial, foi utilizado os valores de dE_{cmc} . Em ambos os gráficos de Pareto na figura 37, a espessura da camada de verniz foi o fator que mais influenciou na mudança de cor do revestimento, entretanto, não foi significativo para alterar a propriedade de cor do material. Assim, independente da temperatura de cura, tempo de cura e da espessura da camada de verniz, o revestimento não sofreu alteração de cor quando exposto ao intemperismo natural.

Figura 37 – Gráfico de Pareto resposta para a cor (dEcmc) das amostras após Weather Ometer 750 h e 1500 h



Fonte: próprio autor

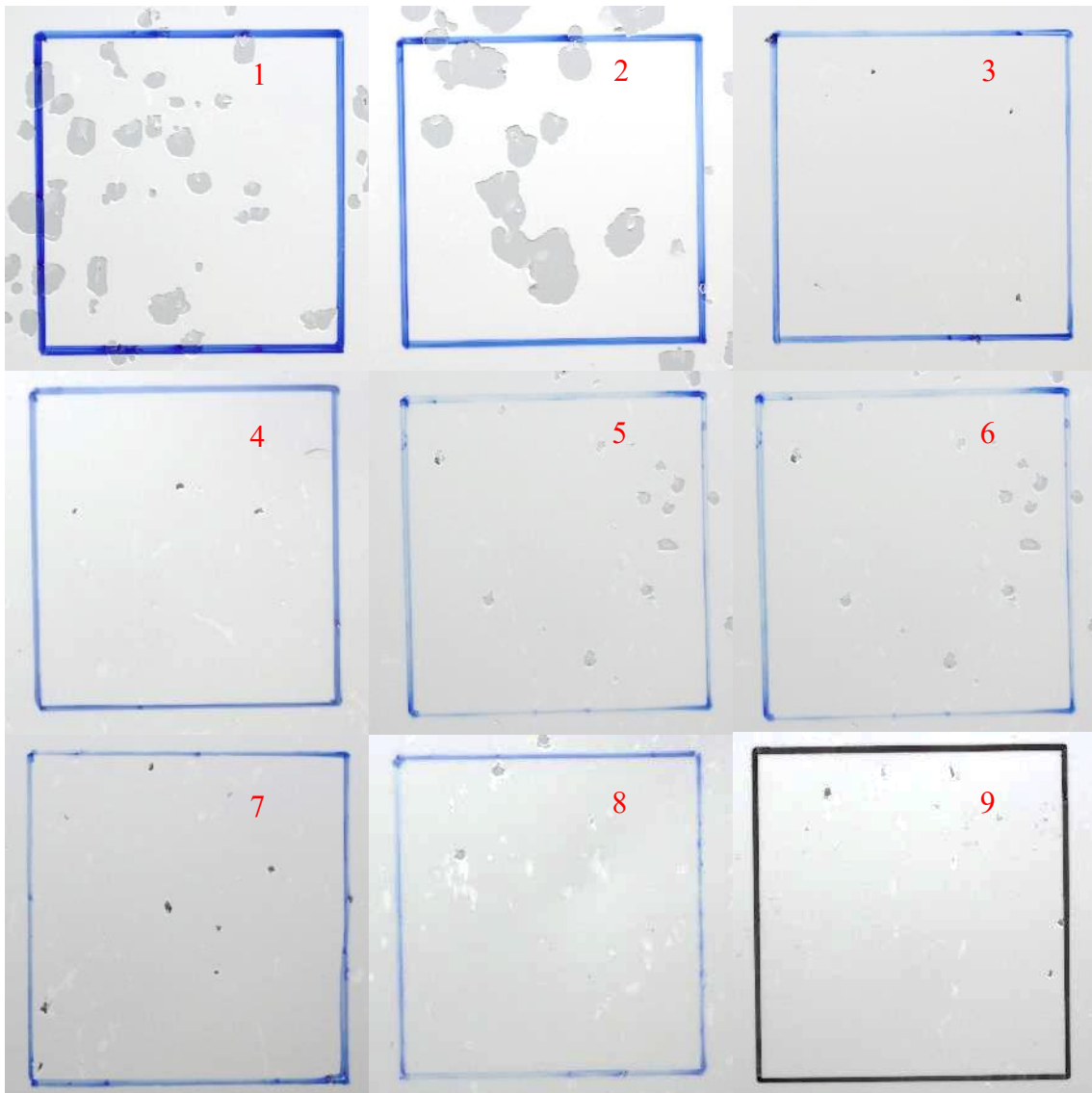
5.9 Resistência à batida de pedras

Os corpos de prova após a batida de pedras podem ser vistos na figura 38. Nas condições 1 e 2 foi observado um diâmetro grande no local em que as pedras colidiram com o revestimento. Esse comportamento foi crítico, uma vez que um veículo automotivo está sujeito a colisão de pequenos objetos durante a sua utilização. Com relação à quantidade de orifícios causados pelas pedras, ocorreu uma variação na classificação entre 5 e 8, como apresentado na tabela 11. A classificação foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3170 – 03 (ASTM, 2003).

Tabela 11- Resultado Batida de Pedras

Condição de Aplicação	Classificação da quantidade de batida de pedras	Classificação do diâmetro do orifício
Condição 1	5	C
Condição 2	6	D
Condição 3	7	A
Condição 4	8	A
Condição 5	6	B
Condição 6	6	B
Condição 7	7	B
Condição 8	8	B
Condição 9	7	B

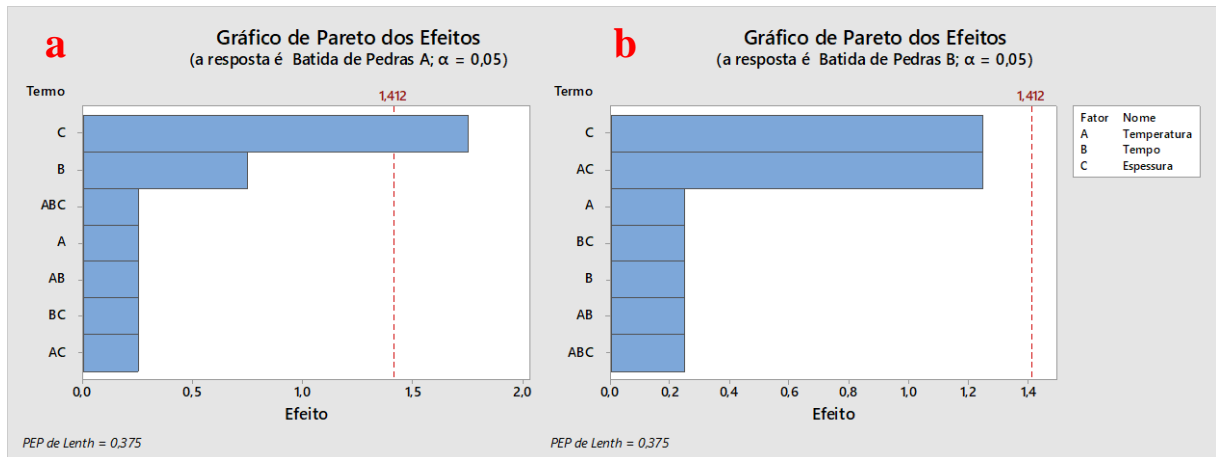
Fonte: próprio autor

Figura 38 – Batida de Pedras

Fonte: próprio autor

De acordo com o gráfico de Pareto da figura 39 (a) quantidade de batida de pedras no revestimento influenciou na resistência do material nas batidas de pedras, sendo que a espessura de camada do verniz ultrapassou a linha de referência em 1,412. Já na figura 39 (b) foi percebido que a espessura de camada de verniz e a combinação de temperatura/espessura de camada de verniz influenciou na propriedade do material. Isso pode ser explicado pelo fato de que a temperatura de cura não foi suficiente para completar todas as ligações cruzadas do material. Além disso, ao utilizar uma espessura baixa de verniz, o material não alcançou uma resistência mecânica suficiente para proteger o revestimento de batida de pedras.

Figura 39 – Gráfico de Pareto para a batida de pedras

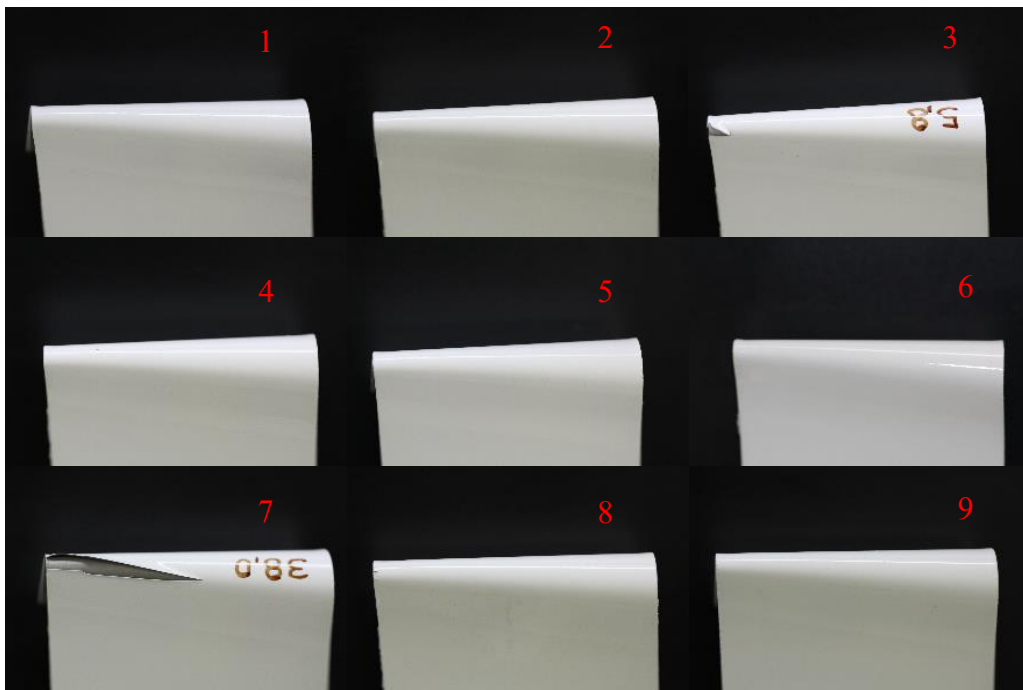


Fonte: próprio autor

5.10 Resistência ao estiramento

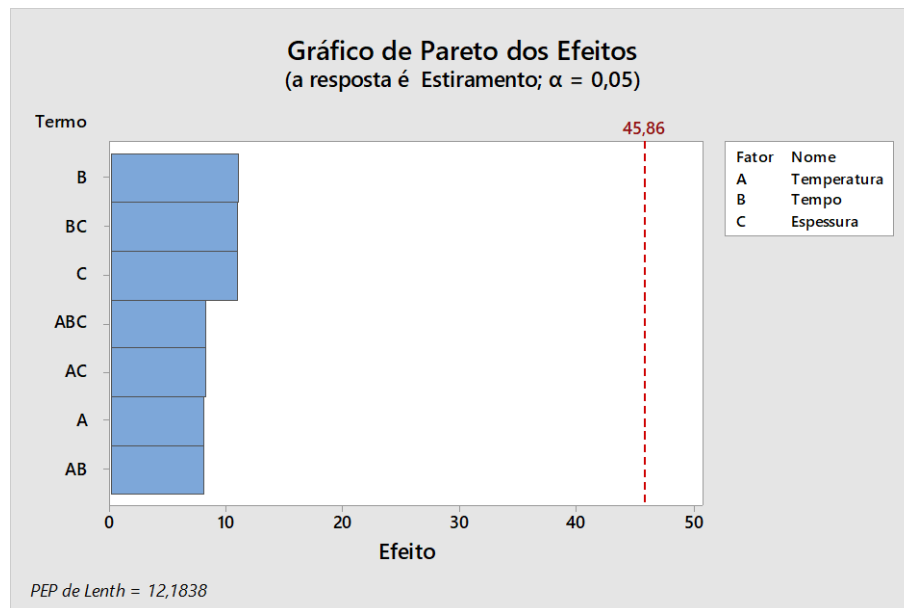
Os corpos de prova após o estiramento do material estão registrados na figura 40. Foi observado que nas condições 3 e 7 ocorreu um deslocamento do revestimento, no qual esse rompimento ocorreu em camadas inferiores à camada em estudo, sendo possível identificar o substrato do material. Com isso, e ao analisar o gráfico de Pareto na figura 41, foi percebido que os fatores não influenciaram na propriedade do material, uma vez que todos não se aproximaram da linha de referência em 45,86.

Figura 40 – Resultado Estiramento



Fonte: próprio autor

Figura 41 – Gráfico de Pareto para Estiramento

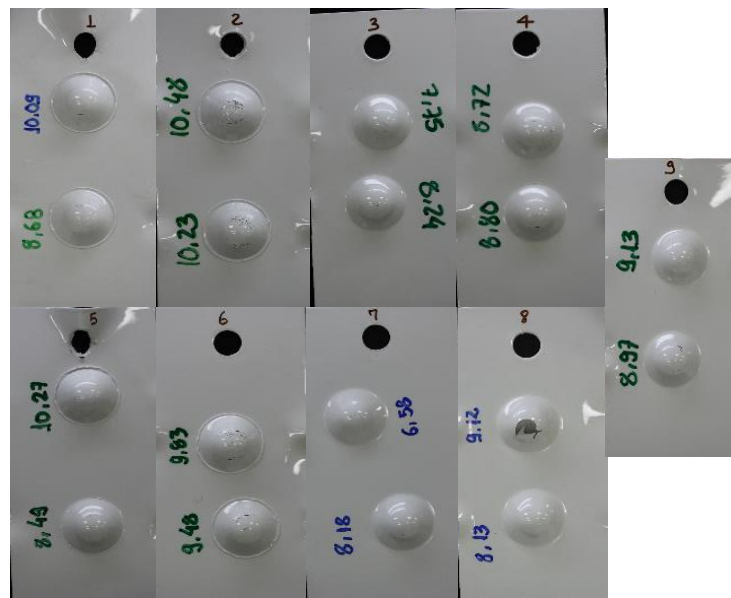


Fonte: próprio autor

5.11 Resistência ao embutimento

Ao avaliar a influência dos três fatores na resistência ao embutimento, foi obtido o resultado da figura 42. Os valores foram descritos na tabela 12, além de sua média e desvio padrão. Os valores da média do embutimento ficaram entre 8,6 mm e 10,4 mm. O maior desvio padrão foi da condição 5 com o valor de 1,3.

Figura 42 – Embutimento



Fonte: próprio autor

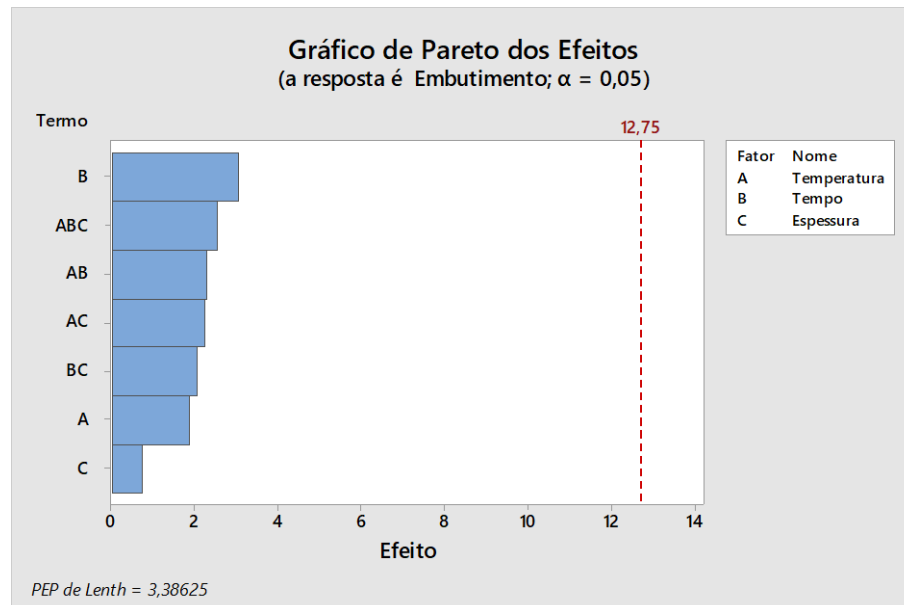
Tabela 12 - Média dos valores de embutimento

Aplicação	Região 1 (mm)	Região 2 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão
Condição 1	8,68	10,09	9,4	1,0
Condição 2	10,23	10,48	10,4	0,2
Condição 3	7,75	8,24	8,0	0,3
Condição 4	8,80	8,72	8,8	0,1
Condição 5	8,48	10,27	9,4	1,3
Condição 6	9,48	9,83	9,7	0,2
Condição 7	8,18	6,58	7,4	1,1
Condição 8	8,13	9,12	8,6	0,7
Condição 9	9,87	9,13	9,5	0,5

Fonte: próprio autor

A partir do gráfico de Pareto na figura 43, foi observado que o tempo de cura influencia na resistência ao embutimento do material, porém não foi suficiente para apresentar uma significância na propriedade do material, por não ultrapassar a linha de referência em 12,75.

Figura 43 – Gráfico de Pareto para Embutimento



Fonte: próprio autor

6. CONCLUSÃO

A partir do trabalho apresentado, foi observado que o tempo de cura, a temperatura de cura e a espessura de camada de verniz influenciam em algumas propriedades da pintura automotiva. O planejamento de experimento fatorial demonstrou ser eficaz, no qual os gráficos de Pareto gerados conseguiram apresentar qual o fator ou quais combinações de fatores podem interferir em determinadas propriedades do revestimento.

Foi visto que a dureza Persoz e a resistência à batida de pedras foram as propriedades diretamente afetadas pela espessura de camada do verniz. Isso porque a variação deste fator comprometeu a propriedade do material.

Nos ensaios de aderência, tanto após a aplicação, quanto após o teste de água e umidade apresentaram, em algumas condições, deslocamento. Apesar disso, o planejamento de experimento fatorial não considerou que os fatores foram determinantes para a alteração dessa propriedade. Esse comportamento também foi observado no ensaio de estiramento e embutimento do material.

A cor e o brilho das chapas também não foram afetados pela alteração do tempo de cura, temperatura de cura e espessura da camada de verniz, mesmo após o teste de envelhecimento acelerado. Já no teste a resistência a luz UV, apesar dos corpos de prova terem amarelados, não foi consequência dos fatores, e sim de uma condição já esperada pelo fato da luz UV incidir diretamente sobre o revestimento e provocar uma foto-oxidação.

REFERÊNCIAS

- AKAFUAH, N. et al. **Evolution of The Automotive Body Coating Process - A Review**. MDPI, Lexington, Julho 2016.
- ASTM, D 2244 – 05. **Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates**. Estados Unidos. Out. 2005.
- ASTM, D 3170 – 03. **Standard Test Method for Chipping Resistance of Coatings**. Estados Unidos. Jul. 2003.
- ASTM, D 3359 – 09. **Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test**. Estados Unidos. Jun. 2014.
- ASTM, D 4366 – 95. **Standard Test Methods for Hardness of Organic Coatings by Pendulum Damping Tests**. Estados Unidos. Out. 1994,
- ASTM, D 522 – 93^a. **Standard Test Methods for Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings**. Estados Unidos. Set. 1993.
- BADOTTI, Alexandre Vilas Boas. **Avaliação do processo de metalização superficial aplicado à peças obtidas por estereolitografia**. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis. Fev. 2003.
- BATISTA, Marcos Antonio Jacó. **Síntese de poliésteres e caracterização de revestimentos poliéster/melamina após degradação em intemperismo acelerado**. Faculdade De Engenharia Química De Lorena. Lorena. Dez. 2004.
- CHEMTREND. **Problemas comum: Olho de peixe**. Disponível em: <https://chemtrend.com/problem/olhos-de-peixe/?lang=pt-br>. Acesso 23 nov. 2020.
- CIDADE, Mariana K. PALOMBINI, Felipe L. LIMA, Natasha F.F. DUARTE, Lauren C. **Método para determinação de parâmetros de gravação e corte a laser CO₂ com aplicação na joalheria contemporânea**. Design e Tecnologia 12. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2016.
- DICKIE, R.A. Bauer, D.R. Ward, S.M. Wagner, D.A. **Modeling paint and adhesive cure in automotive applications**. Elsevier, Progress in Organic Coatings. Mar. 1997.

FAZENDA, M. R. Jorge. **Tintas: Ciências e Tecnologias**. 4ª Ed – Revista e Ampliada. São Paulo: Editora Bluecher, 2009. 1124 p.

FELIPE, José Vicente Afonso. **Pinturas, Barnices y Afines: Composición, formulación y caracterización**. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2013.

FERREIRA, Rafael Fagundes. MAGALHÃES, Nathalia Sette Câmara. CARNEIRO, José Rubens Gonçalves. DUMONT, Marcello Rosa. **Influência da pré-deformação plástica, da temperatura e do tempo de aquecimento no envelhecimento do aço bh220 através de planejamento de experimentos**. Technol. Metal. Mater. Miner. São Paulo. Jul. 2017.

GOLDSCHMIDT, Prof. Dr. Artur. STREITBERGER, Dr. Hans-Joachim. **Basf Handbook on Basics of Coating Technology**. 2ª Ed. Julho, 2007. 791p.

HANSON, Andrew R. **Good Practice Guide for the Measurement of Gloss**. Measurement Good Practice Guide No.94. Londres. 2006.

KOBAYASHI, Sprex K. **Manual de Pintura**. Brasilux, O Brasil tem nossas cores.

KRÄNKEL, Fábio. **Treinamento: Desenvolvimento tecnológico TD – 12. Pintura industrial com tintas líquidas**. WEG Tintas Ltda. - Revisão 4. [S.l.]. 2020.

KIRCHNER, E. J. J. RAVI, J. **Setting Tolerances on Color and Texture for Automotive Coatings**. Industrial Applications. Jun. 2012.

Setting Tolerances on Color and Texture for Automotive Coatings

MARCHETTI, Barbara. **7.M0022 - Gloss Evaluation on Aesthetic Painted Surface**. FCA-Fiat Chrysler Automobiles. Jul. 2018.

MINITAB. **Gráficos de efeitos para Análise de Variabilidade**. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/factorial/analyze-variability/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/>. Acesso: 24 nov. 2020.

MIRANDA, Sarah C. F. **Desenvolvimento e caracterização de tintas em pó com resistência à água**. Mestrado Integrado em Engenharia Química. Universidade do Porto. Porto. Jul. 2010.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. Courier Companies. Arizona, 1991.

MUTO, Angela Silvia. **50471/01 - Alternating ultraviolet radiation/humidity resistance**, André Luiz. FERREIRA, Thaysa Rodrigues Mendes. **Estudo da influência da textura A01 na ancoragem da pintura**. Fiat Chrysler Automobiles: Engenharia de Materiais. Betim. Dez. 2015.

SOUZA, Bruno. **Uso do projeto robusto para identificação de fatores que contribuem na intensidade do aspecto de “casca de laranja” em superfície de para-choques pintados**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

STREITBERGER, H.-J. **Automotive Paints and Coatings**. 2^a. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

TKB INSTRUMENTS. **Mandril Cônico e Mandril Cilíndrico**. Disponível em: <https://www.tkberichsen.com/product-page/mandril-c%C3%B4nico-e-mandril-cil%C3%ADndrico>. Acesso: 17 nov. 2020

TRACTON, Arthur A. **Coatings Technology Handbook**. Taylor e Francis Group. 3^a Edição. Boca Raton, FL. 2006.

TREVIZAN, João Pedro Gonçalves. **Melhoria continua da qualidade no processo de pintura automotiva**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.

VERTURE. ROSSI, Daniel F. **Tratamento de Superfícies: Pinturas em peças Plásticas**. Abril, 2008. 23p.

VETTORAZZI, Ricardo. SIMÕES, Luís Henrique. MORAES, Suéllen da Silva. RIGOLETTO, Ivan de Paula. **Metodologia para Tratativa de Reclamação de Campo - Repintura Automotiva**. 13^o Congresso Internacional de Tintas. 2013.