

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

THAIS OTAVIANO PEREIRA

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS SUBSTRATOS UTILIZADOS
EM PINTURA AUTOMOTIVA QUANTO AO GRAU DE PROTEÇÃO
ANTICORROSIVA**

VOLTA REDONDA

2020

THAIS OTAVIANO PEREIRA

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS SUBSTRATOS UTILIZADOS
EM PINTURA AUTOMOTIVA QUANTO AO GRAU DE PROTEÇÃO
ANTICORROSIVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga
Palmeira

VOLTA REDONDA

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluna:

Thais Otaviano Pereira

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS SUBSTRATOS UTILIZADOS EM PINTURA AUTOMOTIVA QUANTO AO GRAU DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Prof. Ms. Rui Aurélio Barbosa

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho Àquele que, gentil e humildemente, se move em amor em tudo e todos ao meu favor, o meu Pai (Rm 8); ao meu avô, Jarbas das Dores Otaviano (in memoriam), o responsável por provocar em mim o desejo por conhecimento e por inspirar a escolha da carreira que decidi seguir; também aos meus professores, pelo prazer incalculável em poder aprender com suas vidas e ensinamentos, e pelo valioso tempo que tive em suas companhias, em especial, aos professores Alexandre A. Palmeira, Carlos R. Xavier, Diniz Félix, Ecy Cardoso, Jayme Monteiro, Jorge Luís, Lauro M. Takeda, Leonardo Simal, Mauro J. Pisani, Nacib Abdalla, Rui Aurélio, Shimeni Baptista e Yuri Franklin.

AGRADECIMENTOS

Deixo meus sinceros agradecimentos e admiração a todos que se disponibilizaram a fazer parte da elaboração desse trabalho: ao meu professor e orientador Dr. Alexandre A. Palmeira quem viabilizou conexões essenciais para o desenvolvimento do tema proposto, além de toda atenção, tempo e paciência dispensados, e pelo conhecimento compartilhado; igualmente ao engenheiro Andriel Sichi, pelo suporte e orientação referentes ao sistema de pintura automotiva e ao desenvolvimento desse projeto; também ao colega Jose Lázaro pela atenção especial e solicitude ao apresentar-me os detalhes envolvidos nesse tipo de processo de revestimento, assim como aos demais funcionários do setor de pintura da empresa onde esse estudo foi realizado; também ao professor Jayme Monteiro pelos esclarecimentos sobre câmaras de pintura; aos meus pais, Benedito e Elizabeth, e ao engenheiro Mecânico, e meu irmão, Fabrício Otaviano pelo amparo fundamental para a conclusão desse projeto.

RESUMO

Os prejuízos gerados pela corrosão precoce desenvolvida na carroceria dos veículos têm desafiado seus fabricantes a investirem no emprego de revestimentos eficazes quanto à proteção anticorrosiva da superfície de seus produtos em conjunto com o sistema de pintura automotiva utilizado, visto que, anualmente, estima-se serem gastos bilhões de dólares em manutenção, retrabalhos e despesas em geral envolvendo a corrosão dessas estruturas constituídas de aço carbono, material que apresenta excelentes características mecânicas e de custo quanto ao seu emprego nas indústrias automobilísticas, porém, com baixos valores de resistência à corrosão. Os métodos que apresentam maior desempenho em proteção anticorrosiva utilizados hoje pelas montadoras são os de proteção catódica galvânica, por meio do uso de chapas de aço carbono galvanizado à quente (HDG) na composição da superfície externa dos veículos, juntamente com o sistema de pintura automotivo para revestimento e acabamento estético dos mesmos. Porém essa técnica de metalização das chapas ocasiona no aumento do custo de produção desse ativo. Baseado nessa premissa, neste trabalho foi feita a comparação entre chapas de aço carbono utilizadas para compor a superfície externa dos veículos de uma montadora específica, com e sem, revestimento de zinco, quanto ao desempenho anticorrosivo apresentado após passarem pelas etapas do processo de pintura de uma linha automotiva, a fim de demonstrar a influência desses substratos na proteção conferida ao aço. As análises feitas foram baseadas nos resultados dos ensaios de Névoa Salina e Aderência à seco, que revelaram a indiscutível superioridade da performance do aço HDG em relação à proteção anticorrosiva neste sistema de revestimento, quando comparado ao aço carbono comum, ocasionando no evidente impacto no tempo de vida útil disponível oferecido por esses materiais. Os experimentos deste trabalho foram realizados em uma empresa automotiva.

Palavras-chave: Corrosão, Aço HDG, Pintura Automotiva.

ABSTRACT

The damage generated by early corrosion developed in the body of vehicles have challenge their manufactures to invest in the use of effective coatings for the corrosion protection of the surface of their products in conjunction with the automotive paint system used, since billions of dollars are estimated to be spent annually on maintenance, rework and expenses in general involving the corrosion of these structures consisting of carbon steel, a material that has excelent mechanical and cost characteristics in terms of their use in the automotive industries, however, with low corrosion resistance values. The methods that have the highest performance in corrosion protection used today by the automakers are the galvanic cathodic protection, through the use of hot galvanized carbon steel plates (HDG) in the composition of the external surface of the vehicles, together with the automotive paint system for coating and aesthetic finishing of the same. However, this technique of metallization of the plates leads to an increase in the production cost of this asset. Based on this premise, this work made the comparison between carbon steel plates used to compose the external surface of the vehicles of a specifc assembler, with and without zinc coating, as to the anticorrosive performance presented after going through the stages of the painting process of an automotive line, in order to demonstrate the influence of this substrate on the protection afforded to steel. The analyses were based on the results of the saline mist and dry adhesion tests, wich revealed the indisputable superiority of HDG steel performance over corrosion protection in this coating system, when compared to ordinary carbon steel, causing the evident impact in the available lifetime offered by these materials. The experiments of this work were carried out in an automotive company.

Keywords: Corrosion, HDG Steel, Automotive Painting.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Generalidades	14
1.2	Objetivo	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Aços Automotivos	16
2.1.1	Aços AHSS	18
2.1.2	Aços planos na carroceria	22
2.2	Corrosão	25
2.2.1	Corrosão química	26
2.2.2	Corrosão eletroquímica	26
2.2.3	Maneiras de manifestação da corrosão	27
2.2.4	Variáveis de um processo corrosivo	31
2.2.4.1	Ação do ambiente sobre o material metálico	33
.....		33
2.2.5	Tipos de corrosão em carrocerias de automóveis	35
2.3	Tratamento de superfície	36
2.3.1	Metalização	36
2.3.2	Pintura	38
2.3.2.1	Revestimento não metálico inorgânico	38
2.3.2.1.1	Fosfotização	39
2.3.2.1.2	Nano tecnologia	40
2.3.2.2	Revestimento não metálico orgânico	40
2.3.2.2.1	Tintas	40
2.3.2.2.1.1	Meios de aplicação	45
2.3.3	Sistema de proteção: pintura automotiva	48
2.3.3.1	Tratamento de superfície (pré-tratamento)	50

2.3.3.2	Aplicação da Cataforese (KTL).....	54
2.3.3.3	Vedação.....	56
2.3.3.4	Aplicação do primer.....	58
2.3.3.5	Aplicação da base e do verniz.....	63
2.3.3.6	Acabamento.....	65
3	METODOLOGIA.....	68
3.1	Preparação das amostras.....	69
3.2	Revestimento dos corpos de prova.....	70
3.3	Ensaio de Névoa Salina.....	72
3.4	Ensaio de aderência a seco.....	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
4.1	Ensaio de névoa salina.....	80
4.2	Ensaio de aderência a seco.....	81
5	CONCLUSÃO.....	84
6	REFERÊNCIAS.....	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 COMPARAÇÃO ENTRE TIPOS DE AMBIENTES POR MEIO DE COEFICIENTES INDICATIVOS DE GRAU DE AGRESSIVIDADE DOS MESMO.	35
TABELA 2 PROPRIEDADE SUPERFICIAL DA TINTA PARA DIFERENTES TIPOS DE APLICAÇÕES.	44
TABELA 3 CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DAS CHAPAS EM AÇO HDG.....	69
TABELA 4 CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DAS CHAPAS EM AÇO CARBONO.	69
TABELA 5 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DO ASPECTO SUPERFICIAL DO FILME DE PINTURA SEGUNDO A NORMA ASTM D610-08	80
TABELA 6 REGISTRO DOS VALORES DE MASSA (EM GRAMAS) DOS CORPOS DE PROVA ANTES E DEPOIS DO ENSAIO EM CAMARA SALT SPRAY.	81
TABELA 7 CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE ADESÃO CONFORME A NORMA NBR 11003.....	82
TABELA 8 CLASSIFICAÇÃO RESULTANTE DA ANÁLISE DO GRAU DE ADESÃO DO FILME DE PINTURA AO SUBSTRATO DAS AMOSTRAS EM AÇO CARBONO E AÇO HDG CONFORME A NORMA NBR 11003.	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 FLUXOGRAMA DA CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS METÁLICOS.	17
FIGURA 2 FALTA DE COMBUSTÍVEL DURANTE A CRISE DO PETRÓLEO EM 1973.	19
FIGURA 3 PIQUENIQUE NA ESTRADA DURANTE A CRISE DO PETRÓLEO (1973).....	20
FIGURA 4 MANCHETE DA DÉCADA DE 90 EVIDENCIANDO UM DOS MOVIMENTOS EM PROL DA SUSTENTABILIDADE.	21
FIGURA 5 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS EM RELAÇÃO AO ALONGAMENTO VERSUS LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, DESTACANDO AS TRÊS GERAÇÕES DOS AÇOS AHSS.....	22
FIGURA 6 PLANO DE DEFORMAÇÃO DE UMA CARROCERIA.	23
FIGURA 7 DIVISÕES DAS PARTES DE UMA CARROCERIA AUTOMOTIVA.	24
FIGURA 8 ESTRUTURA METÁLICA COM AVANÇADO PROCESSO DE CORROSÃO.	25
FIGURA 9 ESTRUTURA NAVAL EM AVANÇADO PROCESSO CORROSIVO E SUBMETIDO À ATMOSFERA EXTREMAMENTE CORROSIVA.	27
FIGURA 10 TIPOS DE MANIFESTAÇÃO DE CORROSÃO.	28
FIGURA 11 METAL COM CORROSÃO DO TIPO ALVEOLAR.....	28
FIGURA 12 EXEMPLIFICAÇÃO DA CORROSÃO DO TIPO PUNTIFORME.	29
FIGURA 13 CORROSÃO ALVEOLAR E POR PITES POR CO ₂	29
FIGURA 14 CORROSÃO DO TIPO POR PLACAS.	30
FIGURA 15 CORROSÃO DO TIPO INTRAGRANULAR.	31
FIGURA 16 ESQUEMA REPRESENTATIVO DE UMA PILHA ELETROQUÍMICA.	32
FIGURA 17 FORMAÇÃO DE FILME DE LÍQUIDO NO INTERIOR DE UM COMPONENTE AUTOMOTIVO.	33
FIGURA 18 BARRA DE AÇO PARA ARMADURA DE CONCRETO GALVANIZADA POR IMERSÃO À QUENTE.	37
FIGURA 19 CARROCERIA EM UM BANHO DE IMERSÃO PARA RECEBER CRISTAIS DE FOSFATO.	39
FIGURA 20 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE PINTURA EM METAL.	41
FIGURA 21 QUALIDADE DAS TINTAS PARA FINS DE REVESTIMENTO EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE SEUS ELEMENTOS CONSTITUINTES.....	44
FIGURA 22 PINTURA MANUAL POR PULVERIZAÇÃO.....	45
FIGURA 23 PROCESSO DE REVESTIMENTO DE TINTA POR ELETRODEPOSIÇÃO CATÓDICA. ...	46
FIGURA 24 IMERSÃO PARA PINTURA SEM CORRENTE ELÉTRICA.	47

FIGURA 25 PISTOLA DE PINTURA.	47
FIGURA 26 PISTOLA PARA PINTURA CONECTADA À BRAÇOS ROBÓTICOS.....	48
FIGURA 27 CAMADAS DE TINTA NA SUPERFÍCIE DAS CARROCERIAS.....	49
FIGURA 28 FASES DE PINTURA EM UMA UNIDADE PRODUTIVA.	50
FIGURA 29 ETAPAS DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE.	51
FIGURA 30 CHAPAS DESTINADAS À CONFECÇÃO DE CARROCERIAS DE AUTOMÓVEIS EM ESTOQUE.	51
FIGURA 31 ESTUFAMENTO DE TINTA DEVIDO A UMA APLICAÇÃO DEFICIENTE DE PRÉ TRATAMENTO DA CHAPA METÁLICA.	52
FIGURA 32 ESQUEMA DA SEQUÊNCIA DO REVESTIMENTO COM CATAFORESE.	54
FIGURA 33 EXEMPLIFICAÇÃO DE REVESTIMENTO POR ELETRODEPOSIÇÃO CATÓDICA.	55
FIGURA 34 ENXÁGUE PÓS ELETRODEPOSIÇÃO DE TINTA.....	56
FIGURA 35 FUNCIONÁRIOS APLICANDO MATERIAIS DE VEDAÇÃO NA CARROCERIA.....	57
FIGURA 36 MASSA DE VEDAÇÃO APLICADA AO INTERIOR DO VEÍCULO.....	57
FIGURA 37 APLICAÇÃO DO PRIMER, POR ASPERSÃO, ATRAVÉS DE BAÇOS ROBÓTICOS.....	59
FIGURA 38 EXEMPLO DE CABINE PARA PINTURA AUTOMOTIVA.	60
FIGURA 39 ESQUEMA DE FILTRAGEM DO AR NA CÂMARA DE PINTURA E ACOLHIMENTO DE OVERSPRAY.	61
FIGURA 40 INTERIOR DE UMA ESTUFA PARA CURA/SECAGEM DE TINTA	62
FIGURA 41 APLICAÇÃO DA TINTA BASE AUTOMATIZADA.	64
FIGURA 42 SUPERFÍCIE DAS CARROCERIAS APÓS A APLICAÇÃO DO VERNIZ.	64
FIGURA 43 INSPEÇÃO DA CARÇAÇA APÓS A PINTURA.	65
FIGURA 44 SEÇÃO DE ACABAMENTO APÓS A PINTURA.	66
FIGURA 45 MONTAGEM DOS DEMAIS COMPONENTES QUE CONSTITUEM UM VEÍCULO AUTOMOTIVO.	67
FIGURA 46 FLUXOGRAMA GERAL (METODOLOGIA).....	68
FIGURA 47 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE REVESTIMENTO APLICADAS ÀS AMOSTRAS EM UMA EMPRESA AUTOMOTIVA.....	70
FIGURA 48 POSICIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA NA CARROCERIA.	71
FIGURA 49 AMOSTRAS EM AÇO CARBONO NA COR RUBI E EM AÇO HDG NA COR BRANCO RESPECTIVAMENTE.	71
FIGURA 50 AMOSTRAS APÓS DANO MECÂNICO POR FERRAMENTA COM PONTA DE CARBETO DE TUNGSTÊNIO.....	72
FIGURA 51 POSICIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA NA CÂMARA DE NÉVOA SALINA.....	73

FIGURA 52 EQUIPAMENTO EQUILAN SÉRIE SSE2000.	74
FIGURA 53 ASPECTO SUPERFICIAL DE AMOSTRAS EM AÇO CARBONO E AÇO HDG NO INÍCIO DO ENSAIO EM CAMARA SALT SPRAY.	75
FIGURA 54 ASPECTO SUPERFICIAL DE AMOSTRAS EM AÇO CARBONO E AÇO HDG APÓS EXPOSIÇÃO A ATMOSFERA SALINA DURANTE 100 HORAS.	75
FIGURA 55 ASPECTO SUPERFICIAL DE AMOSTRAS EM AÇO CARBONO E AÇO HDG APÓS EXPOSIÇÃO A ATMOSFERA SALINA DURANTE 200 HORAS.	76
FIGURA 56 ASPECTO SUPERFICIAL DE AMOSTRAS EM AÇO CARBONO E AÇO HDG APÓS EXPOSIÇÃO A ATMOSFERA SALINA DURANTE 300 HORAS.	76
FIGURA 57 ASPECTO SUPERFICIAL DE AMOSTRAS EM AÇO CARBONO E AÇO HDG APÓS EXPOSIÇÃO A ATMOSFERA SALINA DURANTE 400 HORAS.	77
FIGURA 58 ASPECTO SUPERFICIAL FINAL DE AMOSTRAS EM AÇO CARBONO E AÇO HDG APÓS EXPOSIÇÃO A ATMOSFERA SALINA DURANTE 500 HORAS.	77
FIGURA 59 AMOSTRA EM AÇO HDG ANTES E APÓS ENSAIO, RESPECTIVAMENTE, PARA CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE ADESÃO DA PELÍCULA DE PINTURA PROTETIVA APLICADA.	79
FIGURA 60 AMOSTRA EM AÇO CARBONO ANTES E APÓS ENSAIO, RESPECTIVAMENTE, PARA CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE ADESÃO DA PELÍCULA DE PINTURA PROTETIVA APLICADA.	79

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Advanced High Strength Steels
ASTM	American Society for Testing and Materials
BH	Bake Hardening
cm	Centímetro
C-Mn	Carbono-Manganês
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP	Complex Phase
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Dual Phase
g/m ²	Gramas por metro quadrado
HDG	Hot-dip Galvanizing
HF	Hot Forming
HSLA	High Strength Low Alloy
IF	Interstitial Free
IF-HS	Interstitial Free-High Strength
ISO	International Organization for Standardization
KTL	Kathodische Tauch Lackierung
mm	Milímetro
MS	Martensita
NaCl	Cloreto de sódio
NBR	Norma Brasileira
PH	Potencial Hidrogenionico
PVC	Policloreto de Vinila
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TTS	Tratamento de Superfície
°C	Gráus Celcius

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Para que se mantenham competitivas diante das características de mercado atuais, as empresas relacionadas ao ramo automotivo estão sempre buscando o desenvolvimento de processos que se mostrem cada vez mais estáveis e que permitam a geração de produtos com propriedades que sejam mantidas ao longo do tempo de vida útil estabelecido para os mesmos, colocando, portanto, em evidência a qualidade e performance apresentadas por eles.

Nesse cenário, um dos maiores problemas enfrentados pelas montadoras, que afetam diretamente a vida útil dos veículos, é a corrosão do aço que compõe suas carrocerias, gerando grandes prejuízos relacionados à custos adicionais e tempo dispendidos em manutenção e retrabalho em peças/regiões comprometidas do ativo, podendo ocasionar no aumento do seu custo de garantia e no mal funcionamento (ou até mesmo na ruptura) de componentes afetados por ela, gerando insatisfação no consumidor final além de danos à imagem da empresa.

Dessa forma é necessário que seja feito o investimento em técnicas e revestimentos de proteção anticorrosiva eficazes, principalmente, das chapas que compõem a superfície externa dos automóveis, pois são as partes mais propícias a desenvolverem um processo de corrosão precoce. Essa proteção é feita por meio de sistemas de pintura, que criam uma película protetiva na superfície das chapas da carroceria evitando o contato do substrato metálico com agentes corrosivos contidas no meio. Em conjunto com o sistema apresentado, também é comum as empresas do setor automobilístico utilizarem chapas que tenham passado por um prévio tratamento de metalização, em especial, as de aço galvanizado por imersão à quente, ou aço HDG, como são chamadas, que consistem em chapas de aço carbono revestidas por uma camada de zinco que promove o aumento do desempenho anticorrosivo das mesmas.

O zinco é bastante empregado pelas indústrias automotivas na proteção catódica das chapas pois ele se mostra altamente compatível com as etapas de revestimento aplicadas durante o processo de pintura do veículo, além de promover excelente ancoragem com as camadas de tinta depositadas. Porém, o processo de galvanização que confere essa proteção extra à corrosão em chapas de aço encarece os custos de fabricação do veículo (TRAVASSOS 2011), gerando um impasse para as montadoras, onde: esse aumento de custo reflete no preço final do produto, que muitas vezes não é bem recebido pelos consumidores, ao passo que, a diminuição da resistência anticorrosiva da superfície do automóvel tem um grande impacto na redução da sua vida útil, comprometendo sua garantia e, assim, prejudicando o retorno financeiro que a empresa teria com a venda do veículo (TRAVASSOS 2011).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo comparar a eficiência da proteção anticorrosiva proporcionada por um revestimento obtido por meio de um sistema de pintura automotivo aplicado sobre chapas de diferentes composições, aço carbono ABNT 1008 e aço galvanizado por imersão à quente (HDG), afim de demonstrar de forma clara e prática algumas das consequências relacionadas a opção das montadoras por confeccionar a superfície externa dos seus automóveis por meio de algum dos materiais anteriormente citados.

Duas amostras de cada um deles serão submetidas aos ensaios de Névoa Salina e Aderência à Seco, sendo seus resultados conduzidos e analisados conforme as orientações contidas nas normas NBR 8754, ASTM B117, ISO 9227, e NBR 11003.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços Automotivos

Em termos de materiais utilizados na construção dos mais variados tipos de estruturas, sejam elas fixas ou móveis, os aços têm posição de destaque como um dos mais frequentemente empregados em indústrias por apresentarem uma combinação de resistência mecânica, boa trabalhabilidade, por haver abundância das matérias-primas presentes na sua composição e por seu baixo custo em relação a outros tipos de materiais utilizados nesse ramo, o que o torna competitivo (ARRUDA 2009) (PANNONI s.d.). Tais propriedades vêm das características dessa liga, definida como uma solução sólida de carbono dissolvido em ferro, seus principais elementos de liga, contendo de 0,008% a aproximadamente 2,11% de carbono, além de alguns outros elementos existentes em quantidade residuais, devido ao seu processo de fabricação, sendo eles não adicionados de forma intencional (JÚNIOR 2019). As características e o desempenho que um aço terá em determinada aplicação, dependerá, essencialmente, da sua composição química e sua microestrutura. A manipulação dessas variáveis e sua combinação, resultam em inúmeras alternativas de propriedades mecânicas e características metalúrgicas que podem ser alcançadas (SCHMITZ 2013), de maneira que, atualmente, existem em torno de 3500 tipos de aços criados pelo ser humano e, destes, 80% foram criados nos últimos 30 anos. O aumento de resistência dessa liga é conferido, principalmente, pelo aumento do teor de carbono, que, conseqüentemente, também reduz sua ductibilidade (capacidade do material de se deformar antes de romper). A figura 1 apresenta um tipo de classificação geral dos materiais metálicos quanto à sua composição.

Dessa forma, os aços carbono são classificados, quanto ao teor de carbono, de três formas (PANNONI s.d.):

- Baixo teor de carbono: possui teor de carbono menor que 0,3%
- Médio teor de carbono: teor de carbono varia de 0,3 a 0,7 %
- Alto teor de carbono: possui teores de carbono maiores que 0,7 %

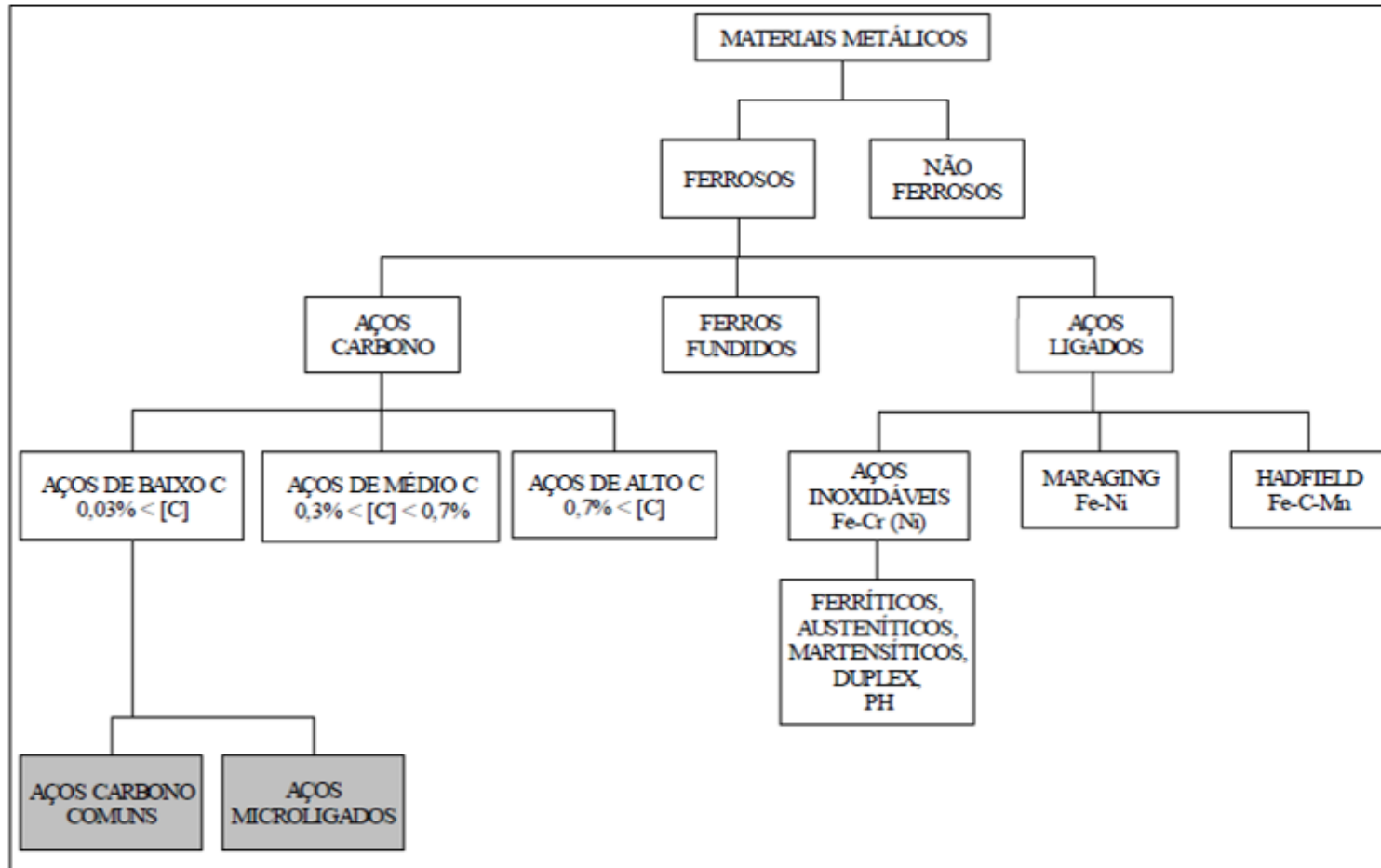


Figura 1 Fluxograma da classificação dos materiais metálicos.

Fonte: PANNONI. D. F., GERDAU, 2016.

Quando ao aço são adicionados elementos de liga de forma intencional, de maneira que esses elementos residuais atinjam teores superiores aos considerados normais, eles são classificados como aços-liga, podendo ser divididos em (PANNONI s.d.):

- Aços com baixo teor de liga: possui elementos de liga adicionados em teores abaixo de 8%
- Aços com alto teor de liga: possui elementos de liga em teores acima de 8%

A adição desses elementos acarreta no aumento da resistência dos aços através da modificação da sua microestrutura, possibilitando que aços baixo carbono apresentem boa capacidade de absorção de energia durante impactos apesar do aumento da resistência.

Os aços estruturais utilizados estão compreendidos nas categorias aço carbono e aços baixa liga e, de uns anos para cá, tem havido uma tendência de preferência pelo emprego de aços com maiores valores de resistência e peso relativamente mais baixo, cada vez maior, principalmente no que diz respeito ao setor automobilístico, para o qual as indústrias siderúrgicas concentram-se no desenvolvimento de alternativas composições de aço para que haja redução de “peso-morto” do veículo. Tais exigências se explicam por razões históricas.

2.1.1 Aços AHSS

Na década de 70, o cenário histórico foi marcado pelo advento da crise do petróleo, que propagava suas consequências por todo o mundo. Considerada uma das mais importantes crises enfrentadas no planeta, ela gerou, entre outros efeitos, o aumento do preço do mesmo, de maneira que foi evidenciada a necessidade da redução do consumo de combustível pelos veículos, o que viria a ser viabilizado, em termos de estrutura, por meio da redução do peso dos automóveis.

Dessa forma, a indústria siderúrgica se viu forçada a reagir desenvolvendo aços mais resistentes, de maneira que apresentassem a mesma



Figura 2 Falta de combustível durante a crise do petróleo em 1973.

Fonte: ACAL NEWS - CRISIS DEL PETROLI 1973:

<http://acalnews.opennemas.com/articulo/internacional/crisis-del-petrol-1973/20170518173213000618.html>. Acessado em 01/12/2019.

resistência necessária para menores espessuras de componentes, resultando em menor quantidade de material, pois, anteriormente a esse período, a demanda da indústria automotiva requeria, basicamente, aços de baixa resistência, que facilitassem o processo de conformação. Assim, foram originados os chamados aços de alta resistência e baixa-liga (High Strength Low Alloy- HSLA), aços IF (Interticial Free), aços BH (Bake Hardening), aços IF-HS (Intersticial Free – High Strength) e aços C-Mn (Carbono-Manganês), desenvolvidos para aplicação em diferentes peças para suas dadas funções específicas (JÚNIOR 2019).

Mesmo com o fim da crise do petróleo (em 1985), o cenário econômico mundial ainda se via em recuperação como reflexo do pós-guerra, o que motivou a indústria automobilística a demandar contínuos avanços que possibilitassem a diminuição dos preços de compra e manutenção dos seus produtos, o que resultou num ambiente extremamente competitivo a nível global, buscando, portanto, em paralelo, elevar cada vez mais os níveis de segurança e qualidade dos veículos através do desenvolvimento contínuo de chapas de aço com



Figura 3 Piquenique na estrada durante a crise do petróleo (1973).

Fonte: Pinterest: <https://www.pinterest.nz/pin/628181847996841720/?autologin=true>. Acessado em 01/12/2019.

propriedades e características cada vez mais adequadas às aplicações requeridas. Juntamente com isso, no final do século passado, vieram à tona questões envolvendo desafios ecológicos enfrentados pelo planeta devido ao efeito estufa, atingindo o setor por meio da exigência de restrições para o alcance da redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂).

Então, devido à essas constantes mudanças provocadas pelas demandas impostas ao setor automotivo, 35 indústrias siderúrgicas de 18 países se reuniram em 1994 (SCHMITZ 2013), criando a World Auto Steel, com o intuito de discutir e propor soluções para melhor se adequarem às atuais necessidades da indústria automotiva. Isso implicou no desenvolvimento de muitos outros tipos de aços com características voltadas para o setor de automóveis principalmente, e, a partir da década de 90, todos eles deram origem à família dos Aços Avançados de Alta Resistência, chamados de AHSS (do inglês “Advanced High Strength Steel”).

Os aços AHSS são definidos como materiais de composição química restrita com rígidos controles de processo de fabricação, resultando em materiais



Figura 4 Manchete da década de 90 evidenciando um dos movimentos em prol da sustentabilidade.

Fonte: Folha de São Paulo: Há 25 anos, Eco-92 tentava convencer o mundo a se salvar
<https://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2017/06/1889596-ha-25-anos-eco-92-tentava->

complexos e sofisticados de microestruturas multifásicas, característica desses aços (JÚNIOR 2019), os quais são comumente classificados quanto às suas três gerações desenvolvidas ao longo dos anos como exposto na figura 5. O maior nível de fases presentes possibilita a união das propriedades antagônicas: alta resistência mecânica e alongamento. São aços, portanto, projetados para atenderem às atuais demandas de imposições normativas quanto à segurança e redução de emissões, e às exigências no que diz respeito ao desempenho e custos acessíveis requeridos.

Em vista disso, a indústria automobilística tem promovido grandes e importantes avanços no âmbito do desenvolvimento e evolução dos aços nos últimos anos,

de maneira que seus principais desafios atuais têm sido equilibrar características como boa conformabilidade, alta resistência, reciclabilidade e cada vez mais baixos custos.

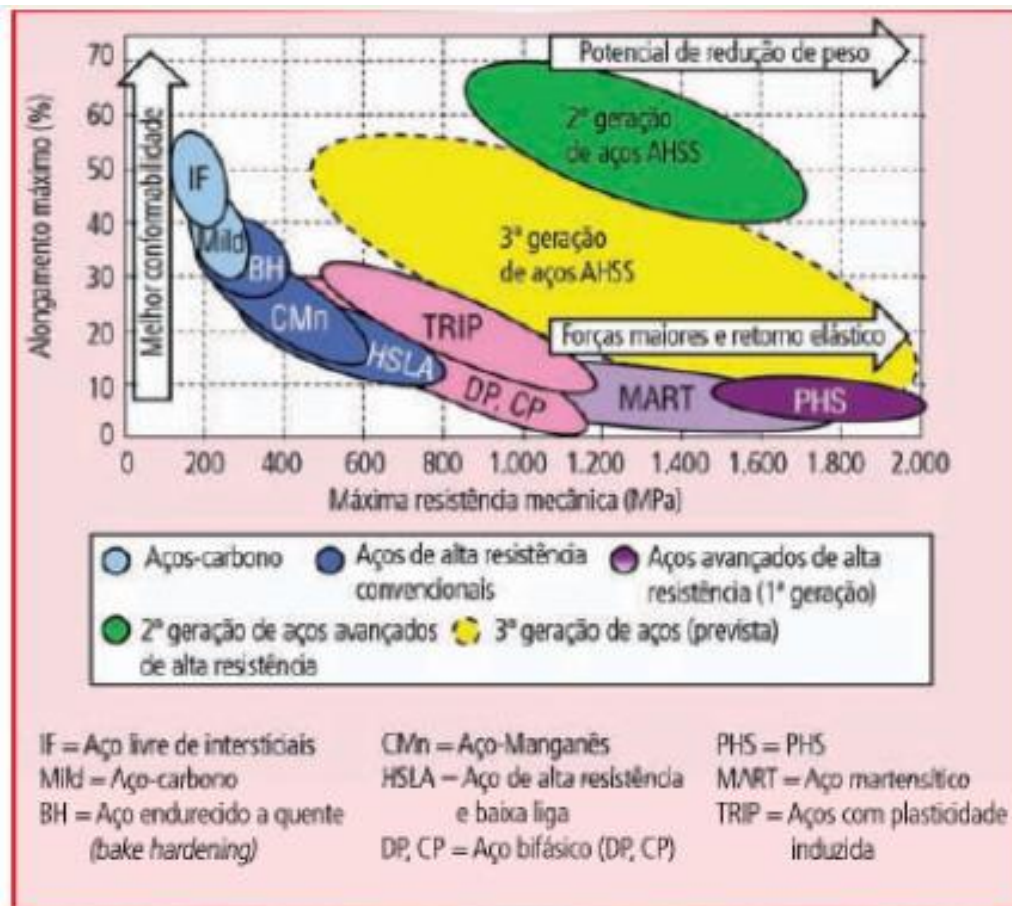


Figura 5 Classificação dos aços em relação ao alongamento versus limite de resistência à tração, destacando as três gerações dos aços AHSS.

Fonte: Corte&conformação: Estudo testa a conformabilidade de aços avançados de alta resistência pelo método de expansão de furos

http://www.arandanet.com.br/revista/ccm/materia/2016/10/01/estudo_testa.html Acessado em 03/10/2019.

2.1.2 Aços planos na carroceria

Quanto ao quesito segurança, a carroceria de um veículo pode ser dividida em duas partes, basicamente, segundo suas funções fundamentais, que determinam os tipos de aços que serão utilizados em cada uma delas. Uma é chamada de “zona de deformação”, que corresponde às partes frontal e traseira

do veículo, a outra é a “célula de segurança”, zona central da carroceria onde se encontram os passageiros. Para a zona de deformação, os aços que geralmente são utilizados são os de elevadas resistência e capacidade de absorção de energia, para que, em uma eventual colisão, eles sofram deformação de forma controlada, de maneira que a energia do impacto seja absorvida preservando a célula de segurança (SCHMITZ 2013), conforme demonstrado na figura a seguir.



Figura 6 Plano de deformação de uma carroceria.

Fonte: SCHMITZ, Sidnei, Aços Planos Aplicados na Indústria Automobilística, 2013.

Já na região da célula de segurança o objetivo é que essa parte da carroceria não sofra deformação, para segurança dos passageiros.

As partes da estrutura de uma carroceria também podem ser divididas em três principais: plataforma, superestrutura e partes móveis, como mostrado na figura 7. Cada uma delas apresenta um ou mais tipos de aço especificados conforme a aplicação requer, em razão da grande variedade de peças com solicitações diversas que a compõe, onde grande parte dos seus componentes também apresentam geometrias complexas, o que exige boa conformabilidade dos aços utilizados. Alguns exemplos deles são (JÚNIOR 2019):

- aços Dual Phase (DP), aplicados nas portas, capô, teto, longarinas e peças de reforço em geral;
- aços Complex Phase (CP), também indicado para peças de reforço como trilhos, caixa de ar, componentes do chassi, pilar B e barra do para-choque;
- aços TRIP (Transformation Induced Plasticity), utilizados em peças de reforço com formas mais complexas;
- aços MS (Martensita), utilizados no reforço do pilar B, barra do para-choque e outros reforços;
- aços HF (Hot Forming), empregados nos pilares A/B e travessas em geral.

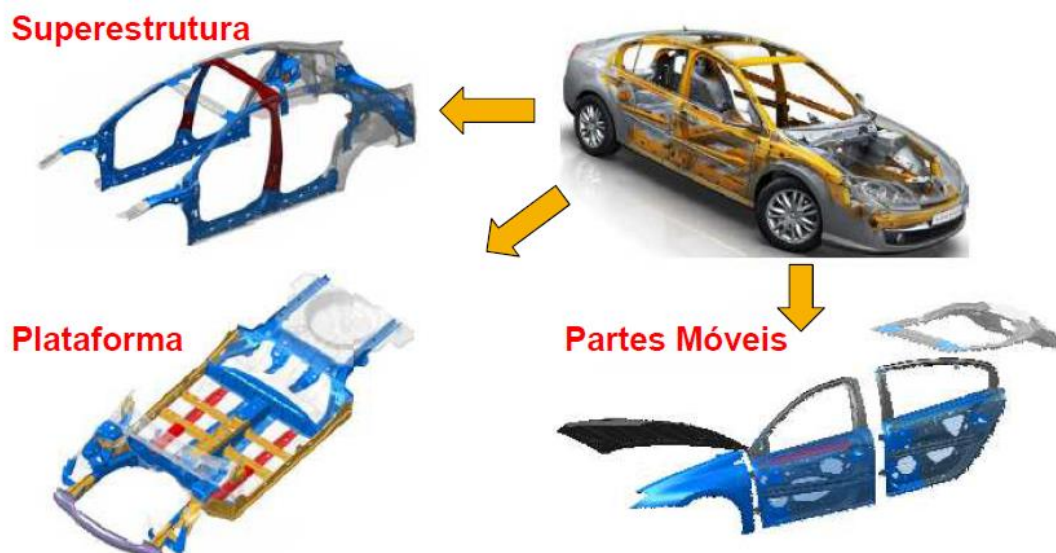


Figura 7 Divisões das partes de uma carroceria automotiva.

Fonte: SCHMITZ, Sidnei, Aços Planos Aplicados na Indústria Automobilística, 2013.

Apesar de todos os esforços empregados para se alcançarem as propriedades ideais para um desempenho cada vez melhor dos aços aplicados na indústria automotiva, apenas o controle da composição química e da microestrutura do aço no seu processo de fabricação não são suficientes para garantir que o automóvel irá cumprir com as exigências normativas impostas a ele, visto que ele também está sujeito à ação da corrosão, que afeta de maneira irreversível sua integridade física, ocasionando na alteração das suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, resultando na redução de sua confiabilidade e desempenho, tornando seu uso inadequado quanto às

necessidades requeridas em seu emprego no setor automotivo. Portanto, a seguir serão apresentados tópicos abordando a respeito desse fenômeno, os meios pelos quais ele ocorre, seu impacto sobre a indústria e as formas de prevenção utilizadas.

2.2 Corrosão

Conforme exposto anteriormente, o aço é atualmente o principal material empregado em construção industrial, em especial na indústria automotiva, e, visto que o mesmo não é resistente à corrosão, ela se apresenta como um dos mais importantes desafios a serem superados no ramo. Só no Brasil, é contabilizado um valor de perda atribuído à prejuízos ligados direta ou indiretamente à corrosão em estruturas metálicas, de 2 a 4 bilhões de reais a cada ano, o que equivale a dizer que aproximadamente 30% de todo o minério de ferro extraído convertido em metal são desperdiçados por esse problema (STORCK, et al. 2014).



Figura 8 Estrutura metálica com avançado processo de corrosão.

Fonte: NHC: Oxidação e Corrosão <https://www.nch.com.br/nchbrasil/Oxidacao-e-Corrosao.aspx>

Acessado em 01/12/2019.

De forma geral, a corrosão é um processo de deterioração que ocorre em todos os materiais, metálicos ou não-metálicos, porém seus efeitos nos metais e suas ligas são evidenciados devido à importância do seu emprego.

Nos metais, esse processo de deterioração o faz converter para um estado não metálico, ocasionando na perda de suas características essenciais como ductibilidade, resistência mecânica e elasticidade, de maneira irreversível, tendendo, portanto, a retornar ao seu estado original de mais baixa energia livre. Essa deterioração pode-se dar por meio de ação química ou eletroquímica, cada uma ocorrendo mediante mecanismos distintos no material (NETO 2016).

2.2.1 Corrosão química

É o tipo de corrosão que ocorre menos frequentemente e, é diferenciada do segundo por ocorrer em ausência de água líquida (por isso, também é chamada de corrosão seca), em temperaturas mais elevadas, acima do ponto de orvalho na água, e por interagir diretamente com o metal (NETO 2016), ocorrendo, principalmente, em equipamentos empregados em situações que envolvam altas temperaturas como fornos em siderúrgicas, caldeiras e tubulações (Metalurgia s.d.).

2.2.2 Corrosão eletroquímica

O processo de corrosão de natureza eletroquímica é caracterizado pela necessidade da presença de água líquida para ocorrer, também pela formação de uma pilha, pois são originadas áreas anódicas e catódicas no metal de maneira que, entre elas, circulam uma corrente de elétrons em sua superfície. E também são caracterizadas por ocorrerem a temperaturas inferiores às do ponto de orvalho da água (NETO 2016).



Figura 9 Estrutura naval em avançado processo corrosivo e submetido à atmosfera extremamente corrosiva.

Fonte: Scientia: Corrosão <https://sites.google.com/site/scientiaestpotentiaplus/corrosao>
Acessado em 01/12/2019.

2.2.3 Maneiras de manifestação da corrosão

As reações descritas nos tópicos anteriores, sejam elas de natureza química ou eletroquímica, geralmente ocorrem na superfície existente entre o metal e o meio corrosivo, onde progridem (GENTIL 2011), sucedendo por meio de reações de oxidação-redução dos metais, que consistem em reações químicas onde verifica-se a perda ou o recebimento de elétrons (GENTIL 2011), sendo que a reação de oxidação ocorre quando um elemento perde elétrons e seu número de oxidação é aumentado, já na reação de redução ocorre o oposto, há um ganho de elétrons pelo elemento e seu número de oxidação diminui. Isto posto, tais processos de corrosão podem se manifestar de oito diferentes maneiras (GENTIL 2011): corrosão uniforme, por placas, alveolar, puntiforme, intergranular, intragranular, filiforme e por esfoliação, exemplificadas na figura 10. Porém, dentre esses tipos, as formas de corrosão puntiforme, por placas, alveolar e intragranular são as que mais se verificam em carrocerias automotivas, e são conhecidas como “corrosão localizada” e, visto que o aprofundamento da caracterização das formas de corrosão promove a escolha adequada da aplicação de proteção a ser executada na superfície do metal

(GENTIL 2011), serão explanadas brevemente, a seguir, tais maneiras de manifestação de corrosão localizada.

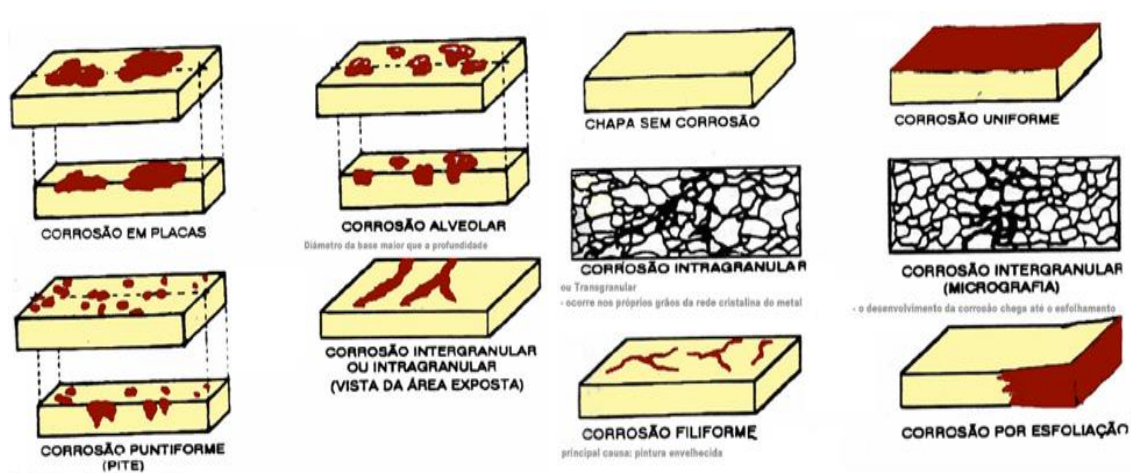


Figura 10 Tipos de manifestação de corrosão.

Fonte: NETO, Luiz Vitorino Dantas, O processo de corrosão e a proteção catódica, 2016.

Corrosão Alveolar: É chamada dessa maneira porque ela causa na superfície do metal marcas aprofundadas ou crateras com formato de fundo arredondado e de profundidade, normalmente, menor que o seu diâmetro (GENTIL 2011), lembrando o formato de alvéolos (Figura 11), sem gerar despreendimento de material. Geralmente ela é iniciada através da corrosão por pites.



Figura 11 Metal com corrosão do tipo alveolar.

Fonte: Engquimicasantosp - Diferentes tipos e formas de corrosão

<https://www.engquimicasantosp.com.br/2015/06/diferentes-tipos-e-formas-de-corrosao.html>

Acessado em 01/12/2019.

Corrosão puntiforme: também conhecida como corrosão por pite ou pitting, mostra-se em forma de pequenas cavidades de fundo anguloso na superfície do metal, normalmente de profundidade maior que seu diâmetro



Figura 12 Exemplificação da corrosão do tipo puntiforme.

Fonte: LOSINOX: corrosão por pite em aço inox – Saiba identificar!

<http://blog.losinox.com.br/2019/03/06/corrosao-por-pite-em-aco-inox-saiba-identificar/> Acessado em 01/12/2019.

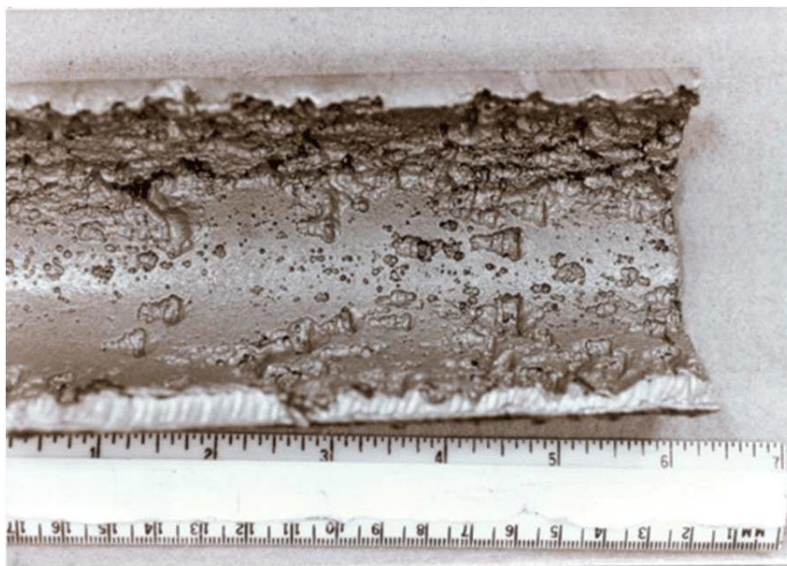


Figura 13 Corrosão alveolar e por pites por CO₂.

Fonte: ResearchGate: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Corrosao-alveolar-e-por-pites-por-CO₂_fig6_311066120](https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Corrosao-alveolar-e-por-pites-por-CO2_fig6_311066120) Acessado em 01/12/2019.

(GENTIL 2011), diferente da corrosão do tipo alveolar. Através dela podem ser iniciadas fissuras que, com sua progressão, venham a gerar fratura no material. É uma forma de corrosão comum em superfícies metálicas usadas como revestimento, que é o caso das chapas que formam a carroceria de um automóvel. A figura 12 exemplifica esse tipo de corrosão, e a figura 13 a retrata juntamente com a corrosão do tipo alveolar.

Corrosão por placas: tipo de corrosão que forma placas em regiões da superfície do metal com marcas aprofundadas nela, e que se desprendem de forma progressiva do volume do material provocando desníveis ao longo de sua superfície (figura14). No caso de metais usados como camada protetora, é comum haver o desprendimento da mesma deixando exposto o substrato metálico.

Corrosão intragranular: também chamada de transgranular e transcristalina (GENTIL 2011), é o tipo de corrosão que ocorre nos grãos da estrutura cristalina do metal formando trincas que se propagam pelo interior desses grãos (figura 15). Conseqüentemente, o metal perde suas características originais referentes às suas propriedades mecânicas, podendo vir a romper quando submetido, até mesmo, à pequenas solicitações.

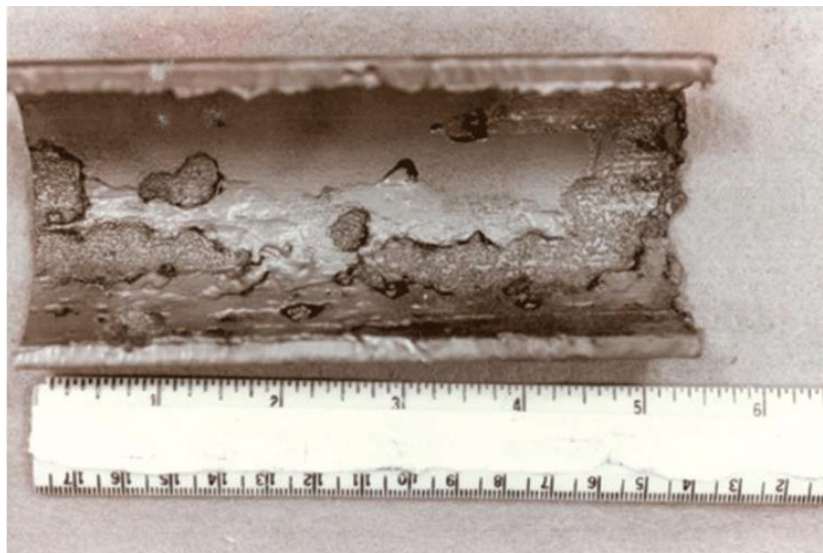


Figura 14 Corrosão do tipo por placas.

Fonte: ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Corrosao-alveolar-e-por-pites-por-CO2_fig6_311066120 Acessado em 01/12/2019.



Figura 15 Corrosão do tipo intragranular.

Fonte: SlidePlayer: <https://slideplayer.com.br/slide/1774959/> Acessado em 01/12/2019.

2.2.4 Variáveis de um processo corrosivo

Para que a escolha adequada do metal a ser utilizado e da proteção conveniente ao tipo de aplicação a que ele será submetido sejam viabilizadas, no que diz respeito à prevenção de tipos de processos de corrosão que possam vir a se desenvolver na superfície das chapas metálicas, é necessário que sejam observadas as variáveis fundamentais por meio das quais o processo de corrosão é iniciado e que sustentam sua progressão. Conforme visto anteriormente nos tópicos 2.3 e 2.3.2, o tipo mais comum de processo corrosivo que se manifesta nos materiais é o de natureza eletroquímica, e uma de suas características é que, para que ele ocorra, é necessário que haja a formação de pilhas.

Pilhas eletroquímicas (ou células de corrosão) (NETO 2016) são dispositivos nos quais há a ligação de dois eletrodos por meio de um metal, funcionando com base na diferença de potencial dos mesmos, que geram reações de oxidação e redução, produzindo energia química (GENTIL 2011). Ela possui quatro elementos fundamentais, sem os quais não poderia funcionar, e que são muito comuns nos ambientes onde os metais são aplicados. Ou seja,

com a ausência de qualquer deles a pilha deixaria de existir, cessando as reações de oxidação-redução, e, conseqüentemente, o processo corrosivo. Esses elementos são identificados como (GENTIL 2011):

Anodo: um dos eletrodos cuja superfície sofre corrosão (reação de oxidação).

Catodo: eletrodo que sofre reações de redução, de maneira que sua superfície fica protegida, não sofrendo corrosão.

Eletrólito: substância ionizada condutora que envolve os eletrodos.

Circuito metálico: ligação através de material metálico, entre os eletrodos, por onde a corrente de elétrons circula.

As chapas da carroceria de um automóvel fazem o papel do anodo, sendo assim, a maneira de prevenir que haja o início de um processo corrosivo na mesma, seria por meio da ausência de interação de, pelo menos, um dos elementos restantes com o anodo, o que, na prática, se viabiliza por meio da aplicação de um revestimento protetor no mesmo, através de técnicas e materiais utilizados em tratamento de superfície, assunto que será mais detalhadamente exposto nos itens que se seguem. Antes, porém, é necessário

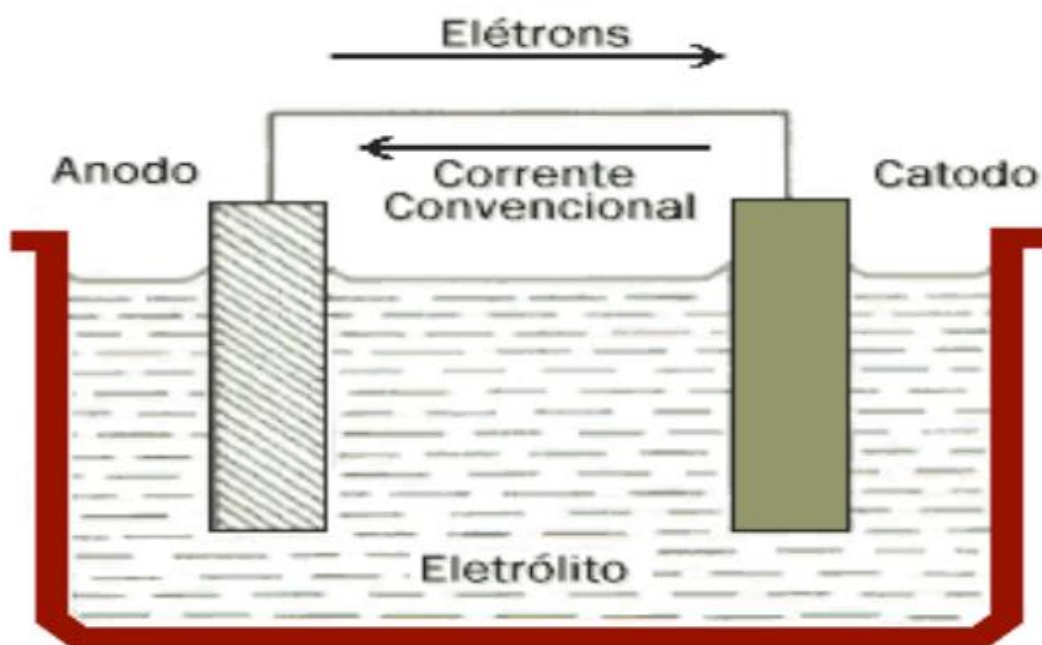


Figura 16 Esquema representativo de uma pilha eletroquímica.

Fonte: NETO, Luiz Vitorino Dantas, O processo de corrosão e a proteção catódica, 2016.

que sejam conhecidos os impactos que os ambientes nos quais o metal ou a liga metálica serão aplicados podem gerar sobre os mesmos no que diz respeito à corrosão.

2.2.4.1 Ação do ambiente sobre o material metálico

Dentre os meios existentes que possibilitam o desenvolvimento de processos corrosivos, a corrosão por meio aquoso é responsável por 90% das ocorrências desse fenômeno, de maneira que a água faz o papel do eletrólito, elemento apresentado no tópico anterior. Essa modalidade inclui a chamada corrosão atmosférica, que é o meio mais comum pelo qual um processo corrosivo é iniciado, e ocorre através da condensação da umidade contida no ar sobre a superfície metálica.



Figura 17 Formação de filme de líquido no interior de um componente automotivo.

Fonte: Como evitar a neblina de água no farol do carro e luz de neblina:
<http://pt.hgautolight.com/info/how-to-prevent-water-fog-in-car-headlight-24367785.html>

Acessado em 01/12/2019.

Um maior ou menor potencial de corrosão atmosférica de um ambiente depende, basicamente, da influência e intensidade dos seguintes fatores (GENTIL 2011):

Umidade: conforme foi introduzido acima, pode-se perceber que quanto maior for a umidade relativa do local, maior será a chance de o material oxidar. Dificilmente será identificado qualquer início de processo de corrosão em um ambiente com baixa umidade relativa do ar.

Contaminantes: são substâncias indesejadas presentes na superfície do metal ou no meio que o envolve, podendo se apresentar na forma de material particulado ou gases. A deposição de partículas de material, seja ele metálico ou não, sobre a superfície do metal que se deseja proteger, torna-se um ponto preferencial para iniciação de um processo de corrosão localizada, porque, direta ou indiretamente, elas promovem uma situação propícia para que uma pilha eletrolítica se desenvolva.

Tempo de contato entre a substância que atua como eletrólito e a superfície do metal: importante porque em toda situação em que a água (eletrólito) entra em contato com o material, ali criou-se um local potencial para o desenvolvimento de uma célula de corrosão. E quanto maior for esse tempo de permanência de contato, maiores prejuízos por processo corrosivo serão identificados. Por esse motivo, o formato da carroceria de um automóvel é projetado de maneira na qual venha-se a evitar a entrada de água em lugares onde ela poderá ficar retida, danificando o filme de revestimento aplicado, assim como também se procede a aplicação de materiais para a vedação de cavidades existentes no veículo.

Temperatura: seu impacto procede conforme abordado nos tópicos 2.3.1 e 2.3.2.

Quando o ambiente é associado à uma atmosfera salina, caso das regiões litorâneas, o mesmo se torna ainda mais agressivo para os aços, por conta da presença de eletrólitos fortes, acelerando o processo corrosivo. A tabela a seguir permite a comparação do grau de agressividade, variando de 1 a 100, dos principais tipos de ambientes a que os metais poderão ser submetidos quando em serviço.

Revelados os conceitos relacionados à corrosão, seus tipos e os mecanismos pelos quais ela pode vir a ocorrer, bem como seus efeitos e fatores agravantes, é possível compreender a necessidade da aplicação de um sistema que previna e, em alguns casos, retarde o desenvolvimento de um processo corrosivo. Caso contrário, isso acarretará em grandes prejuízos financeiros para as montadoras e para as indústrias em geral. Dessa forma, serão apresentados a seguir os tipos de métodos pelos quais essa proteção pode ser alcançada.

Tabela 1 Comparação entre tipos de ambientes por meio de coeficientes indicativos de grau de agressividade dos mesmo.

Atmosfera	Corrosão metálica (índice de agressividade)
Rural seca	1 a 9
Marinha	31
Industrial e marinha	50
Industrial	65
Industrial poluída	100

Fonte: GENTIL, Vicente, 2006.

2.2.5 Tipos de corrosão em carrocerias de automóveis

A corrosão de metais pintados, particularmente em relação às carrocerias de automóveis, é geralmente caracterizada como corrosão cosmética ou perfurante. A corrosão de chapas de aço pintadas que se inicia na superfície interna do painel da carroceria, penetra através da chapa e, eventualmente, surge na superfície externa como uma oxidação vermelha é conhecida como corrosão perfurante. Esse tipo ocorre freqüentemente em locais onde a realização do desengraxamento, da fosfatização e da pintura são dificultadas, tais como dobras e frestas ou em trincas que coletam poeira, sais, água e/ou vapor.

O termo corrosão cosmética é aplicado a um ataque que é iniciado na superfície externa, usualmente em regiões onde a pintura foi danificada. Embora esse tipo de corrosão possa eventualmente levar à perfuração, a principal preocupação é com a aparência. A corrosão cosmética é normalmente relacionada com: (1) corrosão vermelha – mancha avermelhada e esfoliação na região do risco na pintura; (2) deterioração da tinta – corrosão sob a película de

tinta e perda de aderência na região do risco e (3) perfurações – remoção da pintura devido aos efeitos combinados de corrosão e danos causados por impactos por pedras e pequenos fragmentos presentes nas vias de rodagem. Em resumo, a direção de propagação das corrosões cosmética e perfurante pode ser descrita como sendo paralela e perpendicular à superfície, respectivamente, como mostrado na figura 16.

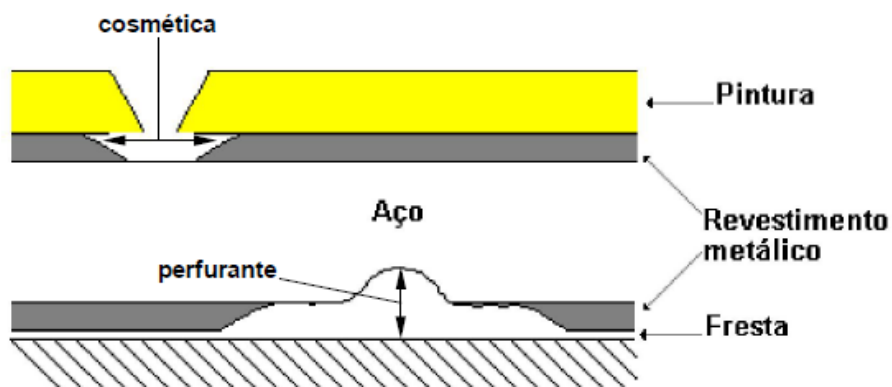


Figura 16 Exemplos de corrosões cosméticas e perfurante

Fonte – MARQUES, Rodrigo 2008.

2.3 Tratamento de superfície

Conforme comentado anteriormente, uma maneira de se prevenir o desenvolvimento de um processo corrosivo em um material, é evitando-se o contato direto entre o mesmo e o ambiente que o envolve, pois é a atmosfera o meio pelo qual os elementos fundamentais que desencadeiam esse fenômeno são fornecidos. Essa separação é obtida pelo recobrimento do metal através da metalização e da pintura, que são dois tipos de revestimentos utilizados na proteção, não só, de carrocerias automotivas, mas também de autopeças, plantas industriais e outros tipos de construções e, até mesmo de eletrodomésticos, podendo conferir a eles aumento de vida útil e características mecânicas e superficiais desejáveis.

2.3.1 Metalização

Essencialmente, os revestimentos metálicos não servem apenas para fins de proteção contra a agressividade do meio, pois através deles é possível alcançar efeitos decorativos para a peça, endurecimento superficial e alteração de propriedades elétricas. Porém, na prevenção da corrosão, a proteção ocorre por meio da formação de película contendo material metálico que reage com as substâncias oxidantes presentes na atmosfera envolvente.

Os metais mais utilizados nesse tipo de revestimento são cromo, alumínio, níquel e zinco, sendo este último o metal mais indicado para a proteção superficial de estruturas metálicas, e que também é o metal utilizado no revestimento de chapas destinadas à indústria automotiva. No caso das carrocerias, o revestimento com zinco é aplicado, principalmente, por meio dos processos imersão à quente (também chamada de zincagem à fogo) ou eletrodeposição (RIBBE 1971).

Imersão à quente: nele, o substrato de aço é imergido no metal de proteção fundido. Quando o metal de proteção usado é o zinco, o processo é denominado galvanização, ou também zincagem à quente. Aços com este tipo de revestimento são largamente usados em indústrias, especialmente no seguimento automotivo, pois são muito indicados para aplicações onde os aços serão submetidos à estampagem, garantindo as propriedades mecânicas necessárias para que o mesmo seja conformado adequadamente (USIMINAS, 2018).



Figura 18 Barra de aço para armadura de concreto galvanizada por imersão à quente.

Fonte: Revista do Aço: <http://www.revistadoaco.com.br/barra-de-aco-para-armadura-de-concreto-galvanizada-por-imersao-a-quente/> Acessado em 01/12/2019.

O zinco confere grande versatilidade ao processo por conta da sua elevada resistência à corrosão atmosférica. Outros materiais comuns de serem aplicados por esse processo são estanho (estanhagem), cobre (copperweld) e alumínio (aluminização) (OLIVEIRA 2012). A norma NBR 7008 especifica as características superficiais que as chapas revestidas com zinco por meio desse processo devem ter, e afirma que a resistência à corrosão será tão maior quanto maior for a quantidade de massa de revestimento. Porém essa quantidade deverá ser equilibrada com o grau necessário de conformabilidade que a chapa deverá apresentar, visto que o aumento da primeira ocasiona na redução da segunda.

Eletrodeposição: processo pelo qual a camada metálica depositada confere um revestimento de alta qualidade, originando uma película fina e contínua de filme de proteção, com ausência de formação de poros. Nele, o componente a ser protegido atua como ânodo, e é imergido em uma solução contendo o material do revestimento carregado com o polo oposto, por onde passa corrente elétrica. Dessa forma, as partículas do revestimento são atraídas ao substrato metálico promovendo uma excelente cobertura até mesmo em partes como cantos e saliências, como não seria possível através de qualquer outro tipo de processo ^[21]. Além do zinco, os metais de revestimento também aplicados através dessa técnica são o ouro, cromo, níquel, cádmio e liga de cobre-prata (OLIVEIRA 2012).

2.3.2 Pintura

2.3.2.1 Revestimento não metálico inorgânico

São revestimentos aplicados como pré-tratamentos de superfícies metálicas, também utilizados na proteção da carroceria de um veículo. Em relação à pintura no ramo automotivo, o pré-tratamento corresponde à etapa da pintura que antecede à dos revestimentos do tipo não metálico orgânico, e consiste numa camada de revestimento aplicada sobre a chapa de aço galvanizado com o objetivo de aumentar o nível de resistência à corrosão do material e promover a aderência das camadas de tinta que serão,

posteriormente, aplicadas, conferindo boa qualidade estética superficial a elas. São também conhecidos como camada de conversão, e, quando utilizadas no revestimento de carrocerias, são empregados, principalmente, dois tipos delas: camada de fosfato de zinco, conhecida como fosfotização, e nano tecnologia (GENTIL 2011).

2.3.2.1.1 Fosfotização

A possibilidade de aplicação desse revestimento para proteção abrange vários tipos de metais além dos aços, sendo também comumente aplicado em substratos de alumínio, cádmio e magnésio. É um tipo de pré-tratamento antigo e o mais frequentemente utilizado na indústria automobilística, e também, para proteção de materiais ferrosos e não ferrosos (NARAYANAN 1994). É aplicado na carroceria por meio de banhos de fosfato à temperatura ambiente, e é um revestimento que apresenta alta resistência contra atmosfera salina além de intensificar sua proteção contra corrosão quando unido à um processo posterior de pintura.



Figura 19 Carroceria em um banho de imersão para receber cristais de fosfato.

Fonte – EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.

Porém, o emprego desse tipo de revestimento, acarreta no inconveniente da produção de substâncias poluidoras, agredindo o meio ambiente. A fim de se resolver tal problema, indústrias do ramo se empenharam no desenvolvimento de novas tecnologias através das quais pudessem ser atingidos os pré-requisitos de proteção e qualidade superficial estabelecidos para as carrocerias dos automóveis. Dessa maneira, foi concebido o revestimento por nano tecnologia.

2.3.2.1.2 Nano tecnologia

Corresponde à uma camada nanométrica aplicada, também chamada de pré-tratamento verde (AMORIN, BATISTA e COELHO 2016) e Oxsilan. Conforme dito, comparado ao tipo de revestimento citado acima, essa é uma camada que fornece proteção à longo prazo (PAINT&PINTURA 2018) livre de substâncias tóxicas, além de ser mais econômica, pois suas etapas de aplicação demandam um nível de consumo de água inferior. É uma camada que consiste em uma película fina de revestimento (ainda mais fina que a alcançada por fosfotização, e de maior qualidade) aplicada na proteção de metais em processos que fazem uso de tintas à base de água, e que também interfere no aspecto visual do produto acabado, porque promove melhor aderência das camadas subsequentes (PAINT&PINTURA 2018).

2.3.2.2 Revestimento não metálico orgânico

São revestimentos aplicados à superfície da carroceria após ela ter sido protegida com uma das camadas de pré-tratamento abordadas nos dois tópicos anteriores, e que também é identificada como pintura industrial. Para outros tipos de aplicações, essa proteção também é empregada na forma de revestimentos com borracha e para tubulação enterrada.

2.3.2.2.1 Tintas

São componentes utilizados no recobrimento do metal a ser protegido, que formam um filme que o isola do eletrólito contido no meio, inviabilizando assim, o prosseguimento do processo corrosivo por não permitir que uma pilha eletroquímica se forme na região revestida.



Figura 20 Exemplo de aplicação de pintura em metal.

Fonte: KNA: Pintura Epóxi Metal <https://www.knapinturas.com.br/pintura-epoxi-metal/> Acessado em 01/12/2019.

É o meio de proteção mais utilizado em revestimentos para fins anticorrosivos (CUSTÓDIO e SOUZA 2018), principalmente por causa do baixo custo que ela apresenta e pela aplicação simples (OLIVEIRA 2012). Porém, para que os objetivos de proteção e acabamento superficial que ela confere sejam alcançados, é absolutamente necessário que a superfície a ser protegida seja suficientemente limpa, ficando livre de óxidos, óleos, partículas sólidas e qualquer tipo de impureza, pois a partir deles é que são originados problemas de aderência das camadas aplicadas e que são iniciados processos corrosivos. De maneira que “livre” significa dizer que, se presentes, esses contaminantes devem estar dentro das quantidades toleradas especificadas para eles, a fim de que não cheguem a danificar ou diminuir a proteção conferida pelo produto, visto

que a total remoção de quaisquer que sejam eles é impossível, porém a limitação de sua concentração não.

As tintas desenvolvidas para aplicação em automóveis devem ser produzidas visando atender aos padrões de propriedades essenciais requeridos a elas, quanto à durabilidade da cor, brilho, resistência à corrosão e à choques, mantendo-as, durante um determinado período mínimo de tempo, através da correta adesão entre todas as camadas e, elas, ao metal de base (OLIVEIRA 2012), permanecendo firmes ao mesmo. Essas tintas podem ser ou à base de solventes, ou à base de água, essa é sua classificação básica (IKEMATSU 2007). Apesar dos nomes, ambos os tipos contêm solventes em sua composição, só que nas tintas à base de água, eles estão presentes em considerável menor quantidade (PRAXEDES 2013), que é uma característica importante desses tipos de tinta, porque os solventes, ao serem evaporados (na secagem da película da tinta), emitem poluentes atmosféricos tóxicos. Essa é a razão pela qual esse tipo de tinta foi desenvolvido, sendo utilizada em substituição às tintas à base de solventes, considerando o cenário de crescente preocupação dos fabricantes de veículos em relação aos danos causados ao meio ambiente por meio do processo de fabricação de automóveis (PIEROZAN 2001).

Porém, independentemente da sua classificação, elas são formadas por 4 elementos básicos: pigmento, resinas, líquido e aditivos (POLITO 2006).

Pigmento: são substâncias que conferem cor e capacidade de cobertura à tinta, que podem ser sintéticas ou naturais, e, geralmente, são insolúveis (quando são solúveis são chamadas de corantes). Alguns exemplos de componentes empregados nas tintas, que possuem essa função, são o dióxido de titânio, carbonato de cálcio, sílica e silicato de alumínio (POLITO 2006).

Resina: também chamada de ligante ou veículo sólido, tem a função de aglomerar as partículas de pigmento, conferindo à tinta, principalmente, características como adesão, resistência à abrasão e dureza, podendo ela ser sintética ou natural (para tintas à base de água, apenas natural). Ou seja, é ela o elemento que garante a aderência às superfícies às quais as tintas serão aplicadas (POLITO 2006).

Líquido: é a parte da tinta que mantém seus demais componentes dissolvidos ou inertes nela, e, após a aplicação da mesma, essa parte líquida evapora completamente, dando origem à película protetiva. Nas tintas à base de água, sua maior parte consiste na própria água, que mantém a resina dispersa pela tinta, sendo o restante de sua composição formada por solventes coalescentes adicionados com o objetivo de amolecê-la, já que ela não pode ser dissolvida por essa mistura. Nas tintas à base de solvente, a parte líquida, em sua maioria, é constituída pelos solventes, que são substâncias inflamáveis adicionadas com o objetivo de dissolver a resina (POLITO 2006).

Aditivos: são substâncias adicionadas aos demais componentes, em baixas concentrações (em torno de menos de 5% da composição total), a fim de conferir propriedades desejáveis à tinta, como maior vida útil, maior homogeneidade do filme de tinta na aplicação, melhor cobertura, resistência, entre outros objetivos (POLITO 2006).

A figura 23 permite que seja feita a comparação entre a qualidade das tintas em função da proporção presente dos seus componentes básicos e das características de espessura do filme de tinta após sua aplicação. E a tabela 2 apresenta as propriedades da superfície da película desejáveis em relação ao substrato a ser protegido.

Após a aplicação das tintas, em pintura industrial, se procede a secagem da mesma, processo chamado de cura, onde ocorre a evaporação dos aditivos, água e solventes, e pode acontecer à temperatura ambiente ou a temperaturas mais elevadas (em estufas).

Em relação à aplicação das tintas na superfície do metal galvanizado, caso das chapas de aço utilizadas nas carrocerias dos automóveis como anteriormente já foi mencionado, podem haver problemas relacionados à sua adesão ao mesmo, principalmente pelo motivo da presença de impurezas em quantidades acima do permitido para a correta aplicação do revestimento de proteção, porém, sua adesão também é afetada, de maneira positiva, pelo emprego, em camada anterior à ela, dos revestimentos metálicos, explicitados nos tópicos 2.3.2.1.1. e 2.3.2.1.2., que, entre outras aplicações, também têm o objetivo de intensificar o grau de ancoragem entre a pintura e a carroceria, promovendo a união mais eficiente das camadas de revestimento.

No caso de tintas desenvolvidas para o uso em revestimento da carroceria de automóveis, é imprescindível que elas sejam formuladas visando atender aos requisitos de durabilidade da cor, brilho, resistência à choques e adesão entre

Tabela 2 Propriedade superficial da tinta para diferentes tipos de aplicações.

Propriedades	Superfícies		
	Alvenaria	Madeira	Metais
Porosidade	Alta	Alta	Nula
Permeabilidade	Alta	Alta	Nula
Reatividade química	Média	Baixa	Muito alta para metais ferrosos
Resistencia a radiações solares	Alta	Baixa	Alta
Característica básica peculiar	Alcalinidade	Higroscopia	Sensibilidade a corrosão

Fonte: AMORIN, BATISTA e COELHO, Estudo do Processo de Pré-Tratamento e Antioxidação da Carroceria Automotiva e Ferramentas de Qualidade Usadas Para Controle, 2016.

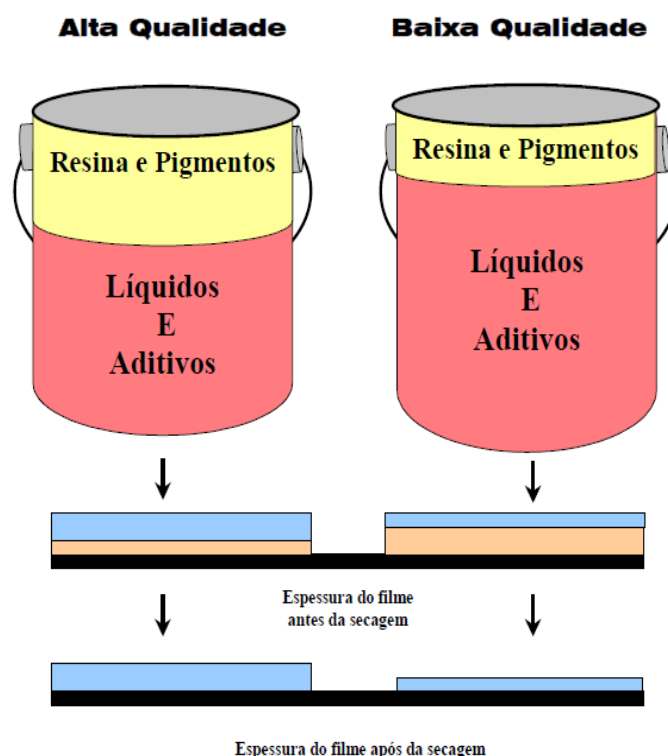


Figura 21 Qualidade das tintas para fins de revestimento em função da proporção de seus elementos constituintes.

Fonte – AMORIN, BATISTA e COELHO, Estudo do Processo de Pré-Tratamento e Antioxidação da Carroceria Automotiva e Ferramentas de Qualidade Usadas Para Controle, 2016.

todas as camadas utilizadas, além de se enquadrarem aos padrões legais no que diz respeito à saúde, segurança e meio-ambiente, promovendo seu desenvolvimento seguro.

2.3.2.2.1.1 Meios de aplicação

A escolha das tintas, bem como seu sistema de aplicação adequado, varia de acordo com o tipo de substrato a ser tratado e com as condições de serviço à que ele será submetido. Na indústria automobilística, os meios de aplicação utilizados são divididos em manual e automático.

A aplicação de forma manual ocorre através da pulverização à pistola, ou spray (figura 25), a automática pode ser por duas formas (ASCENÇÃO 2016):



Figura 22 Pintura manual por pulverização.

Fonte:<<https://thumbs.dreamstime.com/z/pintura-de-pulveriza%C3%A7%C3%A3o-do-pintor-do-corpo-de-carro-na-carro%C3%A7aria-parte-30634085.jpg>> Acessado em 01/12/2019.

Imersão: a carroceria é mergulhada em um tanque contendo a solução do revestimento que se deseja aplicar, promovendo alto grau de cobertura que é potencializado quando somado à técnica de eletrodeposição, podendo, portanto, ocorrer com a utilização de corrente elétrica (processo conhecido como

eletroforese) (SILVA 2012) ou não. O processo de pintura por eletroforese pode ser anódico ou catódico, o que significa dizer que, quando o processo for anódico (também chamado anaforese), a carroceria representa o polo positivo e as partículas de sólidos de tinta são carregadas negativamente, sendo atraídas e depositas na carcaça sob a ação de um campo elétrico, e, quando for catódico, processo mais utilizado atualmente, a carroceria é aterrada, de maneira que se torna o polo negativo, e o tanque e a solução contendo a tinta são o pólo positivo.



Figura 23 Processo de revestimento de tinta por eletrodeposição catódica.

Fonte: <<http://vireshoewhas1976.myq-see.com/cataforese-das>> Acessado em 01/12/2019.

A diferença entre os processos com e sem aplicação de corrente elétrica, está na espessura de película de tinta obtida após o fim dos mesmos, de maneira que, quando o processo utilizado é do tipo sem corrente elétrica, ela dependerá da viscosidade da tinta (SILVA 2012), além de ser dificultado o acesso da mesma a cavidades internas mais escondidas da carroceria. Uma desvantagem em relação à aplicação por pistola da tinta, é a necessidade de um volume muito mais elevado de fluido utilizado no processo, pois a carroceria precisa ser completamente submergida no tanque (SOARES 2013), porém, a aplicação da tinta feita por meio de imersão, principalmente a desempenhada por

eletrodeposição, apresenta melhor qualidade de revestimento pois os substratos penetram melhor em toda a carroceria, alcançando, até mesmo, os lugares de mais difícil acesso.



Figura 24 Imersão para pintura sem corrente elétrica.

Fonte: SILVA, Luíz Fernando Junqueira, Utilização do Método KTL em Pinturas Industriais, 2012.

Pulverização à pistola: (figuras 25 e 26) é um sistema de aspersão que opera por meio de ar comprimido, conforme o mesmo princípio da aplicação manual, podendo, aqui, ser empregado fixo ou conectado à braços mecânicos



Figura 25 Pistola de pintura.

Fonte: AIRPRESS: Paint spray pistol HVLP <https://airpress.net/paint-spray-pistol-hvlp-45102-1-2> Acessado em 01/12/2019.

(robôs) que acompanham o perfil da carroceria à medida que pulverizam a névoa contendo a tinta contra a mesma. As pistolas podem ser eletrostáticas ou não.



Figura 26 Pistola para pintura conectada à braços robóticos.

Fonte: Robô de pintura <https://www.youtube.com/watch?v=vA5RqORcBIY> Acessado em 01/12/2019.

2.3.3 Sistema de proteção: pintura automotiva

Sistema de proteção refere-se a todo o conjunto de operações que envolvem um processo de pintura, nesse caso, a automotiva, desde o preparo das chapas galvanizadas até o acabamento final após a pintura, incluindo todas as suas etapas subsequentes. O processo de pintura de uma carroceria é o fundamento que permite a união das características almejadas relacionadas à estética e à durabilidade do revestimento, conferindo o embelezamento do automóvel e promovendo o elo entre a excelência da proteção e a aparência final do ativo. A operação ocorre em uma linha de produção intermitente (SOARES 2013) de maneira que o deslocamento das carrocerias é feito por meio de plataformas que as recebem, chamadas skids.

Visto que algumas fases do processo e formas de aplicação dos revestimentos variam de acordo com o sistema adotado pelo fabricante, e que também estão em constante modificação pela busca contínua de melhoria de

qualidade dos mesmos, será apresentado, a seguir, um esquema utilizado por uma moderna montadora em específico, a fim de se alcançar um entendimento mais claro e abrangente a respeito do processo, permitindo o conhecimento das principais etapas que compõe um sistema automatizado de pintura de automóveis como um todo.

Conforme o sistema utilizado pela montadora em questão, o processo de pintura consiste em conferir às chapas que compõe a carroceria quatro camadas de tinta como revestimento de proteção: cataforese, primer, base e verniz, apresentadas na figura a seguir (figura 30), além de, na fase de pré-tratamento, ser aplicado um revestimento não metálico inorgânico que, nesse caso, corresponde à camada de nanotecnologia, a mais fina de todas as camadas aplicadas e que não é medida, sendo o controle da quantidade depositada verificado pesando-se a mesma. E, como visto anteriormente, a região correspondente à chapa nua na figura 30 consiste em uma peça de aço carbono já revestido com uma camada de zinco (galvanizada), geralmente tendo em torno de 7 e 10 μm do revestimento.

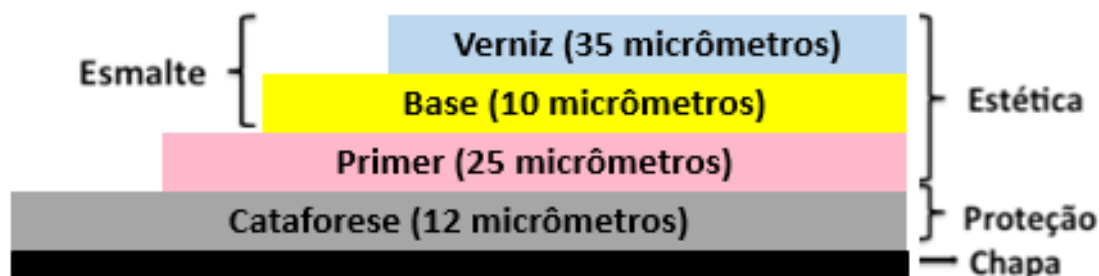


Figura 27 Camadas de tinta na superfície das carrocerias.

Fonte: MOREIRA e MENDONÇA, Implementação do Sistema Edrizzi® na Indústria Automotiva, 2019.

Essa é a configuração da maior parte da superfície da unidade a ser protegida no esquema adotado pela montadora em questão, principalmente na região externa da carroceria, de maneira que apenas em algumas partes internas da estrutura do automóvel é utilizado um substrato diferente do descrito acima.

O esquema apresentado a seguir (figura 28) reflete a sequência das etapas básicas comentadas anteriormente em uma unidade produtiva de pintura automotiva.

Conforme mostra a figura 28, as etapas são divididas em: Tratamento de superfície (TTS), aplicação da Cataforese, vedação, aplicação do primer, do verniz, e da base e acabamento. Cada uma delas serão brevemente apresentadas nos tópicos seguintes.

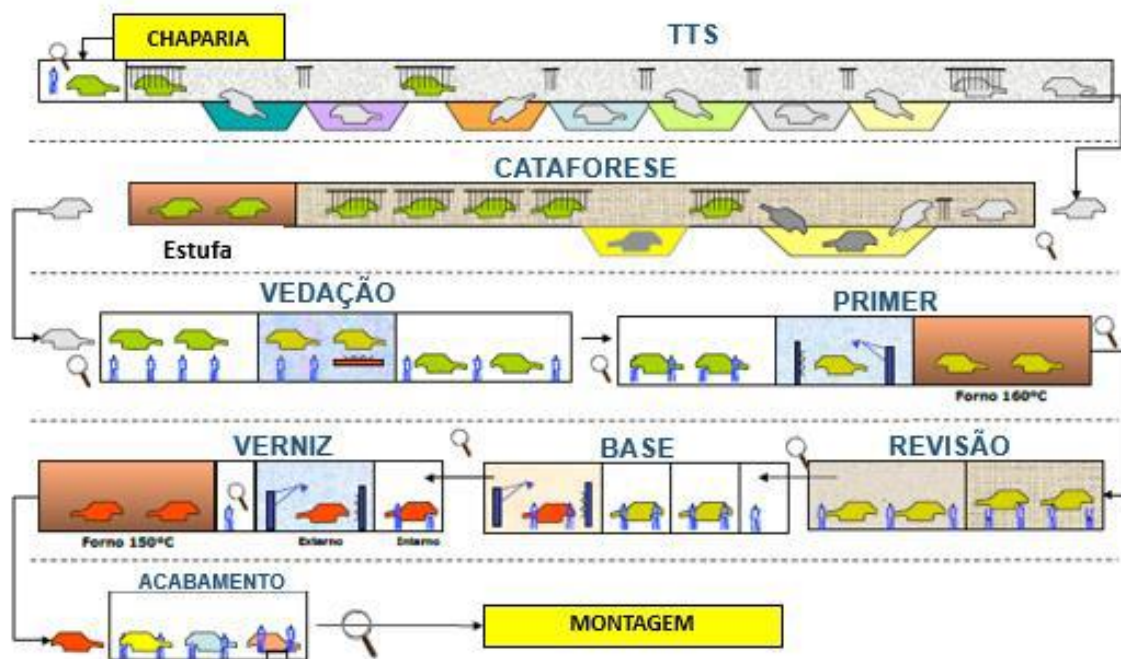


Figura 28 Fases de pintura em uma unidade produtiva.

Fonte: MOREIRA e MENDONÇA, Implementação do Sistema Edrizzi® na Indústria Automotiva, 2019.

2.3.3.1 Tratamento de superfície (pré-tratamento)

É a fase da pintura que envolve as operações de limpeza e preparação da superfície da carroceria para que a mesma receba a aplicação das posteriores camadas de tinta. A carroceria recebida é formada de chapas de aço carbono provenientes do processo de lingotamento contínuo, que receberam revestimento de zinco (galvanizadas à quente). Elas são fornecidas com óleo protetivo, que nesse caso é um óleo resinado, a fim de se evitar que as chapas venham a oxidar devido à exposição ao tempo, às condições de estocagem ou qualquer outra condição que ameace sua adequada utilização no processo objetivado.

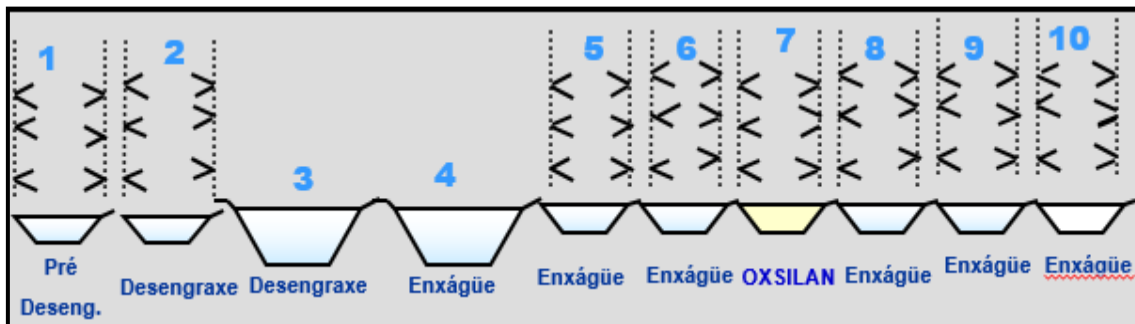


Figura 29 Etapas do tratamento de superfície.

Fonte: AMORIN, BATISTA e COELHO, Estudo do Processo de Pré-Tratamento e Antioxidação da Carroceria Automotiva e Ferramentas de Qualidade Usadas Para Controle, 2016.



Figura 30 Chapas destinadas à confecção de carrocerias de automóveis em estoque.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.

Tendo, também, acabado de passar por processos de conformação, na chaparia, onde é montada toda a estrutura do automóvel, a carroceria se encontra repleta de sujidades, como excesso de óleo, poeira, óxidos, contaminantes em geral, que precisam ser removidos para a apropriada aplicação das camadas subsequentes, se encontrando convenientemente

limpas, a fim de que a aderência das mesmas não seja prejudicada. Por essa razão, a etapa de pré-tratamento da superfície configura uma fase indispensável do sistema de pintura da carroceria de um automóvel, sendo nela que a corrosão pré-matura da mesma é evitada, não permitindo que ela se propague através das etapas seguintes de revestimento, impactando negativamente na qualidade e credibilidade do ativo, como já comentado anteriormente.

A fase da limpeza, engloba várias etapas de desengraxe e enxágue, que garantem que o grau de limpeza da carroceria se encontre dentro dos padrões especificados, pois somente dessa maneira será possível a obtenção de uma camada de conversão que apresente as características de uniformidade, proteção e aderência necessárias. Dessa forma, a limpeza consiste, conforme



Figura 31 Estufamento de tinta devido a uma aplicação deficiente de pré tratamento da chapa metálica.

Fonte: garagem150: Como fazer uma funilaria amadora consertando as ferrugens
<https://garagem150.com/2015/04/10/como-fazer-uma-funilaria-amadora-consertando-as-ferrugens/> Acessado em 01/12/2019.

apresentado na figura 29, nas etapas de: pré-desengraxe, desengraxe 1 e desengraxe 2 (AMORIN, BATISTA e COELHO 2016).

Nelas, a carroceria é banhada por uma solução composta por água industrial e uma substância tensoativa desengraxante, ora feito por meio de

aspersão, através de jatos pulverizados, ora por meio de imersão da carroceria em um tanque contendo essa solução, seguida de intensivo enxágue, com o objetivo de diluir substâncias contidas no banho anterior, como sais, removendo resíduos dos desengraxantes aplicados, evitando seu possível arraste para as seguintes etapas. Os banhos são considerados as fases que garantem o sucesso do processo de eletrodeposição.

Os banhos efetuados no processo de pintura têm como variáveis básicas controladas a concentração das soluções utilizadas no mesmo, a temperatura dos líquidos empregados, de maneira que o uso de temperaturas mais elevadas favorece a diluição dos resíduos, fazendo com que eles saiam com maior facilidade, e o tempo de duração de cada etapa.

O líquido resultante dos banhos é direcionado para ser tratado em filtros e, posteriormente, adicionado novamente aos tanques de pré-tratamento.

A preparação da superfície, fase seguinte à limpeza consiste, nesse sistema de pintura, na aplicação da camada de nanotecnologia, que substitui o processo de fosforização comumente utilizado pela maioria dos fabricantes de veículos automotivos. A aplicação é feita por meio de aspersão (AMORIN, BATISTA e COELHO 2016), produzindo uma camada que confere intensificação da resistência à corrosão da carroceria e que melhora a aderência entre a superfície galvanizada e as camadas de tinta protetiva aplicadas na sequência, evitando que ocorra o seu deslocamento em relação ao substrato metálico, e a consequente exposição do mesmo a condições nocivas presentes na atmosfera envolvente, aumentando a durabilidade do produto submetido à ambientes corrosivos.

Porém, apenas o emprego da camada de conversão não garante proteção satisfatória em relação à corrosão, pois sua efetividade está em ser empregada em conjunto com as camadas de tinta que compõe o sistema de pintura automotiva (AMORIN, BATISTA e COELHO 2016).

O enxágue dessa camada, que antecede a aplicação da Cataforese, é feito apenas com água deionizada, pois os íons contidos no banho interferem no processo de eletrodeposição, prejudicando a eficiência do seu emprego.

2.3.3.2 Aplicação da Cataforese (KTL)



Figura 32 Esquema da sequência do revestimento com cataforese.

Fonte: MOREIRA e MENDONÇA, Implementação do Sistema Edrizzi® na Indústria Automotiva, 2019.

A sigla vem da expressão alemã “Kathodische Tauch Lackierung” que significa “pintura catódica por imersão” (VITOR, et al. 2018). É um tipo de revestimento anticorrosivo aplicado por imersão baseado na diferença de potencial elétrico existente entre o banho de pintura e a carroceira (PAINT&PINTURA 2018) (eletrodeposição), que se destaca em relação ao seu desempenho na proteção contra a ação dos raios ultra violeta, do oxigênio, da umidade, temperatura e atmosferas agressivas em geral (VITOR, et al. 2018), intensificando a proteção à corrosão, o embelezamento, as propriedades superficiais adquiridas como resistência mecânica, condutividade elétrica, lubrificação e conformabilidade, e aumentando a durabilidade das camadas de pintura aplicadas. Nela, a tinta do revestimento se encontra diluída em água deionizada, que corresponde à aproximadamente 85% da solução, sendo o restante constituído de sólidos da tinta (VITOR, et al. 2018) (tinta, resinas e pigmento), o substrato metálico é aterrado e atrai as partículas de tinta que são carregadas positivamente (processo de eletrodeposição catódica) para as regiões onde o campo elétrico age de forma mais intensa, pois à medida que as partículas sólidas vão sendo adicionadas à superfície do metal, elas criam regiões isoladas ali pois não conduzem corrente elétrica, fazendo com que a cobertura tenha uma distribuição muito mais uniforme, chegando também às cavidades de difícil acesso, conferindo um efeito não alcançado, com tamanha qualidade superficial por qualquer outro processo, e também através de uma fina camada de revestimento (aproximadamente 12 microns). Também é caracterizado por ser um processo muito rentável, que utiliza cerca de 98% de todo o líquido envolvido nele (VITOR, et al. 2018). Atualmente, quase 100% dos

automóveis fabricados utilizam esse tipo de revestimento, além de ser empregado, também, em muitos outros tipos de equipamentos e peças (PAINT&PINTURA 2018).

Esse tipo de revestimento só costuma ser empregado em peças metálicas, pois a proteção obtida por meio dele só é possível através da condução de eletricidade ao longo da superfície do componente a ser protegido (AMORIN, BATISTA e COELHO 2016).

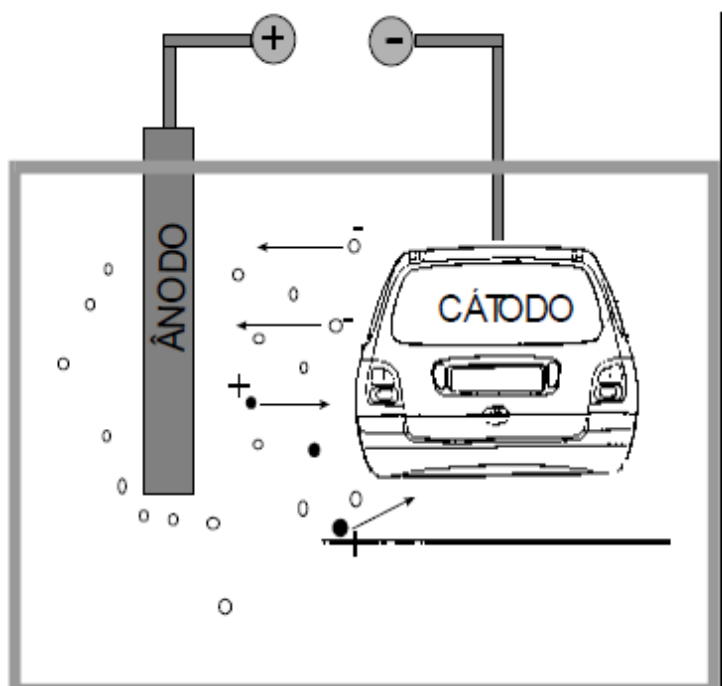


Figura 33 Exemplificação de revestimento por eletrodeposição catódica.

Fonte: PIEROZAN, Leonardo, Estabilização de Processo: Um Estudo de Caso no Setor de Pintura Automotiva, 2001.

Após a aplicação da tinta, a carroceria passa por um enxágue para a remoção do excesso de material particulado (sólidos da tinta) contido na sua superfície, exemplificado na figura 34, para manter o filme de revestimento uniforme. Posteriormente é conduzida à estufa, onde ficará em torno de 14 minutos para que haja a cura adequada da camada depositada, e, assim, podendo dar prosseguimento às etapas restantes.



Figura 34 Enxágue pós eletrodeposição de tinta.

Fonte: VITOR, et al. Processo de Pintura e Revestimento Superficial E-COAT, 2018.

2.3.3.3 Vedação

Também chamada de calafetação, é uma etapa feita de forma manual, por operadores qualificados, que consiste na aplicação de uma massa de vedação à base de PVC, um material viscoso termocurável, por meio de pistola pressurizada em regiões da carroceria do automóvel, pois a mesma é repleta de aberturas, como “furos”, feitos para que, durante a imersão, a estrutura não tenda a boiar por conta da presença de ar em seu interior, facilitando o escoamento da tinta.

Portanto, é aplicado em regiões que sejam ocas, com grandes aberturas e/ou que sejam locais de junção entre chapas, a fim de se evitar a entrada de impurezas e a infiltração de água, para que não aconteça de ela ficar retida no interior de alguma cavidade dando início à um processo corrosivo, como discutido no tópico 2.2.4.1. Além disso, ela também é empregada em regiões com grandes chances de receberem impactos (como de pedras por exemplo), pois aumenta a resistência à choques que possam ocorrer no local. Também nessa etapa é que ocorre a aplicação de placas termofundentes em pontos específicos do interior do veículo com o objetivo de reduzir os ruídos produzidos durante a movimentação do mesmo, promovendo um ambiente mais confortável



Figura 35 Funcionários aplicando materiais de vedação na carroceria.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.



Figura 36 Massa de vedação aplicada ao interior do veículo.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.

para os passageiros (MOREIRA e MENDONÇA 2019), de maneira que, quanto maior for a quantidade de regiões do automóvel protegidas por esse material, menos ruídos o veículo produzirá, o que costuma encarecer seu custo. Depois disso, é feita uma limpeza manual na carroceria, para que qualquer sujidade que possa ter sido depositada na superfície da mesma durante o trajeto seja retirada, sendo então encaminhada para os próximos estágios.

2.3.3.4 Aplicação do primer

Nessa fase, a unidade é direcionada para a cabine de pintura onde a aplicação do primer, assim como da base e do verniz, é feita por aspersão eletrostática de forma robotizada, de maneira que os sólidos da tinta são carregados com, em torno de, 7000 volts, e quando pulverizadas, essas partículas são atraídas pela carroceria que está aterrada, conferindo uma melhor cobertura da mesma. O princípio da aplicação é parecido com o do processo descrito no tópico 2.3.3.2, referente ao revestimento da unidade com a aplicação do Cataforese, só que nessa etapa a carroceria não é imersa na solução.

O primer é a camada que antecede o recobrimento com as tintas de acabamento (base e verniz), sua função é conferir o nivelamento da superfície tratada suavizando possíveis defeitos e irregularidades existentes nessas regiões das chapas, processo esse que é iniciado com o revestimento com KTL e que é intensificado nesta etapa. Também promove melhor absorção e aderência das camadas a serem depositadas em sequência, atuando como um elo que melhora a interação entre a camada protetiva anteriormente aplicada (cataforese) e as de acabamento que virão, o que ocasiona no aumento da firmeza das suas ligações, diminuindo as chances de vir a ocorrer deslocamento das camadas de tinta depositadas (DALMOLIN, GOLÇALVES e PACHEKOSKI 2013). Na montadora em questão, ele pode ser utilizado segundo três tipos de cores diferentes empregadas (branco, cinza claro e cinza escuro), influenciando nas cores dos esmaltes aplicados em seguida, servindo de fundo para eles, por isso que é também chamado de fundo nivelador, pintura de fundo e pintura de base, de maneira que o tom que se espera alcançar pela base é



Figura 37 Aplicação do primer, por aspensão, através de braços robóticos.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.

mais facilmente atingido, necessitando, assim, de menor quantidade de tinta para fins de acabamento, o que diminui o custo do processo de revestimento por pintura visto que as duas últimas camadas de tinta aplicadas são as de maior valor entre as utilizadas em todo o sistema. Isso também implica na redução de emissão dos produtos dos solventes presentes nos esmaltes, ao secarem, para a atmosfera (PIEROZAN 2001), visto que a quantidade necessária das tintas de acabamento diminui. Outras vantagens conferidas pelo seu emprego, são a melhora do desempenho em relação à resistência apresentada quanto à choques que possam vir a danificar o filme de tinta final, e a maior eficiência na proteção do mesmo contra os raios de luz visível e ultravioleta (DRUMOND 2013). Dessa maneira, a camada primer é fundamental para que os padrões requeridos das características de durabilidade e acabamento final da pintura sejam alcançados, porém não somente ela.

Devido à forma de aplicação da tinta na carroceria, ou seja, por aspensão, a cabine de pintura é essencial para tornar viáveis tais resultados, de maneira que ela é o ambiente que fornece as condições que definem a qualidade superficial do produto final (MOREIRA e MENDONÇA 2019) durante a pintura

das últimas três camadas. Como comentado anteriormente, ao evaporar a parte líquida das tintas desenvolvidas para pintura automotiva, são emitidos gases nocivos originados da composição dos solventes presentes nelas, e também, ao ser aspergida, nem toda a névoa de tinta aplicada é absorvida pela superfície da carroceria, resultando na produção de material particulado que se solidifica e que, se vier a aderir à mesma, gera defeitos superficiais que impactam fortemente a qualidade do produto final, o que, para o caso de ativos cuja principal recomendação deriva do apelo estético imposto aos mesmos, resultaria na baixa da posição de competitividade do produto diante do cenário comercial atual e na conseqüente redução de vendas, podendo até mesmo gerar perdas de carroceria.

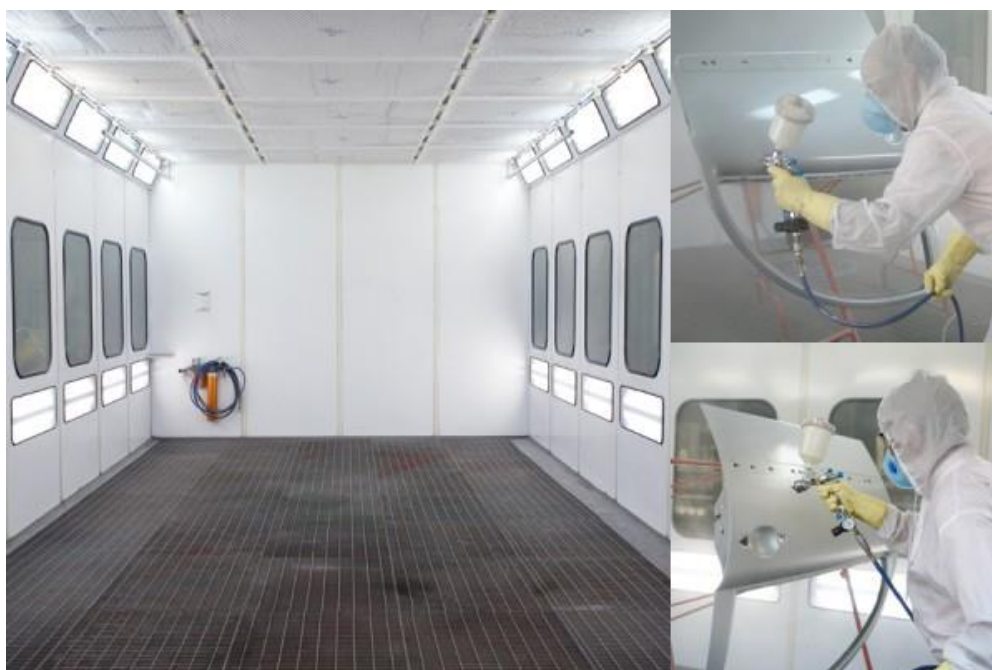


Figura 38 Exemplo de cabine para pintura automotiva.

Fonte: Clube das Oficinas: Essencial – Cabine de pintura positiva

<http://clubedasoficinas.com.br/2013/10/essencial-cabine-de-pintura-positiva/> Acessado em 01/12/2019.

A cabine de pintura atua nesse contexto fornecendo condições de umidade, ventilação e pressão interna criticamente controladas, mantidas dentro de padrões especificados de modo a satisfazer os objetivos de captura efetiva dos sólidos particulados presentes no seu interior e de adequada exaustão dos solventes produzidos, providenciando um ambiente com concentrações de

impurezas em níveis inferiores aos prejudiciais que poderiam ameaçar o sucesso do processo.

Ela também favorece a deposição de tinta sobre a unidade, por meio do insuflamento de ar exterior (previamente tratado para ajuste de umidade e temperatura, e para remoção de impurezas) pela parte superior da cabine, o que aumenta sua pressão interna, fazendo com que a névoa aspergida seja empurrada contra a superfície da carroceria, otimizando, assim, o processo. A parte excedente do produto aspergido que não aderiu à unidade vai para a parte inferior da cabine, passando pelo piso feito de grades, e caindo sobre água corrente que passa por ali, levando todo o material indesejável para onde ela será tratada a fim de voltar para o processo (MOREIRA e MENDONÇA 2019).



Figura 39 Esquema de filtragem do ar na câmara de pintura e acolhimento de overspray.

Fonte: Portal mecânica online: Volkswagen desenvolve solução inovadora para limpar o ar das cabines de pintura na fábrica em Taubaté (SP)

A aplicação dessa, e das seguintes camadas de tinta, é feita de forma manual e automática, intercaladas entre si, de maneira que a pintura externa da carroceria procede por meio de braços robóticos e a pintura interna de maneira manual, daí a importância da efetiva exaustão dos gases nocivos produzidos a partir das tintas, que, além de causar danos ao meio ambiente, podem pôr em risco a saúde dos operadores que atuam nessas áreas.



Figura 40 interior de uma estufa para cura/secagem de tinta

Fonte: Made-in-China: <https://pt.made-in-china.com/co_paint-booth/product_Infitech-Auto-Accident-Repair-Equipment-Paint-Curing-Oven-Paint-Drying-Room-Paint-Baking-Booth_nrnhrig.html> Acessado em 01/12/2019.

Após a deposição dessa camada, a unidade segue para a estufa para curar a tinta, para que seja retirado o máximo possível de água, a fim de não prejudicar o aspecto superficial da pintura final e para que não se crie ali um ambiente propício para o desenvolvimento de um processo corrosivo pela presença do eletrólito, e também para curar os materiais depositados na etapa da vedação, a massa de vedação e as placas termofundentes.

Saindo da estufa, as carrocerias passam por uma inspeção para que qualquer discrepância do processo identificada seja removida, passando por um posterior lixamento da superfície, caso os operadores envolvidos julguem

conveniente. Feito isso, a unidade é então conduzida para as etapas finais do processo.

2.3.3.5 Aplicação da base e do verniz

São as últimas camadas de pintura aplicadas no automóvel, chamadas de esmalte, elas configuram um revestimento para fins de acabamento. Assim como no processo de aplicação da tinta primer, a pintura nesta etapa procede de forma mista, onde no exterior da carcaça ela é feita de forma automatizada, e nas suas partes internas de forma manual, ambas por meio de pistolas eletrostáticas e intercaladas entre si, também, em uma cabine de pintura semelhante.

A unidade, primeiramente, chega à cabine de pintura para receber o revestimento com a camada base, que é responsável por conferir a cor desejada ao veículo. O processo de aplicação, então, se dá conforme anteriormente descrito no tópico 2.3.3.4. A tinta base possui tom fosco, o brilho da carroceria é adquirido pelo verniz, a última camada aplicada. A unidade é então encaminhada, após a deposição da base, diretamente para a cabine de pintura para aplicação do verniz, sem haver a necessidade de secagem da mesma em estufa entre os processos. Nela, o processo de pintura também procede conforme descrito no tópico 2.3.3.4.

O verniz, diferente das demais camadas de acabamento aplicadas, é uma tinta cuja formulação não possui pigmentos, ela é a camada mais exterior de revestimento da superfície do automóvel, e também a mais espessa, medindo $35\mu\text{m}$. Além de conferir brilho à pintura, o verniz também reforça as propriedades de resistência à abrasão e durabilidade das chapas, protegendo-as contra a ação dos raios ultravioletas, que têm a capacidade de comprometer as propriedades de resistência à corrosão das camadas anteriores, e também previne que permeie umidade no revestimento protetivo (PIEROZAN 2001).



Figura 41 Aplicação da tinta base automatizada.

Fonte: Breitkopf: Volkswagen amplia capacidade produtiva da fábrica Anchieta
<https://www.breitkopfblog.com.br/vw/2010/12/13/volkswagen-amplia-capacidade-produtiva-da-fabrica-anchieta/> Acessado em 01/12/2019.



Figura 42 Superfície das carrocerias após a aplicação do verniz.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.

Após a aplicação dessas duas últimas camadas, a unidade vai para uma estufa, cujas temperatura e tempo de exposição da carroceria na mesma são normalizados, para que elas sejam curadas, removendo o máximo de água possível das camadas depositadas. Sendo então encaminhada à última etapa do sistema de pintura, a estação acabamento.

2.3.3.6 Acabamento

É a parte final do processo onde são realizadas operações de revisão e acabamento da carroceria por meio de profissionais capacitados posicionados ao longo da linha, onde usam de suas aptidões técnicas para realizar a correta inspeção da mesma (MOREIRA e MENDONÇA 2019). Num primeiro momento, eles analisam regiões específicas da carcaça a fim de identificar possíveis defeitos e anomalias que estejam presentes na superfície do filme de pintura formado, causadas, normalmente, por material estranho como poeira e outras sujidades, que aderem em sua extensão conforme a unidade avança as etapas do processo de pintura.



Figura 43 Inspeção da carcaça após a pintura.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.

Dependendo da gravidade da desconformidade, os defeitos podem ser corrigidos através de operações manuais simples, como lixamento e polimento, na própria linha, ou, quando mais sérios, devem ser encaminhadas para outro setor, onde despense-se mais tempo em sua correção, podendo a unidade passar até mesmo por trabalho de repintura (PIEROZAN 2001).

Feitas as inspeções e convenientes correções para que as carrocerias se enquadrem no padrão de qualidade exigido, a unidade chega à segunda parte dessa etapa onde passa por um processo chamado de ornamentação, no qual são adicionados em sua superfície exterior adereços decorativos como faixas, logotipos e adesivos.

Concluída esta etapa, chegam ao fim as fases de um sistema de proteção que compõe um processo de pintura automotiva. Sendo a carroceria então enviada aos setores de montagem onde serão adicionados os demais elementos presentes no veículo à estrutura protegida.



Figura 44 Seção de acabamento após a pintura.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.



Figura 45 Montagem dos demais componentes que constituem um veículo automotivo.

Fonte: EXAME: Ford revela detalhes do motor do novo Ka <https://exame.abril.com.br/estilo-de-vida/ford-revela-detalhes-do-motor-do-novo-ka/> Acessado em 01/12/2019.

De maneira geral, a maioria das anomalias encontradas nas camadas protetivas nas inspeções feitas na carcaça do veículo ao longo do processo de pintura do mesmo, são resultado de materiais depositados em sua superfície (sujeidades, poeiras, grumos de tinta, entre outros) durante seu percurso entre as etapas que compõe o sistema de proteção. Tais produtos indesejáveis podem, dependendo da gravidade da discrepância, ser removidos por meio de lixamento ou raspagem, porém, gerando um produto com qualidade superficial diferente dos que não passam por esse tipo de retrabalho. Outro problema ocorre quando esses materiais não são identificados e chegam ao consumidor final, aumentando, assim, as chances de que um processo corrosivo seja identificado antes do término da garantia do veículo, implicando em prejuízo para os fabricantes.

3 METODOLOGIA

A fim de comparar a performance e as características da proteção a corrosão em chapas revestidas por camadas de um processo de pintura em uma indústria automotiva, tendo como base materiais distintos, aço galvanizado a quente por imersão (aço HDG) e aço carbono, comumente empregados nela, foram realizados dois ensaios laboratoriais (utilizados também pela mesma para fins de controle de qualidade): Ensaio de Névoa Salina (câmara salt spray) conforme as normas NBR 8754, ASTM B117, ISO 9227, e ensaio de Aderência a Seco após névoa salina, segundo a norma NBR 11003. Segue o fluxograma apresentando as etapas necessárias a realização da análise:

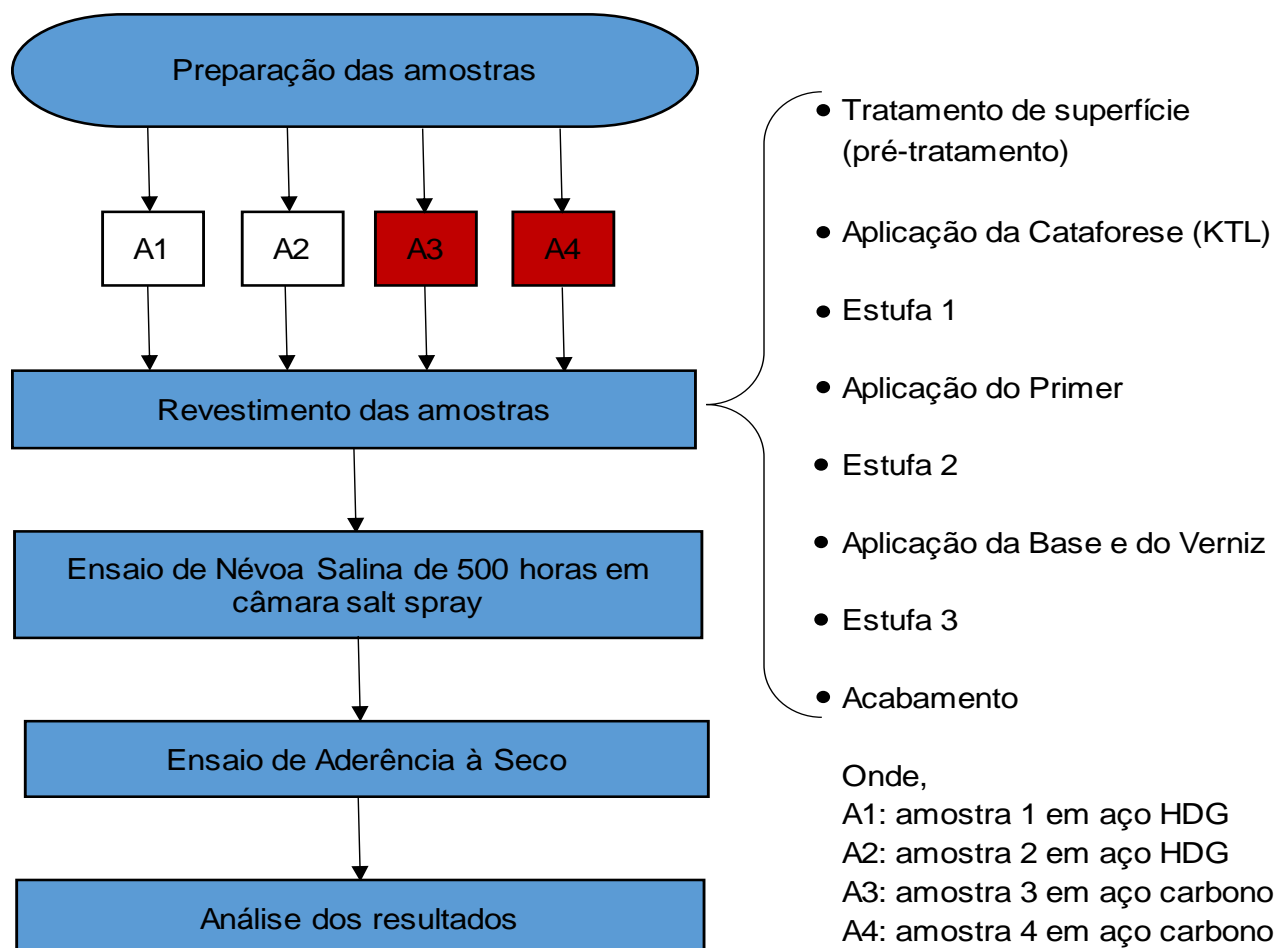


Figura 46 Fluxograma geral (metodologia).

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Preparação das amostras

Tabela 3 Características e composição das chapas em aço HDG.

AÇO GALVANIZADO POR IMERSÃO A QUENTE								
			Composição Química (%)					
Norma	Material do substrato	Faixa de Espessura (mm)	C	Mn	Al	P	S	Outros
DIN EN 10130	Aço laminado a frio	0,7-0,8	0,12 máx.	0,60 máx.	0,005 mín.	0,060 máx.	0,035 máx.	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 Características e composição das chapas em aço carbono.

AÇO CARBONO								
			Composição Química (%)					
Norma	Material do substrato	Faixa de Espessura (mm)	C	Mn	P	S	Si	Outros
ABNT 1008	Aço laminado a frio	0,7-0,8	0,08	1,05 máx.	0,035 máx.	0,040 máx.	0,035 máx.	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

São apresentados nas tabelas 3 e 4 as características das chapas dos materiais selecionados para os ensaios realizados, concedidas pelo fornecedor Chemetall. Foram confeccionadas duas amostras de cada material com as seguintes dimensões: 109 mm de comprimento, 105 mm de largura e 0,8 mm de espessura.

3.2 Revestimento dos corpos de prova

A fim de receberem um revestimento aplicado correspondente aos normalmente processados nos veículos em uma indústria automotiva, os corpos de prova foram então fixados por meio de suportes na região da porta da carroceria de um automóvel (Figura 48) prestes a passar pelas etapas de revestimento protetivo desse sistema, conforme apresentado no tópico 2.3.3, com exceção do estágio onde é feita a aplicação da vedação, visto que as amostras permanecem em uma região exposta onde não há a necessidade de receber tal proteção. Portanto, os passos contemplados pelo sistema de pintura utilizados no revestimento das chapas são:

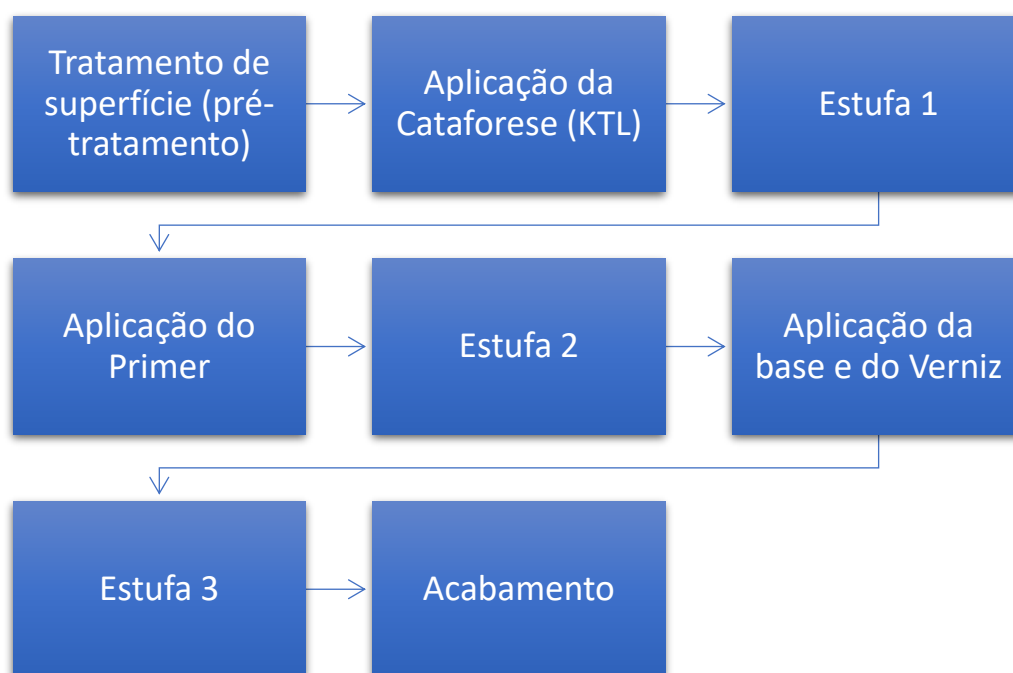


Figura 47 Fluxograma das etapas de revestimento aplicadas às amostras em uma empresa automotiva.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 48 Posicionamento dos corpos de prova na carroceria.

Fonte: SICHI (Qualificação mestrado 2020 UniFOA).



Figura 49 Amostras em aço carbono na cor Rubi e em aço HDG na cor Branco respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram aplicadas cores distintas para o revestimento em cada uma das chapas durante o processo de pintura, a fim de tornar a identificação de ambas mais direta e prática, o que, obviamente, não influencia ou causa alterações no nível de proteção fornecido pelas camadas. Na figura 49 são identificados o material das chapas e suas respectivas cores recebidas.

3.3 Ensaio de Névoa Salina

Concluídas as etapas da aplicação do revestimento protetivo, as amostras foram encaminhadas ao laboratório para a realização do ensaio de corrosão acelerada.

Conforme orientação normativa (NBR 8754, 1985) foi feito um entalhe, em ambas as chapas, diagonalmente, por meio de um instrumento contendo uma ponta constituída de carbeto de tungstênio, atingindo o metal base e danificando, assim, a camada de pintura protetiva formada no passo anterior.



Figura 50 Amostras após dano mecânico por ferramenta com ponta de carbeto de tungstênio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova foram então devidamente higienizados, para que fossem removidas quaisquer partículas sólidas originadas da incisão da ferramenta nas amostras, pois a presença de qualquer corpo estranho sobre as mesmas durante o ensaio em quantidades prejudiciais podem causar alterações em seu resultado final, impossibilitando uma análise confiável dos dados apresentados (Figura 50).

Após os procedimentos descritos anteriormente, foram aferidas as massas iniciais das amostras através de uma balança analítica, a fim de tornar possível a análise das alterações identificadas ao findar do procedimento.

Tais valores, assim como os das massas finais, são apresentados juntamente na tabela 6.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de névoa salina foi a máquina de gabinete do modelo Equilan com série SSE2000. O procedimento foi feito conforme a normalização, sob as condições controladas de umidade relativa, com valor próximo a 97%, e de temperatura a 35°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), e com nebulização de solução aquosa de 5% em peso de cloreto de sódio com PH entre 6,5 e 7,2.



Figura 51 Posicionamento dos corpos de prova na câmara de névoa salina.

Fonte: SHICHI (Mestrado 2020 UniFOA).

Um total de 12 amostras foram ordenadas no interior da câmara (Figura 51), e expostas às condições de sua atmosfera salina por um período de 500 horas, tendo sido feita a verificação e registro do avanço do processo corrosivo nas amostras a cada intervalo de 100 horas de ensaio, tornando possíveis as posteriores análise e comparação.

Os corpos de prova utilizados para análise no tópico 4, apenas constituídos dos materiais aço carbono e aço HDG, foram dispostos juntamente com outras amostras de composições distintas destes que não pertencem ao estudo feito neste trabalho, justificando a quantidade excedente de chapas apresentadas na figura 51.

As figuras de 53 a 58 apresentam os registros feitos das amostras durante o ensaio de 500 horas revelando as modificações dos estados de superfície das chapas a cada período decorrido de 100 horas.

Concluído o ensaio, as amostras foram limpas e pesadas em uma balança de precisão, assim como em seu início, para registro da massa final apresentada pelos corpos de prova, conforme apresentado na tabela 6.



Figura 52 Equipamento Equilan série SSE2000.

Fonte: SICHI (Mestrado 2020 UniFOA).



Figura 53 Aspecto superficial de amostras em aço carbono e aço HDG no início do ensaio em camera salt spray.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 54 Aspecto superficial de amostras em aço carbono e aço HDG após exposição a atmosfera salina durante 100 horas.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 55 Aspecto superficial de amostras em aço carbono e aço HDG após exposição a atmosfera salina durante 200 horas.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 56 Aspecto superficial de amostras em aço carbono e aço HDG após exposição a atmosfera salina durante 300 horas.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 57 Aspecto superficial de amostras em aço carbono e aço HDG após exposição a atmosfera salina durante 400 horas.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 58 Aspecto superficial final de amostras em aço carbono e aço HDG após exposição a atmosfera salina durante 500 horas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Ensaio de aderência a seco

Feitas as aferições, foi dado início ao teste para verificação da adesão das camadas de revestimento ao substrato metálico pós ensaio de névoa salina. O procedimento foi executado seguindo-se as orientações da norma NBR 11003 para corte em grade (método B), que indica a utilização de alguns materiais para que o ensaio seja conduzido de maneira correta. Dessa forma, o ensaio foi realizado em laboratório com condições controladas, a temperatura de 23°C (\pm 2°C) e umidade relativa de 65 % (\pm 5%).

Inicialmente, foram feitas incisões defasadas em um ângulo de 90° entre si, na área central da amostra onde realizou-se o entalhe descrito no tópico 3.3, com um pente de aderência da marca Omicron, de 2mm, visto que as peças já foram limpas e secas no passo anterior. Os cortes foram feitos com pressão e movimentos aplicados de maneira contínua e uniforme, originando, portanto, riscos que formam o desenho de uma grade. A área da incisão foi, então, limpa com um pincel de cerdas macias para que fossem removidos quaisquer resíduos gerados pelas marcações feitas com a ferramenta. Em seguida foi verificado, com o auxílio de uma lupa, que as incisões atingiram o substrato metálico, prosseguindo-se, portanto, ao próximo passo do ensaio onde foi retirado um trecho de aproximadamente 10 cm de fita de aderência Scotch 3M, tendo sido desprezadas suas duas voltas anteriores, que foi colado sobre as incisões em uma das duas direções aplicadas. Para garantir a adesividade da fita, com uma borracha, foi empregada firmemente certa pressão uniforme no seu sentido longitudinal e, aguardados cerca de 120 segundos, foi feita sua remoção sendo puxada, também, no seu sentido longitudinal com uma pressão contínua e movimento de direção tão rente quanto o possível da chapa. Finalmente, foi examinado com o auxílio de uma lupa, e registrado (figuras 59 e 60), o resultante destacamento produzido para que fosse possibilitada posterior análise, e sendo, em seguida, prosseguido com o ensaio da mesma forma com as demais amostras.

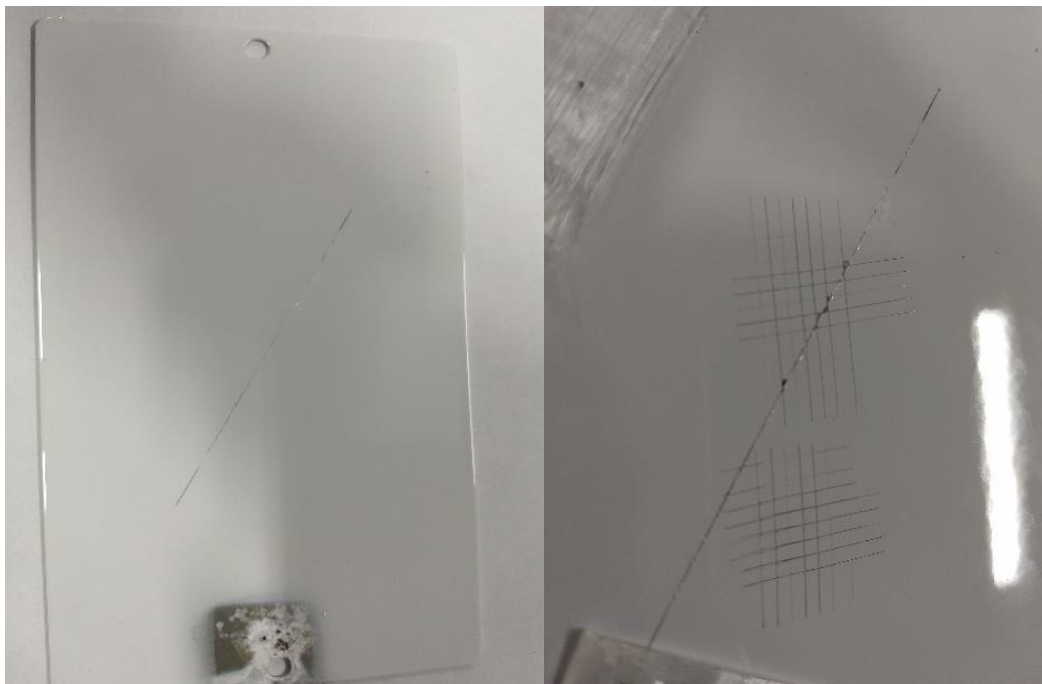


Figura 59 Amostra em aço HDG antes e após ensaio, respectivamente, para classificação do grau de adesão da película de pintura protetiva aplicada.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 60 Amostra em aço carbono antes e após ensaio, respectivamente, para classificação do grau de adesão da película de pintura protetiva aplicada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de névoa salina

A avaliação do grau de ataque dos corpos de prova foi feita baseada na norma ASTM D610, para o caso de chapas revestidas por película de pintura e com incisão provocada, sendo classificados através da comparação dos registros feitos durante o ensaio com os gabaritos contidos na mesma, em graus que podem ser verificados entre 1 e 10, de maneira que o número 10 representa um corpo de prova onde não é observado qualquer ataque. Os resultados são apresentados na tabela 5 e foram pontuados de acordo com a avaliação feita na região do corte.

Tabela 5 Resultado da avaliação do aspecto superficial do filme de pintura segundo a norma ASTM D610-08

	Amostra	100h	200h	300h	400h	500h
Branca	Aço HDG	10	10	10	10	10
Rubi	Aço carbono	6G	4G	1G	1G	1G

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme registrado na tabela 5 e mostrado nas imagens 51 a 56, em relação as amostras em aço HDG, não foi verificada presença de produto de corrosão através de toda a extensão da superfície da película protetiva, ou na região do corte provocado, durante todo o tempo de exposição a atmosfera agressiva do ensaio, revelando a excelente performance do revestimento e vínculo entre a camada protetora adicionada e o substrato do aço HDG, exercendo tamanha proteção sobre as amostras que não é identificável de forma visível qualquer alteração do aspecto superficial das mesmas do início ao final do ensaio.

Já no que diz respeito as amostras em aço carbono, desde o primeiro registro feito após o início do ensaio (em 100 horas) o corpo de prova já apresentava formação de corrosão tanto na região da incisão quanto ao longo da superfície da película de proteção, tendo provocado inclusive o enrugamento da camada de revestimento próximo a extremidade da área danificada pelo dispositivo de

corde nesse intervalo tempo, sendo tal processo corrosivo agravado a medida que era prolongado o tempo de exposição das amostras a atmosfera do interior da câmara e, apresentando ao final do ensaio um processo de oxidação bem evidente e avançado, com seu aspecto superficial completamente comprometido na região próxima ao entalhe, onde é visível a presença de oxidação do tipo vermelha, além dos danos causados ao filme de pintura ao longo da extensão da chapa.

Além da inspeção visual, também foi feita a verificação da média da perda de massa para cada material durante ensaio, possibilitando a comparação da resistência a corrosão das ligas metálicas em questão, onde observou-se a perda 373,97% maior de massa pelo corpo de prova em aço carbono em relação ao em aço HDG, conforme consta na tabela 6, confirmando a superioridade da qualidade da proteção oferecida por um aço galvanizado por imersão a quente em relação ao aço carbono.

Tabela 6 Registro dos valores de massa (em gramas) dos corpos de prova antes e depois do ensaio em camara salt spray.

Cor CP	Item	CP - Pintado (g)	CP - Após ensaio de névoa salina (g)	Perda (g/m ²)	Perda %
Rubi	1	128,0432	126,9267	55,96	0,87
	2	127,9253	127,0014	46,31	0,72
Média				51,135	0,795
Branca	1	127,9338	127,6610	13,67	0,21
	2	128,0196	127,7468	13,67	0,21
Média				13,67	0,21

Fonte: Elaborado pelo autor.

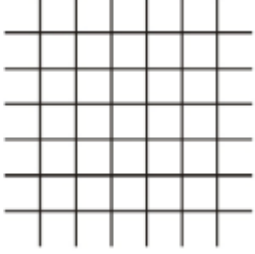
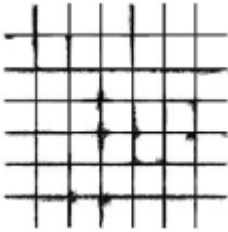
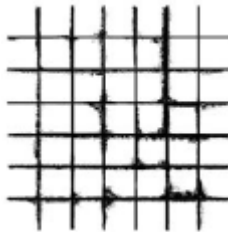
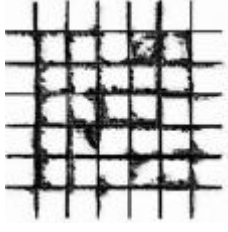
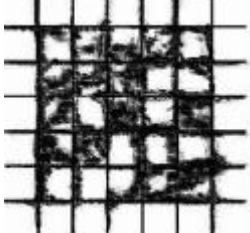
4.2 Ensaio de aderência a seco

O grau de adesão do revestimento protetivo ao substrato metálico dos corpos de prova analisados foi classificado conforme o padrão fornecido pela norma NBR 11003 (tabela 7) por meio de comparação.

Para a amostra em aço HDG, foi observado um deslocamento mínimo do filme de revestimento em região bem rente a incisão provocada (Figura 57), porém, o corpo de prova em aço carbono apresentou um deslocamento bem

agravado do filme protetivo, revelando também nessa região um processo avançado de oxidação sobre o substrato, apresentando uma péssima aderência do filme de pintura sob tais condições (Figura 58). A tabela 8 apresenta tais resultados registrados conforme a padronização da norma

Tabela 7 Classificação do grau de adesão conforme a norma NBR 11003.

<p>GR₀ Nenhuma área da película destacada</p>	
<p>GR₁ Área da película destacada, cerca de 5% da área quadriculada</p>	
<p>GR₂ Área da película destacada, cerca de 15% da área quadriculada</p>	
<p>GR₃ Área da película destacada, cerca de 35% da área quadriculada</p>	
<p>GR₄ Área da película destacada, cerca de 65% da área quadriculada</p>	

Fonte: SICHI (Qualificação mestrado 2020 UniFOA).

Tabela 8 Classificação resultante da análise do grau de adesão do filme de pintura ao substrato das amostras em aço carbono e aço HDG conforme a norma NBR 11003.

Amostra	Classificação da aderencia: NBR 11003
Aço HDG	GR1
Aço carbono	GR4

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Nos dois ensaios realizados neste trabalho, foi observado que os corpos de prova em aço HDG apresentaram um desempenho extremamente superior em relação aos constituídos apenas de aço carbono, onde, com base nos resultados apresentados nas tabelas 5, 6 e 8, pode-se concluir que:

1. As amostras em aço HDG revelaram excelentes características de adesão e resistência a corrosão, enquanto as amostras em aço carbono, já no primeiro estágio registrado após o início do ensaio, apresentaram um evidente desenvolvimento de processo de oxidação na região do dano provocado pela ferramenta de usinagem.
2. Veículos exteriormente constituídos por placas em aço carbono, sem terem passado pelo prévio tratamento de metalização, teriam seu aspecto visual bem mais rapidamente comprometido, ainda que revestidos pela camada de pintura protetiva, quando comparados aos confeccionados por aço HDG, e em alguns casos, até mesmo antes do término da garantia do ativo, resultando em prejuízos tanto financeiros quanto relativos à reputação da empresa.
3. O aspecto da chapa em aço carbono após o ensaio em Névoa Salina reproduz o comportamento superficial que seria semelhantemente observado em um automóvel que sofresse qualquer entalhe que causasse a ruptura de seu filme de pintura após algum tempo, podendo tal resultado ser agravado dependendo das condições atmosféricas da região em que se encontra o automóvel.
4. Ao longo do tempo de uso, a escolha pelas chapas em aço HDG resultará em um excelente retorno para a empresa, reduzindo custos relacionados com retrabalho, desperdícios com material danificado por oxidação e os gastos dispendidos com manutenção que afetam no valor da garantia do automóvel, além de diminuir drasticamente as chances de ocorrer a ruptura de algum componente causada por corrosão.
5. O aço HDG agrega confiabilidade muito maior em relação à durabilidade da superfície do ativo, contribuindo com o crescimento da empresa responsável por sua fabricação.

6. Esses resultados não são capazes, e nem tem o objetivo, de informar o tempo exato que o material levaria para desenvolver um processo de oxidação em condições normais do dia a dia de uso, pois foram obtidos por meio de um ensaio acelerado sob condições controladas de atmosfera, porém eles refletem o comportamento do revestimento de proteção que seria observado ao desenvolverem esse tipo de processo.

Os ensaios e análises feitas neste trabalho foram importantes pois seus resultados refletem os riscos que uma empresa responsável pela linha de montagem de um automóvel pode correr por preferir o uso do substrato de menor custo ao invés do, comprovadamente mais indicado em termos de proteção anticorrosiva, em aço HDG (aproximadamente 2% mais caro), além de permitir que fossem identificadas, de maneira mais clara, quais desvantagens estariam evidentemente envolvidas nessa escolha.

Também é importante destacar que os resultados apresentados e avaliados neste trabalho são referentes às chapas de aço sem qualquer prévia identificação de presença de impurezas oleosas, semissólidas, sólidas, na forma de óxidos ou de produtos de corrosão em sua superfície antes e após o revestimento de proteção por pintura, pois, apesar dos esforços dispendidos pelas montadoras no controle dessas partículas de material indesejado, muitas vezes acaba ocorrendo o contágio das superfícies a serem protegidas por eles, seja por qualquer variação decorrida que atinja o sistema de pintura produzindo uma limpeza superficial deficiente, ou por qualquer descuido por parte dos operadores, visto que algumas etapas presentes em um sistema de pintura automotiva são realizadas de forma manual, o que acelera e agrava o desenvolvimento de qualquer processo de oxidação nas chapas, impactando de maneira significativa o grau de proteção apresentado pelo revestimento resultante, reduzindo ainda mais sua vida útil, que significaria um prejuízo ainda maior no caso da opção pelo uso de chapas em aço carbono comum.

6 REFERÊNCIAS

- AMORIN, Amanda Miller, Mariana Gomes BATISTA, e Thaiza Regina Ferreira COELHO. *Estudo do Processo de Pré-Tratamento e Antioxidação da Carroceria Automotiva e Ferramentas de Qualidade Usadas Para Controle*. Barra Mansa, Rio de Janeiro, 2016.
- ARRUDA, Eduardo Amélio de Farias. *Estudo Comparativo do Processo Corrosivo do Aço Patinável e do Aço Carbono Comum*. Belém, 2009.
- ASCENÇÃO, Tiago Emanuel Correia Ferreira. “Impurezas, uma evidência de desvio de processo em linhas de produção de pintura Spray.” *Instituto Politécnico do Porto: Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão*, Outubro 2016.
- CUSTÓDIO, Maira da Silva, e Paulo Rogério de SOUZA. “Resistência à Corrosão em Chapas Pintadas Submetidas à Pré Tratamento à Base de Nanotecnologia.” *ISITEFA Simpósio de Tecnologia Fatoc*, 2018.
- DALMOLIN, Carla, Felipe Freire GOLÇALVES, e Wagner Mauricio PACHEKOSKI. “Avaliação da remoção da camada primer num processo de pintura automotiva, efeitos econômicos e impactos ambientais.” *Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET*, Outubro 2013: 3045- 3054.
- DRUMOND, Thiago Antônio de Paula. “Aplicação de Técnicas de Produção Sustentável no Processo de Pintura Automotiva.” *UFSC*, Agosto 2013.
- GENTIL, Vicente. *Corrosão*. 6ª. Rio de Janeiro: LTDA, 2011.
- IKEMATSU, Paula. “Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes.” *Escola Politécnica*, 2007.
- JÚNIOR, Guilherme Brito Menegaz. *Siderurgia Brasil o portal de negócios do aço*. 2 de Outubro de 2019. <http://www.siderurgiabrasil.com.br/portal/index.php/indice-da-revista/365-sb133-novos-acos-para-ind-automotiva>.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. “Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces.” 2019.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.” 2019.
- RIJEZA METALURGIA. *Corrosão química: Saiba como prevenir*. Rijeza Metalurgia. s.d. <https://www.rijeza.com.br/blog/corrosao-quimica-saiba-como-prevenir> (acesso em 1 de Dezembro de 2019).

- MOREIRA, Layla Fernandes , e Patrick Vidal Oliveira MENDONÇA. “Implementação do Sistema Edrizzi® na Indústria Automotiva.” *Centro Universitário de Barra Mansa*, 2019.
- NARAYANAN, Sankara. *Phosphate Conversion Coatings - A Metal Pretreatment Process*. 1994.
- NETO, Luiz Vitorino Dantas. *O processo de corrosão e a proteção catódica*. Rio de Janeiro, 2016.
- OLIVEIRA, Antônio Roberto de. *Corrosão e Tratamento de Superfície*. Belém, Pará, 2012.
- PAINT&PINTURA. *Soluções em tintas da BASF ajudam a NIO a configurar nova geração de carros elétricos*. PAINT&PINTURA. 20 de Julho de 2018. <https://www.paintshow.com.br/paintpintura/noticias/view/6066/solucoes-em-tintas-da-basf-ajudam-a-nio-a-configurar-nova-geracao-de-carros-eletricos?categoria=1> (acesso em 4 de Outubro de 2019).
- PIEROZAN, Leonardo. *Estabilização de Processo: Um Estudo de Caso no Setor de Pintura Automotiva*. Porto Alegre, Rio de Janeiro, 2001.
- POLITO, Giulliano . “Principais Sistemas de Pinturas e suas.” *Universidade Federal de Minas Gerais*, Março 2006.
- PRAXEDES, Priscila Brentran. “Aplicação da Borra da Tinta Automotiva na Produção de Cerâmica Branca Refratária.” *Universidade Federal do Paraná*, 2013.
- RIBBE, Alberto Paulo. *Corrosão e tratamentos superficiais dos metais*. Associação Brasileira De Metal, 1971.
- SCHMITZ, Sidnei . *Aços Planos Aplicados na Indústria Automobilística*. Curitiba, Paraná, 2013.
- SICHI, Andriel. “Estudo da Influência de Impurezas Depositadas na Camada do Substrato em Pintura Automotiva e Desenvolvimento de Protocolo para Garantir o Bom Tratamento Superficial em Chapas Galvanizadas à quente por Imersão para Evitar que Haja Corrosão e Desplacamento.” *Fundação Oswaldo Aranha: Centro Universitário de Volta Redonda*, 2020.
- SILVA, Luis Fernando Junqueira. “Utilização do Método KTL em Pinturas Industriais.” *Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão*, 2012.
- SOARES, Bernardo Bregoli. “A Utilização do Modelo de Simulação Computacional Para Análise e Modificação de Um Sistema de Produção de Pinturas Automotivas.” *Universidade Caxias do Sul Centro de Ciências Exatas e Tecnologia*, 2013.

- ISO - International Organization for Standardization. "Corrosion tests in artificial atmospheres -- Salt spray tests." 2017.
- STORCK, Odair, Vilma Bueno SILVA, Eliane GARLET, Larissa Disconzi PERUFO, e Leoni Pentiado GODOY. "Preparação de superfície e pintura líquida poliuretana: garantindo proteção contra danos corrosivos." *Espacios* 35 (2014).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "Corpos-de-prova revestidos e expostos a ambientes corrosivos - Método de avaliação - Método de ensaio." Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "Tintas — Determinação da aderência." Rio de Janeiro, 2009.
- TRAVASSOS, Ricardo Lima. *Avaliação de penetração de banhos de pintura em áreas fechadas com pequenas distâncias entre chapas*. Salvador: Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, 2011.
- USIMINAS. "Galvanizados por Imersão à Quente." *www.usiminas.com*. Usiminas. 3 de Agosto de 2015. https://usiminas.com/wp-content/uploads/hotsites_portal_sap/CongressoDoAco/pdf/Galvanizados_Imersao_Quente.pdf.
- VITOR, Andressa Silva, et al. "Processo de Pintura e Revestimento Superficial E-COAT." *Pesquisa e Ação* V4 N1, Maio 2018.