

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

LETÍCIA ANTEGHINI MIGLIARI

A influência da rugosidade no processo de aderência de esmalte vítreo

Lorena - SP

2021

LETÍCIA ANTEGHINI MIGLIARI

A influência da rugosidade no processo de aderência de esmalte vítreo

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
Lorena da Universidade de São Paulo como
requisito obrigatório para a conclusão do
curso de Engenharia Física.**

**Orientadora: Prof. Dra. Katia Cristiane
Gandolpho Candioto**

Lorena - SP

Dezembro / 2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Migliari, Letícia Anteghini

A influência da rugosidade no processo de aderência de esmalte vítreo / Letícia Anteghini Migliari; orientadora Katia Cristiane Gandolpho Candioto. - Lorena, 2021.

74 p.

Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Física - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2021

1. Esmaltação vítrea. 2. Rugosidade. 3. Jateamento. 4. Lixamento. I. Título. II. Candioto, Katia Cristiane Gandolpho, orient.

Dedico este trabalho à toda minha família, mas, em especial, a minha vó, Edna Elisa de Arruda Anteghini, por ter sido minha inspiração e, hoje, minha estrela guia.

AGRADECIMENTOS

Se alcancei os objetivos que tanto almejei, com certeza só consegui graças às pessoas que estiveram sempre ao meu lado, me incentivando, ajudando e torcendo por mim.

Agradeço aos meus pais, Nilton Paulo Migliari e Patrícia Helena Anteghini Migliari, pela educação que recebi: quando tratamos o próximo com respeito chegamos mais longe; agradeço a eles também por toda motivação e ajuda nesses anos de faculdade e pelas várias viagens Leme-Lorena que fizeram para me auxiliar. Agradeço minhas irmãs, Gabriela Anteghini Migliari e Mariana Anteghini Migliari, por toda vivência, por todos os conselhos e por toda amizade construída e mantida até aqui. Agradeço de coração minha vó, Alzira Ligeiro Migliari, e minha tia, Nerci Aparecida Migliari, que sempre se preocuparam comigo e ajudaram no que fosse preciso! Agradeço também minha vó, Edna Elisa de Arruda Anteghini, que por dois anos e meio conseguiu me auxiliar de maneira excepcional com as matérias da faculdade e é meu exemplo de aluna e professora, descanse em paz vó. Agradeço todos citados acima por se manterem presentes mesmo distantes, amo vocês!

Agradeço ao Arthur Andrade Regolin, por todo companheirismo, amizade e amor, obrigada por sempre estar ao meu lado; e às minhas amigas e amigos, que fizeram dos anos da faculdade os melhores, em especial as meninas do “B4L” e as meninas do Futsal Feminino EEL-USP. Vocês me proporcionaram momentos inesquecíveis!

Agradeço à Escola de Engenharia de Lorena, à Universidade de São Paulo e todos os meus professores, em especial duas professoras que tiveram papel fundamental na minha formação: a professora Dra. Paula Cristiane Pinto Mesquita Pardal, que despertou em mim uma vontade muito grande de aprender, graças à qualidade de suas aulas e a maneira atenciosa de ensinar, me ofereceu oportunidades muito grandes dentro da faculdade e sempre me elogiou e confiou em mim; e a professora doutora Dra. Katia Cristiane Gandolpho Candioto que no final da faculdade se tornou muito próxima, teve papel fundamental durante meu estágio e me deu os melhores conselhos, tenho orgulho em tê-la como orientadora deste trabalho.

Por fim, agradeço meus colegas de trabalho, que vêm tendo papel fundamental no meu desenvolvimento profissional e que me ajudaram e me aconselharam em relação a este projeto.

Obrigada Deus, pelas pessoas incríveis que o senhor colocou no meu caminho e por me ajudar a chegar até aqui!

RESUMO

MIGLIARI, L. A. **A influência da rugosidade no processo de aderência de esmalte vítreo.** 2021. 74 p. Projeto (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

A esmaltação vítrea é um tipo de revestimento inorgânico utilizado em diferentes tipos de superfícies, como metais, vidros e cerâmica; é um processo antigo, mas que passou a receber maior atenção e investimento tecnológico na década de 1980 em diante, devido às suas ótimas propriedades térmicas, químicas, físicas e mecânicas, além disso, suas diferenças estéticas também se sobressaem em relação aos outros processos de revestimento, tudo isso agrega grande valor ao produto final, resultando em destaque para esse tipo de processo. Diante disso, o entendimento das variáveis da esmaltação vítrea é fundamental para controle e prevenção de possíveis falhas do processo. O presente projeto analisa a influência da rugosidade no processo de aderência de esmalte vítreo aplicado através do método de pó eletrostático a seco (POESTA) em substrato de aço carbono. Um estudo de planejamento foi estabelecido para obtenção de diferentes rugosidades, com utilização de dois tipos de tratamentos superficiais distintos: jateamento e lixamento, e, para referência da rugosidade, foram utilizadas também amostras sem tratamento, no intuito de obter condições de maior e menor rugosidade. Foram estabelecidos os processos de jateamento com esferas de aço-carbono e lixamento com lixas até a granulometria de #1200 para promoção das rugosidades. Todas as amostras foram esmaltadas nas mesmas condições e com os mesmos parâmetros de aplicação e cura do esmalte vítreo, para que não houvessem diferenças no processo como um todo. Na aplicação do esmalte utilizou-se do método de pó eletrostático a seco (POESTA). As rugosidades após processo de revestimento demonstraram que a esmaltação vítrea é um processo que uniformiza a superfície revestida, uma vez que as diferentes rugosidades iniciais não promoveram diferenças significativas na rugosidade após esmaltação e cura. As medidas das espessuras da camada de esmalte vítreo apresentaram uma relação de aumento da camada aplicada conforme a rugosidade superficial do aço carbono aumenta. Por último, os testes de aderência de esmalte, objetivo do projeto, se mostraram todos positivos, indicando que não existiu influência na adesão do esmalte nas condições de rugosidade estudadas. Todos os tipos de amostras não apresentaram deslocamento de esmalte, possuindo aderência entre 85% e 100%, concluindo, portanto, que a rugosidade da superfície, para este tipo de composição de aço e condições de esmaltação, não interfere na aderência do esmalte. Concluiu-se também que não houveram diferenças estéticas entre as amostras, isso porque nenhuma delas apresentou defeito superficial visível a olho nu. Vale ressaltar que todos estes resultados foram comprovados tanto pelos valores numéricos obtidos, quanto pelas imagens qualitativas capturas através de microscópio estereoscópio.

Palavras-chave: Esmaltação vítrea, Rugosidade, Jateamento, Lixamento.

ABSTRACT

MIGLIARI, L. A. **Influence of roughness on the vitreous enamel adherence process.** 2021. 74 p. Monograph (Undergraduate thesis) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

Vitreous enamelling is a type of inorganic coating used on different types of surfaces, such as metals, glass and ceramics; it is an old process but it started to receive more attention and technological investment from the 1980s onwards, due to its excellent thermal, chemical, physical and mechanical properties, besides that its aesthetic differences also stand out in relation to other coating processes, all this adds great value to the final product resulting in emphasis on this type of process. Therefore, understanding the variables of vitreous enamelling is essential for the control and prevention of possible failures of process. This project analyzes the influence of roughness on the adherence process of vitreous enamel applied through the dry electrostatic powder method (POESTA) on carbon steel substrate. A planning study was established to obtain different roughness, using two different types of surface treatments: sandblasting and sanding, and, for roughness reference, untreated samples were also used, in order to obtain conditions of higher and lower roughness. Sandblasting processes with carbon steel balls and sanding with sandpaper up to a particle size of #1200 were established to promote roughness. All samples were enameled under the same conditions and with the same application and curing parameters so that there were no differences in the process as a whole. The application of enamel used the dry electrostatic powder method (POESTA). The roughness after the coating process demonstrated that the vitreous enamelling is a process that uniformes the coated surface, since the different initial roughness did not promote significant differences in the roughness after enamelling and curing. The measurements of the thickness of the vitreous enamel layer showed an increase in the applied layer as the surface roughness of carbon steel increases. Finally, the enamel adherence tests, the objective of the project, were all positive, indicating that there was no influence on enamel adhesion under the roughness conditions studied. All types of samples did not show enamel peeling, having adherence between 85% and 100%, concluding, therefore, that the surface roughness for this type of steel composition and enamelling conditions does not interfere with the enamel adherence. It was also concluded that there were no aesthetic differences between the samples, because none of them had a superficial defect visible to the naked eye. It is noteworthy that all these results were confirmed both by the numerical values obtained and by the qualitative images captured through a stereomicroscope.

Keywords: Vitreous enamelling, Roughness, Sandblasting, Sanding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Artefato do final do século XX já revestido com esmalte vítreo; exposição do museu ArTchivio em Ponte San Pietro, na Itália	21
Figura 2 - Aplicações da esmaltação vítrea em objetos domésticos, (a) forno, (b) panelas e (c) pias	25
Figura 3 - Gráfico do percentual de carbono ideal para cada tipo de substrato (aço e ferro)	28
Figura 4 - Aplicação automatizada de pó eletrostático a seco	32
Figura 5 - Visão microscópica da interface aço-esmalte	36
Figura 6 - Curva de queima de fornos contínuos	36
Figura 7 - Seções metalográficas das superfícies de substratos metálicos após tratamentos superficiais distintos, (a) superfície virgem, (b) superfície polida, (c) superfície decapada e (d) superfícies jateada.....	38
Figura 8 - Pontos de ancoragem indicados por "x" na interface substrato-esmalte.....	39
Figura 9 - Curva da variação de aderência para os três diferentes tipos de tratamentos superficiais em função da quantidade de cobalto presente no esmalte	39
Figura 10 - (a) Funcionamento dos medidores de camada, (b) Medidor de camada Minipa MCT-401	42
Figura 11 - Teste de aderência esquematizado e imagens da classificação do teste	44
Figura 12 - Fluxograma do projeto.....	45
Figura 13 – Representação da amostra utilizada (302 x 188 x 0,55mm)	46
Figura 14 - Máquina de jatear Tecjato Febratec utilizada no projeto	48
Figura 15 - Granalhas de aço carbono esféricas utilizadas para o jateamento	48
Figura 16 - Lixadeira orbital pneumática utilizada no projeto	49
Figura 17 - Lixas utilizadas na etapa de lixamento das amostras.....	49
Figura 18 - Rugosímetro digital de bancada SURFTEST SJ-210 da marca <i>Mitutoyo</i>	51
Figura 19 – Desenho esquemático da ordem e locais das medições de rugosidade	52
Figura 20 - Medidor de espessura de camada MCT-401 da marca Minipa	53
Figura 21 – Disposição do equipamento e da amostra para o teste de aderência	54
Figura 22 - Gráfico Rugosidade (μm) x Tratamento Superficial antes do processo de esmaltação vítrea	56

Figura 23 - Amostras preparadas para a aplicação do esmalte, (a) lixada, (b) sem tratamento e (c) jateada	57
Figura 24 - Visão no microscópio estereoscópio da amostra jateada	57
Figura 25 – Visão no microscópio estereoscópio da amostra sem tratamento.....	58
Figura 26 - Visão no microscópio estereoscópio da amostra lixada	58
Figura 27 - Gráfico comparativo de Rugosidade (μm) x Tratamento Superficial antes e após processo de esmaltação vítrea	60
Figura 28 - Amostras pós processo de esmaltação vítrea, (a) lixada, (b) sem tratamento e (c) jateada	60
Figura 29 - Visão no microscópio estereoscópio após esmaltação da amostra jateada....	61
Figura 30 – Visão no microscópio estereoscópio após esmaltação da amostra sem tratamento	62
Figura 31 – Visão no microscópio estereoscópio após esmaltação da amostra lixada	62
Figura 32 - Gráfico de Espessura de Camada (μm) x Tratamento Superficial	63
Figura 33 - Impacto provocado pelo teste de aderência em uma das amostras esmaltadas	65
Figura 34 - Visão no microscópio estereoscópio após teste de aderência da amostra jateada	65
Figura 35 – Visão no microscópio estereoscópio após teste de aderência da amostra sem tratamento	66
Figura 36 - Visão no microscópio estereoscópio após teste de aderência da amostra lixada.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação de alguns óxidos que compõe a fritas	23
Quadro 2 - Métodos de aplicação de esmalte seco e úmido	30
Quadro 3 - Processos físicos e químicos em cada zona de aquecimento do forno	34
Quadro 4 - Defeitos relacionados ao processo de esmaltação vítrea.....	40
Quadro 5 - Testes do processo de esmaltação vítrea para cada tipo de propriedade do esmalte	41
Quadro 6 - Classificação da aderência de esmalte vítreo	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de participação da esmaltação em cada tipo de aplicação no mercado americano de 1990	26
Tabela 2 - Características do pó eletrostático a seco (POESTA)	31
Tabela 3 - Parâmetros importantes durante a aplicação de pó eletrostático a seco.....	32
Tabela 4 – Resultados das medições de rugosidade antes do processo de esmaltação vítrea	55
Tabela 5 – Resultados das medições de rugosidade após o processo de esmaltação vítrea	59
Tabela 6 - Resultados da espessura da camada de esmalte vítreo	63
Tabela 7 – Resultados do teste de aderência do esmalte vítreo	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS.....	19
3	JUSTIFICATIVA.....	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1	Uma breve história da esmaltação vítrea	21
4.2	O esmalte vítreo	22
4.2.1	Propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas.....	24
4.2.2	Vantagens e desvantagens do esmalte vítreo.....	24
4.2.3	Aplicações da esmaltação vítrea.....	25
4.3	Tipos de esmaltes vítreos	26
4.4	Substratos para a esmaltação	27
4.4.1	Aço para esmaltação	27
4.5	O processo de esmaltação vítrea.....	29
4.5.1	Preparação e limpeza da superfície	29
4.5.2	Aplicação do esmalte.....	30
4.5.3	Tratamento térmico do esmalte	33
4.5.4	Sequências de aplicação e queima.....	37
4.6	O processo de aderência do esmalte ao aço e a relação com a rugosidade	37
4.6.1	Os diferentes tratamentos superficiais no estudo de rugosidade e aderência	38
4.7	Defeitos no processo de esmaltação vítrea	40
4.7.1	Defeitos por falta de aderência do esmalte ao aço.....	40
4.8	Testes realizados ao final do processo.....	41
4.8.1	Teste de espessura de camada	42
4.8.2	Teste de aderência	43
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
5.1	Geometria das amostras	46
5.2	Estudo para definição das rugosidades.....	46
5.3	Seleção dos tratamentos superficiais.....	47
5.3.1	Jateamento das amostras.....	47
5.3.2	Lixamento das amostras	49

5.4	Limpeza superficial.....	50
5.5	Aplicação do esmalte	50
5.6	Queima de esmalte	50
5.7	Caracterização das amostras	51
5.7.1	Medição da rugosidade	51
5.7.2	Determinação da superfície	52
5.7.3	Medição da camada de esmalte vítreo	52
5.7.4	Teste de aderência	53
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1	Estudo para definição das rugosidades.....	55
6.2	Caracterizações iniciais (antes do processo de esmaltação).....	55
6.2.1	Medições de rugosidade	55
6.2.2	Determinação das superfícies	57
6.3	Caracterizações finais (após processo de esmaltação).....	59
6.3.1	Medições de rugosidade	59
6.3.2	Determinação das superfícies	61
6.3.3	Medições da camada de esmalte vítreo	63
6.3.4	Testes de aderência.....	64
6.4	Diferenças estéticas de recobrimento a olho nu	67
7	CONCLUSÃO	68
8	PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A esmaltação vítrea é um revestimento do tipo inorgânico que pode ser aplicado em metais, vidros e cerâmicas para fins decorativos e funcionais (RUSSO; ROSSI; COMPAGNONI, 2021). Nos dias atuais, a esmaltação vítrea é utilizada, principalmente, para o revestimento de objetos usados na cozinha, como painéis, fogões e fornos, devido às suas boas propriedades físicas, térmicas, mecânicas, químicas e também estéticas. O uso da esmaltação vítrea, por mais que pareça algo novo por não ser tão conhecido ou discutido no Brasil, é uma das técnicas de revestimento mais antigas, sendo bastante explorada em países como Alemanha e Bélgica (DE OLIVEIRA, 2017). Esse processo, antigamente, era considerado uma forma de arte, pois mudava completamente o *design* da peça, conferindo brilho e cores de destaque.

O que traz grande relevância ao processo da esmaltação são suas excelentes propriedades técnicas: o esmalte vítreo possui alta dureza, durabilidade, impressionante resistência ao calor, à corrosão e ao choque térmico, ou seja, alta resistência a danos mecânicos, físicos, térmicos e químicos, com proteção contra agentes ambientais e atmosféricos, tudo isso sem a liberação de substâncias tóxicas (KUCHINSKI, 1993). Soma-se também todas as suas vantagens estéticas que conferem um *design* totalmente moderno ao objeto em que for aplicado (CALOVI; ROSSI; RUSSO, 2021).

Assim como todos os processos industriais, o revestimento de esmalte vítreo também possui seus modos de falha, podendo ocorrer diversos tipos de defeitos em sua aplicação (IŞIKSAÇAN; YÜCEL; YEŞİLÇUBUK, 2018). Com isso, por mais que o esmalte tenha propriedades técnicas de excelência, o fato de ser uma aplicação que visa muita estética faz com que a qualidade da superfície do revestimento seja de extrema relevância.

Um dos principais fatores para a qualidade da aplicação é a boa aderência do esmalte ao aço durante o processo de queima, uma vez que se não ocorrer corretamente, acarreta uma aparência de deterioração muito grave que pode levar à rápida destruição do aço-esmalte (INTERNATIONAL PEMCO, 2008). Dentre as principais causas que implicam em uma má aderência do esmalte ao aço, estão, segundo Richmond et al. (1953), as condições de superfície do metal antes da aplicação do esmalte, o tempo de queima (insuficiente ou excessiva) e a quantidade de óxido de cobalto/níquel na frita.

Quando Richmond et al., (1953) cita as condições de superfície do metal como variável que interfere na aderência do esmalte, o mesmo refere-se a tratamentos como decapagem, jateamento de areia e polimento, todos esses diretamente relacionados à rugosidade superficial do aço.

Diante da importância do processo de esmaltação vítrea, assim como seus poucos estudos no país, o presente projeto visa fornecer uma base teórica para conhecimento do tema e uma oportunidade de aplicação prática através de uma análise da relação da rugosidade com a aderência do esmalte. Foram realizadas análises da aplicação e cura do esmalte vítreo através do método de pó eletrostático a seco (POESTA) em substrato de aço carbono com superfícies de diferentes rugosidades, com posterior realização de teste de aderência, teste de espessura de camada e inspeção visual.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar qual a influência da rugosidade superficial em aço carbono sobre a aderência do revestimento de esmalte vítreo, através da aplicação de pó eletrostático a seco (POESTA), em amostras com diferentes tratamentos superficiais: jateamento e lixamento; avaliando adicionalmente a interferência na espessura da camada do esmalte aplicado e no resultado estético final.

3 JUSTIFICATIVA

O projeto proposto analisa uma das variáveis que tem influência na aderência do esmalte vítreo ao aço: a rugosidade. O entendimento das variáveis do processo é um tema de extrema importância para o controle e prevenção de falhas, uma vez que, segundo Akdag (2011), quando um defeito ocorre no processo de esmaltação os processos de reparo, reciclagem ou reprocesso são bastante difíceis de serem realizados.

Além disso, apesar da esmaltação vítrea ser um processo já aplicado no ambiente industrial desde muitos anos atrás e ter um desenvolvimento técnico e de pesquisa muito avançado em países como Alemanha e Bélgica, a presença e estudo no Brasil ainda é relativamente prematura e carece de aprimoramentos (DE OLIVEIRA, 2017). Sendo assim, o desenvolvimento de um projeto relacionado ao tema de esmaltação vítrea proporciona conhecimentos novos em uma área que oferece oportunidades futuras.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Uma breve história da esmaltação vítrea

É praticamente impossível a determinação da data exata em que o processo de esmaltação vítrea foi descoberto e passou a ser desenvolvido e utilizado, mas alguns autores afirmam que o processo teve um grande impulso por volta do século XIII A.C. na região do mar mediterrâneo (DIETZEL, 1981). Alguns artefatos arqueológicos e joias antigas comprovam que os precursores do uso extensivo da esmaltação foram os egípcios, que aplicavam a vitrificação para revestir cerâmicas e deixá-las mais atrativas (RICCARDELLI; MASS; THORNTON, 2002). Tal processo agregava valor ao produto final, pois este ficava com aparência brilhante e com bela textura e cores (COMPAGNONI; ROSSI; RUSSO, 2021). Na Figura 1 é apresentado um artefato do final do século XX, o qual já apresentava revestimento vítreo.

Figura 1 - Artefato do final do século XX já revestido com esmalte vítreo; exposição do museu ArTchivio em Ponte San Pietro, na Itália



Fonte: adaptado de Compagnoni; Rossi; Russo (2021).

Durante muito tempo, a esmaltação vítrea foi utilizada somente para o revestimento de utensílios domésticos, joias e objetos religiosos, entretanto, com a Revolução Industrial, o esmalte se tornou uma alternativa interessante industrialmente, pois poderia ser um revestimento de baixo custo e útil para diversas aplicações (PETZOLD; POSCHMANN, 1992). A partir disso, a esmaltação vítrea

passou a ser vista como um processo técnico e teve muita oportunidade de desenvolvimento e descobertas (ANDREW, 1961).

No início do século XX já se via uma presença considerável do esmalte vítreo em objetos domésticos, como fogões, fornos, banheiras e pias. Na década de 1960, houve uma redução drástica no uso de metais esmaltados devido ao advento dos polímeros, mas, 20 anos depois, o esmalte ressurgiu e deu início a uma nova era de esmaltação moderna (UMBERTAZZI; WOJCIECHOSWKI, 2002). Dessa época até hoje, os metais esmaltados têm sido explorados de maneira assídua, principalmente para aplicações tecnológicas de alto rendimento, tendo um foco um pouco diferente das aplicações da primeira metade do século XX (ROSSI; RUSSO, [s.d.]).

4.2 O esmalte vítreo

O esmalte é um composto vítreo solidificado, inteiramente inorgânico, formado principalmente de óxidos (GAI, 2009). Ele é constituído de diferentes matérias primas encontradas na Terra, como quartzo, carbonato de sódio, bórax e óxidos de metal (PAGLIUCA; FAUST, 2011). Essas matérias primas são misturadas em proporções adequadas formando um pó fino que é derretido em temperaturas entre 1100°C e 1450°C (PETZOLD; POSCHMANN, 1992). Posteriormente, essa mistura é transferida para uma zona primária de resfriamento. Segundo Aver (2017), o processo de resfriamento do material é completado pelo processo de trituração, onde se é obtida uma forma granulométrica fina, sendo considerado um material semiacabado comumente denominado de frita. A granulometria adequada nessa etapa fica em torno de 100-250 µm (PAGLIUCA; FAUST, 2011).

A composição da frita é o aspecto fundamental a ser considerado no processo de obtenção do esmalte vítreo, uma vez que determina a maior parte das propriedades de engenharia do revestimento (CALOVI; ROSSI; RUSSO, 2021). O principal constituinte da frita é o óxido de silício (SiO_2), componente que forma o vidro, entretanto, muitos outros óxidos também são adicionados (PAGLIUCA; FAUST, 2011). No Quadro 1 é apresentada a relação de alguns óxidos com as propriedades do esmalte.

Quadro 1 - Relação de alguns óxidos que compõe a frita

Função	Compostos	Descrição
Refratários	SiO_2 Al_2O_3	Óxido formador de vidro, aumenta a resistência química e a viscosidade Aumenta a viscosidade e reduz o coeficiente de expansão
Fluxantes	B_2O_3 Na_2O, K_2O, Li_2O ZnO	Produz a matriz vítrea e aumenta a dureza da superfície Componentes alcalinos, reduzem a temperatura de amolecimento do vidro Fluxo excelente, reduz o coeficiente de expansão
Opacificantes	ZrO_2 Sb_2O_3 TiO_2 P_2O_5	Atua como opacificante e melhora a resistência aos ácidos Produz um alto grau de opacidade e oferece resistência aos ácidos Aumenta a brancura e confere resistência aos ácidos Melhora a estabilidade da cor, mas reduz a resistência química
Óxidos de aderência	CoO, NiO, CuO	Agentes de adesão

Fonte: Compagnoni; Rossi; Russo (2021).

Os agentes de adesão, apresentados na última linha do Quadro 1, vêm sendo substituídos por compostos não tóxicos. Nos últimos anos, uma atenção especial foi dedicada à produção de fritas ecológicas, tentando substituir elementos como chumbo e vanádio, por outros mais sustentáveis, como dióxido de titânio, trióxido de ferro e óxido de bismuto (COMPAGNONI, 2008).

Para chegar na forma de pó em seu estado final para uso, a frita precisa passar por alguns processos como moagem e peneiramento, remoção magnética de eventuais impurezas metálicas e, por último, adição de silicone para auxiliar a deposição e fixação. A partir disso, a frita se transforma no esmalte de recobrimento, o qual pode ser aplicado sobre superfícies metálicas na forma de pó (AVER, 2017).

Na etapa de moagem é importante salientar que são adicionados aditivos de moagem, que são materiais que auxiliam na moagem do esmalte, sendo eles classificados da seguinte forma: argilas,

agentes de *setting*, adições refratárias, opacificantes, óxidos corantes (para pigmentação) e água (para obtenção de esmalte líquido) (GAI, 2009). Segundo Bruce e Sharon (1949), o número de aditivos de moagem depende da coloração individual e do processo de esmaltação, além disso, os aditivos utilizados também dependem da tipologia do esmalte que se deseja obter.

4.2.1 Propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas

O esmalte vítreo foi comumente conhecido e estudado devido às suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas que se mostraram muito boas. Os esmaltes não são significativamente afetados pela exposição aos raios ultravioletas, sendo resistentes à radiação e intemperismos, têm boa resistência ao calor, chama direta e choque térmico, são resistentes a ataques químicos de ácidos e álcalis, mantendo sempre suas propriedades superficiais de cor e brilho, possuem propriedades antiaderentes e boa resistência a arranhões e, além disso, possuem alta resistência à corrosão, flexão e excelentes propriedades antibacterianas. Soma-se também sua dureza superficial, alta resistência a agentes ambientais e atmosféricos e a não liberação de substâncias tóxicas (BERGAMO et al., 2019; DE OLIVEIRA, 2017; GOODWIN; WHITELOCK, 1985).

4.2.2 Vantagens e desvantagens do esmalte vítreo

As vantagens do esmalte vítreo giram em torno de suas ótimas propriedades de engenharia e propriedades tecnológicas, como já dito no item 4.2.1. Ademais, ainda podem ser citadas como vantagens sua ótima estética visual e sua facilidade de limpeza. Os materiais usados para sua produção são considerados de baixo custo e apresentam baixo tempo de processamento (o menor entre outros tipos de revestimentos).

Como desvantagens pode-se citar a não excelência à abrasão e ao impacto. Apesar de sua dureza superficial, o esmalte vítreo tem comportamento frágil em relação à abrasão, que é um mecanismo muito comum de degradação superficial, uma vez que a fratura pode ocorrer e se propagar, levando à perda de propriedades estéticas, exposição de porosidade intrínseca do esmalte e perda de massa pela formação de flocos, além disso, as rachaduras devido à abrasão podem atingir o substrato de metal e permitir um contato direto com o ambiente (BAYER, 1994; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos para melhorar a resistência do esmalte vítreo em relação à abrasão, estudos que levam em conta modificações na composição da frita, adição de aditivos de moagem e/ou partículas duras (CALOVI; ROSSI; RUSSO, 2021).

Outro ponto de desvantagem de alguns tipos de esmalte vítreo é a dependência com o formato da peça, algumas características de formato fazem com que esse processo de revestimento seja prejudicado (INTERNATIONAL PEMCO, 2008).

4.2.3 Aplicações da esmaltação vítrea

A esmaltação vítrea é muito utilizada para revestir utensílios de cozinha, como fogões, fornos, panelas e frigideiras, uma vez que esses geralmente precisam de boas propriedades térmicas e antibacterianas, também é bastante utilizada para revestir pias, banheiras e tanques, já que o esmalte tem um bom comportamento em relação à resistência de ácidos e detergentes. Também pode-se citar aquecedores e outras aplicações mais estéticas, como painéis arquitetônicos e de publicidade, além de placas e aparelhos de segurança, que necessitam de boa resistência à intemperes. No âmbito mais industrial as aplicações giram em torno de trocadores de calor, tanques industriais e vasos químicos (COMPAGNONI; ROSSI; RUSSO, 2021). Na Figura 2 são apresentados alguns exemplos da utilização da esmaltação vítrea em objetos domésticos.

Figura 2 - Aplicações da esmaltação vítrea em objetos domésticos, (a) forno, (b) panelas e (c) pias



Fonte: adaptado de Compagnoni; Rossi; Russo (2021).

Na Tabela 1 são mostrados os percentuais de aplicação da esmaltação no mercado americano de 1990.

Tabela 1 - Percentual de participação da esmaltação em cada tipo de aplicação no mercado americano de 1990

Mercado da esmaltação nos EUA em 1990	Participação
Cooktops e fornos	32%
Lavadoras e secadoras	18%
Aquecedores de água	18%
Metais para banheiros	18%
Produtos/componentes especiais	12%
Lavadoras de louça	10%
Aplicações em arquitetura e sinalizações	7%

Fonte: Ceramics and glasses (1991).

4.3 Tipos de esmaltes vítreos

O principal constituinte do esmalte, como já dito anteriormente, é a sílica, responsável pelo caráter vitrificado do revestimento, esse constituinte, juntamente com os materiais refratários, fluxantes, agentes de adesão e colorantes, quando corretamente misturados, formam o esmalte. Depois de preparada a frita, esta pode vir a ser aplicada diretamente no substrato como pó. Outra maneira existente de aplicação é com esmalte líquido (AVER, 2017). Nesse caso, segundo Aver (2017), a frita em seu estado final pronto para uso recebe a adição de água e agentes aditivos específicos que mantêm todas as propriedades do revestimento.

Além da diferenciação entre esmalte em pó e esmalte líquido, também se considera esmalte fundente, direto, coberta e autolimpante, essa diferenciação ocorre por conta da adição de diferentes aditivos de moagem. Esses esmaltes são classificados conforme a definição apresentada abaixo (PEI-402, 1995).

- **Esmalte fundente:** esmalte preto com alto grau de aderência que pode ser utilizado diretamente sobre o metal base e, geralmente, é negro ou azulado e com superfície opaca;
- **Esmalte direto ou *easy-clean*:** esmalte com superfície brilhante que também pode ser aplicado diretamente sobre o metal base por conter óxidos reagentes; apresenta

coloração diversa, mas, na maioria das vezes, tende ao negro e ao azul, e tem grande resistência aos ácidos;

- **Esmalte cobertura:** esmalte essencialmente vítreo que necessita da aplicação de um esmalte fundente, pois não reage com o metal de maneira a obter aderência, apresenta diversas colorações, principalmente branca;
- **Esmalte autolimpante:** esmalte poroso que permite a deposição de resíduos, de coloração diversa e, também como o esmalte cobertura, necessita de uma interface com o metal através de um fundente.

Outro ponto relevante é a diferenciação dependendo de qual substrato o esmalte vítreo é aplicado, uma vez que se torna mandatório que tanto o esmalte, quanto o substrato, apresentem propriedades compatíveis um com o outro, para que assim o processo de esmaltação possa produzir uma camada de revestimento com a qualidade de adesão esperada (AVER, 2017).

4.4 Substratos para a esmaltação

Existem diferentes tipos de substratos os quais o revestimento de esmalte vítreo pode ser aplicado: alumínio, aço, ferro fundido, cobre, prata, ouro, cerâmicas e ligas de alta temperatura. O que diferencia o esmalte para cada tipo de substrato são as composições químicas e as temperaturas de cura (CHEN et al., 2013).

Em relação à indústria, os substratos mais relevantes para o processo de esmaltação são o ferro, o aço carbono, o aço inoxidável e as ligas de alumínio. Cobre, prata, ouro e cerâmicas são esmaltados com intuito mais artístico (CHEN et al., 2016). O escopo deste trabalho engloba somente a superfície do aço carbono.

4.4.1 Aço para esmaltação

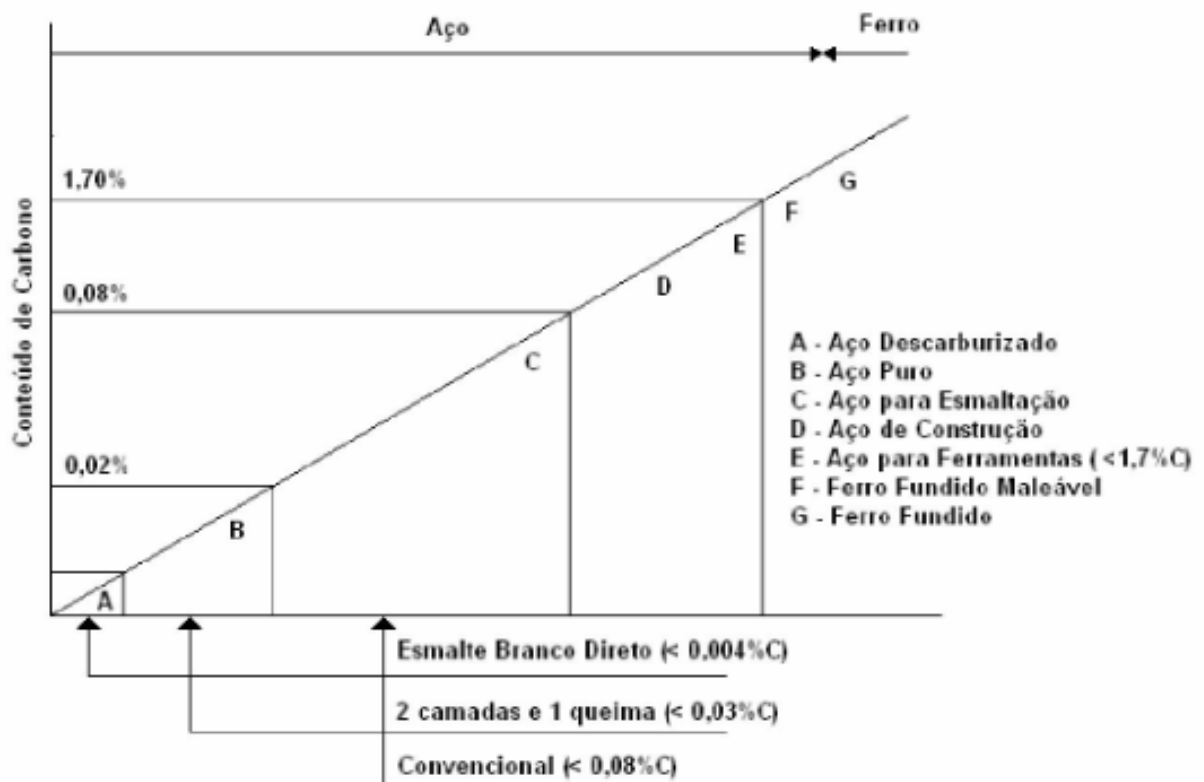
O termo "aço" refere-se a uma vasta gama de materiais com características mecânicas e características químicas. Em geral, os aços utilizados na esmaltação são aços laminados. A esmaltação convencional em aço laminado a frio foi desenvolvida na década de 1960 e a esmaltação em substratos laminados a quente foi desenvolvida em paralelo e usada principalmente em aquecedores de água. O uso de aço laminado a quente tende a causar defeitos, como a formação de bolhas na superfície

esmaltada, geradas por supersaturação de hidrogênio na interface metal-esmalte. Por esta razão, aços laminados a quente são usados apenas para aplicações especiais, onde dados requisitos de resistência precisam ser tratados de forma eficaz (GAVRILOVSKI; GAVRILOVSKI, 2003; HUANG et al., 2021).

No que diz respeito aos aços laminados a frio, a norma americana ASTM A424/A424M apresenta os principais requisitos para o uso na esmaltação. As chapas podem ser definidas seguindo a classificação em três tipos distintos de aço: Tipo I, Tipo II e Tipo III; cada um com suas características particulares (AVER, 2017). A norma EN 10209: 2013 também constitui um importante guia para a escolha da qualidade certa do aço para esmaltação (EN-10209, 2013).

É importante ressaltar que a esmaltação inorgânica requer lâminas de aço com baixo teor de carbono, uma vez que a sua liberação durante a queima causa defeitos superficiais; o aço deve conter quantidades de carbono inferiores a 0,08%, já o ferro fundido pode conter quantidades maiores, vide Figura 3 (INTERNATIONAL PEMCO, 2008).

Figura 3 - Gráfico do percentual de carbono ideal para cada tipo de substrato (aço e ferro)



Fonte: International Pemco (2008).

4.5 O processo de esmaltação vítrea

Para que o processo de esmaltação vítrea ocorra de forma satisfatória e sem defeitos, devem ser seguidas, de maneira geral, as seguintes etapas: preparação e limpeza da superfície a ser esmaltada, aplicação do esmalte e tratamento térmico. Após essas etapas é consolidada a ligação metal-esmalte, a qual é durável e não pode ser removida (HARRISON et al., 1954).

4.5.1 Preparação e limpeza da superfície

O primeiro passo a ser considerado na etapa de limpeza superficial do aço é a limpeza química, também denominada como “desengorduramento”; realizada com soluções aquosas de detergentes alcalinos com o intuito de remover óleos e graxas. Esta etapa de limpeza pode ser feita por imersão ou por pulverização, em ambos os casos, por 5–10 minutos e em temperatura entre 40°C-70°C (PAGLIUCA; FAUST, 2011). Atualmente, a limpeza química também pode ser substituída pela limpeza eletrolítica, que é mais rápida e realizada com equipamento automático. O procedimento de limpeza é sempre seguido por uma etapa de enxágue, feito em água corrente (DANIELSON, 1919).

Posteriormente, deve ser realizada a “decapagem”, que consiste na eliminação dos óxidos metálicos da superfície do substrato usando uma solução ácida, como por exemplo, ácido sulfúrico. A decapagem pode ser feita por pulverização ou por imersão; no caso de imersão pelo tempo em média de 8 minutos em temperatura entre 65°C-75°C (PAGLIUCA; FAUST, 2011). A etapa de decapagem deve ser seguida por um enxágue profundo em água e por imersão em banho neutralizante, para remoção completa de todos os vestígios de ácido (COMPAGNONI; ROSSI; RUSSO, 2021).

A última etapa do processo de pré-tratamento é a etapa de secagem do substrato.

No caso das chapas de aço, dependendo se passaram por um processo de laminação a quente ou a frio, processos produtivos distintos, requerem uma preparação e limpeza superficial igualmente distintas. O que acontece é que no caso do aço laminado a quente existem etapas adicionais para limpeza, como jateamento mecânico, que garante a formação de uma superfície homogênea em termos de rugosidade (AVER, 2017).

No caso de outros tipos de substratos metálicos também ocorrem diferenças no processo de limpeza superficial, mas que não cabem no escopo deste trabalho.

4.5.2 Aplicação do esmalte

As técnicas de aplicação de esmalte podem ser divididas em aplicação seca (via deposição eletrostática) e aplicação úmida (esmaltação convencional). O Quadro 2 mostra as diferenças entre essas duas técnicas (COMPAGNONI; ROSSI; RUSSO, 2021; INTERNATIONAL PEMCO, 2008).

Quadro 2 - Métodos de aplicação de esmalte seco e úmido

Tipo de aplicação	Método de aplicação	Descrição
Úmida	Spray	Pistolas manuais ou automáticas para aplicação
	Pó eletrostático úmido (ESTA)	Pistolas manuais, automáticas ou robô para aplicação
	Disco de alta rotação	Aplicação através de discos eletrostáticos em alta rotação
	Imersão	Substrato é imergido no esmalte
	<i>Flow coating</i>	Precipitação do esmalte sobre a peça
	Eletroforética (EPE)	Migração do esmalte ao substrato
Seca	Pó eletrostático a seco (POESTA)	Completamente automatizado, aplicação por pistolas automáticas ou robôs

Fonte: adaptado de Compagnoni; Rossi; Russo (2021).

Como são vários os métodos de aplicação de esmalte, optou-se pela explicação somente do método de pó eletrostático a seco, por ser o método utilizado neste trabalho.

4.5.2.1 Método de aplicação de pó eletrostático a seco – POESTA

O método de aplicação de pó eletrostático a seco é um dos métodos mais difundidos mundialmente, pois possui inúmeras vantagens, como mínimo desperdício, alta produtividade, completa automação, eliminação de secador, não desperdício de água, possibilidade de integração com o sistema de pré-tratamento superficial e alta qualidade. Entretanto, também apresenta alguns pontos de desvantagem, como alto investimento, necessidade de ar pressurizado e um número limitado de cores (GAI, 2009).

Neste método ocorre a aplicação de uma corrente contínua, negativa, de voltagem entre 60kV e 100kV, na ponta de um eletrodo, com isso, os elétrons são emitidos e acelerados até a peça aterrada; os íons de nitrogênio são atraídos pelo eletrodo perdendo sua carga e os íons de oxigênio preenchem o espaço entre a pistola e a peça. O pó de esmalte, mantido em reservatório fluidizado, é transportado até o eletrodo, onde acumula carga negativa. Através de forças aerodinâmicas e elétricas, as partículas deixam a pistola e movem-se até o ânodo. A deposição das partículas de esmalte geralmente segue um fluxo não uniforme através do campo eletromagnético imposto pelo ar turbulento. As partículas eletricamente negativas aderem firmemente ao metal (WAMKE, 2001).

Uma série de características do pó eletrostático a seco é necessária para a sua aplicação, na Tabela 2 algumas delas são exemplificadas.

Tabela 2 - Características do pó eletrostático a seco (POESTA)

Características	Valores
Fluidez	70 a 150 g/30s
Adesão	> 60% depois de 15 minutos
Deposição	30% a 40%
Penetração	Depende da peça
Resistência superficial	> $1 \text{ E} + 14 \text{ } \Omega \text{ cm}$
Distribuição do tamanho da partícula	10 a 80 μm
Efeito de separação	Limitada ao mínimo

Fonte: adaptada de International Pemco (2008).

Com o aumento da deposição de pó, a atração da superfície do metal diminui e forças repulsivas começam a repelir as partículas, assim o “borrifamento” é cessado. Se ocorresse a deposição de pó contínua na mesma superfície, isso geraria o fenômeno conhecido como “ionização reversa” (WAMKE, 2001).

Segundo Wamke (2001), somente 30% a 40% do esmalte original é depositado sobre a peça, o restante acaba caindo, sob efeito da gravidade, e gera acúmulo na superfície do chão. Esse pó acumulado deve retornar ao reservatório da cabine de aplicação para ser reaproveitado. Qualquer contaminação deve ser removida por peneiras ou separadores magnéticos. Além disso, o pó reaproveitado deve ser misturado com pó virgem para evitar diferenças na tonalidade e na aderência do esmalte.

Na Tabela 3 são apresentados alguns pontos importantes para manter a qualidade da aplicação POESTA.

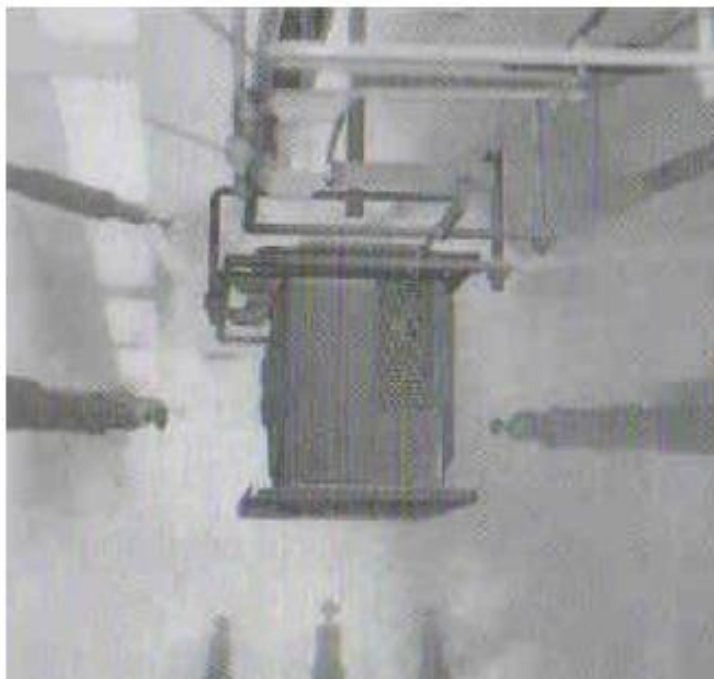
Tabela 3 - Parâmetros importantes durante a aplicação de pó eletrostático a seco

Parâmetros	Valor
Atmosfera interna	20°C a 25°C
Umidade relativa	< 50%
Vapor d'água	< 1 g/Nm ³
Conteúdo de óleo	< 0,1 ppm

Fonte: adaptado de Wamke (2001).

Na Figura 4 pode ser visto um exemplo de aplicação de pó eletrostático a seco em uma cabine de esmaltação automatizada.

Figura 4 - Aplicação automatizada de pó eletrostático a seco



Fonte: International Pemco (2008).

4.5.3 Tratamento térmico do esmalte

No caso do esmalte úmido, antes da peça revestida com esmalte seguir para a etapa de queima é necessária uma etapa intermediária de secagem, para remoção de água e prevenção de falhas de manuseio, no entanto, como o escopo deste trabalho engloba somente a aplicação a seco, tal etapa intermediária não será abordada.

Após a aplicação eletrostática a seco, as peças esmaltadas são encaminhadas para a última etapa do processo de esmaltação: a cura do esmalte. Este é um tratamento térmico contínuo que tem como principal intuito proporcionar a adesão do esmalte ao substrato metálico. As peças esmaltadas geralmente são colocadas em um transportador mecânico, como por exemplo trilhos, que permitem a introdução e passagem das peças através do forno de maneira contínua, com velocidade constante e com posterior alívio de tensões residuais do esmalte (AVER, 2017).

Os fornos utilizados nessa etapa podem ter formatos, tamanhos, isolamento, zonas de aquecimento e fonte de energia térmica todas distintas, no entanto, todos necessitam proporcionar um aquecimento gradativo através das zonas de aquecimento. Em geral, as primeiras zonas de aquecimento têm como função a elevação gradual da temperatura ambiente até cerca de 550°C, as zonas subsequentes elevam a temperatura até cerca de 860°C, onde ocorre o fenômeno de cura do esmalte, por fim, as últimas zonas têm como função estabelecer a rampa de resfriamento controlado, até que o material esmaltado saia do forno em uma temperatura abaixo de 450°C (AVER, 2017).

O principal método de transferência de calor entre o esmalte e o forno é através de radiação emitida pela superfície do gás queimado ou da resistência elétrica, mas esta também pode ocorrer por convecção de calor entre as regiões mais quentes e as mais frias (PEI-601, 1995). Vale ressaltar que as temperaturas e tempos de cura variam um pouco de substrato para substrato e, segundo Dietzel (1981), como essa etapa está associada a muitos processos químicos e físicos, os quais serão explicados a seguir, desvios das condições ótimas de queima podem ter como consequência a deterioração das características do esmalte.

4.5.3.1 Os processos físicos e químicos na cura do esmalte

Para explicação dos processos químicos e físicos que ocorrem em cada uma das zonas de aquecimento é apresentado o Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 - Processos físicos e químicos em cada zona de aquecimento do forno

Efeitos da variação da temperatura entre 24°C e 550°C	
No aço	Absorção de H_2
Na interface aço – esmalte	Oxidação do ferro: $Fe \rightarrow Fe_2$ e Fe_3 $Fe + H_2O \rightarrow FeO + H_2$ $2Fe + O_2 \rightarrow FeO$
No esmalte	Desidratação do esmalte (H_2O) Decomposição do silicone Aumento da viscosidade do esmalte
Efeitos da variação da temperatura entre 550°C e 720°C	
No aço	Desgaseificação (H_2) Difusão de carbono Aprisionamento de H_2
Na interface aço – esmalte	Decomposição de resíduos orgânicos, gerando H_2 , CO e CO_2 Molhamento do aço pelo esmalte Desgaseificação inicial (H_2 , CO e CO_2) Célula voltaica: oxidação do Fe e redução de óxidos de Mn , Ni e CO
No esmalte	Amolecimento do esmalte Difusão inicial dos íons alcalis (Na , F , Co e Ni) Geração de gases (H_2 , CO e CO_2)
Efeitos da variação da temperatura entre 720°C e 860°C	
No aço	Difusão do carbono Aprisionamento de H_2 Mudança de fase do Fe : $\alpha \rightarrow \gamma$
Na interface aço – esmalte	CoO (NiO) + $Fe \rightarrow Co$ (Ni) + FeO CoO (NiO) + $CO \rightarrow Co$ (Ni) + CO_2 Saturação do FeO e Fe_3O_4 Formação e liberação de CO e CO_2 Formação de dendritos (Fe_xCo_y)
No esmalte	Difusão final dos íons alcalis (Na , F , Co e Ni) Geração de gases (H_2 , CO e CO_2) Formação de bolhas no esmalte

Continua

Conclusão

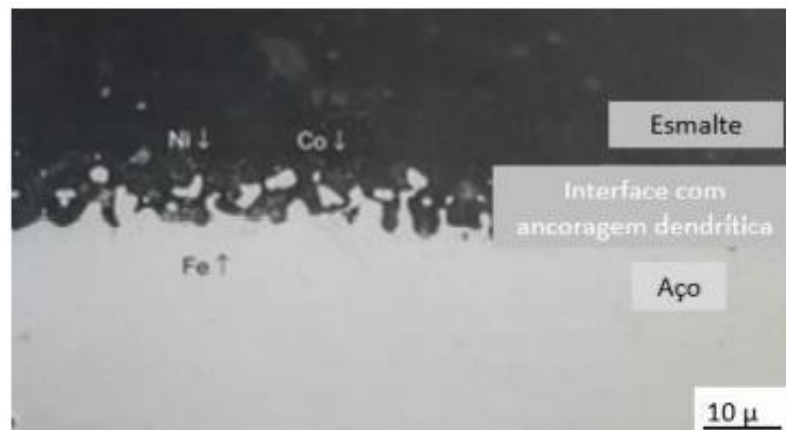
Efeitos da variação da temperatura entre 860°C e 24°C	
No aço	Diminuição da solubilidade do H_2
Na interface aço – esmalte	Excesso de H_2 causando “fish scale”
No esmalte	Solidificação do esmalte cessando a evolução de gases

Fonte: Aver (2017).

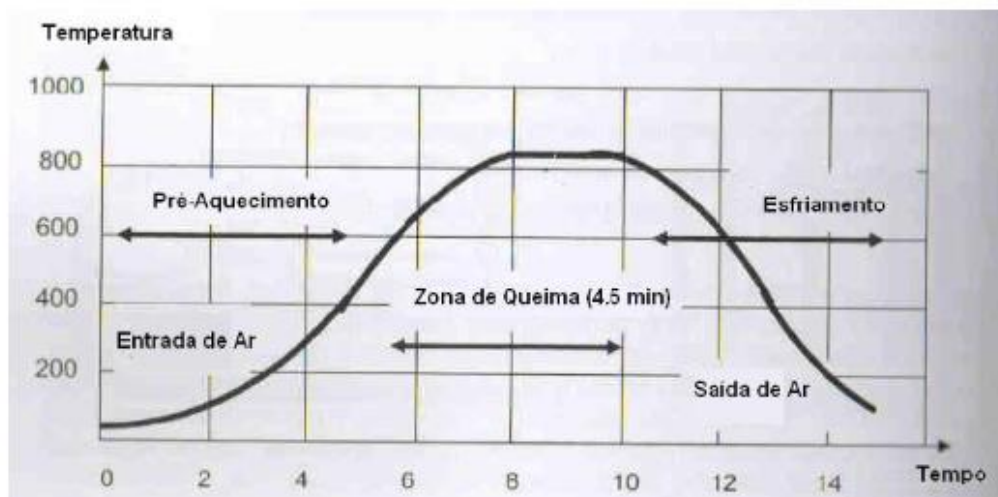
De forma mais explicativa, para a obtenção de uma boa aderência entre o esmalte e o aço, durante o primeiro aumento gradativo da temperatura ocorre a oxidação do aço pelo vapor de água da desidratação do esmalte e/ou pelo oxigênio presente no ambiente, que penetram na frita (material semiacabado que compõe o esmalte) por esta estar inicialmente porosa. Ao mesmo tempo o aço absorve hidrogênio. Em temperaturas acima de 550°C o esmalte começa a amolecer, se espalhando e acarretando no molhamento do aço, dissolvendo-se assim o óxido de ferro produzido anteriormente e gerando uma camada mais compacta de esmalte. Além disso, o hidrogênio absorvido pelo aço é aprisionado, ocorre difusão do carbono no aço e, tanto no aço como na interface aço-esmalte, a desgaseificação, onde gases são liberados. Elevando-se a temperatura até a faixa próxima à 860°C são formadas as reações químicas de oxido redução e os íons álcalis (*Na*, *F*, *Co* e *Ni*) presentes no esmalte são totalmente difundidos, reagindo com o ferro dissolvido no esmalte e migrando até a interface aço-esmalte, promovendo a formação de uma camada dendrítica extremamente aderente ao substrato metálico. Nessa etapa do tratamento térmico o nível de hidrogênio dissolvido no aço é o mais elevado, quando então inicia-se o processo de resfriamento (AVER, 2017; INTERNATIONAL PEMCO, 2008).

Com a redução da temperatura, agora de 860°C até a temperatura ambiente, ocorre a diminuição da solubilidade do hidrogênio no aço e a diminuição da evolução dos gases até que o esmalte atinja seu ponto final de solidificação. Bem próxima da temperatura ambiente a peça esmaltada passa por um ciclo curto de revenimento que promove o relaxamento das tensões internas do conjunto (AVER, 2017).

Na Figura 5 é apresentada a região dendrítica formada entre o aço e o esmalte através de visão microscópica, já na Figura 6 é apresentada a curva de queima que ocorre nos fornos contínuos, onde dependendo do tipo de peça e volume carregado pode demorar entre 5 e 20 minutos, no caso da curva apresentada, teve-se um tempo de queima um pouco maior que 14 minutos.

Figura 5 - Visão microscópica da interface aço-esmalte

Fonte: International Pemco (2008).

Figura 6 - Curva de queima de fornos contínuos

Fonte: International Pemco (2008).

Um ponto de atenção na etapa de tratamento térmico do esmalte é que, segundo a International Pemco (2008), a atmosfera do forno tem papel muito importante na qualidade do processo de esmaltação. Por exemplo, o vapor de água pode penetrar na câmara de queima como resultado da secagem incompleta das peças. Além disso, a troca de ar ou resfriamento do ar no forno deve ser suficiente para manter um nível aceitável de umidade em seu interior e os gases como dióxido de enxofre, dióxido de carbono, NOx e flúor devem ser retirados de sua atmosfera pois podem ter influência negativa no processo, danificando o esmalte.

4.5.4 Sequências de aplicação e queima

No processo de esmaltação vítrea a sequência mais comum de aplicação é a sequência de duas camadas de esmalte e duas queimas, também conhecida como “2C/2Q”, no entanto, outras sequências também podem ser empregadas dependendo das características que se deseja obter. Por exemplo, pode ser feita a aplicação de uma única camada e uma única queima, “1C/1Q”, ou mesmo duas camadas e uma só queima, “2C/1Q” (GOMES, 2015). Cada uma dessas sequências de aplicação requer composições de esmaltes e parâmetros específicos que não vem ao caso o aprofundamento.

4.6 O processo de aderência do esmalte ao aço e a relação com a rugosidade

O processo de aderência do esmalte ao substrato é um tanto quando complicado, pois depende de fatores como a composição do aço, a quantidade de óxido de cobalto e níquel na fritada, o tratamento superficial do aço antes da aplicação de esmalte e o tempo de tratamento térmico na etapa de cura (RICHMOND et al., 1953).

No processo de esmaltação vítrea, a aderência é definida como a força de ligação entre o substrato de aço e a camada de esmalte (ZHANG, 2013) e uma das primeiras explicações avançadas sobre o assunto é baseada no fato de que quando a aderência é boa existe uma interface áspera entre o revestimento e o substrato metálico e quando a aderência é ruim a interface é lisa, isso porque o revestimento consegue penetrar nas cavidades superficiais do aço e, quando o revestimento passa pelo processo de cura, os dois materiais são interligados formando uma forte ligação mecânica (RICHMOND et al., 1953). Segundo Tostmann (1909), a aderência se deve a uma ação química do esmalte sobre o substrato, onde parte do óxido de cobalto é reduzido e forma um tipo de liga porosa na interface com ferro, promovendo aderência. Logo, existem duas teorias que explicam o mecanismo básico de aderência: a teoria mecânica e a teoria química.

Em seus estudos e experimentos, Richmond et al. (1953) concluiu que realmente existe uma correlação positiva entre a aderência da camada de esmalte e a rugosidade da interface e que o método de preparação superficial do substrato tem efeito na aderência do revestimento, no entanto, não é a única condição, existem outros fatores que a influenciam, como por exemplo a quantidade de cobalto e níquel na fritada.

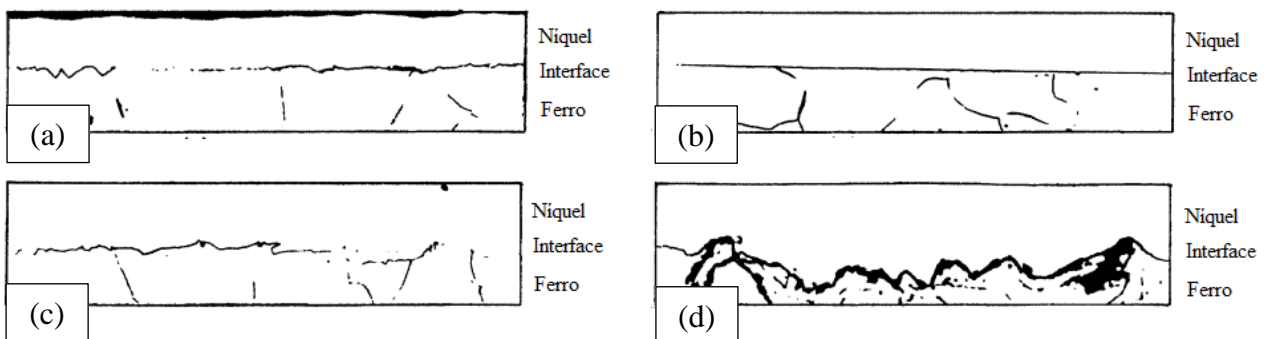
Além disso, segundo Zhang (2013), diferentes métodos de aplicação de esmalte também podem afetar a aderência do revestimento ao substrato. Através de estudos realizados por Kim e Kim (2008) foram descobertas diferenças de aderência quando o esmalte é aplicado via spray eletrostático a seco

e quando é imergido em esmalte úmido, comprovando que a aderência da camada de esmalte pelo processo a seco é muito mais forte do que pelo processo a úmido. O experimento mostrou que os dendritos da interface aço-esmalte crescem uniformemente na aplicação a seco, enquanto na aplicação a úmido crescem de forma desigual.

4.6.1 Os diferentes tratamentos superficiais no estudo de rugosidade e aderência

Quando Richmond et al. (1953) cita que o método de preparação superficial do substrato tem efeito marcante na aderência do revestimento ele refere-se à comparação de três métodos: polimento, decapagem química e jateamento de areia; apresentando o seguinte resultado superficial, mostrado na Figura 7, para cada um dos métodos de tratamento antes da passagem pelo processo de esmaltação vítrea.

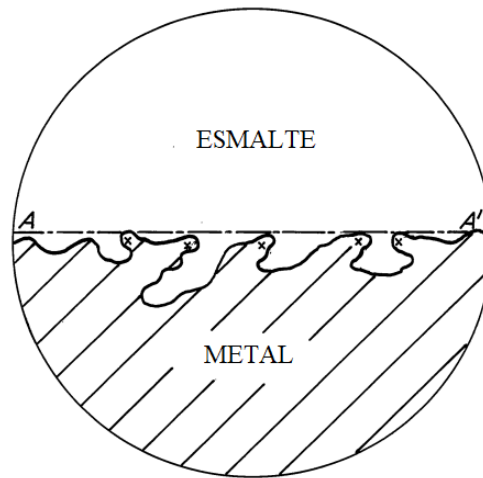
Figura 7 - Seções metalográficas das superfícies de substratos metálicos após tratamentos superficiais distintos, (a) superfície virgem, (b) superfície polida, (c) superfície decapada e (d) superfícies jateada



Fonte: modificada de Richmond et al. (1953).

Em seu estudo, foi considerado para quantificar a rugosidade o que Richmond et al. (1953) chamou de “pontos de ancoragem”. Na Figura 8 são mostrados esses pontos, indicados por “x”, contados e expressados como um número por centímetro da amostra.

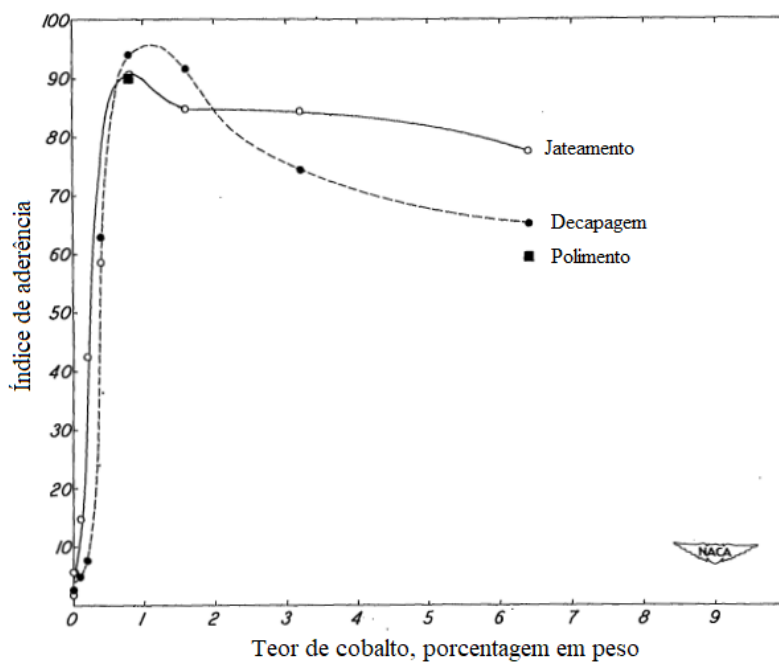
Figura 8 - Pontos de ancoragem indicados por "x" na interface substrato-esmalte



Fonte: Richmond et al. (1953).

O resultado de Richmond et al. (1953) para o processo de esmaltação vítrea nas superfícies de diferentes rugosidades é apresentado na Figura 9, onde percebe-se a variação na curva de aderência de cada um dos três tipos de tratamentos superficiais. O autor também levou em consideração a quantidade de cobalto presente no esmalte, por ser este outro fator que interfere na aderência do esmalte ao aço.

Figura 9 - Curva da variação de aderência para os três diferentes tipos de tratamentos superficiais em função da quantidade de cobalto presente no esmalte



Fonte: Richmond et al. (1953).

4.7 Defeitos no processo de esmaltação vítrea

No processo de esmaltação vítrea não são apenas suas propriedades de engenharia que podem ser observadas, caracterizadas e medidas; assim como em todos os processos produtivos existentes a esmaltação também apresenta inúmeros modos de falhas que implicam em defeitos no revestimento superficial. Esses defeitos podem prejudicar as propriedades do esmalte e danificar o revestimento, proporcionando um resultado estético final que não é aceito dentro dos padrões visuais do processo (AVER, 2017).

Tais defeitos podem estar relacionados ao substrato metálico, ao esmalte aplicado, ou até mesmo podem estar relacionados à junção desses dois materiais. O método de aplicação (a seco ou úmido), o manuseio das peças com esmalte e o tratamento térmico também podem influenciar (AVER, 2017; GAI, 2009). O Quadro 4 apresenta alguns dos principais defeitos relacionados ao processo de esmaltação.

Quadro 4 - Defeitos relacionados ao processo de esmaltação vítrea

Defeitos relacionados ao/a:	Defeitos
Aço	Escamas de peixe, lascas e bolhas
Esmalte	Pontos brancos, bolhas, linhas de cabelo, ondulações, escorridos, trincas, furos, deslocamento, pelamento, grumos, tons, brilho, textura e trincas tardias
Aplicação a úmido	Escorridos e pele de laranja
Aplicação a seco	Ionização
Tratamento térmico	Trincas, inchamento, furos, pontos brancos, bolhas, deslocamento, tons, brilho, textura e trincas tardias
Manuseio	Deslocamento, trincas e pelamento

Fonte: adaptado de Gai (2009) e Martín (2004).

4.7.1 Defeitos por falta de aderência do esmalte ao aço

Os tópicos abaixo apresentam os tipos de defeitos que podem ser ocasionados por problemas relacionados à falta de aderência do esmalte ao aço (GAI, 2009; MARTÍN, 2004).

- **Escorridos (ou linhas de drenagem):** marcas deixadas pelo escorrimento de perfurações pertencentes ao desenho do artigo esmaltado. Ocorrem pela falta de aderência do esmalte ao aço ou pelo uso de esmaltes excessivamente moídos;
- **Pelamento:** aplicação de baixa camada de esmalte, falha de manuseio da peça com esmalte ou falha de aderência do esmalte ao aço;
- **Deslocamento:** ocasionada por falhas de aderência do esmalte ao aço e por temperatura incorreta durante o tratamento térmico.

Alguns defeitos, dependendo da natureza e intensidade que aparecem na peça esmaltada, são passíveis de retrabalho, fazendo com que a peça seja recuperada, já outros, não podem ser retrabalhados e a peça deve ser descartada (AVER, 2017).

4.8 Testes realizados ao final do processo

Muitas vezes os defeitos no processo de esmaltação vítrea são visíveis a olho nu, no entanto, a validação sobre as características de engenharia da peça esmaltada ocorre através de testes. Dos anos anteriores para cá, vários métodos foram desenvolvidos para avaliar e controlar a qualidade da aplicação do revestimento. Segundo Gai (2009), muitos destes testes são padronizados pelo Porcelain Enamel Institute Technical Committee C-22, ISO, EN, ASTM e ABNT e validados em muitos países. O Quadro 5 apresenta quais testes podem ser feitos para cada tipo de propriedade do esmalte.

Quadro 5 - Testes do processo de esmaltação vítrea para cada tipo de propriedade do esmalte

Propriedades	Testes
Térmicas	Fluidez, expansão térmica e transição vítrea, resistência ao calor e resistência ao choque térmico
Mecânicas	Espessura de camada, aderência, elasticidade, abrasão, porosidade e empenamento
Ópticas	Refletividade, brilho e cor
Químicas	Resistência a ácidos frios, resistência à solução de soda cáustica quente, resistência à solução de detergente quente e resistência à água fervente e ao vapor

Continua

Conclusão

Propriedades	Testes
Outras	Toxidade, intemperismo, propriedade de esmalte autolimpante e propriedades pirolíticas

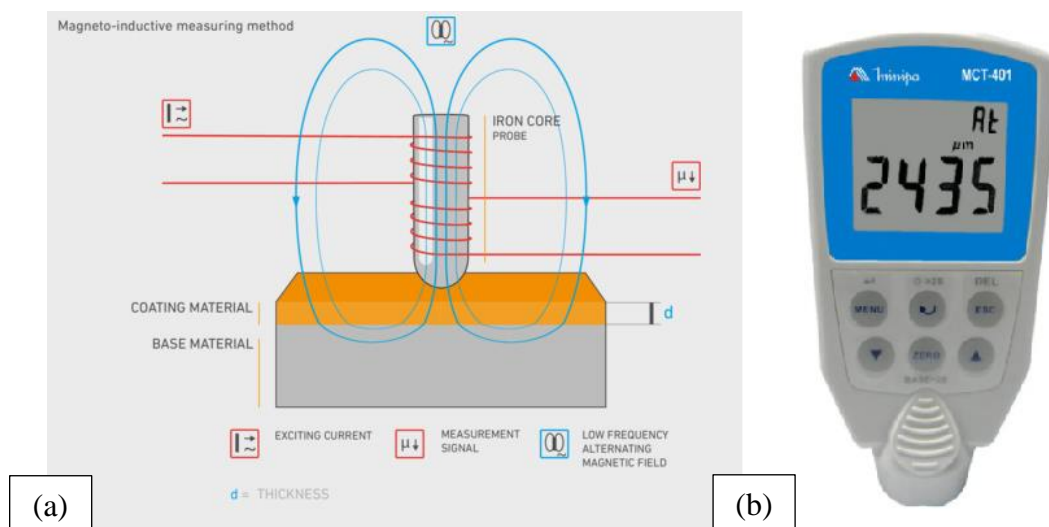
Fonte: (GAI, 2009).

4.8.1 Teste de espessura de camada

Medir a espessura da camada de esmalte é importante para atingir os requisitos de qualidade exigidos. Para isso são usados dispositivos eletrônicos chamados de medidores de camada, que operam através do princípio de atração magnética.

A medição é realizada por conta da presença de um núcleo de ferro no interior do dispositivo, enrolado com uma bobina de excitação. Uma corrente alternada de baixa frequência flui por essa bobina criando um campo magnético alternado em torno dos polos do núcleo de ferro. Quando o polo da sonda se aproxima de um objeto magnetizável, como uma peça feita de ferro, o ferro aumenta o campo magnético alternado e uma bobina de medição registra esse aumento como tensão. A diferença de tensão depende da distância entre o polo e o substrato de ferro, que corresponde à espessura da camada (FISCHER, [s.d.]). Na Figura 10 é apresentado um esquema que mostra o funcionamento dos medidores de camada, assim como uma foto de um medidor real.

Figura 10 - (a) Funcionamento dos medidores de camada, (b) Medidor de camada Minipa MCT-401



Fonte: Fischer ([s.d.]) e MRE ferramentas ([s.d.]).

Na norma EN ISO 2178 são descritas as calibrações deste tipo de aparelho, a qual devem ser feitas com fitas não magnéticas sobrepostas sobre o metal (EMAIL QUALITY, 2007).

4.8.2 Teste de aderência

A má aderência do esmalte ao substrato metálico provoca uma aparência de deterioração na peça esmaltada e pode levar à rápida destruição do aço-esmalte, acarretando no defeito de deslocamento do esmalte (IŞIKSAÇAN; YÜCEL; YEŞİLÇUBUK, 2018). Para que isso não ocorra a longo prazo, é necessária a realização de teste de aderência.

A aderência da camada de esmalte pode ser verificada através da destruição, por meio de deformação mecânica, de uma parte da peça plana. Essa deformação é realizada pelo impacto calibrado provocado por um peso em queda livre, posteriormente, por meio de inspeção visual, é analisada a quantidade de esmalte que resta no local do impacto, o que irá corresponder a uma medida qualitativa da aderência entre o aço e o esmalte. Essa classificação é padronizada na EN 10209 por uma numeração de 1 a 5, a qual é apresentada no Quadro 6 (GAI, 2009; IŞIKSAÇAN; YÜCEL; YEŞİLÇUBUK, 2018).

Quadro 6 - Classificação da aderência de esmalte vítreo

Grau	Classificação	Descrição
Grau 1	Muito boa/ótima	Não há deslocamento de esmalte sobre a chapa. Aderência de 85% a 100% sobre a região de impacto da peça ou corpo de prova
Grau 2	Boa	Há deslocamento de esmalte sobre a chapa. Aderência de 75% à 80% sobre a região de impacto da peça ou corpo de prova
Grau 3	Regular	Há deslocamento de esmalte sobre a chapa. Aderência de 50% à 65% sobre a região de impacto da peça ou corpo de prova
Grau 4	Ruim	Há deslocamento de esmalte sobre a chapa. Aderência de 25% à 30% sobre a região de impacto da peça ou corpo de prova

Continua

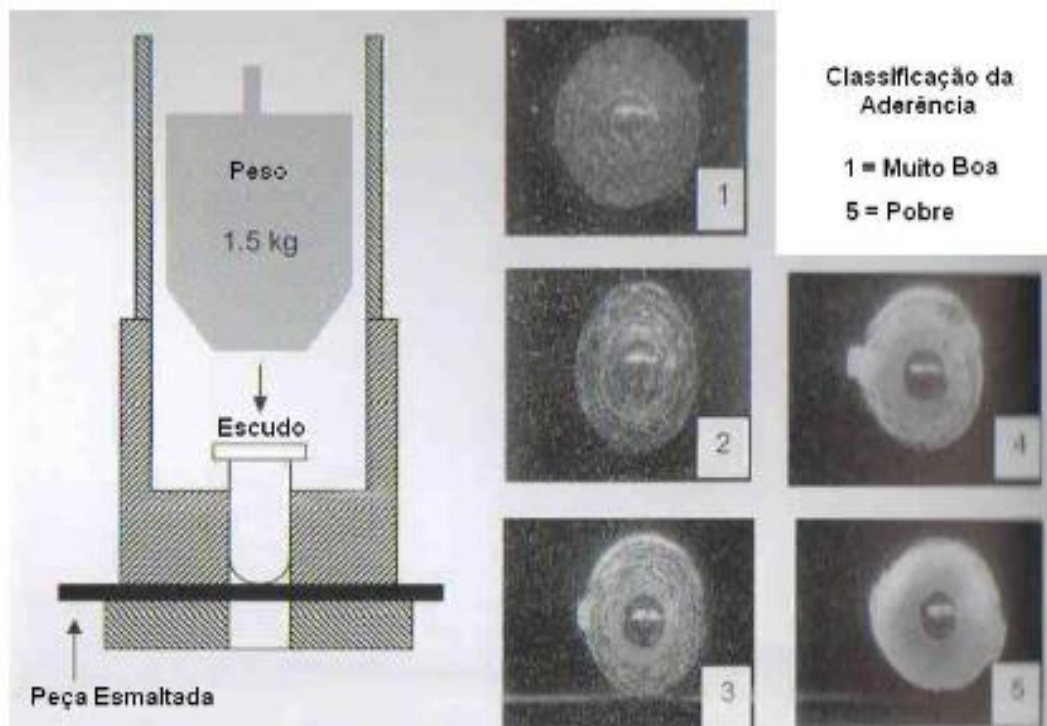
Conclusão

Grau	Classificação	Descrição
Grau 5	Muito ruim/pobre	Há deslocamento total de esmalte sobre a chapa. Aderência de 0% sobre a região de impacto da peça ou corpo de prova

Fonte: International Pemco (2008).

Na Figura 11 é mostrado um esquema do teste de aderência, assim como imagens da classificação de 1 a 5 definida pela International Pemco (2008).

Figura 11 - Teste de aderência esquematizado e imagens da classificação do teste

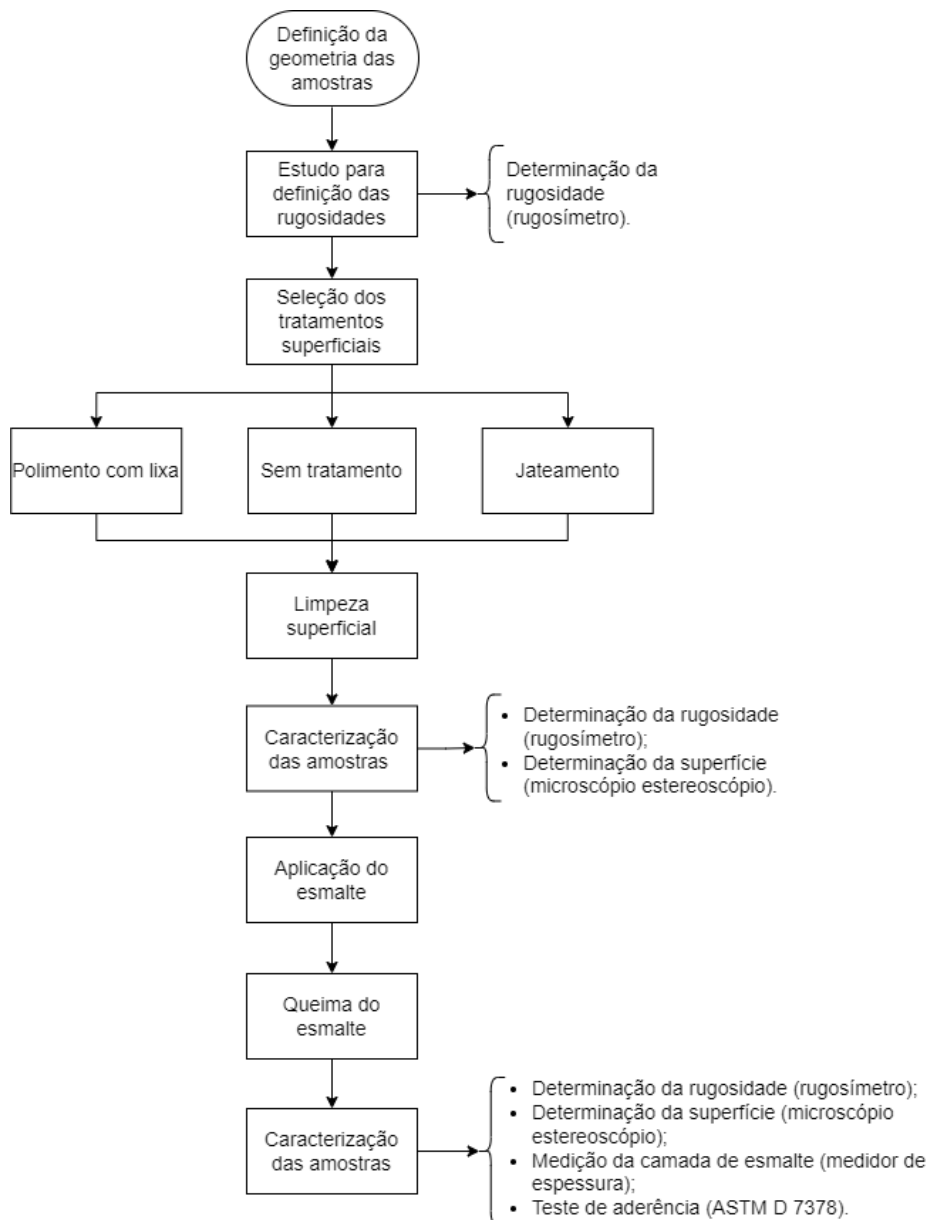


Fonte: adaptado de International Pemco (2008).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto foi todo desenvolvido em colaboração com uma empresa de produtos esmaltados, dessa forma, algumas informações não podem ser descritas por questões de sigilo. Cabe ressaltar que todos os equipamentos foram utilizados com as definições do processo de fabricação da empresa, de modo a não interferir na configuração da linha de produção. As etapas do projeto foram executadas com base no fluxograma apresentado na Figura 12. Cada uma das etapas será explicada com maiores detalhes nas próximas seções.

Figura 12 - Fluxograma do projeto

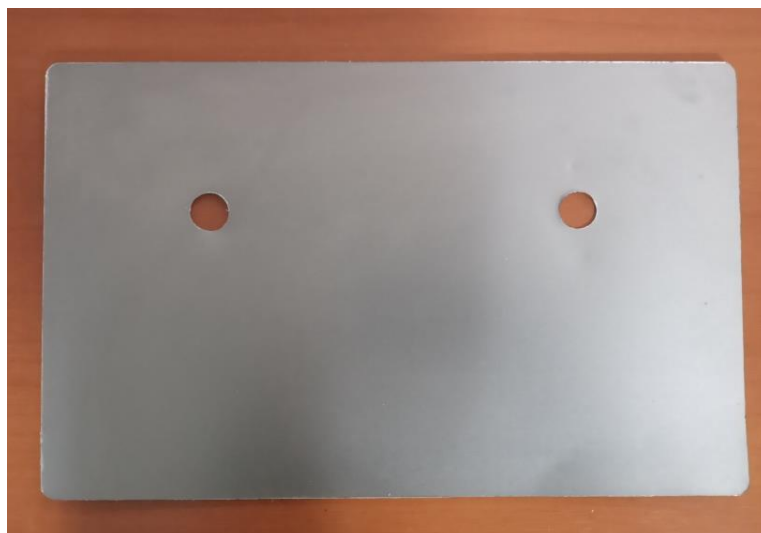


Fonte: autoria própria.

5.1 Geometria das amostras

As amostras utilizadas foram chapas retangulares de aço carbono, de 302 x 188 x 0,55mm cada, anteriormente submetidas ao processo de estampagem. Como forma de garantia de qualidade foram utilizadas somente chapas que não apresentavam defeitos superficiais, tais como riscos, pequenas depressões ou empenamentos. Na Figura 13 é apresentada a geometria de amostra escolhida. Já pensando nas necessidades do processo de esmaltação, as amostras apresentavam dois furos próximos a uma das extremidades, para que pudessem ser transportadas por ganhos, necessários para aplicação e queima do esmalte nas linhas de processo. Vale ressaltar que as amostras eram provenientes do mesmo lote, para que não houvessem diferenças significativas na matéria prima.

Figura 13 – Representação da amostra utilizada (302 x 188 x 0,55mm)



Fonte: autoria própria.

5.2 Estudo para definição das rugosidades

Foram preparadas 3 amostras para realização do teste de referência da rugosidade:

- Amostra rugosa: tratamento superficial de jateamento por 2 minutos;
- Amostra virgem: sem tratamento;
- Amostra lixada: tratamento superficial de lixamento com lixas de *meshes* gradativos (de #80 a #1200).

Depois de preparadas, as três amostras foram limpas com álcool etílico 70% e realizou-se um teste de referência usando a caracterização de rugosidade, com um rugosímetro (item 5.7.1), a fim de verificar em qual posição as amostras virgens se encontravam em relação às amostras tratadas superficialmente (lixadas e jateadas) em uma escala de rugosidade.

5.3 Seleção dos tratamentos superficiais

A amostragem utilizada no projeto foi de 15 amostras de chapas retangulares de aço carbono, iguais à apresentada na Figura 13, sendo divididas em três conjuntos:

- 1º conjunto: 5 amostras jateadas por um tempo de 2 minutos cada;
- 2º conjunto: 5 amostras virgens, ou seja, sem tratamento;
- 3º conjunto: 5 amostras lixadas na seguinte sequência de *meshes*: #80, #100, #150, #280, #320, #400, #600, #800 e #1200.

Novamente, como forma de garantia de qualidade, foram utilizadas somente chapas que não apresentavam defeitos superficiais, tais como riscos, pequenas depressões ou empenamentos; e todas as amostras provenientes do mesmo lote de matéria prima. Cada conjunto de amostra foi numerado de 1 a 5 (reprodutibilidade).

5.3.1 Jateamento das amostras

As amostras foram jateadas uma de cada vez, com o intuito de garantir sempre a mesma posição dentro da máquina de jatear. O processo foi realizado na máquina de jateamento do tipo gancheira da Tecjato | Febratec, utilizando-se granalhas de aço carbono esféricas S-660, com diâmetro médio de 2,0 mm e por um período de 2 minutos cada jateamento. A pressão de ar comprimido foi de aproximadamente 7 bar, o fluxo de abrasivo na turbina de 120 Km/min e a distância do jato à amostra de 910 mm. Na Figura 14 pode ser observada a máquina de jateamento utilizada no projeto e na Figura 15 podem ser observadas as granalhas de aço carbono esféricas utilizadas.

Figura 14 - Máquina de jatear Tecjato | Febratec utilizada no projeto



Fonte: TECJATO | FEBRATEC (2021).

Figura 15 - Granalhas de aço carbono esféricas utilizadas para o jateamento



Fonte: DEUMEX DO BRASIL (2021).

5.3.2 Lixamento das amostras

O lixamento das amostras foi realizado com o uso de 9 diferentes lixas, na seguinte ordem de *meshes*: #80, #100, #150, #280, #320, #400, #600, #800 e #1200 (baseado nos resultados obtidos no estudo do tratamento superficial, item 5.2) e utilizando-se a lixadeira orbital pneumática *Random Orbital Sander* de 10000 rpm. De modo a minimizar a orientação do lixamento, as amostras foram rotacionadas 90° a cada troca de lixa. Na Figura 16 é apresentada a lixadeira utilizada no projeto e na Figura 17 são apresentadas as lixas, todas em formato de disco.

Figura 16 - Lixadeira orbital pneumática utilizada no projeto



Fonte: SOUB! (2021).

Figura 17 - Lixas utilizadas na etapa de lixamento das amostras



Fonte: autoria própria.

5.4 Limpeza superficial

A fim de evitar possíveis resíduos de óleo e/ou resquícios de jateamento e lixamento que pudessem interferir nas medições de rugosidade e nas imagens microscópicas, as amostras passaram por limpeza superficial. Portanto, todas as amostras foram limpas com uma flanela umedecida em álcool etílico 70%.

5.5 Aplicação do esmalte

De forma a produzir a mesma esmaltação nos 3 conjuntos de amostras, estas passaram pelo processo de esmaltação vítrea sequencialmente na linha de produção. Sendo assim, as 15 amostras foram esmaltadas no mesmo dia e horário, utilizando-se do mesmo lote de esmalte e dos mesmos parâmetros de vazão de esmalte pelas pistolas e de velocidade do transportador da cabine de esmaltação. Além disso, todas as amostras foram penduradas de maneira igual nos ganchos e seguiram na linha de transporte do processo.

O método utilizado para aplicação do esmalte foi o de pó eletrostático a seco (POESTA), com aplicação automatizada. Os parâmetros de vazão e velocidade não podem ser aqui apresentados devido às questões de sigilo.

Após aplicado o esmalte, as amostras foram cuidadosamente transferidas da monovia da cabine de esmaltação para a monovia do forno, tomando-se os devidos cuidados para que fossem evitadas falhas superficiais devido à manuseio.

5.6 Queima de esmalte

Após a etapa de aplicação do esmalte, as amostras passaram pela etapa de cura. O forno utilizado no processo foi um forno em formato de U, com 25 queimadores e 6 zonas de aquecimento. A velocidade do transportador do forno e as temperaturas de cada zona não podem ser aqui apresentadas devido às questões de sigilo, mas, cabe ressaltar, que foi considerada a especificação de temperatura máxima de 860°C (item 4.5.3). Após a saída do forno as amostras passaram pelo resfriamento forçado (ar) e foram coletadas com o processo de esmaltação finalizado para as caracterizações.

5.7 Caracterização das amostras

As caracterizações a serem apresentadas foram realizadas de maneira igualitária para todas as etapas do processo: estudo de rugosidade, condição inicial (sem esmaltação) e condição final (com esmaltação). Em todas as etapas foi realizada análise estética com o propósito de verificar se houveram diferenças significativas entre as amostras e os processos.

5.7.1 Medição da rugosidade

Utilizou-se um rugosímetro digital de bancada SURFTEST SJ-210, da marca *Mitutoyo*, como o apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Rugosímetro digital de bancada SURFTEST SJ-210 da marca *Mitutoyo*

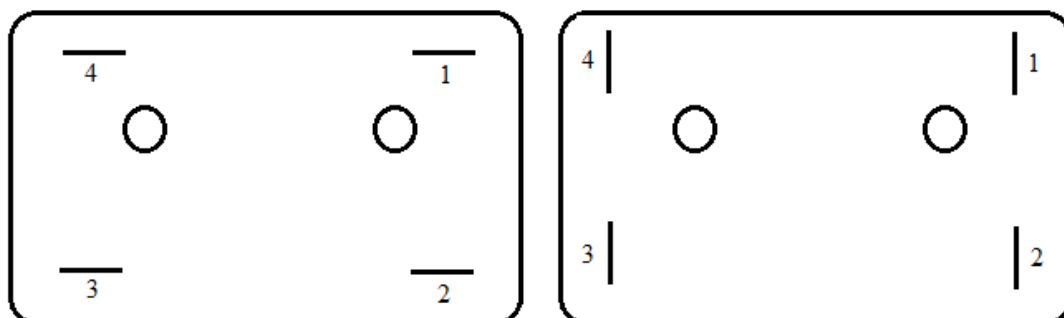


Fonte: SURFTEST SJ-210 (2021).

Foram feitas medições nos quatro cantos de cada amostra e para cada canto realizou-se 6 medições: 3 medições horizontais e 3 medições verticais; totalizando, portanto, 24 medições de rugosidade por amostra.

A Figura 19 representa de forma esquemática os pontos de medições horizontais e verticais, numerados pela ordem dos cantos em que as medidas foram realizadas. Medições no meio da amostra não foram possíveis, devida à configuração do tipo de rugosímetro que não permitia o alcance.

Figura 19 – Desenho esquemático da ordem e locais das medições de rugosidade



Fonte: autoria própria.

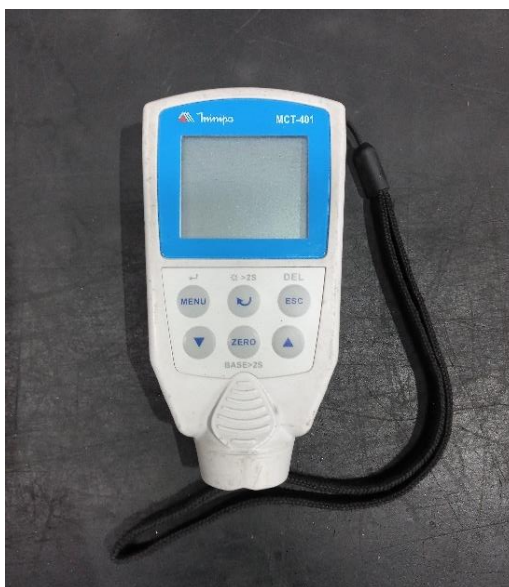
5.7.2 Determinação da superfície

Para obtenção das imagens de superfície das amostras foi utilizado um microscópio estereoscópio, com ocular S.W.F. 10x e com lente objetiva de 4,5x. As imagens foram captadas utilizando-se de uma câmera de celular, para que pudessem ser digitalizadas, uma vez que o microscópio não possuía sistema de captura de imagens.

5.7.3 Medição da camada de esmalte vítreo

As medições de espessura foram realizadas com o medidor de espessura de camada MCT-401 da marca *Minipa*, apresentado na Figura 20. As medições foram feitas nos quatro cantos de cada amostra, na região central e seguindo a norma ASTM D 7378.

Figura 20 - Medidor de espessura de camada MCT-401 da marca Minipa



Fonte: autoria própria.

5.7.4 Teste de aderência

Aplicou-se um impacto, via queda livre, de um peso de 1,5 kg sobre um escudo com ponta esférica de 20 mm de diâmetro, conforme norma ASTM D 2794, liberado de três alturas distintas:

- 50 cm;
- 60 cm;
- 70 cm.

A aplicação do impacto ocorreu em três pontos da chapa, dois laterais e um central; cada impacto foi avaliado qualitativamente na escala de 1 a 5 já especificada no Quadro 6, conforme classificação visual. A Figura 21 apresenta uma das amostras esmaltadas, posicionada no equipamento de teste, momentos antes de sofrer o impacto. Posteriormente, os locais que sofreram impacto também foram analisados através do microscópio estereoscópio, para verificação da ocorrência de pequenas trincas, não visíveis a olho nu.

Figura 21 – Disposição do equipamento e da amostra para o teste de aderência



Fonte: autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Estudo para definição das rugosidades

Após os ensaios preliminares para definição das rugosidades foram observados os seguintes resultados:

- Amostras jateadas: rugosidade aproximada de 3,0 μm ;
- Amostras virgens: rugosidade aproximada de 1,0 μm ;
- Amostras lixadas com lixas até #400: rugosidade aproximada de 0,6 μm ;
- Amostras lixadas com lixas até #1200: rugosidade aproximada de 0,09 μm .

Como o propósito do estudo era identificar condições de rugosidade maior e menor comparadas às amostras sem tratamento, foi possível obter pelo jateamento a condição de rugosidade maior, e, para o lixamento, a condição de rugosidade menor. A lixa de #1200 se mostrou mais significativa se comparada à lixa de #400, sendo a lixa de #1200 a definida para a elaboração do projeto.

6.2 Caracterizações iniciais (antes do processo de esmaltação)

6.2.1 Medições de rugosidade

Para a obtenção dos resultados calculou-se a média das medições de cada amostra, considerando tanto as medições horizontais quanto as verticais, depois calculou-se a média das 5 amostras de cada conjunto, onde para a incerteza de medição foi utilizado o desvio padrão médio. Na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos para cada conjunto de amostras.

Tabela 4 – Resultados das medições de rugosidade antes do processo de esmaltação vítrea

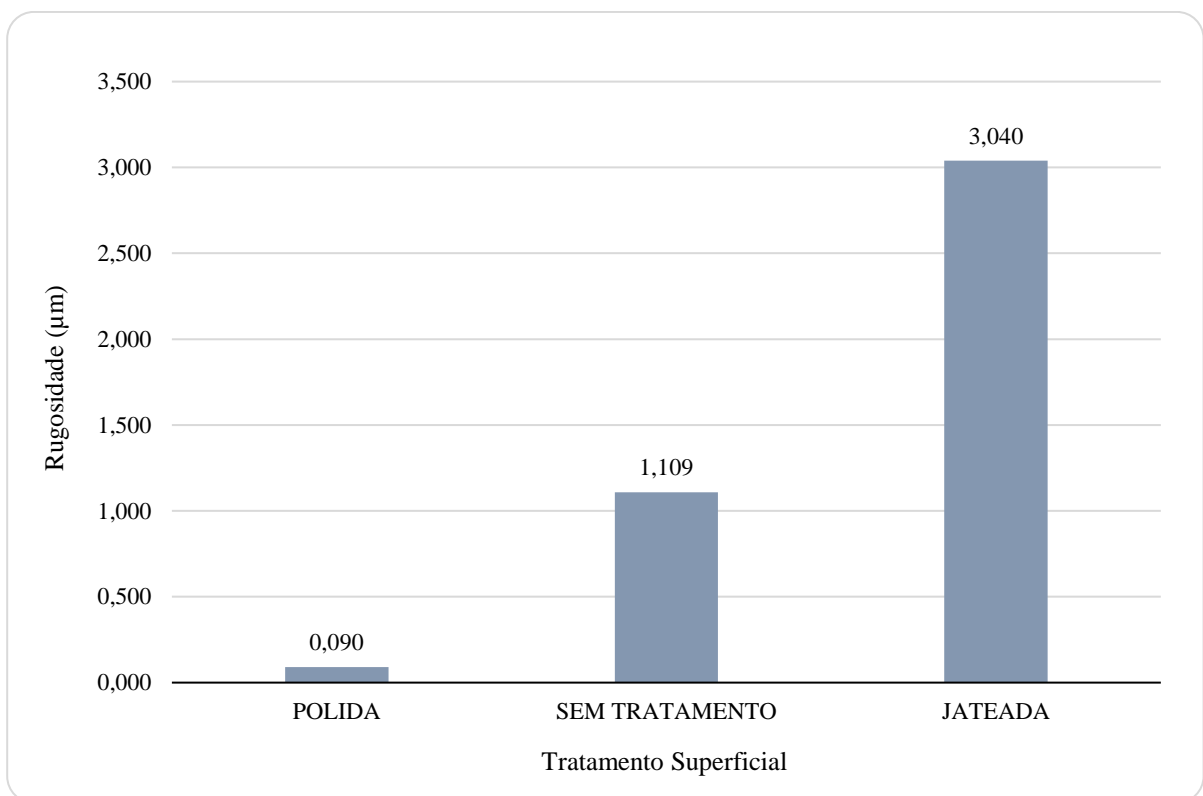
Conjunto de amostras	Rugosidade (μm)
Lixadas	0,090 \pm 0,006
Sem tratamento	1,109 \pm 0,019
Jateadas	3,040 \pm 0,140

Fonte: autoria própria.

Como podem ser observados, os valores de rugosidade medidos condizem com cada tipo de tratamento superficial aplicado. Amostras lixadas apresentaram valores inferiores de rugosidade, comparadas às amostras sem tratamento e jateadas. As amostras jateadas apresentaram rugosidades superiores entre todas as demais. As incertezas de medição também condizem com cada conjunto, uma vez que a incerteza das amostras lixadas foi a mais baixa, evidenciando uma uniformidade superficial, e a incerteza das amostras jateadas foi a mais alta, explicitando a não uniformidade do processo de jateamento.

Na Figura 22 é apresentado o gráfico de Rugosidade (μm) x Tratamento Superficial, onde pode ser verificado o aumento da rugosidade em relação ao tipo de tratamento superficial empregado. Isto demonstra que os processos de lixamento e jateamento realizados foram suficientes para a promoção das diferenças de rugosidade nos materiais a serem estudados.

Figura 22 - Gráfico Rugosidade (μm) x Tratamento Superficial antes do processo de esmaltação vítrea



Fonte: autoria própria.

Na Figura 23 podem ser vistas uma amostra de cada tipo de tratamento superficial realizado, nessa fase as amostras estavam adequadas para seguirem para a etapa de aplicação do esmalte.

Figura 23 - Amostras preparadas para a aplicação do esmalte, (a) lixada, (b) sem tratamento e (c) jateada

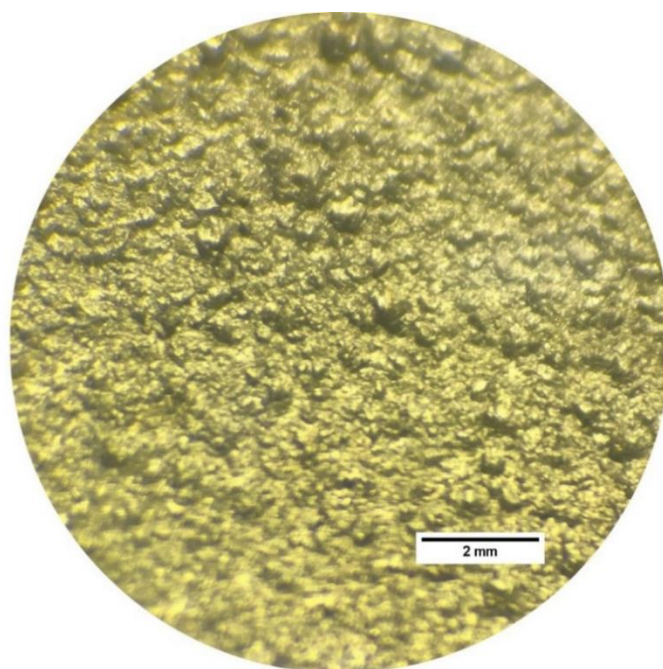


Fonte: autoria própria.

6.2.2 Determinação das superfícies

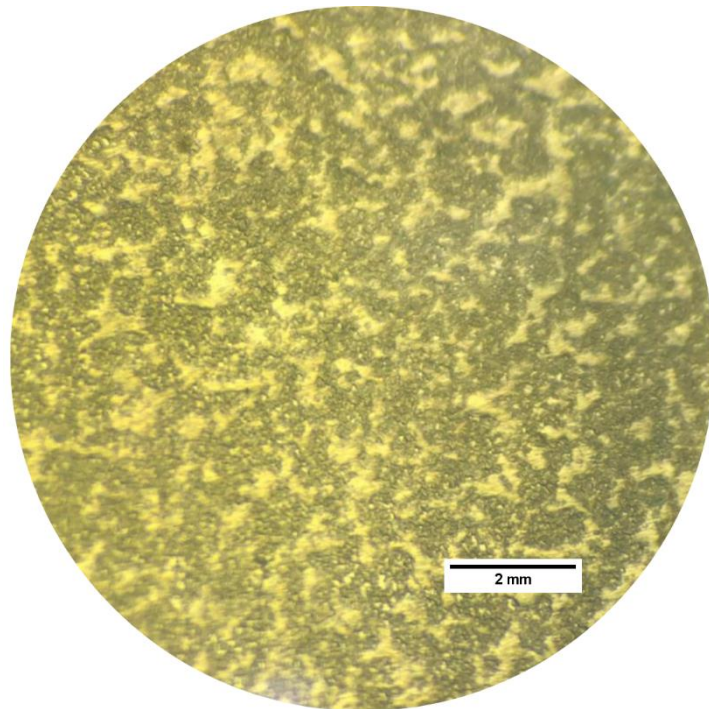
Nas Figuras 24, 25 e 26, são apresentados os resultados de imagem no microscópio estereoscópio. A Figura 24 corresponde a uma das amostras jateadas, evidenciando sua superfície rugosa (com depressões). A Figura 25 corresponde à amostra sem tratamento, que apresenta uma superfície com determinada rugosidade, no entanto, com características de menores depressões. Por último, a Figura 26 corresponde à amostra lixada, onde pode ser observada uma superfície com rugosidade inferior e apresentando os possíveis riscos provenientes do lixamento realizado.

Figura 24 - Visão no microscópio estereoscópio da amostra jateada



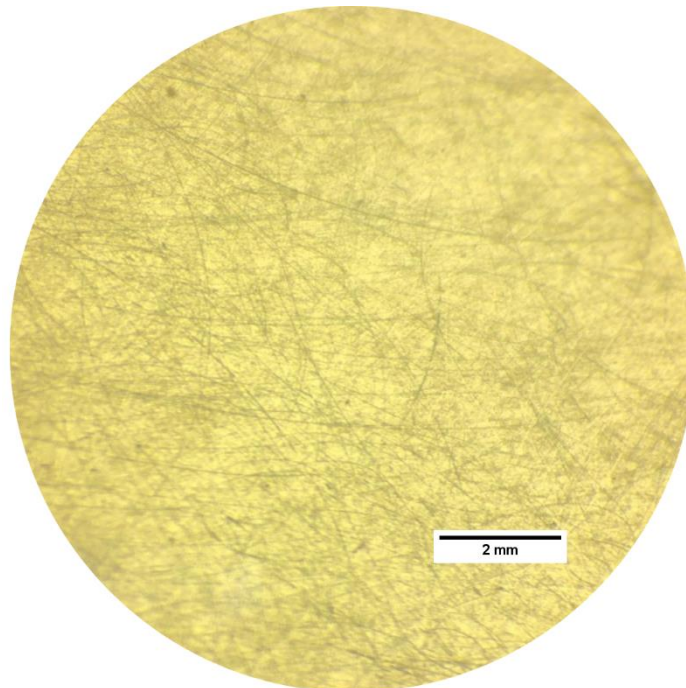
Fonte: autoria própria.

Figura 25 – Visão no microscópio estereoscópio da amostra sem tratamento



Fonte: autoria própria.

Figura 26 - Visão no microscópio estereoscópio da amostra lixada



Fonte: autoria própria.

6.3 Caracterizações finais (após processo de esmaltação)

6.3.1 Medições de rugosidade

Os resultados para as amostras após esmaltação vítrea foram obtidos da mesma maneira já descrita no item 6.2.1, com cálculo das médias da rugosidade das 5 amostras e com desvio padrão médio para as incertezas de cada medição. A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 5 – Resultados das medições de rugosidade após o processo de esmaltação vítrea

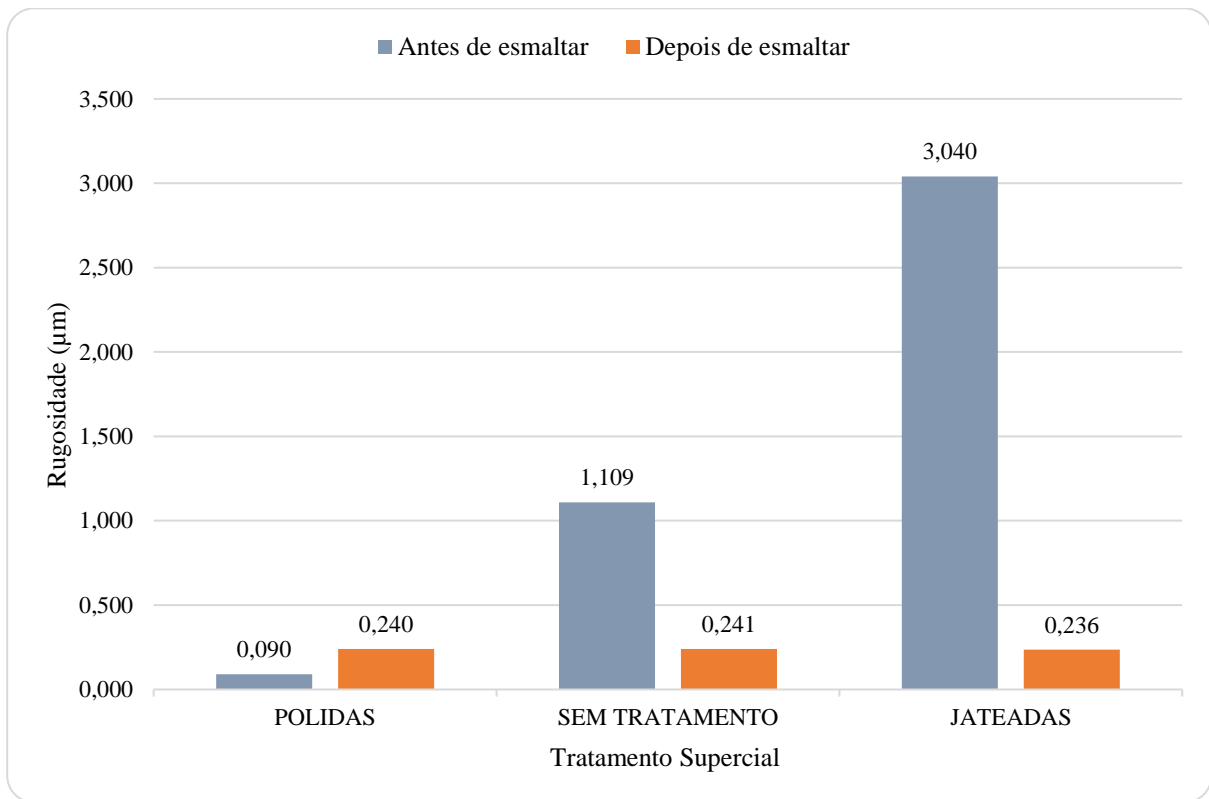
Conjunto de amostras	Rugosidade (μm)
Lixadas	$0,240 \pm 0,008$
Sem tratamento	$0,241 \pm 0,006$
Jateadas	$0,236 \pm 0,005$

Fonte: autoria própria.

Os resultados encontrados evidenciam como o processo de esmaltação vítrea uniformiza seu substrato de aplicação, uma vez que as rugosidades dos 3 conjuntos de amostras se tornaram muito próximas entre si, além disso a esmaltação diminui os valores de rugosidade superficial caso eles sejam consideráveis, como era o caso das amostras sem tratamento e das amostras jateadas, e aumenta os valores de rugosidade caso eles sejam mínimos, como era o caso da amostra lixada. Outro ponto é que as incertezas das medições podem ser consideradas pequenas se comparadas aos resultados antes da aplicação do esmalte, apontando, mais uma vez, a uniformidade desse processo de revestimento.

Na Figura 27 é apresentado novamente o gráfico de Rugosidade (μm) x Tratamento Superficial, agora com a comparação dos resultados antes e após as amostras passarem pelo processo de esmaltação vítrea.

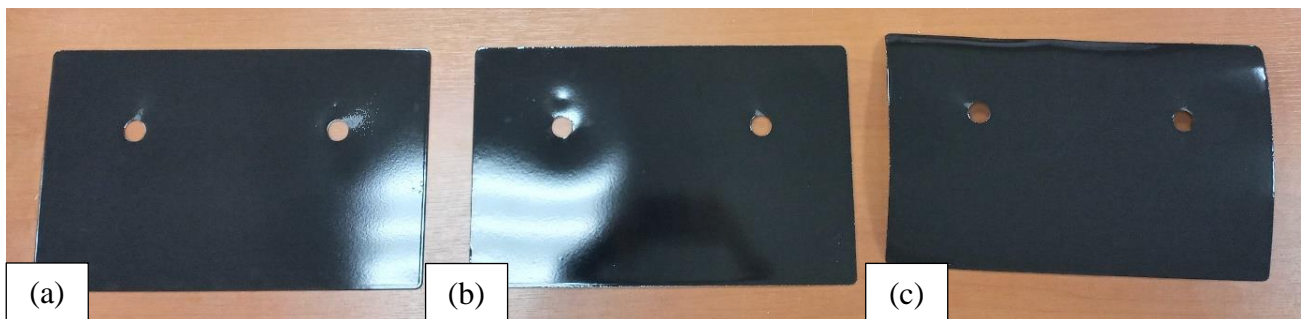
Figura 27 - Gráfico comparativo de Rugosidade (μm) x Tratamento Superficial antes e após processo de esmaltação vítrea



Fonte: autoria própria.

Na Figura 28 podem ser observadas uma amostra de cada tipo de tratamento superficial após esmaltação, nessa fase as amostras estavam prontas para seguirem para a etapa de caracterizações.

Figura 28 - Amostras pós processo de esmaltação vítrea, (a) lixada, (b) sem tratamento e (c) jateada

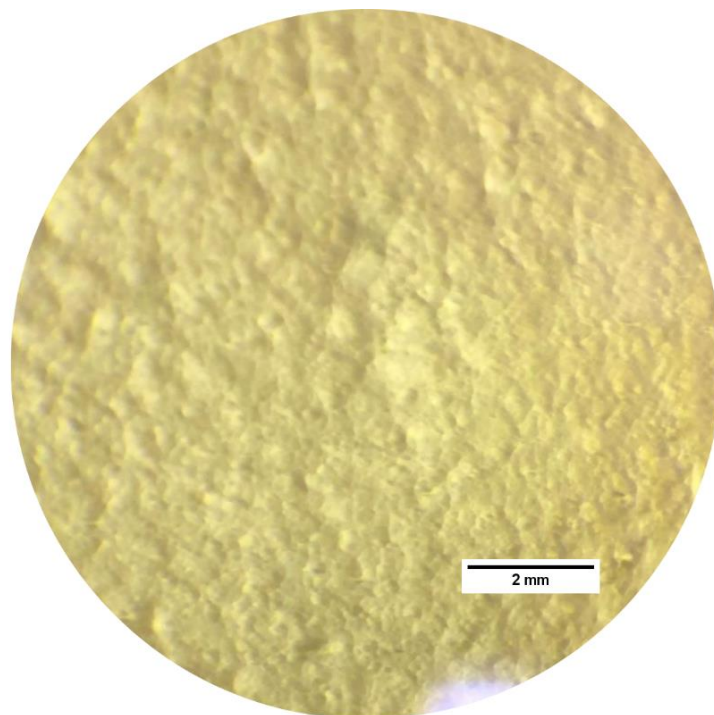


Fonte: autoria própria.

6.3.2 Determinação das superfícies

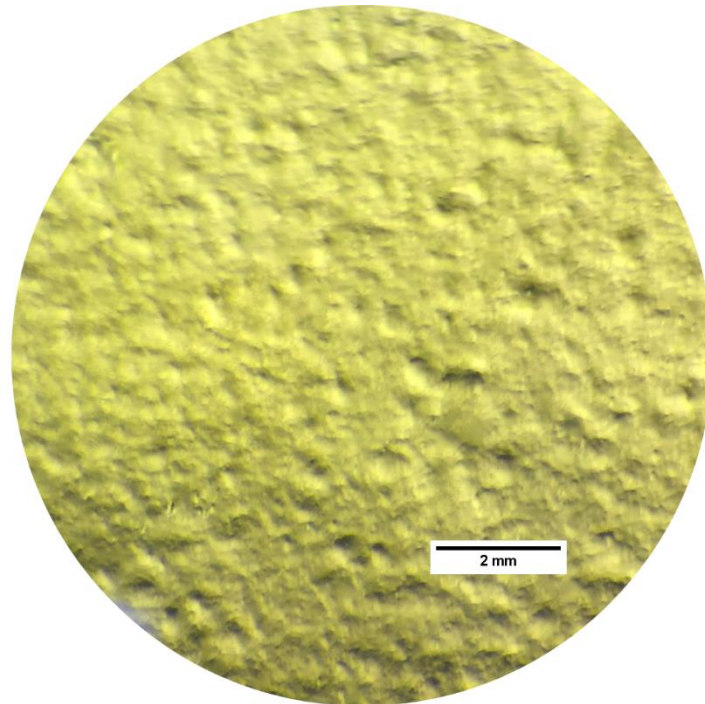
Nas Figuras 29, 30 e 31, são apresentadas as imagens das amostras obtidas pelo microscópio estereoscópico após o processo de aplicação e cura do esmalte. A Figura 29 corresponde à amostra jateada, a Figura 30 à amostra sem tratamento e, por fim, a Figura 31 à amostra lixada. As figuras comprovam os resultados apresentados no item anterior, onde as superfícies se assemelham muito em relação à rugosidade superficial.

Figura 29 - Visão no microscópio estereoscópico após esmaltação da amostra jateada



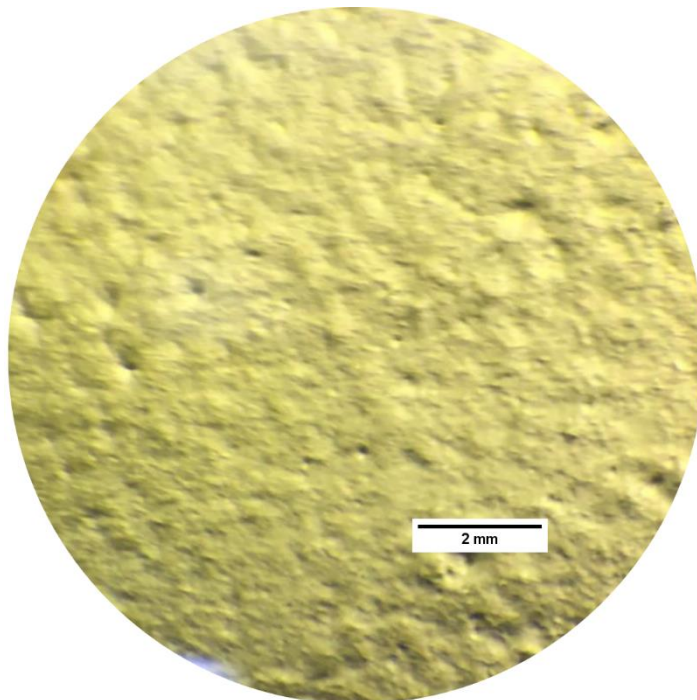
Fonte: autoria própria.

Figura 30 – Visão no microscópio estereoscópio após esmaltação da amostra sem tratamento



Fonte: autoria própria.

Figura 31 – Visão no microscópio estereoscópio após esmaltação da amostra lixada



Fonte: autoria própria.

6.3.3 Medições da camada de esmalte vítreo

Foram realizadas medições de espessura da camada de esmalte vítreo para cada uma das amostras com diferentes tratamentos superficiais, com os resultados obtidos foi possível calcular a média da espessura de camada por conjunto e obter também a incerteza de medição através do desvio padrão médio. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.

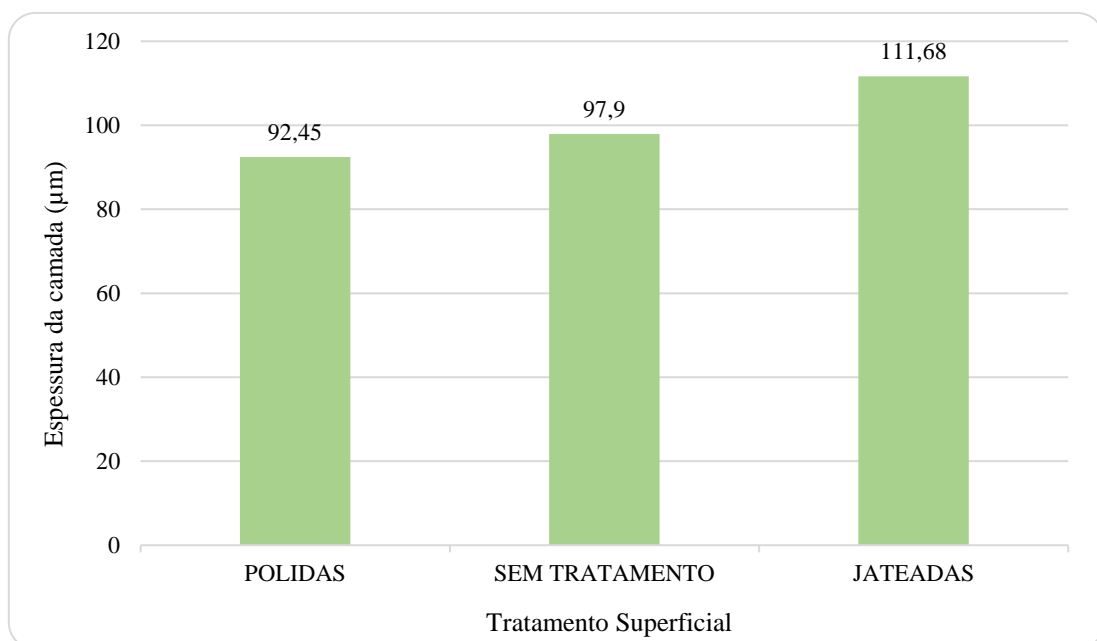
Tabela 6 - Resultados da espessura da camada de esmalte vítreo

Conjunto de amostras	Espessura da camada (μm)
Lixadas	$92,45 \pm 6,14$
Sem tratamento	$97,90 \pm 4,60$
Jateadas	$111,68 \pm 6,06$

Fonte: autoria própria.

Todos os resultados de espessura de camada ficaram dentro da variação aceitável do processo, ou seja, entre $60\mu\text{m}$ a $350\mu\text{m}$, e, como pode ser visto, houve um aumento da espessura da camada conforme a rugosidade da amostra aumentou, essa tendência de aumento é evidenciada no gráfico de Espessura (μm) x Tratamento Superficial apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Gráfico de Espessura de Camada (μm) x Tratamento Superficial



Fonte: autoria própria.

O resultado apresentado está relacionado à provável diferença de altura das depressões das superfícies, que se tornam reflexo na promoção de medições maiores ou menores conforme estes desníveis, fato explicado pelas amostras jateadas que apresentam maiores desníveis e subsequentemente maior espessura.

6.3.4 Testes de aderência

O teste de aderência de esmalte vítreo, como já dito anteriormente, é um teste qualitativo, sendo assim, após os testes as amostras foram avaliadas e classificadas de 1 a 5 conforme qualidade da aderência, sendo 1 o melhor resultado e 5 o pior. Para chegar aos resultados finais de aderência foram calculadas as modas para cada conjunto de amostra e em relação a cada altura do teste feito. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

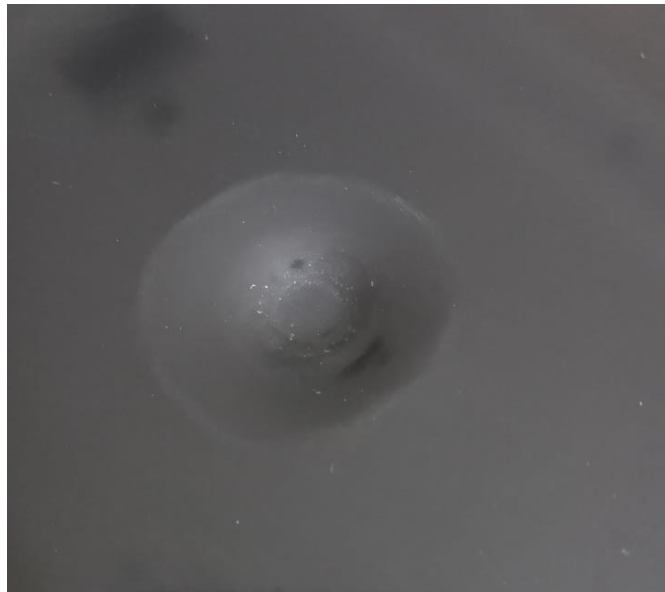
Tabela 7 – Resultados do teste de aderência do esmalte vítreo

Altura do impacto	Conjunto de amostras	Classificação teste de aderência
50 cm	Lixadas	1
	Sem tratamento	1
	Jateadas	1
60 cm	Lixadas	1
	Sem tratamento	1
	Jateadas	1
70 cm	Lixadas	1
	Sem tratamento	1
	Jateadas	1

Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado na Tabela 7, os testes de aderência foram todos satisfatórios, mesmo que alguns impactos tenham provocado mínimo deslocamento, estes foram classificados com grau 2, ou seja, satisfatórios e bons, e como foram poucos, na sua média, não interferiram nos resultados como um todo, mantendo a classificação com grau 1. A Figura 33 apresenta um dos impactos causados na amostra, este avaliado como grau 1.

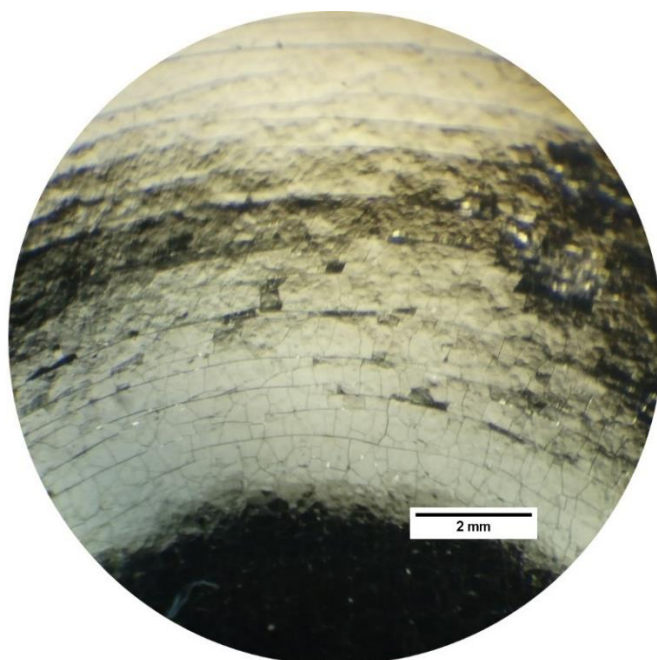
Figura 33 - Impacto provocado pelo teste de aderência em uma das amostras esmaltadas



Fonte: autoria própria.

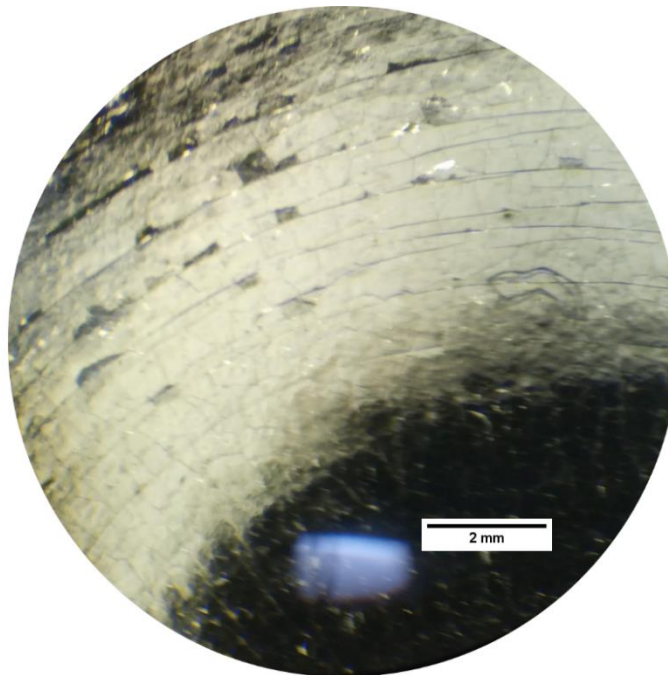
Após os impactos do teste de aderência também foram feitas novas imagens no microscópio estereoscópio com o objetivo de verificar se realmente a aderência estava adequada, através das imagens foi confirmado que o impacto não gerou trincas significativas que poderiam se propagar com o tempo. Os resultados das imagens obtidas são mostrados nas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34 - Visão no microscópio estereoscópio após teste de aderência da amostra jateada



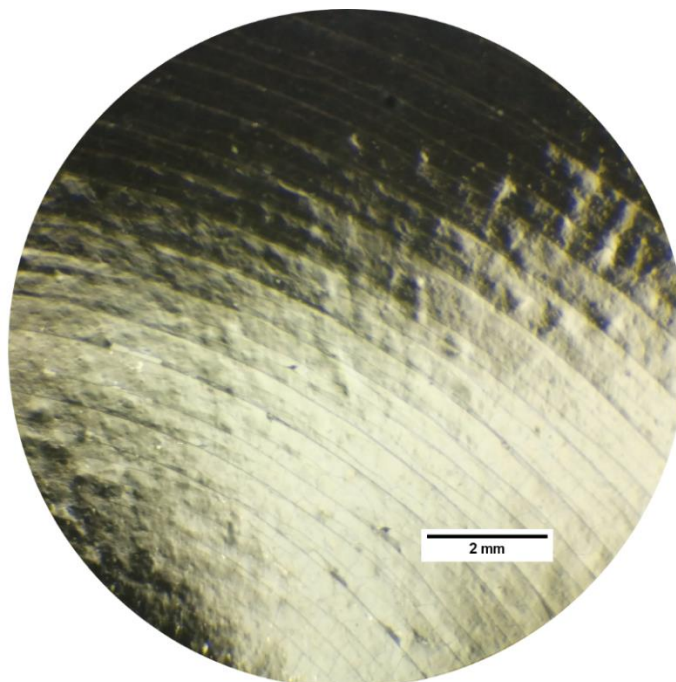
Fonte: autoria própria.

Figura 35 – Visão no microscópio estereoscópio após teste de aderência da amostra sem tratamento



Fonte: autoria própria.

Figura 36 - Visão no microscópio estereoscópio após teste de aderência da amostra lixada



Fonte: autoria própria.

As figuras mostram anéis circulares provenientes do impacto do pino com ponta esférica, as regiões mais escuras indicam os locais onde o impacto foi direto.

6.4 Diferenças estéticas de recobrimento a olho nu

Para finalizar, foram verificadas se haviam diferenças estéticas entre os conjuntos de amostras, ou seja, se algum conjunto apresentava qualquer tipo de defeito superficial visível a olho nu. Como resultado não foram encontradas nenhuma alteração estética significativa que comprometesse o visual das chapas e também não foram encontrados nenhum dos defeitos citados no item 4.7, conhecidos e comuns no processo de esmaltação vítrea.

7 CONCLUSÃO

De início, pôde-se concluir que o estudo para definição da rugosidade se mostrou eficiente, uma vez que, depois de realizados os tratamentos superficiais definidos chegou-se em resultados condizentes e esperados: as amostras jateadas apresentaram rugosidade de $3,040 \pm 0,140 \mu\text{m}$ e as amostras lixadas rugosidade de $0,090 \pm 0,006 \mu\text{m}$, estando, respectivamente, na escala superior e inferior à rugosidade das amostras sem tratamento, usadas de referência intermediária ($1,109 \pm 0,019 \mu\text{m}$).

Após o processo de esmaltação vítrea, concluiu-se que este tipo revestimento uniformiza a superfície em que é aplicado, pois este deixou todas as amostras com rugosidade praticamente igual. Todas as amostras apresentaram rugosidade aproximada de $0,240 \mu\text{m}$, ou seja, a rugosidade das amostras jateadas diminuiu com o processo de esmaltação e a rugosidade das amostras lixadas aumentou. Como as amostras sem tratamento apresentavam rugosidade superior a $0,240 \mu\text{m}$, suas rugosidades também acabaram por diminuir.

Em relação à espessura da camada de esmalte, os resultados obtidos mostraram uma tendência de aumento da espessura conforme a superfície de aço carbono se encontrava mais rugosa. Portanto, amostras lixadas ficaram com menor espessura de camada ($92,45 \pm 6,14 \mu\text{m}$), amostras sem tratamento apresentaram espessura intermediária ($97,90 \pm 4,60 \mu\text{m}$) e amostras jateadas apresentaram espessura maior ($111,68 \pm 6,06$).

Os testes de aderência, que foram objetivo do projeto, se mostraram todos aceitáveis/aprovados, sendo todos classificados qualitativamente como grau 1, ou seja, classificação muito boa/ótima para a aderência do esmalte vítreo ao substrato, evidenciando que não houve deslocamento de esmalte sobre nenhuma amostra e que a aderência foi de 85% a 100% sobre as regiões de impacto dos testes. Este resultado mostrou que a rugosidade da superfície não apresentou influência na aderência do esmalte ao substrato de aço. Analisando o gráfico apresentado na Figura 9, que relaciona a aderência do esmalte vítreo e o teor de cobalto presente na frita para diferentes tipos de tratamentos superficiais, pôde-se concluir que o teor de cobalto do esmalte utilizado neste projeto ficou em torno de 0,5% a 2%, valores que implicam em uma aderência de 85% a 100% para todos os tipos de tratamentos superficiais estudados, como obtido no projeto.

Por último, em relação as questões estéticas, não houveram diferenças significativas entre os tipos de amostras. Nenhuma delas apresentou defeitos superficiais visíveis a olho nu, o que evidenciou que o processo aplicado para todas as amostras (jateadas, sem tratamento e lixadas) foi adequado.

8 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS

Como etapas futuras, podem ser realizados alguns estudos complementares, tais como a análise de:

1. Diferentes composições do aço carbono usado como substrato;
2. Diferentes quantidades de óxido de cobalto e níquel na frita;
3. Diferentes tempos de cura;
4. Influência de óleo na superfície de aplicação do esmalte;
5. Influência do teor de sólidos presente no esmalte.

Segundo RICHMOND et al. (1953) em seu estudos, existe correlação positiva entre a aderência do esmalte vítreo e a rugosidade da superfície, entretanto, esse não é o único fator de influência, a aderência também depende da composição do aço, da quantidade de óxido de cobalto e níquel na frita, e do tempo de tratamento térmico na etapa de cura, parâmetros que neste projeto não foram investigados.

REFERÊNCIAS

AKDAG, F. **Emaye Okulu Ders Notları II**. Congresso Internacional de Cerâmica, Vidro, Esmalte de Porcelana e Pigmento, 2011.

ANDREW, I. A. **Porcelain enamels: The preparation, application, and properties of enamels**. Champaign: Garrard Press, 1961.

ASHIS JANAHA, A. **Vitreous enamelling of aluminium - A review**. Trans. Ind. Ceram. Soc., n. 27, p. 1–15, 1968.

AVER, M. **Análise do uso de chapas de aço baixo carbono produzidas via aciaria elétrica para indústria da esmaltação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

BAYER, R. G. **Mechanical Wear Prediction and Prevention**. New York: Marcel Dekker, 1994.

BERGAMO, L. et al. **Effect of Enamel Coatings on the Mechanical Properties of Aluminium Foams**. p. 1130–1139, 2019.

BRASIL, D. DO. **Fornecedor Granalha de Aço**. Disponível em: <<https://www.deumexdobrasil.com.br/fornecedor-granalha-aco>>. Acesso em: 15 de setembro de 2021.

BRUCE, B. D.; SHARON, A. V. **Effect of Refractory Mill Additions on Molten Apparent Viscosities of Steel Ground-Coat Enamels**. Journal of the American Ceramic Society, v. 32, n. 2, p. 41–45, 1949.

CALOVI, M.; ROSSI, S.; RUSSO, F. **Durability of vitreous enamel coatings and their resistance to abrasion, chemicals, and corrosion: a review**. Journal of Coatings Technology and Research. Springer, 2021.

CHEN, M. et al. **Interfacial reaction between SiO₂–Al₂O₃–ZnO–CaO based glass coatings and K38G superalloy substrates**. Surf. Coat. Technol., n. 216, p. 145–151, 2013.

CHEN, M. et al. **Protection mechanism of enamel–alumina composite coatings on a Cr-rich nickel-based superalloy against high-temperature oxidation**. Surf. Coat. Technol., n. 285, p. 57–

67, 2016.

COMPAGNONI, A. M. **Reduction or Elimination of Vanadium in Enamel for Aluminium.** Xangai, Japão: [s.n.].

COMPAGNONI, A. M.; ROSSI, S.; RUSSO, F. **Porcelain Enamel Coatings.** MDPI AG, 27 abr. 2021. (Nota técnica).

DANIELSON, R. R. **The cleaning of sheet steel and iron for enamelling.** Journal of the American Ceramic Society, v. 2, p. 883–894, 1919.

DE OLIVEIRA, L. **Esmaltação em painéis de ferro fundido – Engenharia aplicada como uma forma de agregar valor ao produto.** São João Del Rei: Universidade Federal de São João Del-Rei, 2017.

DIETZEL, A. H. **Emaillierung - Wissenschaftliche Grundlagen und Grundsätze der Technologie.** Springer, Berlin: [s.n.].

EN-10209. **UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione.** UNI: Milano, Italy, 2013.

FEBRATEC. **Gancheiras - Gancho na porta.** Disponível em: <<http://www.tecjato.com.br/site/gancheiras-gancho-na-porta/>>. Acesso em: 11 de outubro de 2021.

FISCHER. **MEDIÇÃO DE ESPESSURA DE REVESTIMENTO MAGNÉTICO-INDUTIVO.** Disponível em: <<https://www.helmut-fischer.com/pt/tecnicas/medicao-de-espessura-de-revestimento-magnetico-indutivo>>. Acesso em: 04 de outubro de 2021.

GAI, B. F. **Esmaltação inorgânica em lâminas de aço.** Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2009.

GAVRILOVSKI, D.; GAVRILOVSKI, M. **Properties of hot rolled steels for enamelling.** In Proceedings of the 3rd BMC, p. 24–27, 2003.

GOMES, R. **Artefatos de cocção em ferro fundido: Agregação de valor a partir do design e da seleção e aplicação de processos de revestimento cerâmico.** Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2015.

GOODWIN, J. W.; WHITELOCK, K. E. **The Importance of Colour and Its Stability in Vitreous**

Enamels. p. 172–176, 1985.

HANDBOOK, E. M. **CERAMICS AND GLASSES.** Volume 4, ASM International, 1991.

HARRISON, W. N. et al. **Galvanic Corrosion Theory for Adherence of Porcelain Enamel Ground Coats to Steel.** Journal of the American Ceramic Society, v. 34, n. 1, p. 1–6, 1954.

HUANG, X. et al. **Variations of microstructure and resistance to fish-scaling of a hot rolled enamel steel before and after enamel firing.** J. Mater. Res. Technol., n. 11, p. 466–473, 2021.

HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

INTERNATIONAL, P. **Pemco Enamel Manual.** Brugge, Belgium: [s.n.].

IŞIKSAÇAN, Ö.; YÜCEL, O.; YEŞİLÇUBUK, A. **Vitreous Enamel Coating Surface Defects and Evaluation of the Causes.** International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology ISO, v. 5, n. 5, p. 6–11, maio 2018.

JIANG, J. et al. **Development of high-performance enamel coating on grey iron by low-temperature sintering.** Materials, v. 11, p. 2183, 2018.

KIM, D. S.; KIM, M. T. **Adhesion of vitreous enamel coatings on he carbon steel applied via various methods.** Materials Science and Technology Conference and Exhibition, v. 4, p. 2191–2196, 2008.

KUCHINSKI, F. **Corrosion Resistant Thick Films by Enamelling.** Park Ridge: Noyes Publication, 1993.

MARTÍN, F. L. **Processos Produtivos em Revestimentos Cerâmicos : Variáveis de Processo e Possíveis Causas de Defeitos.** Cerâmica Industrial, v. 9, p. 7–20, 2004.

MREFERRAMENTAS. **Medidor de Espessura de Camada Minipa MCT-401.** Disponível em: <<https://www.mreferramentas.com.br/instrumentos-de-medicao/diversos/medidores-de-espessura/medidor-de-espessura-de-camada-minipa-mct-401>>. Acesso em: 21 de outubro de 2021.

PAGLIUCA, S.; FAUST, W. D. **Porcelain (Vitreous) Enamels and Industrial Enamelling Processes - The Preparation, Application and Properties of Enamels.** Mantova: The International

Enamellers Institute, 2011.

PEI-402. **Mill Additions**. Norcross, 1995.

PEI-601. **Drying and Firing**. Norcross, 1995.

PETZOLD, A.; POSCHMANN, H. **Email und Emailiertechnik**. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1992.

QUALITY, E. **Quality Requirements for Vitreous/Porcelain Enamellings**. Hagen English Edition, 2007.

RICCARDELLI, C.; MASS, J.; THORNTON, J. **Egyptian Faience Inlay Techniques: a process for obtaining detail and clarity by refiring**. Boston, 2002.

RICHMOND, J. C. et al. **Relation between roughness of interface and adherence of porcelain enamel to steel**. Washington, 1953.

ROSSI, S.; RUSSO, F. **Porcelain Enamel Coatings**. Itália, Trento, 2021.

SJ-210, S. **METROLOGIA**. Disponível em: https://www.metrologia.pt/fotos/familias/18a_mitutoyo_pt20003_p484_p499_surftest_1525886335cd0b6945a77b.pdf. Acesso em: 21 de outubro de 2021.

SOUB! **Air Random Orbital Pneumatic Sander Ferramenta de Lixamento Redondo**. Disponível em: https://www.soubarato.com.br/produto/3227259092/at-780-5-4-air-random-orbital-pneumatic-sander-ferramenta-de-lixamento-redondo?WT.srch=1&WT.srch=1&epar=bp_pl_00_go_shopping_3p&gclid=EAIAIQobChMI4cr5h9_38wIVIQnnCh0qoQr3EAQYBiABEgKxPvD_BwE&opn=MIDIASOUB&sel. Acesso em: 19 de outubro de 2021.

TOSTMANN, C. **The Influence of Cobalt Oxide on the Properties of Ground Coat Enamels for Kitchenware**. Keramische Rundschau, , 1909.

UMBERTAZZI, A.; WOJCIECHOSWKI, N. **Smalto Porcellanato - vitreous enamel**. Milano: Ulrico Hoepli Editore, 2002.

WAMKE, H. **Die Elektrotauchemailierung**. Marienfld: Eigenverlag, 2001.

ZHANG, A. **A study of hot rolled steel plate for porcelain enamelling**. Austrália, Wollongong, 2013. Disponível em: <<https://ro.uow.edu.au/theses>>. Acesso em: 18 de setembro de 2021.