

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MATHEUS VINICIUS COLPANI**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APLICAÇÃO DE  
ESMALTE PORCELÂNICO POR DEPOSIÇÃO ELETROSTÁTICA EM PEÇAS DE  
FERRO FUNDIDO PARA FOGÕES**

**PATO BRANCO**

**2023**

**MATHEUS VINICIUS COLPANI**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APLICAÇÃO DE  
ESMALTE PORCELÂNICO POR DEPOSIÇÃO ELETROSTÁTICA EM PEÇAS DE  
FERRO FUNDIDO PARA FOGÕES**

**Technical and economic feasibility study for the application of porcelain  
enamel through electrostatic deposition on cast iron pieces for stoves**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a) Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maria Nalu Verona Gomes  
Coorientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dra. Silvana Patrícia Verona

**PATO BRANCO**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**MATHEUS VINICIUS COLPANI**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APLICAÇÃO DE  
ESMALTE PORCELÂNICO POR DEPOSIÇÃO ELETROSTÁTICA EM PEÇAS DE  
FERRO FUNDIDO PARA FOGÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16/Junho/2023

---

Bruno Bellini Medeiros  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Valdir Celestino da Silva  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Maria Nalu Verona Gomes  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PATO BRANCO**  
**2023**

Eu dedico esse trabalho ao meu futuro eu, que irá usá-lo como força motriz para conclusão de empreitadas cada vez mais desafiadoras.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar o meu agradecimento a Nosso Senhor Jesus Cristo, que sem ele nada disso seria possível.

Gostaria de agradecer a minha família pelo suporte tanto emocional como financeiro, principalmente a minha avó que puxou a minha orelha inúmeras vezes.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, que me incentivaram durante esta jornada a não desistir e seguir em frente.

E finalmente, mas não menos importante, gostaria de agradecer a Filosofia, que nos momentos de solidão e crises, serviu como lanterna para iluminar a escuridão que pairava sobre os meus pensamentos.

Don't try to add more years to your life. Better add  
more life to your years (PASCAL, Blaise).  
Não tente adicionar mais anos a sua vida. Melhor  
adicionar mais vida a seus anos (PASCAL,  
Blaise).

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo preliminar de viabilidade técnica e econômica sobre a aplicação de esmalte por deposição eletrostática em ferro fundido para manufatura de fogões a lenha. Este estudo serve de modelo para uma possível substituição de um processo de pintura de silicone em ferro fundido. Ele apresenta as origens da esmaltação no mundo, quais as suas especificidades em relação ao tipo de ferro fundido que esse processo de esmaltação eletrostática a pó pode ser aplicado, quais as principais características do processo, elaboração e composição da frita e quais os fornos utilizados neste processo; os custos envolvidos tanto na parte da implantação quanto na parte da operação de um dado projeto e o cálculo do retorno sobre o investimento. Mostra detalhadamente o método aplicado para obtenção dos equipamentos necessários para o processo, a câmara de esmaltação, o forno de queima e as prateleiras, também evidencia o modo de aplicação do pó, os testes necessários para validação da qualidade da superfície esmaltada e sinaliza os funcionários necessários para cada setor. Discute quais foram os equipamentos selecionados e porque eles são adequados ao processo, demonstra o produto final gerado pela esmaltação, verifica os resultados da aplicação dos testes de Scratch e oxidação os quais impactam diretamente na qualidade do revestimento, analisa a espessura de camada ideal para o processo, elabora um layout com a disposição final dos equipamentos no local designado e apresenta uma estimativa da quantidade de funcionários para manejar cada parte do processo. Estratifica os custos de implantação e operação e gera um faixa de valores para o retorno sobre o investimento. Este estudo resulta em uma possibilidade positiva de aplicação da esmaltação eletrostática a pó na fábrica de fogões 3E no sudoeste do Paraná.

Palavras-chave: esmaltação eletrostática a pó; viabilidade técnica; viabilidade econômica; esmaltação em ferro fundido; revestimento vítreo.

## **ABSTRACT**

This work presents a preliminary technical and economic feasibility study on the application of enamel by electrostatic deposition on cast iron for the manufacture of stoves. This study serves as a model for a possible replacement of a silicone painting process on cast iron. It presents the origins of enameling in the world, what are its specificities in relation to the type of cast iron that this electrostatic powder enameling process can be applied, what are the main characteristics of the process, elaboration and composition of the frit and which furnaces are used in this process, the costs involved in both the implementation part and the operation part of a given project and the calculation of the return on investment. It shows in detail the method applied to obtain the necessary equipment for the process, the enameling booth, the firing furnace and the shelves; it also shows the way of applying the powder, the tests necessary for validating the quality of the enameled surface and signals the employees required for each sector. It discusses which equipment was selected and why they are suitable for the process, demonstrates the final product generated by enameling, verifies the results of the application of scratch and oxidation tests which directly impact the quality of the coating, analyzes the ideal layer thickness for the process, prepares a layout with the final disposition of the equipment in the designated place and presents an estimate of the number of employees necessary to handle each part of the process. It stratifies deployment and operating costs and generates a range of values for return on investment. This study results in a positive possibility of application of electrostatic powder enameling in the 3E stove factory in southwest Paraná.

**Keywords:** electrostatic powder enameling; technical feasibility; economic feasibility; cast iron enameling; vitreous coating.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DE ESMALTAÇÃO A PÓ .....	18
FIGURA 2 - DIAGRAMA DE RESISTIVIDADE .....	20
FIGURA 3 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA PISTOLA DE APLICAÇÃO .....	22
FIGURA 4 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA CABINE DE APLICAÇÃO MANUAL MODELO 902 .....	23
FIGURA 5 - FORNOS EM CAIXA (SEMI-MUFLA E INTERMITENTE).....	25
FIGURA 6 - FORNO EM CAIXA ELÉTRICO .....	25
FIGURA 7 - FORNO CIRCULAR .....	26
FIGURA 8 - GEOMETRIAS DE PERCURSO PARA FORNOS EM TÚNEL .....	27
FIGURA 9 - FORNO EM TÚNEL POR ROLOS TRANSPORTADORES .....	27
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	32
FIGURA 11 - PISTOLA DE APLICAÇÃO DE ESMALTE .....	34
FIGURA 12 - APLICAÇÃO DO ESMALTE.....	35
FIGURA 13 - CABINE CLASSICSTANDARD 2 .....	38
FIGURA 14 - FORNO PARA O TESTE DE QUEIMA .....	39
FIGURA 15 - PLACA DE INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO FORNO DE TESTE .....	40
FIGURA 16 - MODELO DO SCRATCH TEST.....	42
FIGURA 17 - MEDIDOR DE ESPESSURA .....	43
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO TESTE DE SALT SPRAY.....	45
FIGURA 19 - FLUXOGRAMA DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	47
FIGURA 20 - PEÇAS DE TESTE PÓS APLICAÇÃO DO ESMALTE .....	52
FIGURA 21 - PISTOLA DE APLICAÇÃO COM LEITO FLUIDIZADO OPTIFLEX .....	53
FIGURA 22 - ARRANJO DAS PEÇAS DO FOGÃO DENTRO DA CÂMARA DE QUEIMA.....	55
FIGURA 23 - VISTA LATERAL DO FORNO DE ESMALTAÇÃO .....	55
FIGURA 24 - PLACA GRANDE ESMALTADA NO PRIMEIRO TESTE .....	56
FIGURA 25 - PLACA PEQUENA ESMALTADA NO PRIMEIRO TESTE .....	57
FIGURA 26 - PLACA GRANDE ESMALTADA NO SEGUNDO TESTE.....	58
FIGURA 27 - PLACA PEQUENA ESMALTADA NO SEGUNDO TESTE.....	58
FIGURA 28 - IMAGEM MEV DO ESMALTE DE TESTE .....	61
FIGURA 29 - RESULTADOS SCRATCH TEST.....	62
FIGURA 30 - PONTOS DE AFERIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE ESMALTE DA PLACA PEQUENA .....	63

<b>FIGURA 31 - AFERIÇÃO DA ESPESSURA DO PONTO 5 DA PLACA PEQUENA DO PRIMEIRO TESTE .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 32 - PONTOS DE AFERIÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE ESMALTE DA PLACA GRANDE .....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 33 - PEÇA TESTE IMERSA EM NÉVOA SALINA .....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 34 - VISTA FRONTAL DO RACK COM 8 GAVETAS.....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 35 - VISTA DE TOPO DO RACK COM ROLL-OUT TOTAL.....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 36 - VISTA DE TOPO DO RACK COM ABERTURA BILATERAL .....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 37 - LAYOUT FINAL EM PLANTA BAIXA DO PROCESSO DE ESMALTAÇÃO .....</b>	<b>72</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO EM PESO DO FERRO FUNDIDO PRODUZIDO PELA EMPRESA.....	33
TABELA 2 - DIMENSÕES E MASSAS DAS PARTES RELATIVAS À MUP .....	36
TABELA 3 - DIMENSÕES DA CABINE DE ESMALTAÇÃO CLASSICSTANDARD 2 .....	37
TABELA 4 - DADOS TÉCNICOS DA CABINE CLASSICSTANDARD 2 .....	37
TABELA 5 - ÁREA SUPERFICIAL DA MUP .....	44
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO IDEAL DO FERRO FUNDIDO PARA ESMALTAÇÃO .....	51
TABELA 7 - DIMENSÕES OPTIFLEX 2 FE .....	53
TABELA 8 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS OPTIFLEX 2 FE .....	54
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ESMALTE TESTE .....	60
TABELA 10 - ESPESSURAS DE CAMADA DE ESMALTE DA PLACA PEQUENA DO PRIMEIRO TESTE .....	64
TABELA 11 - ESPESSURAS DE CAMADA DE ESMALTE DA PLACA PEQUENA DO SEGUNDO TESTE .....	64
TABELA 12 - ESPESSURAS DE CAMADA DE ESMALTE DA PLACA GRANDE DO PRIMEIRO TESTE .....	65
TABELA 13 - ESPESSURAS DE CAMADA DE ESMALTE DA PLACA GRANDE DO SEGUNDO TESTE .....	65
TABELA 14 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO RACK .....	68
TABELA 15 - CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO .....	74
TABELA 16 - CUSTO FIXO SALARIAL .....	75
TABELA 17 - DADOS DOS CUSTOS OPERACIONAIS VARIÁVEIS .....	75
TABELA 18 - CUSTOS DE OPERAÇÃO.....	76
TABELA 19 - CUSTO TOTAL .....	76
TABELA 20 - RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
MUP	Maior Unidade de Produto
ROI	<i>Return on Investment</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$  Constante de massa de camada por espessura ( $\text{g/m}^2$ )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.1.1	Objetivo principal .....	15
1.1.2	Objetivos específicos .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Esmaltação</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Frita</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Esmaltação eletrostática a pó</b> .....	<b>18</b>
2.3.1	Fatores que influenciam a esmaltação a pó .....	19
<u>2.3.1.1</u>	<u>Resistividade</u> .....	<u>19</u>
<u>2.3.1.2</u>	<u>Distância da pistola de aplicação</u> .....	<u>20</u>
<u>2.3.1.3</u>	<u>Tensão</u> .....	<u>21</u>
<u>2.3.1.4</u>	<u>Granulometria</u> .....	<u>21</u>
2.3.2	Pistola de aplicação.....	21
2.3.3	Cabine de aplicação ou pulverização .....	22
<b>2.4</b>	<b>Fornos para esmaltação</b> .....	<b>24</b>
2.4.1	Fornos em túnel por rolos transportadores.....	27
<b>2.5</b>	<b>Ferro fundido</b> .....	<b>28</b>
2.5.1	Ferro fundido cinzento.....	28
2.5.2	Ferro fundido para esmaltação.....	29
<b>2.6</b>	<b>Viabilidade econômica</b> .....	<b>29</b>
2.6.1	Custos de implantação ou investimentos .....	29
2.6.2	Custos de operação .....	30
2.6.3	Retorno sobre o investimento.....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Viabilidade técnica do processo de esmaltação</b> .....	<b>31</b>
3.1.1	Levantamento dos requisitos de projeto.....	32
3.1.2	Medida do espaço disponível .....	32
3.1.3	Ferro fundido para esmaltação.....	33
3.1.4	Escolha do método de esmaltação e aplicação do esmalte .....	33
<u>3.1.4.1</u>	<u>Aplicação do esmalte</u> .....	<u>33</u>
3.1.5	Dimensão e massa das peças a serem esmaltadas. ....	35
3.1.6	Determinação da cabine de esmaltação .....	36

3.1.7	Dimensionamento do forno e teste de queima do esmalte.....	38
<u>3.1.7.1</u>	<u>Teste de queima do esmalte .....</u>	<u>39</u>
3.1.8	Escolha do esmalte .....	41
<u>3.1.8.1</u>	<u>Teste de aderência do esmalte .....</u>	<u>41</u>
<u>3.1.8.2</u>	<u>Aferição da espessura de camada .....</u>	<u>42</u>
<u>3.1.8.3</u>	<u>Quantidade de esmalte por MUP .....</u>	<u>43</u>
<u>3.1.8.4</u>	<u>Teste de oxidação .....</u>	<u>44</u>
3.1.9	Taxa de perdas de peças esmaltadas.....	46
3.1.10	Prateleiras de armazenamento.....	46
3.1.11	Transporte das peças.....	46
3.1.12	Funcionários necessários no processo .....	47
<b>3.2</b>	<b>Viabilidade econômica do processo de esmaltação .....</b>	<b>47</b>
3.2.1	Custos de implantação .....	48
3.2.2	Custos de operação .....	48
3.2.3	Custo total .....	48
3.2.4	Retorno sobre o investimento.....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Viabilidade técnica do processo de esmaltação .....</b>	<b>50</b>
4.1.1	Levantamento dos requisitos de projeto.....	50
4.1.2	Espaço útil para Instalação do processo de esmaltação.....	50
4.1.3	Definição do ferro fundido cinzento para esmaltação.....	51
4.1.4	Método de esmaltação .....	51
4.1.5	Aplicação do esmalte .....	51
<u>4.1.5.1</u>	<u>Pistola de aplicação.....</u>	<u>52</u>
4.1.6	Forno de queima .....	54
4.1.7	Teste de queima do esmalte .....	55
4.1.8	Escolha do esmalte .....	59
<u>4.1.8.1</u>	<u>Teste de aderência.....</u>	<u>61</u>
<u>4.1.8.2</u>	<u>Aferição da espessura de camada de esmalte.....</u>	<u>62</u>
<u>4.1.8.3</u>	<u>Teste de oxidação .....</u>	<u>65</u>
<u>4.1.8.4</u>	<u>Quantidade de esmalte por MUP .....</u>	<u>66</u>
4.1.9	Taxa de perda de peças esmaltadas.....	67
4.1.10	Prateleiras de armazenamento.....	67
4.1.11	Transporte das peças.....	70
4.1.12	Funcionários necessários no processo .....	70

4.1.13	Layout final .....	71
<b>4.2</b>	<b>Viabilidade econômica do processo de esmaltação .....</b>	<b>73</b>
4.2.1	Custos de implantação .....	73
4.2.2	Custos de operação .....	74
4.2.3	Custo total .....	76
4.2.4	Retorno sobre o investimento .....	76
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O esmalte porcelânico é um revestimento vítreo aplicado a diversos substratos metálicos através de um processo de fusão geralmente em alta temperatura. O composto vidro-metal quimicamente ligado resultante exibe propriedades que refletem as características químicas, físicas, elétricas e estéticas do vidro, combinado com a força, facilidade de fabricação e durabilidade do metal. Os esmaltes de porcelana são formulados para desenvolver propriedades específicas em metais ou ligas (FAUST, 2009).

De acordo com Russo & Rossi (2021), o berço da esmaltação pode com certa precisão ser identificado no Mar Mediterrâneo. Os primeiros reais objetos esmaltados foram encontrados em um túmulo micênico em Chipre e datam do século XIII a.C. Os exemplos mais notáveis desses achados arqueológicos são representados pelos famosos anéis de ouro Kouklia e o cetro real de ouro Kourion, ambos datados do período da Idade de Ouro de Chipre.

Ao passar dos séculos em 1761 foi possível esmaltar o interior de um recipiente de ferro fundido pela primeira vez na história. Naquela época, o único método para deposição de esmalte em grandes peças de ferro fundido consistia em aquecer até o estado de vermelhidão o substrato metálico e aplicar o esmalte em pó sobre a superfície quente, tornando-o macio e aderente à camada cerâmica.

Após esta etapa a peça era reaquecida no forno para que o esmalte derretesse e, assim, criar uma superfície vítrea lisa. O verdadeiro ponto de virada para a esmaltação técnica ocorreu por volta de 1850, quando os químicos austríacos e alemães conseguiram esmaltar a parte interna dos recipientes feitos de chapa de aço. Em 1851 foi publicado o primeiro manual sobre esmaltação, escrito por Moritz Vogelsang (S. ROSSI; F. RUSSO; A. M. COMPAGNONI, 2020).

Portanto, ao longo do século XVIII e XIX a esmaltação em metal ocorria geralmente em equipamentos de cocção e cozinha como também na parte sanitária, principalmente em banheiras. Então, relata a Vitrious Enamel Association (2022), uma revolução essencial aconteceu com a descoberta da incorporação do cobalto no esmalte, sendo um fator crucial para o desenvolvimento da adesão entre o esmalte e o aço. Assim, a esmaltação vítrea era, e em grande parte ainda é, aplicada em duas demãos ou camadas.

A primeira demão (camada) é composta por um vidro que contém cobalto e níquel, os quais desenvolvem essa adesão. Estes esmaltes, chamados de camadas de base, tendem à serem pretos, azulados ou marrons. Após a queima desta demão, uma segunda demão é aplicada dando a cor e as propriedades finais desejadas.

No ano de 1970 foi introduzido o processo de aplicação eletrostática de esmalte em pó especialmente tratado. Isso permitiu um grau ainda maior de automação e desqualificação do processo, causando grande economia de demão. A necessidade de reduzir o impacto ambiental do pré-tratamento complexo resultou no retorno ao processo de duas demãos. Os novos esmaltes que foram desenvolvidos para a camada de base foram capazes de produzir adesão em aço e não exigiam nenhum pré-tratamento além da remoção de graxas e óleos usados na produção das peças.

As fábricas modernas agora aplicam a camada de base e a camada de cobertura consecutivamente sem a necessidade de uma operação de queima intermediária. As duas camadas são queimadas ao mesmo tempo para produzir a peça esmaltada vítrea final. Este é o processo automatizado, o qual é de uso geral em todas as fábricas de produção em massa hoje. Ambos os processos úmidos e em pó foram desenvolvidos usando esta tecnologia. (Vitrious Enamel Association, 2022).

Assim, sabendo das características e possibilidades de aplicação dos esmaltes, uma empresa de manufatura de fogões a lenha situada na cidade de Saudade do Iguaçu no Paraná estava em busca de um processo que substituísse seu método atual de aplicação de uma superfície protetora externa para seus fogões. O método atual da empresa é a aplicação de uma superfície de silicone, contudo, este processo gera uma grande quantidade de resíduo, baixo ou nulo reaproveitamento de material combinado a uma baixa eficiência de aplicação por hora. A substituição deste método pela esmaltação a pó foi levantada pela empresa como uma solução viável para este problema.

A dificuldade encontrada pela empresa sobre a substituição consiste em saber se o método de aplicação por esmaltação a pó produz uma superfície com qualidade igual ou superior em relação ao acabamento como também suas propriedades mecânicas; além, é claro, do custo total da implantação de tal sistema.

Conseqüentemente, a identificação do projeto foi feita por intermédio da orientadora Prof.<sup>a</sup>. Dra. Maria Nalu Verona com a empresa de manufatura de fogões 3E Fogões.

O projeto consiste em realizar uma análise de viabilidade técnica e econômica da implementação de um processo de esmaltação a pó que substitua o atual processo de pintura com silicone utilizado pela empresa para o acabamento superficial da parte externa dos seus fogões.

A metodologia aplicada no projeto é de cunho majoritariamente empírico com suporte teórico, sendo dividida em duas partes: técnica e econômica. A parte técnica lança mão de identificar todas as partes necessárias para a implantação e funcionamento do processo, seus componentes físicos, a aplicação do esmalte, a validação da aplicação, a verificação das propriedades finais do produto validado, o fluxo de produção do processo, os funcionários necessários no processo e o layout do processo dentro do espaço disponível. A parte econômica por sua vez contabiliza os custos de implantação e operação do processo de esmaltação associado a análise de um indicador chamado Retorno sobre o Investimento.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo principal**

O objetivo principal desse trabalho é realizar um estudo preliminar sobre a viabilidade técnica e econômica de um processo de esmaltação de ferro fundido em uma fábrica de fogões no sudoeste paranaense.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Analisar a composição do ferro fundido a ser utilizado;
- Analisar o método de aplicação do esmalte;
- Analisar o fluxo de produção dos produtos de acordo com a demanda da empresa;
- Analisar os equipamentos necessários para o processo de esmaltação estabelecido;
- Analisar o espaço útil da empresa para instalação do processo;
- Analisar os custos do processo;

- Determinar o orçamento necessário para implantação e funcionamento do processo, como também o tempo necessário para o retorno sobre o investimento;

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Esmaltação**

A esmaltação ou a adição de um revestimento de esmalte vítreo é um revestimento de uma substância vítrea que foi fundido no metal base para dar um acabamento rígido fortemente aderente, resistente a muitos abrasivos e materiais corrosivos. A finalidade dos esmaltes vítreos modernos é dupla, ou seja, conferir resistência à corrosão, proteção ao substrato metálico e ao mesmo tempo fornecer cor permanente, brilho e outros valores estéticos (CURTIS, 2010).

### **2.2 Frita**

Frita é uma composição cerâmica realizada pela fusão de materiais inorgânicos em um vidro e resfriando-os em água, ou qualquer outro método de resfriamento rápido. Este processo, conhecido como fritting ou fritura, foi desenvolvido para tornar insolúveis e/ou atóxicos quaisquer componentes solúveis e/ou tóxicos. Outros benefícios da fritura incluem a eliminação da água quimicamente ligada dos ingredientes; redução do ponto de fusão dos materiais fritados em relação aos componentes individuais; e simplificação do sistema glaze ou bond reduzindo o número de materiais na fórmula (FUSION CERAMICS, 2022).

O processo de fabricação das fritas é estratificado em duas partes: fusão e moagem. No processo de fusão, o vidro é fundido a partir de matérias primas, geralmente borosilicatos. Um lote grosseiro misturado é alimentado em um forno contínuo por uma extremidade e o vidro fundido flui como produto na outra extremidade. Na etapa da fundição ocorrem: decomposição, evolução de gás, reação e dissolução. Posteriormente, quando o vidro fundido se torna homogêneo, ele é derramado em um pequeno fluxo de água ou em rolos de metal giratórios refrigerados a água. Este vidro temperado, agora já denominado frita, é um material facilmente reduzível às partículas de tamanho pequeno por uma operação de moagem feita por esferas (WRATIL, 1984).

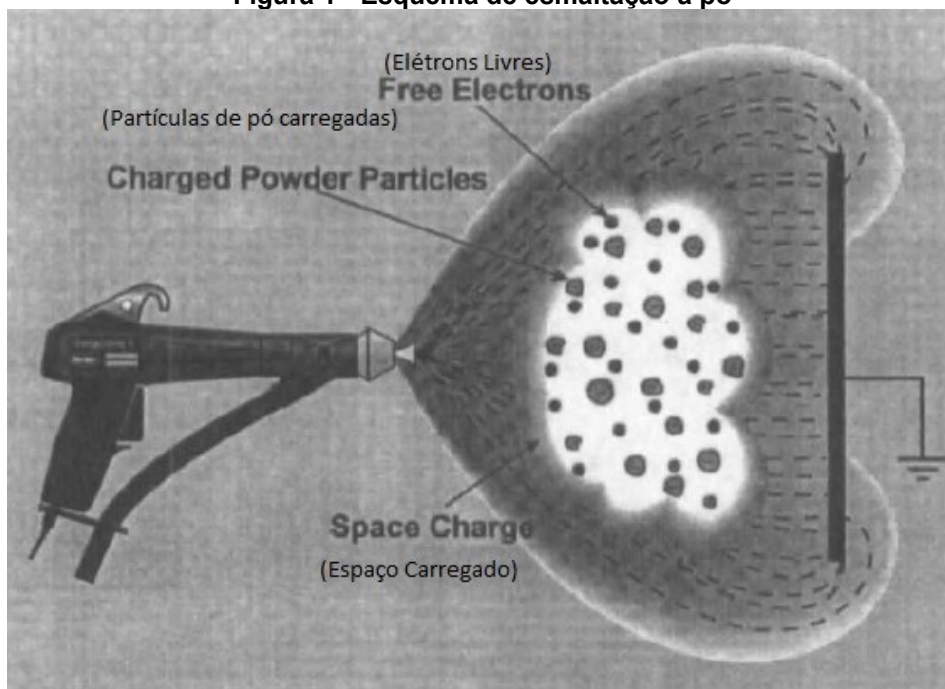
Segundo WRATIL (1984) a moagem do vidro por moinho-de-esferas é feita usando esferas de porcelana ou de alta alumina, com diâmetro de 1,5 a 5,0 centímetros.

Tamanho, velocidade e carga do moinho como tamanho e carga das esferas são parâmetros de fundamental importância para a determinação do tempo de moagem necessário para a obtenção do tamanho ideal do produto. Os esmaltes da camada de base são moídos por esferas até uma granulometria menor que 74  $\mu\text{m}$  (< malha 200) em um índice de 95% de precisão. As camadas de cobertura são ainda mais refinadas, com 98% de precisão em uma granulometria menor que 44  $\mu\text{m}$  (< malha 325).

### 2.3 Esmaltação eletrostática a pó

No processo de esmaltação eletrostática a pó, o pó de esmalte é fluidizado e então transportado para um sistema de eletrodos por um fluxo de ar adequado. As partículas de pó são carregadas com uma carga negativa por um processo de ionização e direcionadas por um campo elétrico para a superfície metálica aterrada a ser coberta, como ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Esquema de esmaltação a pó



Fonte: GUSKOV (1997)

Neste processo mostrado na Figura 1, as forças adesivas eletrostáticas retêm as partículas de pó na superfície. A espessura final da camada de pó é determinada por uma gama de fatores, mas, em geral, é dito que a espessura do filme tende a um valor limitante, com o pó dispersando-se uniformemente sobre a superfície do metal (BRIGHT; COFFEE, 1964).

### 2.3.1 Fatores que influenciam a esmaltação a pó

#### 2.3.1.1 Resistividade

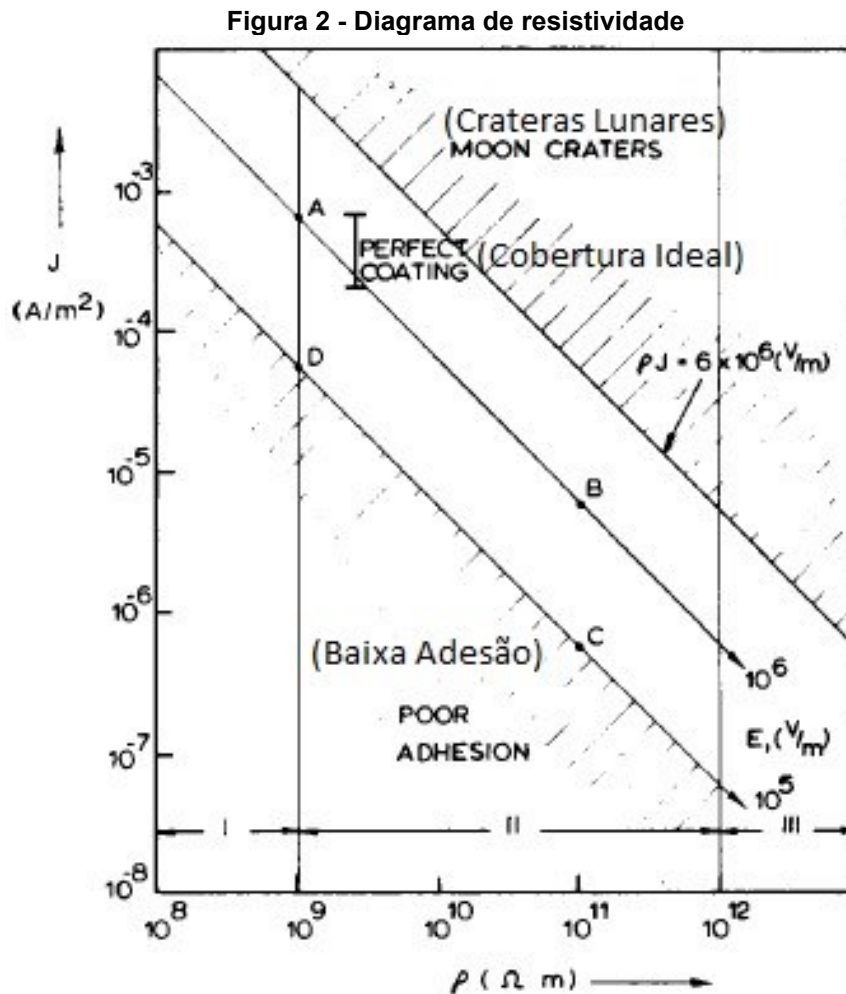
A resistividade aqui é referida como a resistividade elétrica através do material em pó. Segundo Corbett & Makin (1973) a resistividade do material em pó difere completamente da do material inteiro do qual as partículas são originárias. A corrente aparente flui através da superfície das partículas e a resistividade fica sensível à umidade absorvida sobre a superfície das partículas.

Ao passo que a resistividade do material inteiro é frequentemente tida como constante, é notável que a resistividade do pó é variável, a qual é altamente sensível à umidade e temperatura. As propriedades do pó para deposição eletrostática podem, portanto, variar dependendo das condições do ambiente. Essa variação pode ocorrer a despropósito e causar irreprodutibilidade na produção a não ser que precauções sejam tomadas.

Existem três categorias de pós em relação à sua resistividade: pós condutores ( $\xi < 10^9 \Omega m$ ), pós de resistividade intermediária ( $10^9 < \xi < 10^{12} \Omega m$ ) e pós de alta resistividade ( $\xi > 10^{12} \Omega m$ ). Os pós condutores ganham carga rapidamente mas também perdem com a mesma facilidade, então são de difícil manejo pois a sua aderência é dificultada e ainda podem desprender as partículas já aderidas, geralmente são usados em materiais condutores com ressalvas.

Os pós de resistividade intermediária são os mais aptos a serem utilizados pois são os mais abundantes no mercado além de uma maior facilidade na parametrização da corrente e tensão. Finalmente, os pós de alta resistividade são aqueles que dificultam o carregamento mas também os quais permanecem carregados por mais tempo, são os melhores em questão de aderência mas necessitam de uma tensão mais elevada, sua fabricação é complexa e portanto difíceis de obter (CORBETT; MAKIN, 1973).

A Figura 2 mostra o diagrama da resistividade dos pós em relação às correntes e tensões aplicadas referentes à adesão no material aplicado.



Fonte: CORBETT & MAKIN (1973)

Assim, como ilustra a Figura 2 uma adesão ideal é obtida a partir de um balanço entre corrente, tensão e resistividade, quanto maior a resistividade menor a corrente e maior a tensão necessária para que a cobertura seja propriamente aderida.

### 2.3.1.2 Distância da pistola de aplicação

A distância da pistola de aplicação em relação ao objeto aplicado influencia a intensidade do campo elétrico. A intensidade do campo se intensifica na ponta da pistola como também nas bordas do objeto a ser aplicado. As distâncias de pistola normais variam entre 8 e 12 polegadas (20 a 30 cm) (PORCELAIN ENAMEL INSTITUTE).



### 2.3.1.3 Tensão

Segundo o Porcelain Enamel Institute (PEI) as tensões das pistolas variam entre aproximadamente 45 kV a 100 kV. A tensão varia segundo o fluxo de corrente e o ajuste das pistolas. As seleções de tensão normais estão entre 90 e 100 kV para cobertura de base e giram em torno de 80 kV para a camada de acabamento, importante salientar que esses parâmetros são específicos para cada planta de aplicação.

### 2.3.1.4 Granulometria

De acordo com Dechun Fu (1994) os efeitos dos tamanhos de partícula são um fenômeno comum encontrado em diversos aspectos da esmaltação porcelânica. Portanto, o tamanho de partícula afeta o processamento do pó, a pulverização eletrostática e a queima. Partículas largas favorecem uma maior eficiência na deposição, superando os efeitos da gaiola de Faraday, com uso em aplicações de grande porte sem estilhaçamento.

Entretanto, partículas menores oferecem uma alta fluidez, maior uniformidade de cobertura e bom envelopamento nos contornos e cantos vivos. Utilizando encapsulantes de pó, os quais são polímeros adicionados ao pó, apropriados e boa encapsulação do pó, parâmetros como fluidez e eficiência de deposição do pó são afetados mais significativamente pelo tamanho de partícula do que por parâmetros como aderência e resistividade.

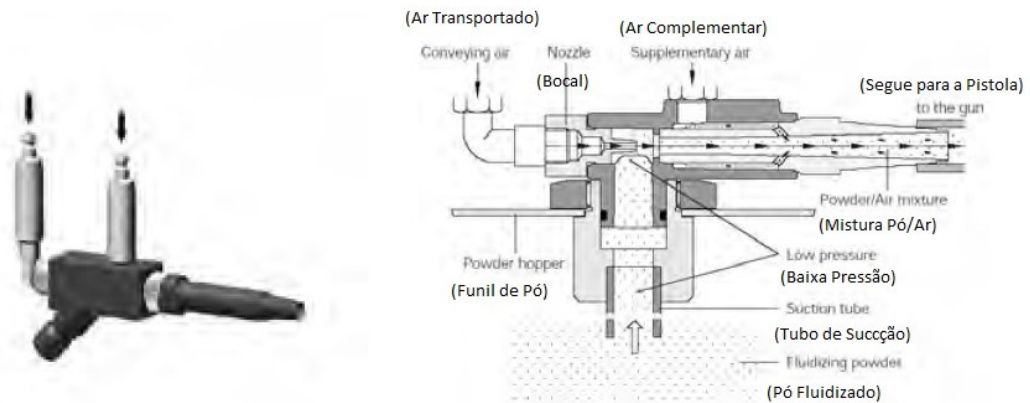
O uso do efeito gerado pelo manejo da granulometria para controlar as propriedades dos pós eletrostáticos deve ser combinado com ajuste de encapsulantes e parâmetros de pulverização para obter os melhores resultados. Os tamanhos de partícula típicos variam em uma faixa de 10 $\mu$ m – 250 $\mu$ m (BRIGHT; COFFEE, 1964).

### 2.3.2 Pistola de aplicação

De acordo com Christopher Merritt (2018) a maioria dos atuais usuários de esmalte em pó usam um injetor estilo Venturi para fornecer o pó aos aplicadores eletrostáticos. O injetor de esmalte padrão utiliza o princípio de alta velocidade de ar comprimido injetado através da câmara interna aberta. A baixa pressão criada pelo ar o qual se move através da porta aberta, cria um vácuo que extrai o pó do funil fluidizado e empurra o esmalte em pó para o aplicador eletrostático.

Neste ponto, o pó é atomizado e as partículas são carregadas conforme são direcionadas para a peça de trabalho aterrada. Este mecanismo é evidenciado pela Figura 3.

**Figura 3 - Esquema de funcionamento da pistola de aplicação**



Fonte: MERRITT (2018)

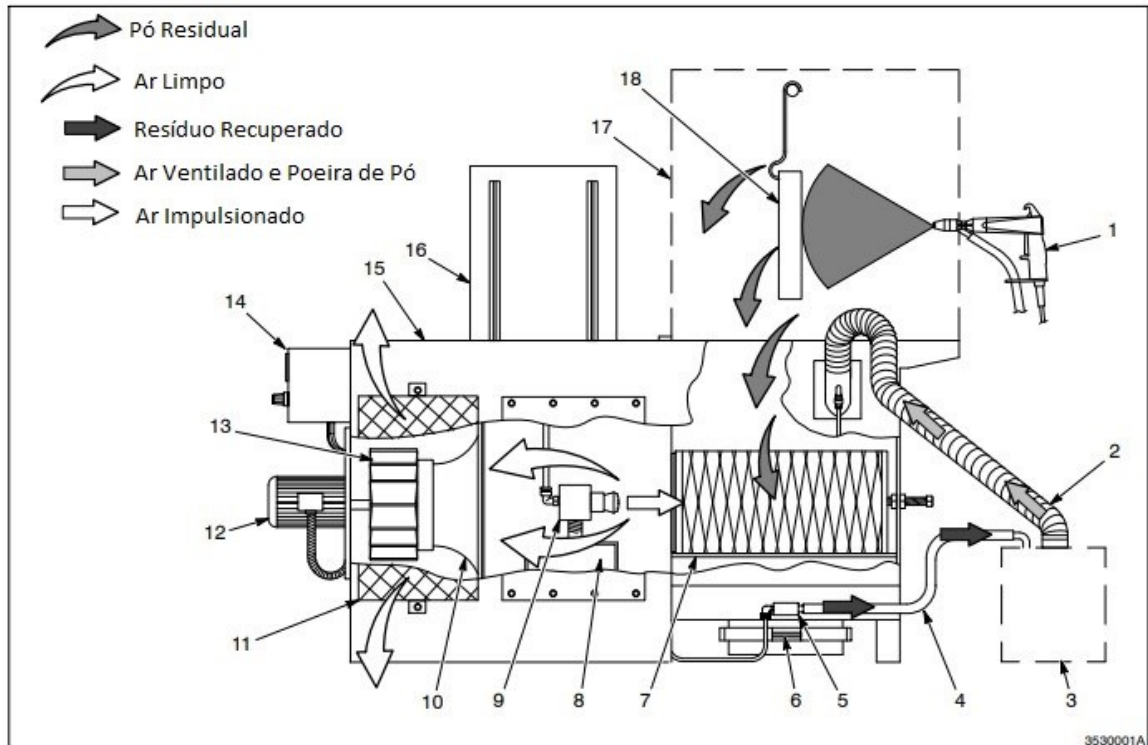
Este processo ilustrado pela Figura 3 embora simples e robusto, utiliza grandes volumes de ar comprimido e alta velocidade para entregar o pó para a pistola. Além disso, é da natureza do pó de frita ser abrasivo, causando alto desgaste e perda de controle do processo devido a alterações dos componentes da bomba ao longo do tempo (MERRITT, 2018).

### 2.3.3 Cabine de aplicação ou pulverização

A cabine de aplicação serve para aplicar o pó emitido pelas pistolas nas peças de trabalho sem perturbações externas, como movimentos descontrolados do ar, bem como recolher o pó pulverizado em excesso e, simultaneamente, evitar a contaminação do ambiente com pó (KELLER; HOFER, 1984).

De acordo com Keller e Hofler (1984) o pó não aderido as peças de trabalho deve ser transportado de volta para o funil de coleta pelo menor caminho possível. Este processo deve ser feito sem nenhuma interferência. Para separação do pó do ar da cabine, é recomendado quando possível o uso de um filtro separador. Em consequência da finura da fritada de pó, a carga no filtro deve ser reduzida substancialmente e qualquer impureza que puder ter contaminado o pó reciclado deve ser removida através de uma peneira ou separador magnético. A Figura 4 ilustra o funcionamento de uma cabine de aplicação com reaproveitador de pó.

**Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma cabine de aplicação manual modelo 902**



- |                               |                                   |                            |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 1. Pistola de Aplicação       | 7. Cartuchos Filtrantes           | 13. Ventilador de Exaustão |
| 2. Tubulação de Ventilação    | 8. Distribuidor de Ar Impulsinado | 14. Painel Pneumático      |
| 3. Depósito ou Alimentador    | 9. Válvula de Pulso               | 15. Coletor                |
| 4. Tubulação de Transferência | 10. Cone de Entrada               | 16. Painel Elétrico        |
| 5. Bomba de Transferência     | 11. Filtros Finais                | 17. Cobertura de Aplicação |
| 6. Placa Fluidizadora         | 12. Motor                         | 18. Peças de Trabalho      |

**Fonte: NORDSON CORPORATION (1999)**

De acordo com a Nordson Corporation (1999) o excesso de pulverização (pó que não adere às peças de trabalho (18)) acumula-se nas superfícies externas dos cartuchos filtrantes (7). Os filtros finais (11) removem qualquer pó restante do ar antes de devolvê-lo à sala de pulverização (17).

Quando os cartuchos filtrantes ficam carregados com pó, o operador liga o ar de purga (pulso). As válvulas de pulso (9) se abrem, liberando um grande volume de ar pelos centros dos cartuchos filtrantes. O ar sopra o pó coletado dos cartuchos filtrantes. O pó cai sobre a placa fluidizadora (6) no fundo do coletor. O ar de baixa pressão flui através da placa fluidizadora para fluidificar o pó. A bomba de transferência (5) bombeia o pó fluidizado para o depósito de sucata para descarte ou para um funil alimentador (3) para reutilização.

O ar que transporta o pó para o depósito de sucata ou funil de alimentação, junto com o pó em pó, flui de volta para a cabine através da tubulação de ventilação (2).

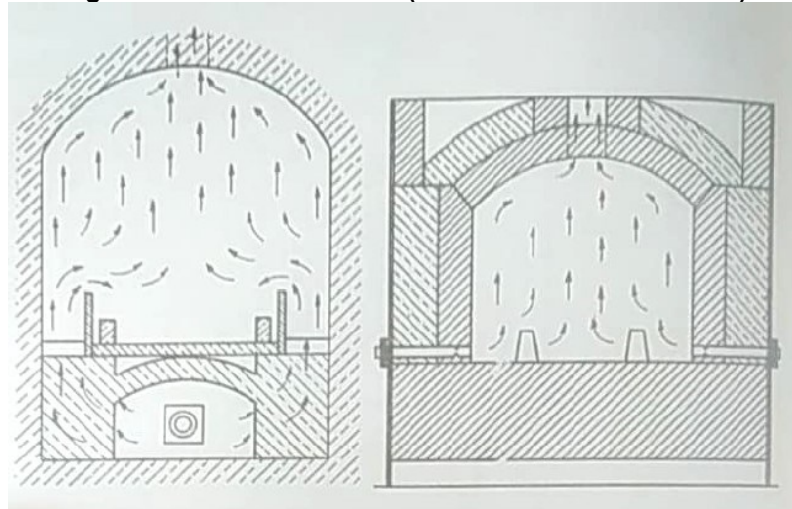
O ar auxiliar de ventilação aumenta o fluxo de ar através da tubulação de ventilação. A ventilação é necessária para evitar um aumento na pressão do ar dentro do depósito de sucata ou funil de alimentação o qual impediria o fluxo de pó. O painel elétrico (16) abriga os comandos do operador e os componentes necessários para operar a cabine, incluindo solenoides de controle pneumático e os temporizadores da válvula de pulso. Todas as outras válvulas e controles pneumáticos estão alojados no painel (14).

## **2.4 Fornos para esmaltação**

Segundo Andrews (1960), as duas grandes classes de fornos para esmaltação são divididas em tipos de fornos mais usuais. Os tipos de forno em caixa (estacionário) são: Caixa em Mufla Inteiriça (Full Muffle Box), Semi-mufla (Semi-Muffle), Intermitente e Mufla Moderna.

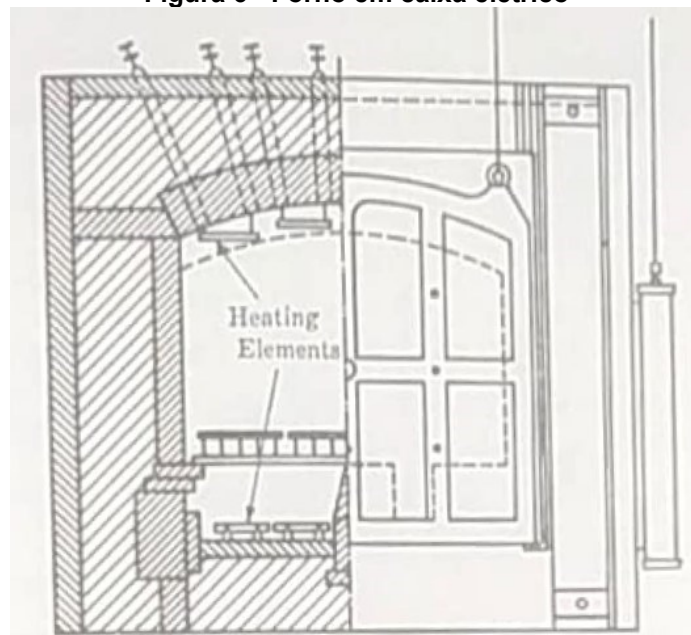
Para a classe dos fornos contínuos, os seus tipos mais usuais são: Circular e Túnel. Os tipos de fornos estacionários tiveram sua evolução quanto ao material combustível utilizado (carvão, gás, óleo ou eletricidade), quanto ao material refratário utilizado (argila refratária, carboneto de silício e aluminada fundida), quanto à existência de mufla, somente o forno intermitente e a mufla moderna de eletricidade não utilizam o sistema de mufla, e quanto à geometria interna (tamanho, localização as zonas de queima, posição dos refratários para a radiação). As figuras 5 e 6 mostram alguns exemplos de fornos em caixa.

**Figura 5 - Fornos em caixa (semi-mufla e intermitente)**



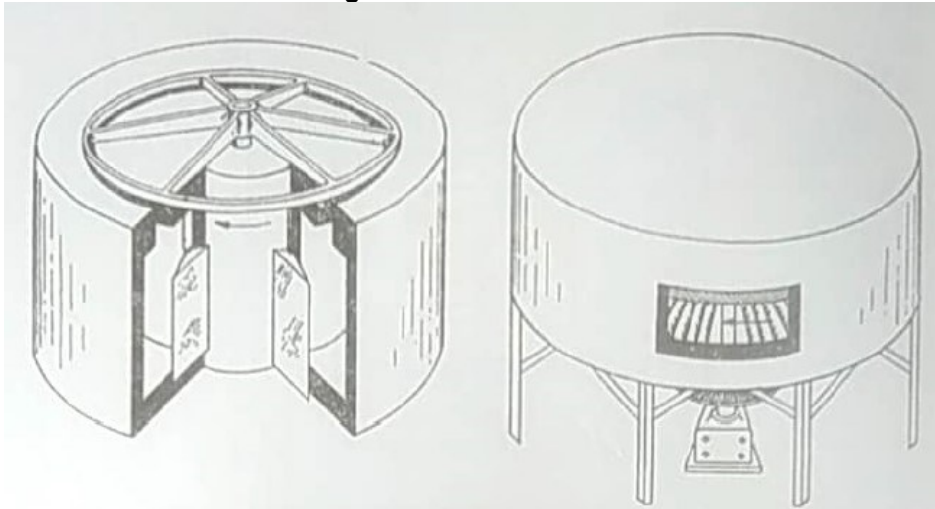
Fonte: ANDREWS (1960)

**Figura 6 - Forno em caixa elétrico**



Fonte: ANDREWS (1960)

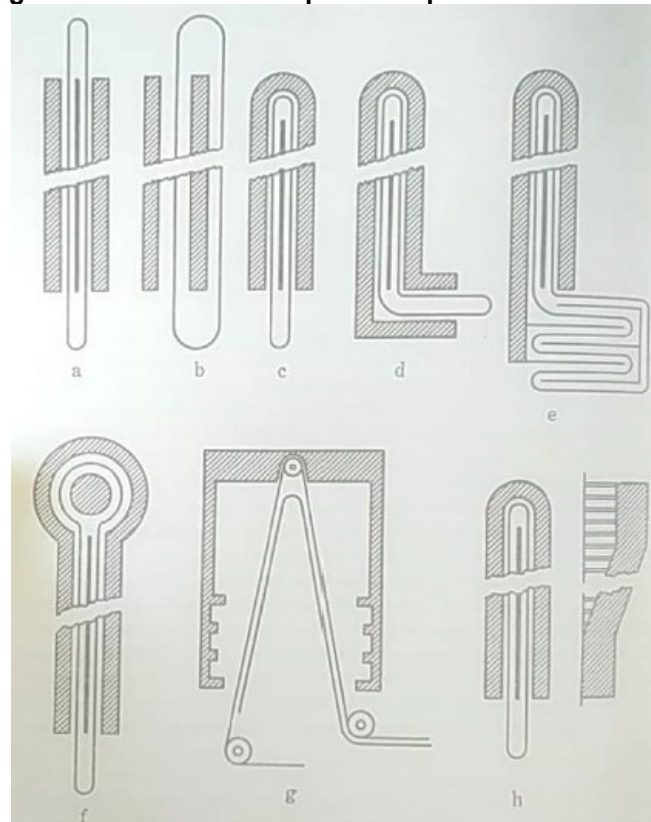
Os fornos contínuos também evoluíram de acordo com as propriedades citadas acima em relação aos fornos de caixa (combustível, material refratário, existência de mufla e geometria interna), porém, os fornos circulares têm somente uma geometria de percurso sendo circular. Estes fornos são carregados e descarregados manualmente, onde as peças são transportadas por trilhos de topo durante o percurso, a Figura 7 mostra um exemplo de forno circular

**Figura 7 - Forno circular****Fonte: ANDREWS (1960)**

Todavia, os fornos do tipo Túnel podem variar além das propriedades já citadas também quanto à geometria do percurso, tipo de carregamento (manual ou automático), velocidade do transporte das peças, troca de calor entre as peças transportadas, tamanho do percurso, tipo de transporte (trilhos ou esteiras), exaustão dos gases internos entre outras propriedades ajustáveis dependendo da demanda específica de esmaltação do objeto (ANDREWS, 1960).

A Figura 8 demonstra alguns dos possíveis percursos para os fornos em Túnel, sendo identificados a partir de sua geometria de trajetória, sem nomenclatura propriamente definida.

**Figura 8 - Geometrias de percurso para fornos em túnel**

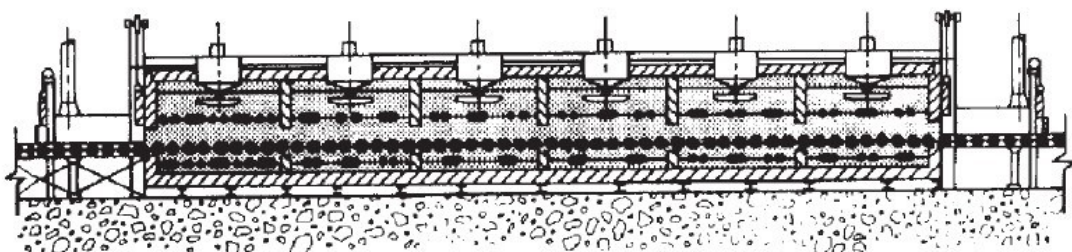


**Fonte: ANDREWS (1960)**

#### 2.4.1 Fornos em túnel por rolos transportadores

A Figura 9 mostra um exemplo de forno em túnel por rolos transportadores contínuo aquecido com tubos em U radiantes posicionados acima e abaixo das cargas nos rolos em vez de um transportador convencional (TRINKS et. al, 2004).

**Figura 9 - Forno em túnel por rolos transportadores**



**Fonte: TRINKS et. al. (2004)**

Segundo Trinks et. al.(2004), algumas cargas estreitas e leves (como telhas e louças) permitem o uso de rolos de cerâmica ou liga em vez de carros de forno.

O empenamento dos rolos pode causar problemas de rastreamento e também resultar na deformação das cargas. Os rolos são feitos de ligas de alta temperatura, mulita, alumina ou carboneto de silício, determinados pela carga, extensão e temperatura selecionada. Às vezes, rolos de vários materiais diferentes são reaproveitados na mesma fornalha. Os rolos usualmente são acionados apenas de uma extremidade, geralmente por uma corrente ou engrenagem. É necessária manutenção regular. As telhas planas geralmente são queimadas diretamente nos rolos;

As peças de carga devem ser distribuídas uniformemente pelos rolos para permitir fluxo de ar e distribuição de temperatura uniformes. Com vários níveis de rolos, o deslocamento das peças de carga pode garantir um fluxo de gás quente mais uniforme ao redor de todas as peças.

## **2.5 Ferro fundido**

Em termos gerais, os ferros fundidos são uma classe de ligas ferrosas que contêm teores de carbono acima de 2,14%p; porém, na prática, a maioria dos ferros fundidos contêm entre 3,0% e 4,5%p C, além de outros elementos de liga.

Um reexame do diagrama de fases ferro-carbeto de ferro revela que as ligas nessa faixa de composições tornam-se completamente líquidas em temperaturas entre cerca de 1150°C e 1300°C, o que é consideravelmente bem inferior se comparadas aos aços. Assim, essas ligas são fundidas com facilidade, e são apropriadas para fundição. Além disso, alguns ferros fundidos são muito frágeis, e a fundição é a técnica de fabricação mais conveniente (CALLISTER Jr., 2020).

### **2.5.1 Ferro fundido cinzento**

De acordo com ASKELAND et. al. (2014) o ferro fundido cinzento é o tipo mais utilizado e é assim chamado pela cor acinzentada e opaca em sua superfície fraturada. A grafita do ferro fundido cinzento pode ocorrer com um gama de morfologias, uma delas é a de veios interconectados. O ponto no qual os veios se conectam é o núcleo de crescimento da grafita. A inoculação facilita a formação de veios menores, o que aumenta a resistência.

Resistências mais elevadas são adquiridas pela redução do carbono equivalente, com o uso de elementos de liga ou por tratamento térmico.



Posto que os veios de grafita concentrem tensão e causam baixa resistência e ductilidade, o ferro fundido cinzento possui propriedades convenientes, alta resistência à compressão, boa usinabilidade, boa resistência ao desgaste, boa resistência à fadiga térmica, boa condutividade térmica e boa capacidade de amortecimento de vibrações.

### 2.5.2 Ferro fundido para esmaltação

Segundo FAUST (2009) ferros fundidos para esmaltação contêm entre 2,8 e 3,7% em peso de carbono; o teor mais frequentemente adotado está entre 3,25 e 3,6% em peso. O carbono é geralmente encontrado em duas formas: carbono grafitico e carbono combinado. Alguns elementos encontrados em adição ao ferro fundido são silício, manganês, enxofre e fósforo. O ferro fundido cinzento é o mais utilizado para fins de esmaltação. Antes da esmaltação, uma peça fundida deve ser limpa, geralmente com jateamento da superfície, com uso de areia ou granalha de aço.

A aptidão dos ferros fundidos para esmaltação é largamente determinada pelo tamanho das partículas de grafita separadas. O tamanho destas partículas depende dos componentes presentes no ferro fundido e a sua proporção.

Para a quantidade de 2,7-2,8% em peso de silício a separação da grafita é máxima. A aptidão do ferro fundido para esmaltação também é positivamente afetada pela presença de manganês na quantidade de 0,4-0,6% em peso. A presença de fósforo afeta a aptidão muito sutilmente numa proporção de ao menos 0,15% em peso. O efeito deletério do enxofre na esmaltação só se manifesta quando sua quantidade supera os 0,2% em peso. Ter controle sobre a presença e quantidade desses elementos é de suma importância para melhorar a qualidade dos produtos esmaltados (SHCHEPOCHKINA, 1995).

## 2.6 Viabilidade econômica

### 2.6.1 Custos de implantação ou investimentos

Segundo Buarque (1984) os investimentos servem para determinar as necessidades financeiras para execução do projeto, colocá-lo em operação e garantir seu funcionamento inicial. Os investimentos necessários para implantação e funcionamento do projeto separam-se em: investimentos fixos e investimentos circulantes.

Os investimentos fixos dependem somente do nível de produção desejado. Os investimentos circulantes requerem um nível efetivo de produção da empresa, seu cálculo necessita conhecimento profundo dos recursos financeiros necessários para que o projeto em questão entre em funcionamento, também engloba a garantia do funcionamento sem risco de escassez de insumos e nem de liquidez (BUARQUE, 1984).

### 2.6.2 Custos de operação

Os custos operacionais são aqueles que se repetem dado um determinado período. Estes custos se dividem em: custos fixos e custos variáveis. Os fixos são aqueles que não dependem estritamente do nível de produção da empresa, por exemplo o custo da mão de obra mensal. Os custos variáveis em contrapartida são umbilicalmente ligados à produção, por exemplo o custo de matéria prima (BUARQUE, 1984).

### 2.6.3 Retorno sobre o investimento

Segundo Saurin et. al. (2013) o equacionamento básico do retorno sobre o investimento (ROI – *Return on Investment*) é obtido pelo lucro antes dos juros e tributos (LAJIR) em relação ao investimento total. O ROI ilustra o retorno sobre o capital próprio com o de terceiros aplicados no empreendimento, como mostra a Equação (1).

Portanto, o ROI é uma forma de medir a rentabilidade permitindo estabelecer uma classificação das empresas e correlacioná-las de acordo com a instituição de avaliação. Em vista que o ROI é um índice percentual, no qual resulta do lucro líquido operacional em relação ao investimento total, não há necessidade de fazer qualquer correção monetária dos respectivos valores. A Equação 1 ilustra a forma equacional do cálculo básico do ROI (SAURIN et. al., 2013).

$$ROI = \frac{LAJIR}{Investimento} \quad (1)$$

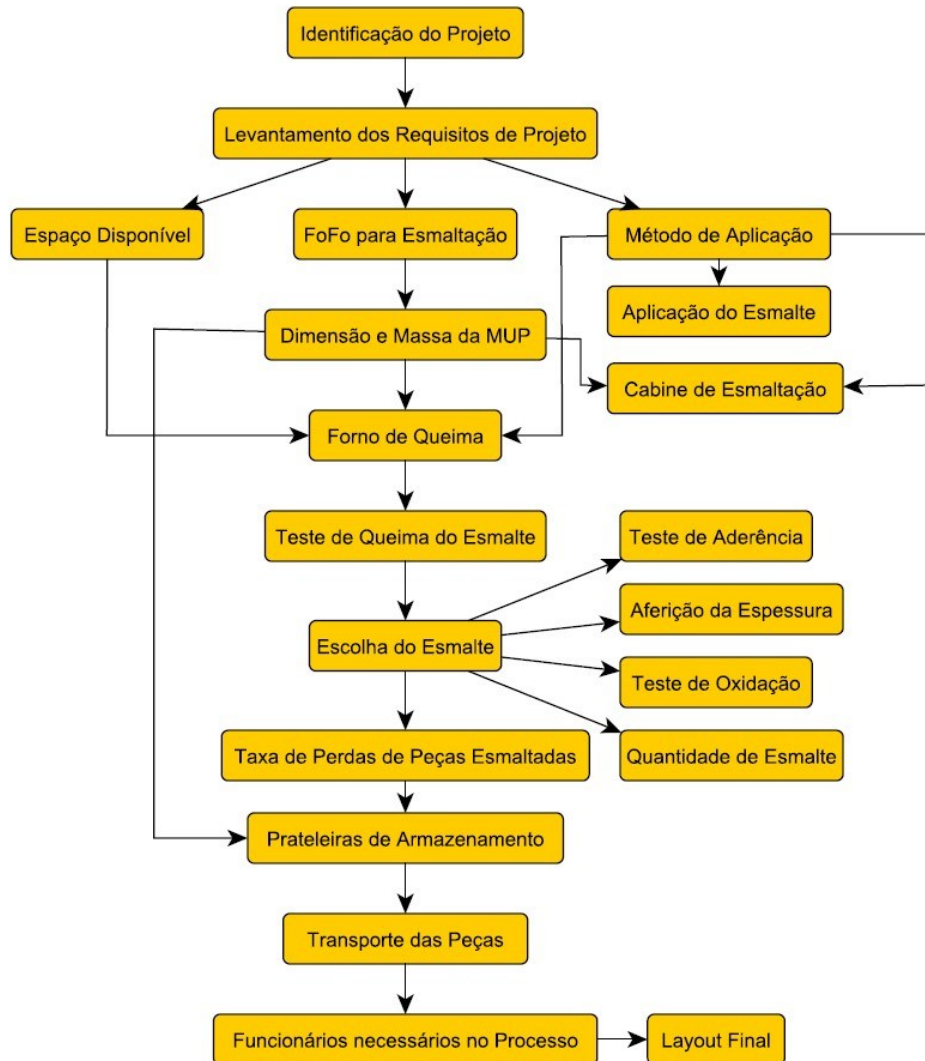
### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia foi dividida em duas partes, a primeira foi voltada para a realização da viabilidade técnica, ou seja, a possibilidade de implantação do processo de esmaltação, e a segunda foi voltada para a viabilidade econômica, onde os custos da implantação do processo de esmaltação foram contabilizados e feita uma estimativa de tempo para o retorno sobre o investimento (ROI).

#### **3.1 Viabilidade técnica do processo de esmaltação**

A viabilidade técnica foi pautada pelo fluxograma metodológico, mostrado na Figura 10, e delineada a partir dele. A primeira etapa foi a identificação do projeto, o que a empresa em questão quer implantar e o porquê. Depois de definidos os parâmetros fundamentais do projeto, foi feita a visita à empresa, para conhecer a instalação física, seu funcionamento e principalmente o produto manufaturado.

**Figura 10 - Fluxograma de viabilidade técnica**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

### 3.1.1 Levantamento dos requisitos de projeto.

A definição dos requisitos de projeto foi feita durante uma visita à empresa e em reunião com os diretores da empresa o que acarretou em três passos paralelos: a delimitação do espaço disponível para implantação do processo, o material das peças que será usado para o processo, e o método de esmaltação a ser utilizado.

### 3.1.2 Medida do espaço disponível

O espaço disponível para instalação do processo foi mensurado simplesmente por uma trena, a qual já possibilitou de maneira adequada o dimensionamento.

### 3.1.3 Ferro fundido para esmaltação

O ferro fundido cinzento usado para esmaltação foi o próprio fabricado pela empresa. A composição do ferro fundido da empresa foi comparado com uma composição ideal para saber se é adequado para a esmaltação ou necessita de ajustes na fundição. A Tabela 1 ilustra a composição em peso do ferro fundido fabricado pela empresa e obtida a partir de uma espectrofotometria de emissão atômica no Laboratório da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

**Tabela 1 - Composição em peso do ferro fundido produzido pela empresa**

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al
3.5075	2.4275	0.5375	0.073	0.0575	0.25625	0.08925	0.02	<0.0010
%Cu	%Co	%Ti	%Nb	%V	%W	%Pb	%Mg	%B
0.186	0.009525	0.0165	<0.0025	0.00665	<0.010	0.005975	<0.0010	<0.0005
%Sn	%Zn	%As	%Bi	%Ce	%Zr	%La	%Fe	%CEQ
0.0295	0.01225	0.0135	0.006725	0.008375	<0.0015	0.00185	92.725	4.34

**Fonte: Aatoria Própria (2022)**

### 3.1.4 Escolha do método de esmaltação e aplicação do esmalte

O método de esmaltação de ferro fundido cinzento pode ser realizado de diferentes maneiras: Imergindo o objeto em uma suspensão aquosa com a frita, pela deposição eletrostática ou por eletroforese. Além do método de aplicação, também foi necessária a seleção da quantidade de camadas aplicadas - uma única camada, ou a aplicação de uma camada de base e outra de acabamento. A quantidade de queimas também foi um parâmetro importante, tendo a possibilidade de queima única ou queima dupla.

Os critérios usados para a seleção do método foram: capacidade de reaproveitamento do esmalte, limpeza do processo, facilidade na aplicação do esmalte, número de camadas necessárias para obtenção do revestimento e número de queimas necessárias.

#### 3.1.4.1 Aplicação do esmalte

A aplicação do esmalte foi feita após a escolha do método em um ambiente aberto. A pistola utilizada para a aplicação é da fabricante Technoavance no modelo PPE004 como é ilustrada na Figura 11.

**Figura 11 - Pistola de aplicação de esmalte**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A aplicação do esmalte foi feita a uma distância de 20 cm, de maneira circular, com uma pressão nominal de saída de 1 bar e uma deposição média de 300 g/min. O equipamento de aplicação usado tem uma potência de 200 W, com um *output* de 70 kV de tensão, a aplicação é demonstrada na Figura 12.

**Figura 12 - Aplicação do esmalte**

**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A imagem da Figura 12 mostra, no centro, a peça sendo revestida, pendurada em uma haste aterrada para garantir a atração eletrostática do pó proveniente da pistola.

### 3.1.5 Dimensão e massa das peças a serem esmaltadas.

Foi possível verificar a dimensão da maior peça esmaltada a partir da definição do material.

As dimensões foram fornecidas pela empresa que também forneceu a massa total da maior unidade de produto final, o que possibilitou a definição da cabine de esmaltação.

Para o dimensionamento da cabine de esmaltação, dos equipamentos utilizados no processo e dimensionamento do forno de queima foi feito o levantamento das dimensões e das massas das peças a serem esmaltadas. A Tabela 2 demonstra as dimensões da Maior Unidade de Produto (MUP) manufaturada pela empresa.

**Tabela 2 - Dimensões e massas das partes relativas à MUP**

QTIDE.	NOME	L (cm)	C (cm)	E (cm)	P (kg)
1	FRENTE	68	36,8	5,2	6,21
1	PORTA DO FOGO	19,4	12,9	2,2	0,83
1	PORTA DO FORNO	39,1	26,7	1,93	3,77
1	TRASEIRA DO FOGÃO	67,9	37	4,6	10,35
4	PÉ	34	16,3	6,2	5,64
1	PORTA DA CINZA	17,1	8,7	2	0,59
1	PORTA DO AR	15,8	8,3	2,7	0,5
1	SUPORTE DO FOGO	13	10	1,4	0,43
1	TAMPA TRASEIRA	9,6		0,6	0,26
4	ESCORA	9,3	2,5	2,8	0,36
1	FUNDO DO FOGÃO	72	47,7	4,3	15,45
1	FUNDO DO FORNO	42,6	35,9	2,1	5,94
1	GRELHA DO FOGO	19,5	42,2	1,3	4
1	GRELHA DO FORNO	41	33,5	0,6	3,66
2	LATERAL DO FOGÃO	42,4	36,7	4,4	11,44
1	LATERAL DO FORNO	42,6	27,7	2,6	4,48
1	LATERAL DO FORNO	42,6	26,7	2,6	4,27
1	TETO DO FORNO	42,6	35,7	3,1	5,95
1	PROTEÇÃO DA LATERAL	42,5	17,5	1,6	2,31
1	REGISTRO	23,8	5,4	1,6	0,43
<b>Total</b>					<b>86,87</b>

**Fonte: Autoria Própria (2022)**

### 3.1.6 Determinação da cabine de esmaltação

Para a escolha da cabine de esmaltação foram considerados os seguintes elementos:

- Dimensão da área útil de aplicação considerando a peça de maior dimensão;
- Dimensão do espaço necessário para fixação da estrutura externa,



- Dimensão do leito fluidizado para o esmalte de acordo com a quantidade de peças produzidas por hora;
- Tipo das pistolas de aplicação do esmalte por custo-benefício;
- Exaustor adequado a quantidade e massa do pó;
- Reaproveitador de pó adequado ao tipo de esmalte.

A cabine de esmaltação foi escolhida de acordo com a maior peça existente na MUP. Assim, a maior parte da MUP é a frente do fogão com largura de 68 centímetros com 36,8 centímetros de comprimento e 5,2 centímetros de espessura. A Tabela 3 exprime os dados de largura, profundidade e altura que a cabine selecionada ClassicStandart 2 possui.

**Tabela 3 - Dimensões da cabine de esmaltação ClassicStandard 2**

<b>Largura</b>	1463 mm
<b>Profundidade</b>	1940 mm
<b>Altura</b>	2810 mm

**Fonte: Autoria Própria (2022)**

As dimensões possuem uma folga bem considerável mesmo selecionando o modelo mais compacto oferecido pela Gema, possibilitando assim até a esmaltação de outras peças de maior porte caso necessário.

A Tabela 4 demonstra os dados técnicos da cabine escolhida. Essa cabine é projetada para produções de pequeno e médio porte de fluxo, o que se enquadra justamente nas características de produção da empresa 3E.

**Tabela 4 - Dados técnicos da cabine ClassicStandard 2**

<b>Nº de elementos filtrantes</b>	2
<b>Volume de extração do exaustor</b>	4000 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Potência efetiva do exaustor</b>	2,2 kW
<b>Tensão nominal</b>	380 V
<b>Frequência</b>	50Hz
<b>Consumo de ar comprimido</b>	15 Nm <sup>3</sup> /h a 6 bar
<b>Ruído</b>	78 dBA
<b>Peso</b>	580 kg
<b>Volume do depósito de resíduo</b>	80 L

**Fonte: Autoria Própria (2022)**

O volume de extração do exaustor pode ser aumentado caso a empresa queira elevar sua produção, trocando o exaustor por outro com volume de extração de 6600 Nm<sup>3</sup>/h.

A Figura 13 ilustra a cabine de esmaltação escolhida. Feita em aço, tem um design compacto com a qualidade de ser altamente flexível para o aplicador.

**Figura 13 - Cabine ClassicStandard 2**



**Fonte: Gema Switzerland GmbH (2022)**

Confeccionada com suporte rolante é capaz de ser movida de lugar com facilidade. É embutida com um sensor de monitoramento do volume extraído pelo exaustor, onde o sensor emite um sinal de luz quando atinge o volume mínimo para a limpeza dos filtros. Trocas de cor também são possíveis com os cartuchos intercambiáveis dos filtros.

### 3.1.7 Dimensionamento do forno e teste de queima do esmalte

Sequencialmente, conhecendo as dimensões das peças, com a massa total e com a quantidade de fogões a ser produzidos por dia, foi possível definir o forno de queima para a esmaltação. O forno de queima pode ser selecionado a partir dos seguintes parâmetros: Contínuo ou estacionário, elétrico ou a gás, dimensões internas e externas úteis, temperatura nominal de operação, energia necessária para operação por hora e o fluxo de massa exigido por hora.

A definição do tipo de forno foi feita em acordo como fornecedor de fornos, o qual tinha uma grande experiência com este tipo de processo, com a professora-orientadora e o aluno orientado.

#### 3.1.7.1 Teste de queima do esmalte

O teste de queima do esmalte foi importante para avaliar se as especificações e condições do forno contínuo selecionado fora feita de maneira adequada. Para o teste de queima foi utilizado um forno estacionário de bancada da fabricante JUNG, conforme a Figura 14.

**Figura 14 - Forno para o teste de queima**

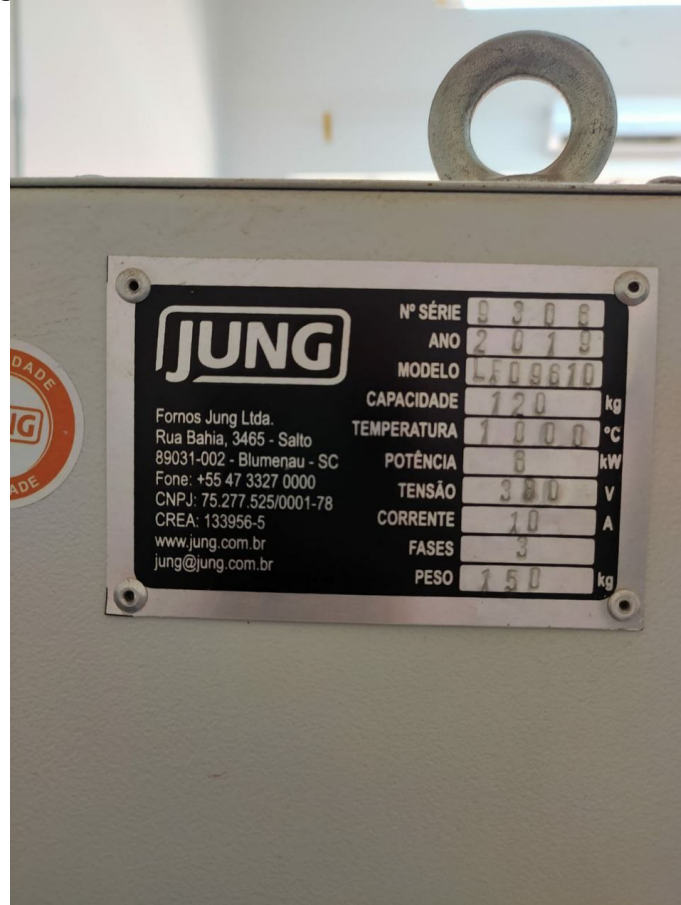


**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Este forno mostrado pela Figura 14 situa-se no laboratório de análises químicas da empresa Aramart Indústria de aramados Ltda em Pato Branco.

O Forno de teste atende à necessidade de temperatura exigida para a queima do esmalte (830 °C) como também suporta com tranquilidade o peso das placas de ferro fundido de teste como é mostrado na Figura 15.

**Figura 15 - Placa de Informações técnicas do forno de teste**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A placa de informações técnicas do forno de teste fica colada na lateral do forno, com boa visibilidade e com todas as informações necessárias para o experimento como indica a Figura 15.

Os testes de queima do esmalte proposto foram conduzidos da seguinte maneira:

- Teste 1:
  - Inserção das placas de teste no forno pré aquecido à 300 °C;
  - Aquecimento livre até 830 °C;
  - Permanência de 8 minutos à 830 °C;
  - Resfriamento livre dentro do Forno até 250 °C;
  - Resfriamento à temperatura ambiente abaixo de 250 °C;

- Teste 2:
  - Inserção das placas de teste no forno pré aquecido à 350 °C;
  - Aquecimento com rampa de 100 °C por minuto até 830 °C;
  - Permanência de 8 minutos à 830 °C;
  - Rampa de resfriamento de 100 °C por minuto até 300 °C;
  - Resfriamento à temperatura ambiente abaixo de 250 °C;

### 3.1.8 Escolha do esmalte

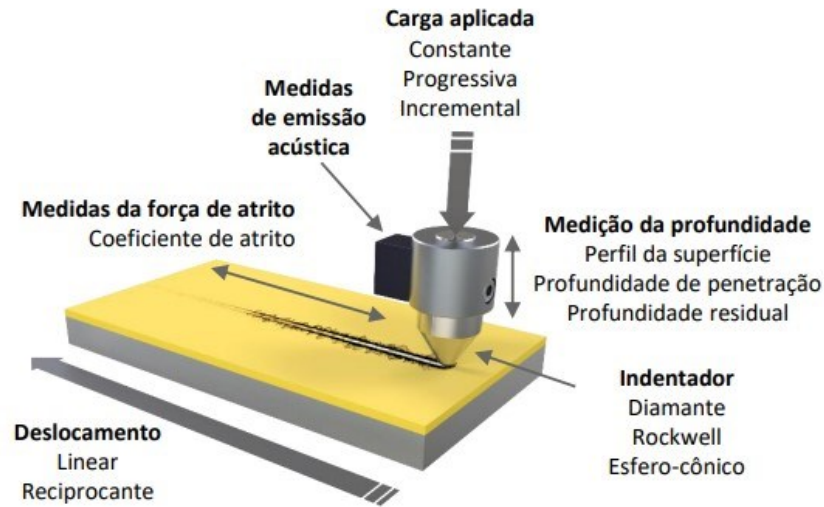
Sucessivamente à definição do forno e ao teste de queima do esmalte foi possível a escolha do esmalte a ser empregado no processo de esmaltação. Existem duas questões a serem atendidas nesse quesito, as características físicas do esmalte e a quantidade necessária por produto. A primeira questão se divide em: cor do esmalte, temperatura de queima, aderência e propriedades mecânicas desejadas pela empresa, por exemplo resistência ao desgaste, resistência à abrasão, resistividade térmica etc.

A segunda é determinar a espessura da camada que será empregada na peça e a área superficial máxima que é referente a maior unidade do produto final. A cor do esmalte foi definida pela empresa. A temperatura de queima escolhida foi retirada das temperaturas nominais utilizadas para queima de esmalte cerâmico, as propriedades mecânicas foram também estabelecidas previamente pela empresa.

#### 3.1.8.1 Teste de aderência do esmalte

A aderência do esmalte foi estabelecida seguindo à norma ASTM C1624 (*Scratch Test*) realizado no laboratório da Anton Paar em São Paulo. Este teste tem como finalidade analisar a adesão e resistência da camada cerâmica em um substrato metálico, o modelo esquemático da montagem da amostra é ilustrado conforme a Figura 16.

**Figura 16 - Modelo do Scratch Test**



**Fonte: Anton Paar (2023)**

Neste método um indetador de diamante sob uma carga aplicada é pressionado e movimentado em linha sobre o material a ser analisado conforme mostra a Figura 16.

O equipamento utilizado para o teste foi o Micro Combi Tester (MCT<sup>3</sup>) da fabricante Anton Paar.

Os parâmetros utilizados no teste foram:

- Indetador tipo Rockwell com raio de 100 $\mu$ m;
- Velocidade do risco de 4 mm/min;
- Comprimento do risco de 2 mm;
- Carga progressiva de 0,3 N até 30 N;
- Critério para carga é a delaminação total.

### 3.1.8.2 Aferição da espessura de camada

A espessura da camada foi definida a partir da esmaltação de peças de teste e realizando uma avaliação da média da espessura em diferentes pontos da peça. A aferição da espessura de camada foi realizada com o medidor de espessura MCT-301 da fabricante Minipa, como mostra a Figura 17. Este medidor realiza a aferição pressionando sua base contra a superfície a ser medida, configurando o aparelho para substrato de ferro e camada de cerâmica, o resultado é dado em micrometro.

**Figura 17 - Medidor de espessura**

Fonte: Minipa (2022)

### 3.1.8.3 Quantidade de esmalte por MUP

A obtenção da quantidade média de esmalte a ser utilizado foi obtida a partir do cálculo da área superficial a ser esmaltada da MUP, multiplicada por um fator quantitativo constante retirado de um banco de dados de uma empresa que utilizava o mesmo esmalte em ferro fundido com o mesmo método de aplicação para uma mesma espessura. A Tabela 5 demonstra as áreas de cada uma das peças que compõem a MUP e também sua área total.

Tabela 5 - Área superficial da MUP

QTIDE.	NOME	L (cm)	C (cm)	A (cm <sup>2</sup> )
1	FRENTE	68	36,8	2502,4
1	PORTA DO FOGO	19,4	12,9	250,26
1	PORTA DO FORNO	39,1	26,7	1043,97
1	TRASEIRA DO FOGÃO	67,9	37	2512,3
4	PÉ	34	16,3	2216,8
1	PORTA DA CINZA	17,1	8,7	148,77
1	PORTA DO AR	15,8	8,3	131,14
1	SUORTE DO FOGO	13	10	130
1	TAMPA TRASEIRA	9,6		72,38
4	ESCORA	9,3	2,5	93
1	FUNDO DO FOGÃO	72	47,7	3434,4
1	FUNDO DO FORNO	42,6	35,9	1529,34
1	GRELHA DO FOGO	19,5	42,2	822,9
1	GRELHA DO FORNO	41	33,5	1373,5
2	LATERAL DO FOGÃO	42,4	36,7	3112,16
1	LATERAL DO FORNO	42,6	27,7	1180,02
1	LATERAL DO FORNO	42,6	26,7	1137,42
1	TETO DO FORNO	42,6	35,7	1520,82
1	PROTEÇÃO DA LATERAL	42,5	17,5	743,75
1	REGISTRO	23,8	5,4	128,52
<b>Total</b>				24083,9

Fonte: Autoria Própria (2022)

Lembrando que a área mostrada na Tabela 5 é metade da área superficial total, pois as peças são simétricas e serão esmaltadas somente em uma face. A Equação 2 exemplifica o cálculo.

$$Q = \beta * Atot \quad (2)$$

Onde Q corresponde à quantidade de esmalte por MUP em dada em kg,  $\beta$  à constante de quantidade de esmalte dada em g/m<sup>2</sup> e Atot corresponde à área superficial total a ser esmaltada da MUP dada em m<sup>2</sup>.

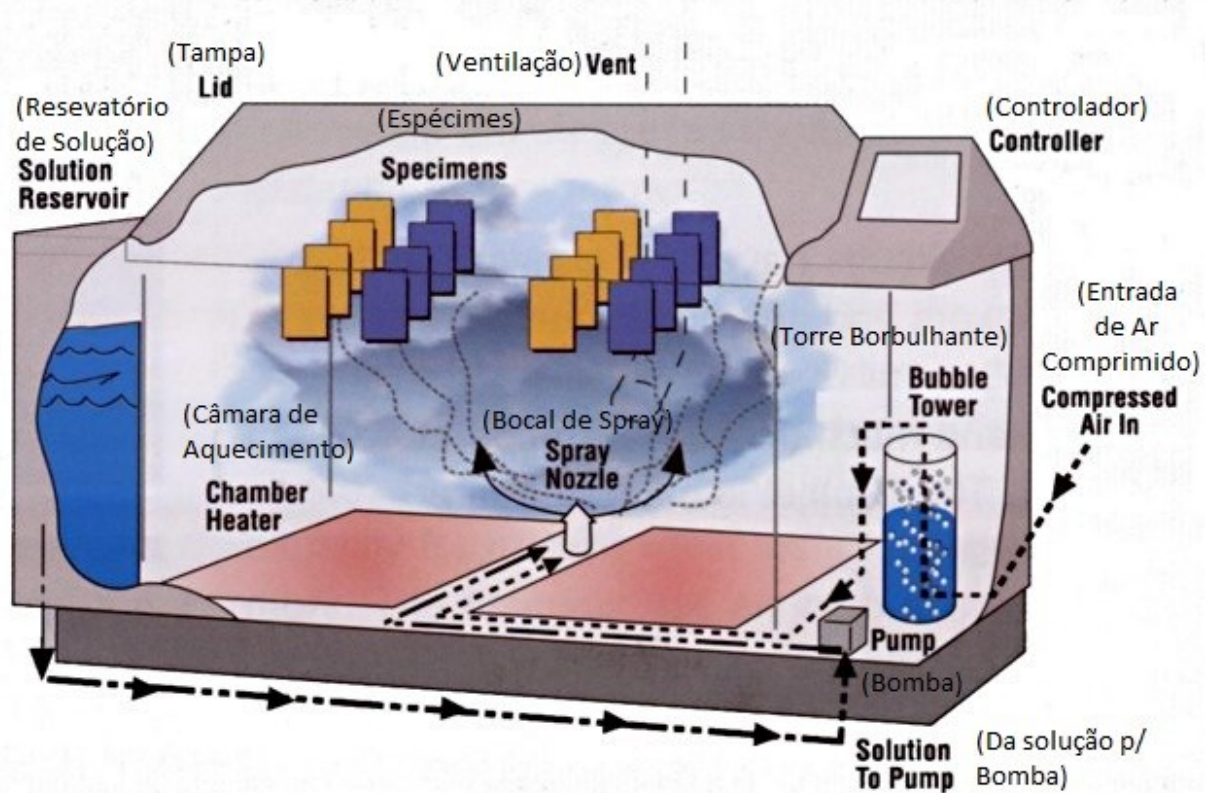
#### 3.1.8.4 Teste de oxidação

O teste de oxidação pelo método de *Salt Spray* (névoa salina) foi feito de acordo com a norma ABNT 8094:83.no laboratório de análises químicas da empresa Aramart Indústria de aramados Ltda em Pato Branco.



Este teste tem como finalidade obter a quantidade de tempo decorrido que a peça teste suporta imersa em solução salina até o início do processo de oxidação na mesma. Um esquema de funcionamento de uma cabine de salt spray está mostrada na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma de funcionamento do teste de Salt Spray



Fonte: HERESITE (2022)

Neste método as peças são colocadas em suspensão na cabine e submetidas à variação de temperatura exercida pela câmara de aquecimento. O bocal de spray pulveriza uma solução salina como o cloreto de sódio por intermédio de uma bomba tornando o meio oxidante. As peças permanecem enclausuradas até que se inicie o processo de oxidação conforme mostra a Figura 18. Ao término é contabilizado o tempo decorrido desde a inserção das peças até o início da oxidação.

O equipamento utilizado para o teste de *Salt Spray*, é o modelo BASS USC da fabricante BASS Equipamentos, somente uma placa foi utilizada para o teste.

Os parâmetros utilizados no teste foram:

- Pressão de Alimentação de 1,2 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Pressão do Ejetor de 1 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Temperatura da câmara de 35 °C;

- Temperatura do saturador 45 °C;
- Solução de cloreto de sódio a 5%;
- Peça pendurada a 45° em relação à base.

### 3.1.9 Taxa de perdas de peças esmaltadas

A partir das etapas anteriores em mãos, foi estipulada uma taxa de perdas de peças esmaltadas referente ao processo, pois todo processo é imperfeito e conseqüentemente foi necessário delimitar um coeficiente extra para cobrir essas eventuais falhas. A taxa foi estipulada de maneira arbitrária só para título de embasamento para o estudo.

### 3.1.10 Prateleiras de armazenamento

Em relação a etapa de obtenção das dimensões das peças, com todas as etapas anteriores concluídas, foi possível determinar as prateleiras de armazenamento para as peças pós esmaltadas. Para estabelecer as prateleiras foi necessário atender aos seguintes requisitos: Quantidade de peças que serão armazenadas, quantidade em massa que a prateleira suporta, as dimensões das peças e o formato da prateleira, podendo esta ser aberta, semiaberta ou fechada.

As quantidades de peças para armazenamento foram estipuladas de forma que uma parte das peças esmaltadas estejam frias e prontas para o uso e a outra parte esteja em processo de resfriamento para assim realizar um fluxo contínuo de peças, com essa quantidade foi estabelecido uma quantidade mínima de suporte em massa da prateleira. O formato escolhido foi de acordo com o critério de melhor resfriamento com o tempo.

### 3.1.11 Transporte das peças

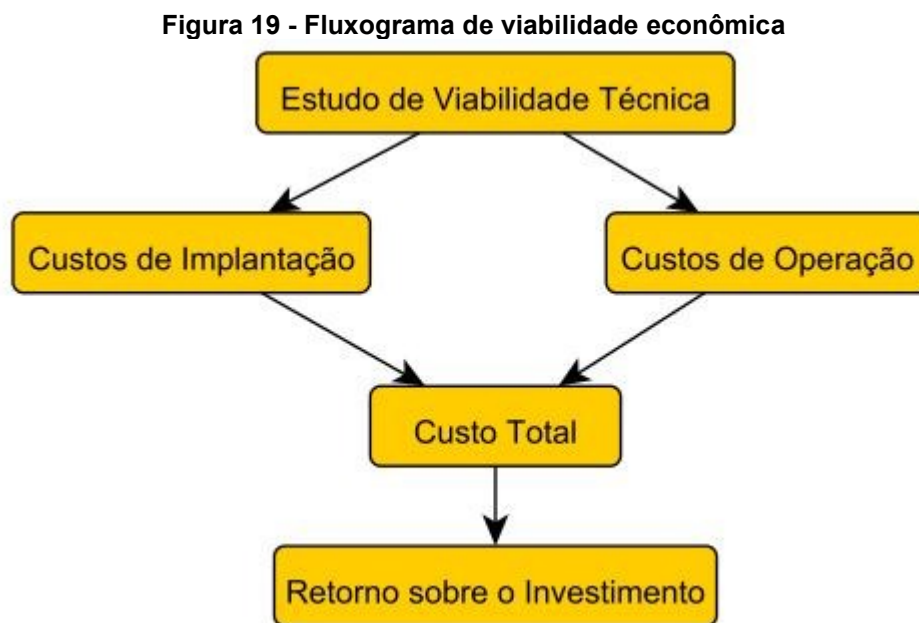
Após a obtenção das prateleiras, foi definido o transporte das peças, podendo ser executado manualmente, por empilhadeiras ou esteiras rolantes. O transporte selecionado foi feito de acordo com o menor custo possível, o mínimo de traslado necessário e o mínimo de funcionários necessários.

### 3.1.12 Funcionários necessários no processo

Foram definidos os funcionários necessários na atuação do processo de esmaltação, sendo exigidos funcionários na função do transporte das peças, na operação do forno, na aplicação do esmalte, na inspeção de qualidade das peças e no armazenamento.

### 3.2 Viabilidade econômica do processo de esmaltação

Concluída a parte da viabilidade técnica do processo de esmaltação, a partir dela foi possível realizar a contabilidade dos custos envolvidos em tal processo. É importante frisar que a viabilidade econômica, assim como a viabilidade técnica, foi pautada pelo fluxograma metodológico ilustrado pela Figura 19.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Primeiramente, os custos foram divididos em duas categorias distintas, os custos de implantação e os custos de operação. Nos custos de implantação se enquadram o forno de esmaltação para a queima, a cabine de esmaltação completa, as prateleiras de armazenamento e o dispositivo utilizado para o transporte das partes esmaltadas do produto final. Na categoria dos custos de operação foram alocados o consumo energético, a quantidade de esmalte média mensal e os salários dos funcionários.

### 3.2.1 Custos de implantação

De acordo com o item acima que delineou quais partes os custos de implementação abarcam, o custo do forno de esmaltação foi obtido a partir de um orçamento feito com um fabricante de fornos da Argentina, pois no Brasil a fabricação de fornos para esmaltação é muito limitada, o qual fabrica fornos de acordo com as necessidades específicas de cada cliente, o que era absolutamente necessário já que o projeto é sob medida e precisa de certas especificidades técnicas.

O custo da cabine completa de esmaltação foi extraído a partir de um fabricante de equipamentos de esmaltação suíço, porém que possui uma sede de revenda no Brasil, tanto a estrutura externa, quanto as pistolas de aplicação, a cama fluidizada, o exaustor e o reaproveitador de pó foram fornecidos pelo mesmo fabricante, o aterramento da base pode ser feito de maneira simples pelo próprio cliente.

As prateleiras foram custeadas a partir de um fabricante próprio de prateleiras para armazenamento de metais. O custo do transporte foi calculado a partir do meio selecionado.

### 3.2.2 Custos de operação

Após delineados os custos de implantação, o próximo passo foi o estabelecimento dos custos de operação. Para que os custos sejam demarcados de maneira a facilitar a visualização do custo total, os custos tanto do consumo energético quanto da quantidade de esmalte foram normalizados por uma média mensal. O custo médio mensal do consumo energético foi calculado a partir da multiplicação do gasto energético por hora fornecido pelo fabricante de fornos pela quantidade de horas de funcionamento do forno no mês pelo preço da tarifa de energia de Curitiba.

O custo da quantidade de esmalte foi calculado a partir da multiplicação do preço por kg fornecido pelo fabricante de esmalte, em função do peso médio de esmalte necessário por mês, já o custo salarial dos funcionários foi retirado de um banco de dados de salários-base no sistema CLT.

### 3.2.3 Custo total

O custo total foi obtido pela somatória dos custos de implantação e dos custos de operação.

### 3.2.4 Retorno sobre o investimento

Finalmente, o tempo de retorno sobre o investimento do processo foi calculado a partir da divisão do custo total por um valor revertido do lucro de venda de cada unidade de produto, sendo este valor multiplicado pela quantidade de produtos produzidos em um mês. Essa divisão forneceu o tempo em meses para que a empresa cobrisse todo seu investimento inicial para implantação do processo de esmaltação agregado ao pagamento dos custos de operação mensais. A Equação 3 exemplifica matematicamente o cálculo para a obtenção da quantidade de meses necessários para atingir o retorno sobre o investimento.

$$ROI = \frac{CT}{LRU * QM} \quad (3)$$

Onde ROI é o retorno sobre o investimento em meses, CT é o custo total em reais, LRU é o lucro revertido unitário dos fogões em reais e QM é a quantidade média de fogões feitas por mês.

Parte principal do trabalho, que contém a exposição ordenada e pormenorizada do assunto. É composta de revisão de literatura, dividida em seções e subseções, material e métodos e/ou metodologia e resultados, agora descritos detalhadamente. Cada seção ou subseção deverá ter um título apropriado ao conteúdo.

Deve-se utilizar sempre a terceira pessoa do singular na elaboração do texto, mantendo-se a forma impessoal.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados de acordo com os fluxogramas metodológicos tanto para a parte da viabilidade técnica, Figura 10, como para a viabilidade econômica, Figura 19.

### 4.1 Viabilidade técnica do processo de esmaltação

#### 4.1.1 Levantamento dos requisitos de projeto.

Uma visita à empresa teve como objetivo o levantamento dos requisitos de projeto desejados pelos proprietários, como também a observação do processo produtivo e o espaço disponível para a implementação do processo de esmaltação.

Os parâmetros designados para o projeto foram:

- Espaço útil para a implementação é de 22 metros de comprimento por 6 metros de largura;
- O material a ser esmaltado é o próprio ferro fundido que a empresa fabrica;
- As peças são esmaltadas somente em uma de suas faces;
- A cor deve ser o preto fosco;
- O processo deve ser a esmaltação a pó, porém a quantidade de camadas e queimas é de livre escolha;
- O fluxo de material deve ser uma média de 8 MUP por hora;
- O forno deve ser elétrico;
- As propriedades requeridas do esmalte são: Resistência à abrasão (riscos), homogeneidade da camada aplicada, resistência à oxidação e boa adesão ao metal.

#### 4.1.2 Espaço útil para Instalação do processo de esmaltação

A delimitação do espaço útil para a instalação do processo foi designada pelos proprietários da fábrica. O espaço consiste em um comprimento de 22 metros e uma largura de 6 metros.

O espaço é coberto por parede do lado esquerdo e próximo da linha de manufatura do fogão para facilitar o fluxo de produtos.

#### 4.1.3 Definição do ferro fundido cinzento para esmaltação

O ferro fundido utilizado para o processo de esmaltação é de fabricação própria da empresa. A composição do ferro fundido está ilustrada pela Tabela 1 no item 3.1.3 da metodologia.

A Tabela 6 ilustra as porcentagens em peso dos principais elementos que constituem um ferro fundido ideal para a esmaltação.

<b>%C</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>	<b>%Fe</b>
2,2 - 3,7	1,0 - 2,9	0,2 - 1,0	0,02 - 0,3	0,02 - 0,3	Rem.

**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Em uma comparação direta foi verificado que o ferro fundido fabricado na empresa tem as composições dentro da faixa ideal e, portanto, está apto para a esmaltação.

#### 4.1.4 Método de esmaltação

O método de esmaltação por deposição eletrostática foi o escolhido para ser realizado, essa escolha já fora determinada pelos clientes na etapa de definição dos parâmetros do projeto. Esse método foi escolhido pela sua facilidade de aplicação, seu baixo custo relativo a uma grande produção, alta taxa de aproveitamento do esmalte também como sua reciclagem e baixa geração de resíduos

#### 4.1.5 Aplicação do esmalte

A aplicação do esmalte nas placas de teste foi executada de acordo com o item 3.1.4.1 da metodologia. A Figura 20 ilustra como as peças ficaram pós aplicação.

A aplicação apresentou bons resultados, apresentando homogeneidade de esmalte ao longo das peças de teste, boa adesão nas partes irregulares com curvaturas e pouca perda de pó por queda devido à gravidade ou má ionização do pó.

**Figura 20 - Peças de teste pós aplicação do esmalte**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

#### 4.1.5.1 Pistola de aplicação

A pistola de aplicação foi selecionada de acordo com a fabricante mais capacitada para o fornecimento de equipamentos confiáveis e de alta qualidade. Como a cabine fora selecionada da fabricante Gema, não poderia ser diferente que a pistola também seria da mesma fabricante, pela sua reputação de excelência na fabricação de equipamentos para esmaltação a pó e seu custo-benefício.

A Figura 21 ilustra a pistola selecionada para o processo de esmaltação manual a pó. A pistola vem em um sistema acoplado de leito fluidizado e pistola OptiFlex 2 FE, da fabricante Gema. Este sistema acoplado já está pronto para o uso no processo de aplicação do esmalte, com ajuste fino de parâmetros.



**Figura 21 - Pistola de aplicação com leito fluidizado OptiFlex**



**Fonte: Gema Switzerland GmbH (2022)**

As dimensões específicas externas e o consumo de ar comprimido do sistema de aplicação de esmalte estão demonstrados na Tabela 7.

<b>Tabela 7 - Dimensões OptiFlex 2 FE</b>	
<b>Largura</b>	460 mm
<b>Comprimento</b>	832 mm
<b>Altura</b>	1105 mm
<b>Volume do Leito</b>	50 L
<b>Peso</b>	47 kg
<b>Consumo de ar comprimido</b>	7.5 Nm <sup>3</sup> /h

**Fonte: Aatoria Própria (2022)**

A Tabela 8 expõe as especificações técnicas do acoplamento pistola-leito fluidizado para aplicação do esmalte.

**Tabela 8 - Especificações técnicas OptiFlex 2 FE**

<b>Tensão nominal</b>	100 - 240 V
<b>Frequência</b>	50 - 60 Hz
<b>Temperatura de Trabalho</b>	0 - 40 °C
<b>Pressão máxima de trabalho</b>	10 bar / 145 psi
<b>Pressão mínima de trabalho</b>	5,5 bar / 80 psi
<b>Quantidade máxima de vapor de água do ar comprimido</b>	1,3 g/Nm <sup>3</sup>
<b>Quantidade máxima de vapor de óleo do ar comprimido</b>	0,1 mg/Nm <sup>3</sup>

Fonte: Autoria Própria (2022)

Este equipamento selecionado encontra-se no nível de estado da arte em questão de design e alta *performance* para aplicação de esmalte em pó. É compatível com todos os tipos de pó de esmalte do mercado e tem ótimos resultados mesmo em geometrias complexas.

#### 4.1.6 Forno de queima

De acordo com os parâmetros citados no item 4.1.1, em um diálogo com o fornecedor de fornos Hernan da fabricante Patagonic Gás, um forno específico foi estabelecido para o projeto.

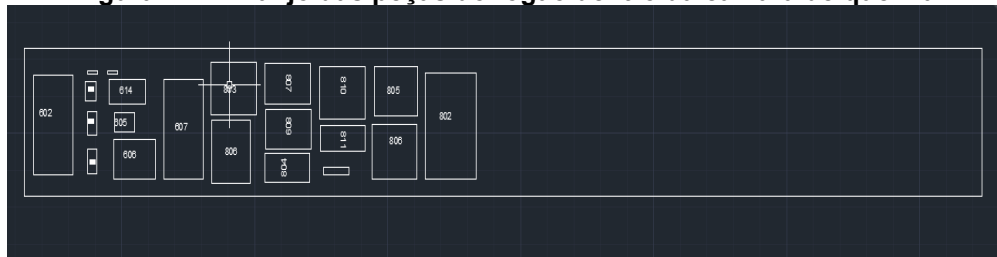
O forno decidido tem as seguintes especificações:

- Forno elétrico contínuo de passagem linear com rolos com suporte para 800 kg por hora;
- Resistências elétricas somente no topo do forno;
- Largura útil de 1000 mm e altura útil de 100 mm para o bocal de entrada e saída do forno;
- Potência de 37,5 kW por metro de câmara de queima;
- Comprimento da câmara de queima de 9 m, resultando numa potência necessária do forno de 340 kW;
- Comprimento de 2 metros para a pré-câmara de aquecimento e 4 m de comprimento para pré câmara de resfriamento;
- Velocidade de translação de 1 a 1,2 m/min, com permanência média dentro da câmara de queima de 8,1 min;
- 2 motores de translação;

- 7 rolos de mulita por metro linear de forno para que a carga por unidade de mulita seja em uma média de 4 kg, com rolos de 32 mm diâmetro cada;
- Comprimento da rampa de entrada de 1 m e comprimento da rampa de saída de 2 m;
- Comprimento total do forno de 18 m.

De acordo com a Figura 22, a qual mostra um arranjo ideal das peças de uma MUP dentro da câmara de queima em proporções reais, é notável que a capacidade de queima de peças por passada é superior à duas MUP se bem distribuídas as peças.

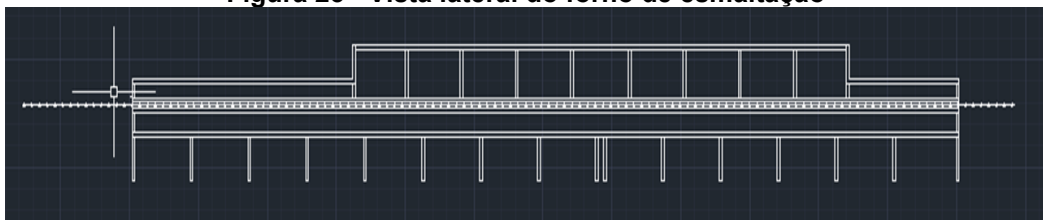
**Figura 22 - Arranjo das peças do fogão dentro da câmara de queima**



**Fonte: Patagonic Gás (2022)**

A Figura 23 abaixo é referente à vista lateral do forno lateral projetado em escala, com a sua entrada à direita e sua saída à esquerda.

**Figura 23 - Vista lateral do forno de esmaltação**



**Fonte: Patagonic Gás (2022)**

#### 4.1.7 Teste de queima do esmalte

Em retrospectiva aos parâmetros utilizados na secção 3.1.7.1, os parâmetros utilizados para o primeiro teste foram: inserção das placas de teste no forno estacionário pré aquecido à 300 °C, aquecimento livre até a temperatura de 830 °C, permanência de 8 minutos à temperatura de 830 °C; resfriamento livre dentro do forno até 250° C, resfriamento à temperatura ambiente abaixo de 250 °C.

Este primeiro teste teve o intuito de fazer uma imitação com o forno discutido e projetado sem a condição de uma rampa específica de temperatura, mesmo assim o forno utilizado da fabricante JUNG demorou em torno de 3 minutos para elevar a temperatura de 250 °C para 830 °C. O tempo de resfriamento não foi cronometrado pelo fato do forno ser fechado e estacionário, portanto com um resfriamento muito inferior ao forno projetado. A Figura 24 ilustra uma placa grande esmaltada a qual é um componente dos fogões manufacturados na empresa 3E.

**Figura 24 - Placa grande esmaltada no primeiro teste**



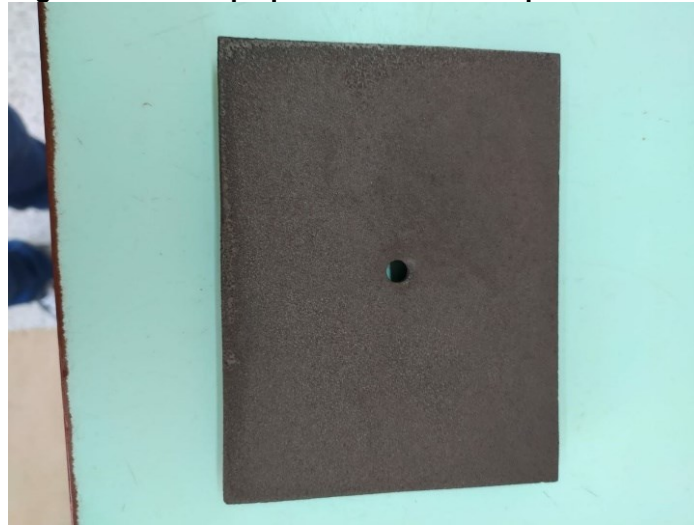
**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Esta placa, Figura 24, apresenta uma boa tonalidade referente à cor que o cliente necessita, a queima foi completa e não houve trincas ou rachaduras no esmalte.

A diferença de coloração na placa é resultado de uma diferença na espessura da camada de esmalte aplicado, essa diferença ocorreu pois as placas de teste só foram tratadas superficialmente em relação às graxas e sujeiras, porém não foram lixadas nem polidas, então a rugosidade superficial tem influência na espessura de camada gerando um gradiente de coloração.

A Figura 25 mostra o resultado da esmaltação pelo método do primeiro teste em uma placa pequena que também é um componente dos fogões manufacturados na 3E.

**Figura 25 - Placa pequena esmaltada no primeiro teste**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A placa pequena, Figura 25, apresenta uma boa coloração, tanto em relação à cor desejada quanto a homogeneidade, a queima foi completa e não houve trincas ou rachaduras no esmalte. Existem algumas falhas nas bordas por serem cantos vivos, os quais são mais difíceis de sofrerem aderência do esmalte.

Da mesma forma, em retrospectiva aos parâmetros utilizados na seção 3.1.7.1, os parâmetros utilizados para o segundo teste foram: inserção das placas de teste no forno estacionário pré aquecido a temperatura de 350 °C, aquecimento até a temperatura de 830 °C com rampa de aquecimento de 100 °C por minuto, permanência de 8 minutos à temperatura de 830 °C, resfriamento forçado de 100 °C por minuto até 300 °C, resfriamento ao ar livre abaixo de 300 °C.

Este segundo teste teve o intuito de realizar um processo mimético ao de queima do forno projetado, contudo, agora com rampas de aquecimento e resfriamento para uma imitação mais fidedigna do processo idealizado.

A rampa de aquecimento é mais baixa que a idealizada por consequência das limitações do forno estacionário como também a rampa de resfriamento, que mesmo forçosamente designada à temperatura de 100 °C por minuto, teve um tempo de resfriamento maior. A Figura 26 refere-se à placa grande esmaltada pela metodologia do segundo teste.

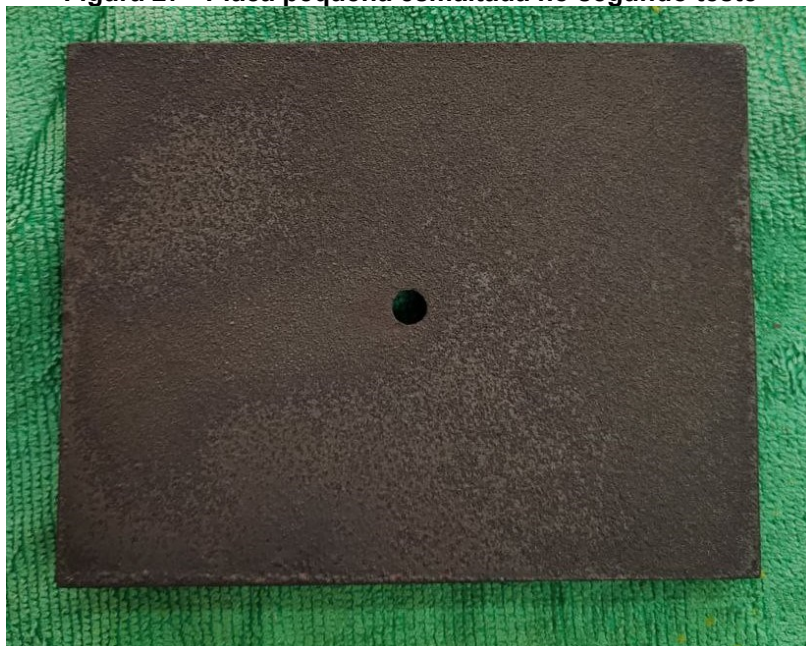
**Figura 26 - Placa grande esmaltada no segundo teste**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

Esta placa, Figura 26, apresenta uma coloração um pouco mais clara que a placa do primeiro teste, porém com uma homogeneidade muito mais evidente. Essa coloração é resultante de uma camada mais espessa que a placa grande do primeiro teste. Novamente a queima foi completa e não houve trincas nem rachaduras no esmalte. Contudo, como notado nas peças anteriores ainda há um gradiente de tonalidade pela falta de lixamento e polimento da superfície. A Figura 27 representa a esmaltação da placa pequena pela metodologia do segundo teste.

**Figura 27 - Placa pequena esmaltada no segundo teste**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A coloração mais escura define uma camada menos espessa que a camada da placa grande, existe um grande gradiente de cor, o que evidencia a má distribuição do esmalte na peça devido a superfície rugosa e não descartando a possibilidade de uma aplicação pouco eficiente. A queima foi completa, não apresentaram trincas ou rachaduras no esmalte, porém como notado na placa pequena do primeiro teste, há também falhas nas bordas devido aos cantos vivos.

Portanto, observando os resultados da aplicação das duas metodologias no que tange à queima do esmalte com o intuito de um processo análogo ao proposto pelo forno projetado, é inferido que o processo como fonte reprodutora da idealização pretendida é satisfatório, porém para uma melhoria significativa dos resultados serão necessários lixamentos e polimentos nas superfícies das placas como também um processo mais atento e rigoroso de aplicação do esmalte.

#### 4.1.8 Escolha do esmalte

O esmalte de teste escolhido foi o pó eletrostático preto VPD – 324 da fabricante Vasisque Novus. Existem somente duas fabricantes de pós eletrostáticos no mercado brasileiro, a Vasisque Novus e a Vibrants. Este pó foi escolhido pelo seu menor preço e maior disponibilidade. A composição química do pó é dada pela Tabela 9.

**Tabela 9 - Composição química do esmalte teste**

<b>Componente</b>	<b>%</b>
Óxido de alumínio	0 - 6
Óxido de Bário	0 – 4,5
Óxido de Cobalto II	0 – 2
Óxido de Manganês IV	0 – 40
Óxido de Sílica	15 – 70
Óxido de Sódio	5 – 25
Óxido de Fósforo	0 – 3
Óxido de Cromo III	0 – 2
Óxido de Ferro III	0 – 4
Óxido de Níquel II	0 – 5
Óxido de Cobre II	0 – 10
Óxido de Potássio	1 – 10
Óxido de Boro	10 – 31
Óxido de Zircônio	0 – 10
Óxido de Cálcio	2 – 18
Óxido de Antimônio	0 – 1,3

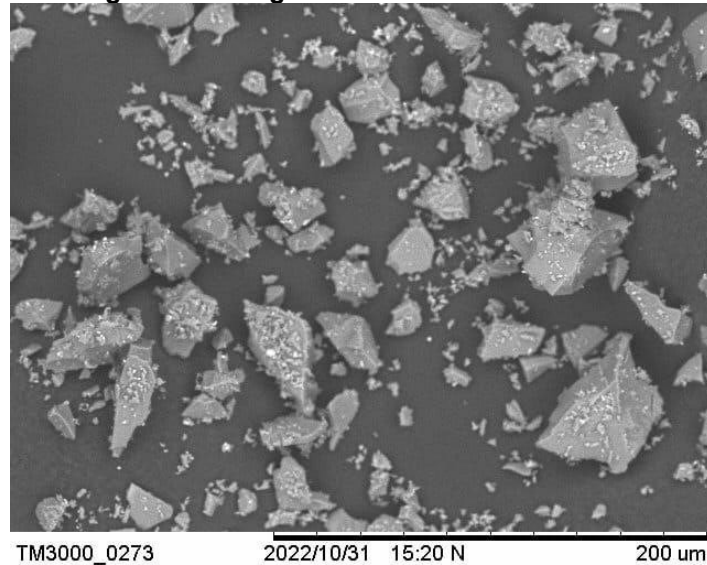
**Fonte: Autoria Própria (2023)**

O esmalte escolhido para o teste de aplicação e queima tinha a possibilidade de ser efetivado como um esmalte viável para o processo. Após a aplicação, o esmalte de teste teve bons resultados em relação à aderência ao substrato como também boa fluência no momento da aplicação.

Efetuada a queima do esmalte foi evidenciado que o esmalte reagiu bem a queima, a cor pós queima é a cor requerida para o processo e não houve problemas relacionados as qualidades intrínsecas do esmalte. Assim, se o esmalte obtivesse bons resultados nos testes de oxidação e aderência, não haveria a necessidade de uma busca posterior por um outro esmalte. A Figura 28 representa uma fotografia retirada de uma microscopia eletrônica de varredura (MEV) sobre o esmalte teste.



**Figura 28 - Imagem MEV do esmalte de teste**



**Fonte: UTFPR (2022)**

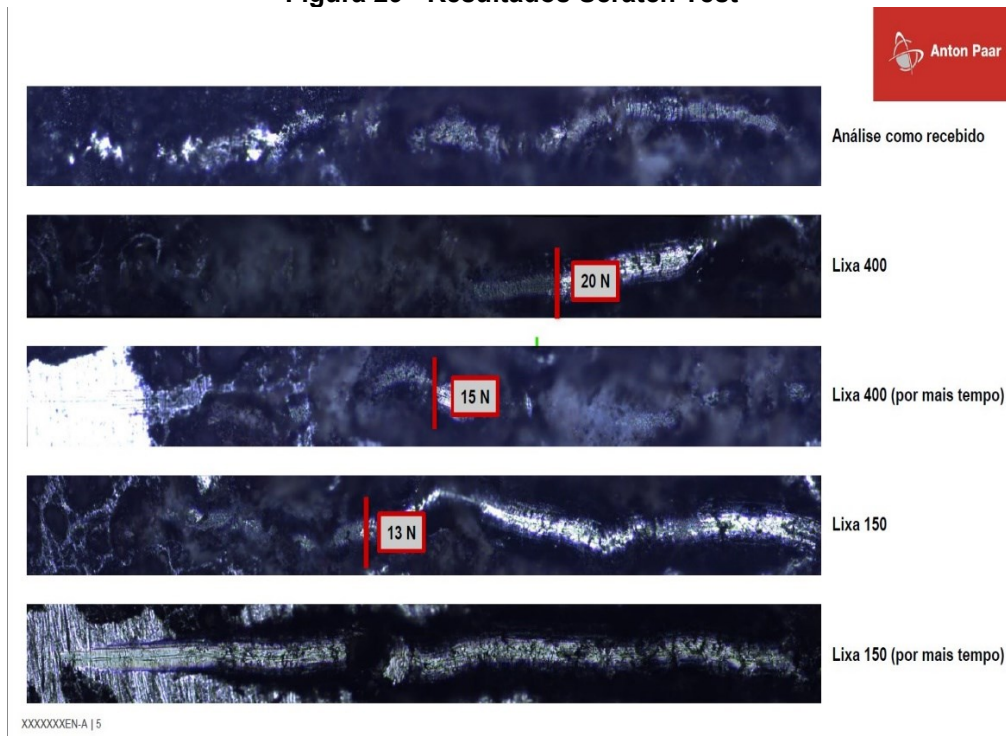
A partir desta imagem, Figura 28, é possível inferir que os tamanhos de partícula variam desde uma malha mais grosseira *Mesh* 40 ( $d < 420 \mu\text{m}$ ) até uma malha bem fina *Mesh* 400 ( $d < 37 \mu\text{m}$ ). Não foi feito um teste específico para granulometria mas há indícios que a média gaussiana fique em torno de uma malha média com *Mesh* 200 ( $d < 74\mu\text{m}$ ), uma granulometria aceita como boa em referência a um instituto renomado como o *Porcelain Enamel Institute* (PEI).

Outros dados empíricos que corroboram com esta dedução estão na observação da aplicação do pó, o cujo quase não refletiu as partículas quando aplicadas, onde a reflexão é uma característica demonstrativa de que a granulometria das partículas é muito fina, como também não houve queda significativa do esmalte devido à gravidade ou má ionização, onde a queda ou a má ionização indicam partículas muito grosseiras.

#### 4.1.8.1 Teste de aderência

A Figura 29 ilustra os resultados obtidos a partir do *Scratch Test* realizado de acordo com a metodologia descrita no item 3.1.8.1. De acordo com o técnico responsável pela realização do teste, Gustavo Bispo, a amostra original teve dificuldades de ser propriamente analisada devido a sua rugosidade superficial.

**Figura 29 - Resultados Scratch Test**



**Fonte: Anton Paar (2023)**

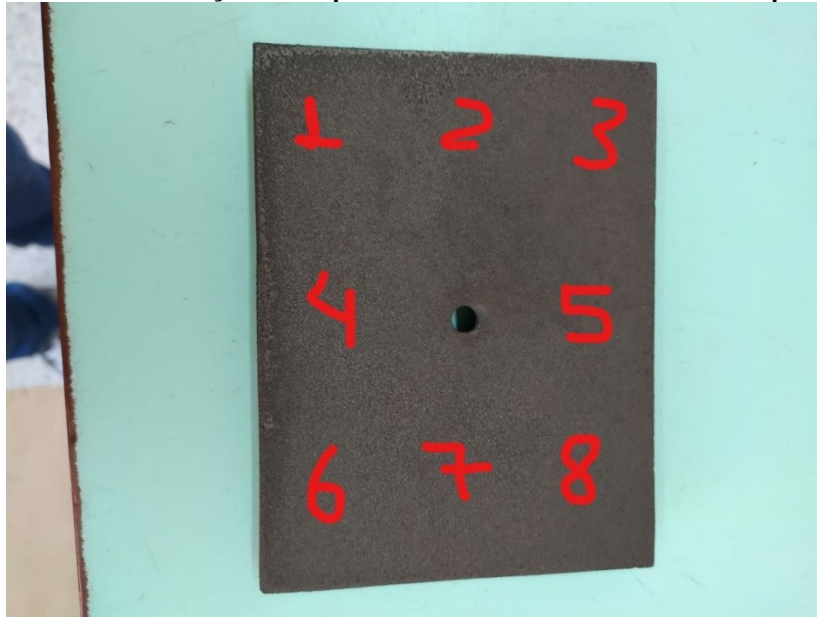
Portanto foram feitas lixações com lixas 400 e 150. Com a lixa 400 foi possível obter um resultado congruente. As lixações posteriores melhoraram a aplicação do teste, porém em detrimento da camada de esmalte que foi deteriorada a cada lixagem conforme mostra a Figura 29.

A partir do resultado do teste com a lixagem feita com a lixa 400, no qual foi necessária uma força de 20 N para a total descamação do esmalte, é possível estabelecer que o esmalte de teste teve sucesso no teste, segundo o operador uma força de 20 N é altamente resistente, o que satisfaz a condição de uma boa adesão tanto em estado incólume quanto caso sofra algum impacto abrasivo.

#### 4.1.8.2 Aferição da espessura de camada de esmalte

A aferição das espessuras da camada de esmalte foi efetuada de acordo com pontos específicos demarcados na peça como mostra a Figura 30. Após a aferição em cada ponto, foram realizadas a média e o desvio padrão para uma noção geral.

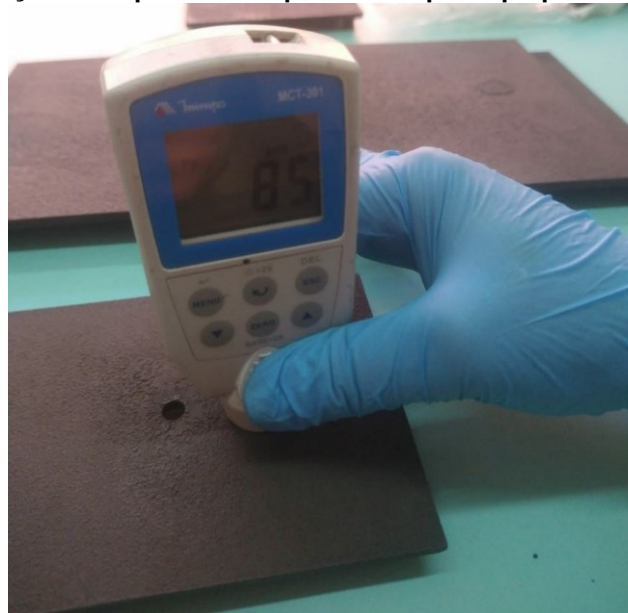
**Figura 30 - Pontos de aferição da espessura da camada de esmalte da placa pequena**



Fonte: Autoria Própria (2023)

O exemplo de como a aferição foi feita é demonstrado pela Figura 32. Nesta figura a espessura do ponto 5 foi obtida, a qual tem 85  $\mu\text{m}$ .

**Figura 31 - Aferição da espessura do ponto 5 da placa pequena do primeiro teste**



Fonte: Autoria Própria (2022)

A exposição de uma imagem para cada medida seria um excesso de imagens para os fins deste trabalho, portanto, somente será informado o dado obtido para cada ponto das placas, a média final e o desvio padrão.

Os resultados da aferição das espessuras da camada de esmalte da placa pequena do primeiro teste são demonstrados pela Tabela 10.

**Tabela 10 - Espessuras de camada de esmalte da placa pequena do primeiro teste**

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8
Espessura ( $\mu\text{m}$ )	88	109	94	90	85	91	75	80
Média ( $\mu\text{m}$ )	89							
Desvio Padrão P	9.513149							

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados da aferição das espessuras da camada de esmalte placa pequena do segundo teste são demonstrados pela Tabela 11.

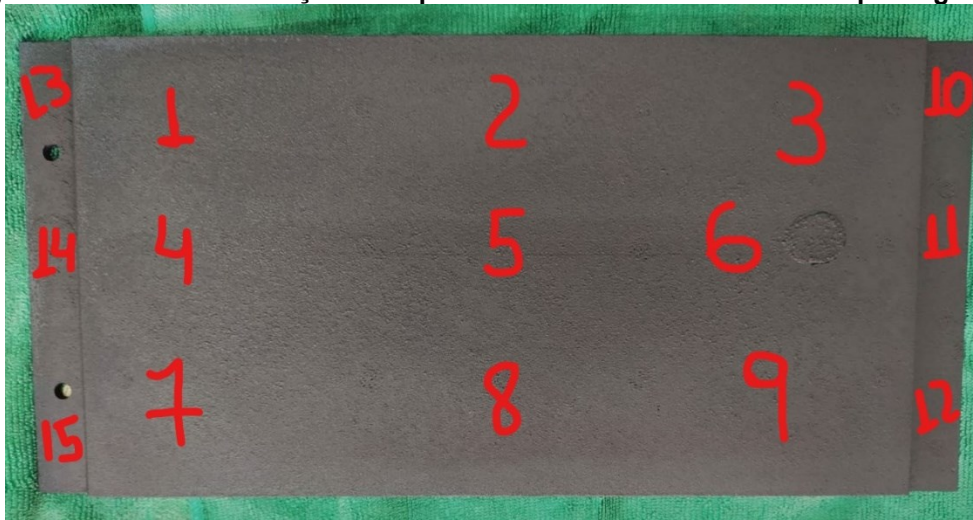
**Tabela 11 - Espessuras de camada de esmalte da placa pequena do segundo teste**

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8
Espessura ( $\mu\text{m}$ )	100	109	98	122	115	105	142	138
Média ( $\mu\text{m}$ )	116.125							
Desvio Padrão P	15.59998							

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os pontos de aferição da espessura da camada de esmalte da placa grande são ilustrados pela Figura 32.

**Figura 32 - Pontos de aferição da espessura da camada de esmalte da placa grande**



Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados das aferições das espessuras das camadas de esmalte da placa grande do primeiro teste são demonstrados pela Tabela 12.

**Tabela 12 - Espessuras de camada de esmalte da placa grande do primeiro teste**

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	138	141	145	137	214	145	104	134
Pontos	9	10	11	12	13	14	15	
<b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	97	104	98	116	95	107	97	
<b>Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	124.8							
<b>Desvio Padrão P</b>	30.39123							

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Os resultados das aferições das espessuras de camada de esmalte da placa grande do segundo teste são demonstrados pela Tabela 13.

**Tabela 13 - Espessuras de camada de esmalte da placa grande do segundo teste**

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	130	158	170	150	110	99	120	180
Pontos	9	10	11	12	13	14	15	
<b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	120	96	98	102	96	105	107	
<b>Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	122.7333							
<b>Desvio Padrão P</b>	27.47961							

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Observando os resultados obtidos pelas aferições das espessuras das camadas de esmalte das placas é possível salientar que existe uma tendência onde a coloração mais branda indica uma espessura de camada mais espessa, porém é difícil estabelecer com grande precisão pois os resultados têm uma discrepância significativa mesmo aferindo duas vezes o mesmo lugar ou em lugares próximos, essa discrepância é em decorrência da rugosidade das placas a qual faz como que dois pontos de diferente espessura fiquem mais perto do que normalmente ficariam em uma superfície lisa.

A conclusão mais evidente é que a espessura desejada para uma coloração ideal seja em torno dos 100  $\mu\text{m}$ , tanto pela análise da flutuação da média das espessuras das camadas quanto pelo critério de uma coloração mais desejável perto das camadas com 100  $\mu\text{m}$  de espessura.

#### 4.1.8.3 Teste de oxidação

O teste de oxidação foi realizado de acordo com a metodologia apresentada no item 3.1.8.4.

Este é um teste clássico para resistência à oxidação de revestimentos de peças para engenharia ou outros setores produtivos que tenham componentes submetidos às intempéries atmosféricas. O estado da peça teste após o teste de *Salt Spray* é exposto conforme a Figura 33.

**Figura 33 - Peça teste imersa em névoa salina**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

A peça, Figura 33, começou a apresentar sinais de oxidação 36 horas após o início do teste. Não há uma quantidade mínima de horas padronizada para este tipo de teste, cada empresa solicita o tempo requerido de acordo com a sua necessidade. No entanto, existe um acordo tácito entre empresas e fornecedores que exige no mínimo 24 horas de imersão sem oxidação para peças esmaltadas. Assim, de acordo com essa convenção implícita a peça teste está aprovada com folga.

#### 4.1.8.4 Quantidade de esmalte por MUP

A quantidade de esmalte necessário para maior unidade de produto é obtida a partir do cálculo da área superficial a ser esmaltada da MUP, multiplicada por uma constante de quantidade de esmalte por unidade de área.

A constante de quantidade de esmalte tem o valor de  $400 \text{ g/m}^2$  para uma camada de  $100\mu\text{m}$  de esmalte, convertendo a área superficial esmaltada da MUP em  $\text{cm}^2$  para  $\text{m}^2$  e arredondando para cima, pois estamos lidando com um consumível, o valor da área total da superfície esmaltada é de  $2,41 \text{ m}^2$ . Utilizando a Equação 2 tem-se:

$$Q = 2,41m^2 * 400 \frac{g}{m^2} \quad (4)$$

$$Q = 964g \quad (5)$$

Observando os cálculos acima realizados chega-se ao valor final da quantidade de esmalte para cada MUP manufaturada de 964 g de esmalte em pó para cada MUP.

#### 4.1.9 Taxa de perda de peças esmaltadas

A taxa de perdas foi estipulada de maneira arbitrária somente para englobar uma variável real que acontece em processos produtivos reais. Foi estipulada uma taxa de perda de 10% das peças esmaltadas. Levando em conta que o processo produza 9 MUP por hora de peças esmaltadas, aplicando os 10% de perdas estipuladas, o processo produz 8,1 MUP por hora de peças esmaltadas, que fica dentro da margem de uma média de 8 MUP por hora requisitada pela empresa.

#### 4.1.10 Prateleiras de armazenamento

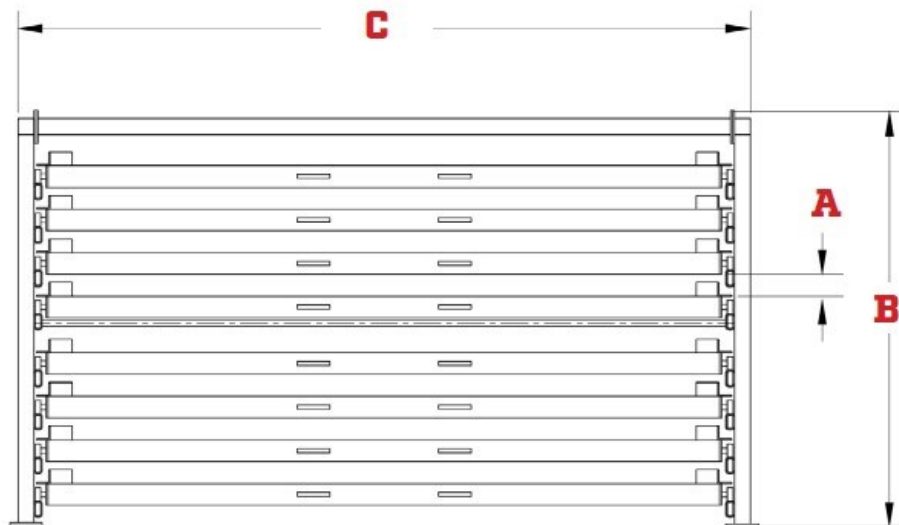
As prateleiras são as unidades armazenadoras das peças pós esmaltadas. É importante ressaltar que existem as peças quentes e as peças frias. As peças quentes precisam de descanso até atingirem a temperatura ambiente, as peças frias são aquelas já habilitadas para utilização. Portanto, há a necessidade de duas prateleiras, uma preenchida com peças quentes para resfriamento e outra com peças frias para uso. A Tabela 14 apresenta as especificações técnicas das prateleiras que serão usadas do tipo Rack.

<b>Modelo</b>	60x120R				
<b>Capacidade por gaveta</b>	5000 lbs				
<b>Número de gavetas</b>	4	5	6	7	8
<b>Altura da gaveta (A)</b>	12"	10"	8"	6"	4"
<b>Altura do Rack (B)</b>	73"	79"	81"	79"	73"
<b>Comprimento do Rack (C)</b>	135"				
<b>Largura do Rack (D)</b>	127"				
<b>Comprimento da gaveta (E)</b>	122"				
<b>Largura da gaveta (F)</b>	62"				
<b>Extensão de Roll-out (G)</b>	68"				

Fonte: Autoria Própria (2023)

O modelo de Rack escolhido para o armazenamento foi o 60x120R com 7 gavetas. As Figuras 34 e 35 mostram as vistas de frente e tipo do Rack, e as medidas em vermelho, ilustradas, são referentes as medidas apresentadas na Tabela 14.

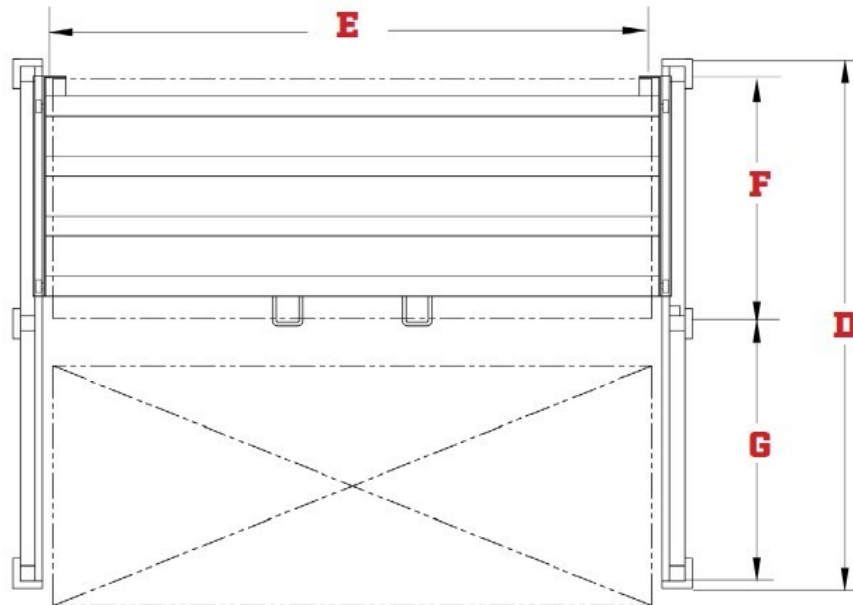
**Figura 34 - Vista frontal do rack com 8 gavetas**



Fonte: Steel Storage Systems (2023)



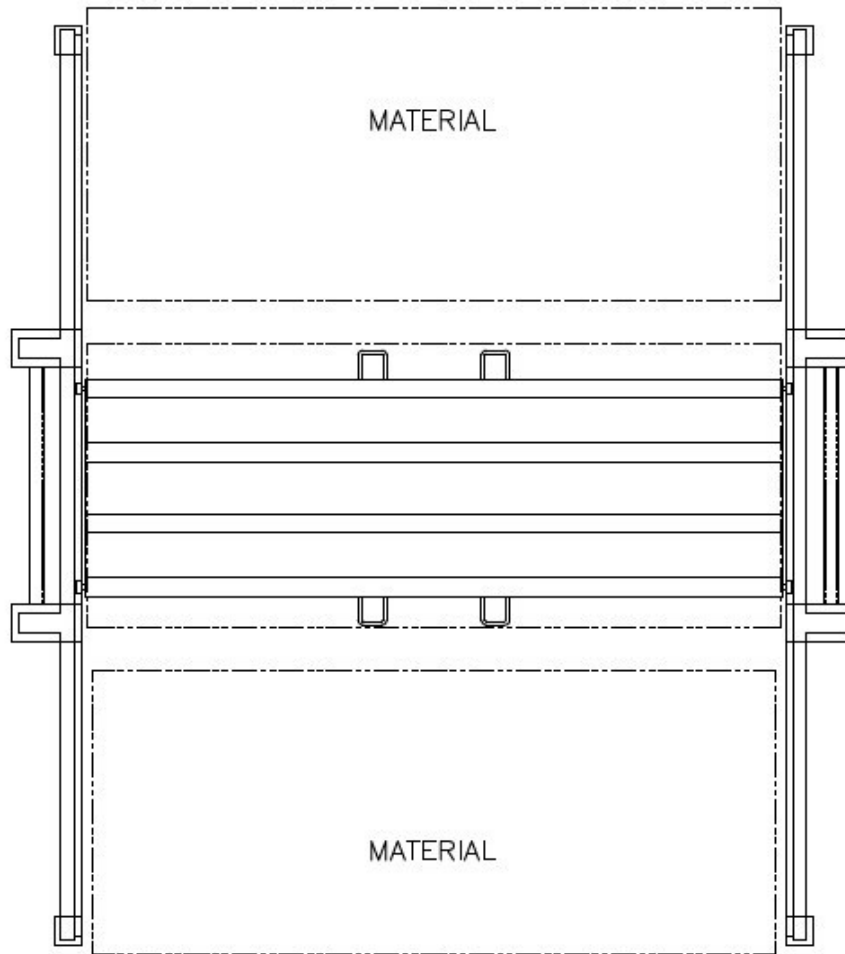
**Figura 35 - Vista de topo do rack com roll-out total**



**Fonte: Steel Storage Systems (2023)**

Esse modelo suporta com facilidade o peso das peças do fogão por gaveta e cada gaveta tem capacidade de armazenar em área superficial o equivalente à aproximadamente duas MUP inteiras. Assim, com um espaçamento ideal para uma troca de calor eficiente das peças com o ambiente as prateleiras conseguem armazenar com tranquilidade 10 MUP em sua totalidade. Portanto, cada prateleira consegue armazenar mais de uma hora de produção de peças esmaltadas, suprimindo com folga o tempo necessário para o resfriamento das peças.

As prateleiras também têm a capacidade de ser acessadas por ambos os lados, assim o armazenamento pode ser feito de um lado e a retirada do outro para que facilite a continuidade do processo como ilustra a Figura 36.

**Figura 36 - Vista de topo do rack com abertura bilateral**

**Fonte: Steel Storage Systems (2023)**

#### 4.1.11 Transporte das peças

O transporte das peças é feito de forma manual pois cada parte do processo de esmaltação é adjacente um ao outro. A cabine de aplicação do esmalte fica a poucos passos do forno de queima, portanto, a peça esmaltada pode ser transportada manualmente da cabine para a esteira do forno. Assim, as prateleiras de armazenamento também ficam a menos de 1 metro de distância da esteira de saída do forno, podendo transferi-las manualmente do mesmo modo.

#### 4.1.12 Funcionários necessários no processo

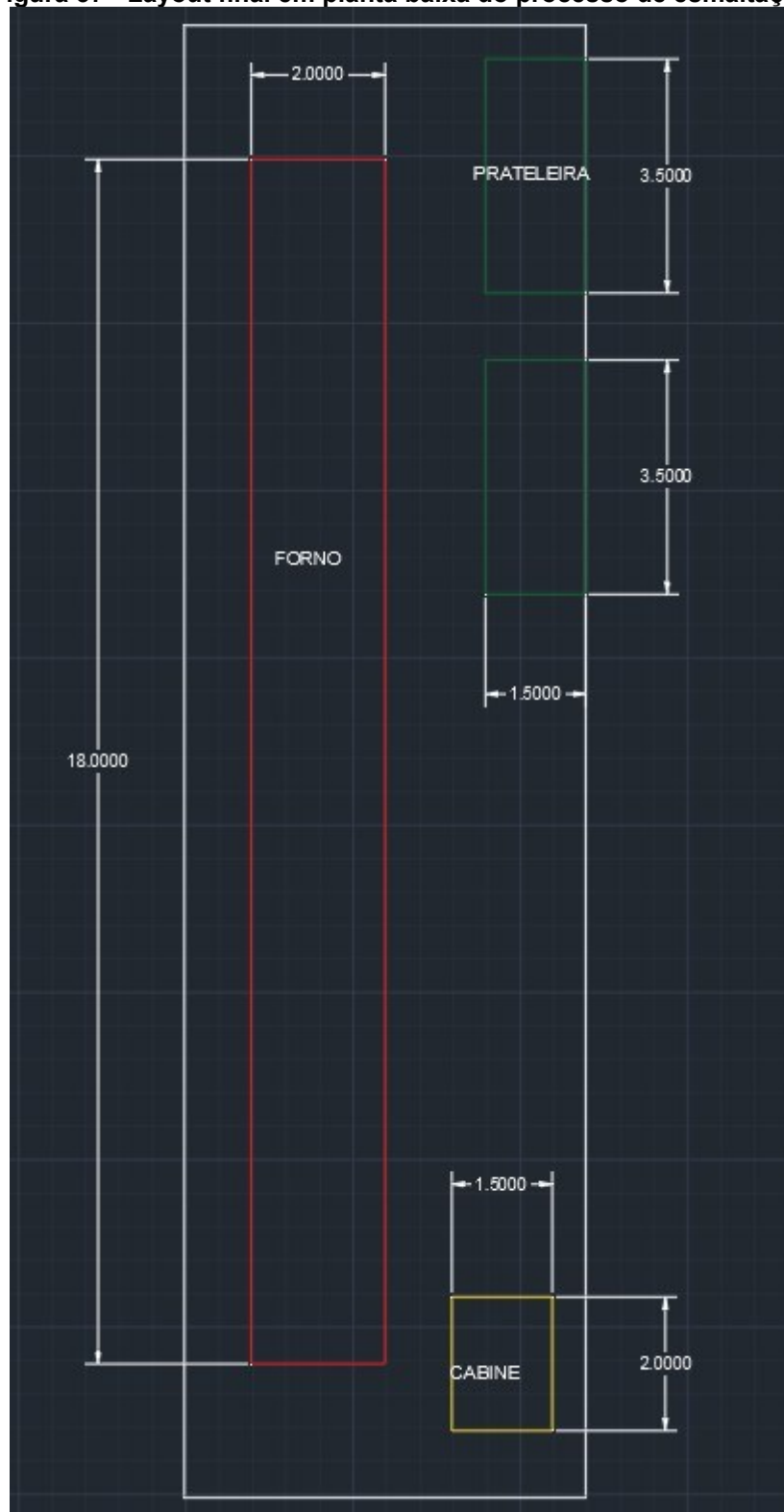
O processo de esmaltação idealizado conta com no mínimo quatro funcionários distintos.

Um funcionário especializado para a aplicação do esmalte na cabine, sendo este mesmo o transportador primário das peças para a entrada do forno. Um funcionário encarregado da operação do forno de queima, outro para a inspeção de qualidade das peças pós esmaltadas e por final o transportador secundário, o qual transladará as peças de saída da esteira do forno para as prateleiras de armazenamento.

Porém, o inspetor de qualidade e o transportador secundário trabalham em conjunto, assim, o transportador secundário pode ser eliminado e o inspetor torna-se encarregado de transladar as peças para as prateleiras.

#### 4.1.13 Layout final

O *Layout* final tem como objetivo organizar da melhor maneira possível a disposição dos componentes do processo de esmaltação para que haja a maior eficiência possível do processo. Isso significa menor deslocamento entre um setor e outro, facilidade de saída e entrada de material, facilidade na observação do processo, na manutenção dos equipamentos e no transporte das peças. A Figura 37 representa o *Layout* final em planta baixa.

**Figura 37 - Layout final em planta baixa do processo de esmaltação**

Fonte: Autoria Própria (2023)

O retângulo em branco representa o espaço total designado pela empresa de 6 m de largura por 22 m de comprimento, os limites lateral esquerdo e superior são paredes, enquanto os limites direito e inferior são abertos.

O retângulo em vermelho representa o forno, há uma distância da parede superior de 2 m e uma distância da parede esquerda de 1 m, a distância da parede esquerda tem a função tanto para o bom funcionamento do forno como também uma abertura de espaço com capacidade de ser acessado caso haja necessidade de manutenção. A entrada é situada na parte inferior, a largura de ocupação do forno é de 2 m e 18 m de comprimento.

A cabine de esmaltação representada pelo retângulo amarelo fica situada a 1 m de distância da entrada do forno com a sua abertura na parte superior onde fica situado o operador de aplicação do esmalte, assim as peças esmaltadas têm uma grande facilidade de transporte para o forno, sendo realizado o transporte das peças de forma manual. A cabine tem uma largura de ocupação de 1,5 m e comprimento de 2 m. As peças pré esmaltadas ficam situadas no espaço entre a cabine e as prateleiras de armazenamento para uma facilidade de acesso ao operador de aplicação do esmalte.

As prateleiras são representadas pelos retângulos na cor verde. Cada prateleira tem um espaço de ocupação de 3,5 m de comprimento e 1,5 m de largura, a prateleira superior fica a uma distância de 0,5 m da parede superior. A distância entre prateleiras é de 1 m. A distância entre as prateleiras e o forno é de 1,5 m, exatamente à distância de abertura máxima da gaveta da prateleira, desta maneira o deslocamento das peças pós esmaltadas até o recipiente de armazenamento é mínimo e pode ser realizado manualmente. A abertura da prateleira para lado direito excede o limite direito, porém como o limite é aberto ela serve como um facilitador de acesso para a utilização na próxima etapa, que fica localizada em frente ao limite direito do espaço designado pela empresa.

## **4.2 Viabilidade econômica do processo de esmaltação**

### **4.2.1 Custos de implantação**

Os custos de implantação são o somatório dos custos dos componentes físicos (máquinas) necessários para que o processo funcione, ou seja, o forno de queima, a cabine de esmaltação, o acoplamento pistola leito fluidizado e as prateleiras.

Em tese deveria constar também os custos primários de operação para que o processo tenha início, porém foi resolvido separar totalmente os dois para facilitar a visualização dos custos. A Tabela 15 apresenta os custos referentes à implantação do processo de esmaltação.

**Tabela 15 - Custos de implantação**

<b>ITEM</b>	<b>Quantidade</b>	<b>PREÇO (R\$)</b>
Pistola de aplicação c/ leito OptiFlex 2 FE	1	R\$ 73,610.63
Forno de queima	1	R\$ 702,000.00
Cabine de aplicação ClassicStandart 2	1	R\$ 50,000.00
Prateleiras	2	R\$ 40,000.00
	<b>Total</b>	<b>R\$ 865,610.63</b>

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

Cada preço foi obtido pelo contado direto com os fornecedores. Infelizmente os custos acima não contabilizam os custos de instalação que dependem exclusivamente de negociação com cada fabricante ou a negociação com instaladores externos, todavia, o preço de instalação é ínfimo se comparado com o preço total, não agravando significativamente o resultado.

#### 4.2.2 Custos de operação

Os custos de operação são como o nome já define, os custos devidos à operação do processo depois de propriamente instalado, estes custos são encapsulados por mês. Os custos de operação se dividem em dois: os custos fixos e os custos variáveis. Os custos fixos são aqueles que não alteram durante o funcionamento do processo ao longo do tempo.

Os custos fixos são somente os salários dos funcionários. Os custos variáveis em contra partida são aqueles que variam durante o processo ao longo do tempo, devido a demanda. Os custos variáveis são a quantidade utilizada de esmalte mensal e a quantidade de energia consumida mensal. A Tabela 16 mostra a relação entre funcionários e seus salários os quais são referentes aos custos fixos de operação.

**Tabela 16 - Custo fixo salarial**

<b>Função</b>	<b>Salário</b>
Transporte de Peças	R\$ 1.600,00
Operador de Forno Elétrico	R\$ 1.836,99
Esmaltador	R\$ 2.007,74
Inspetor de Qualidade	R\$ 2.344,55
<b>Total</b>	<b>R\$ 7.789,28</b>

**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Os salários que constam na Tabela 16 foram retirados de uma média salarial para cada função no estado do Paraná. Esses valores foram obtidos a partir um banco de dados gratuito que está de acordo com os dados fornecidos pela Secretaria da Previdência e Trabalho do Ministério da Economia (Salários das Profissões, 2023).

A Tabela 17 estratifica os itens levados em conta na elaboração dos custos de operacionais variáveis.

**Tabela 17 - Dados dos custos operacionais variáveis**

<b>Preço do esmalte por kg</b>	R\$ 38,00
<b>Quantidade de esmalte por MUP (kg)</b>	0,964
<b>Tarifa do kWh</b>	R\$ 0,56
<b>Energia consumida mensal (kW)</b>	59.840
<b>Produção mensal de MUP</b>	1430
<b>Custo mensal de esmalte</b>	R\$ 52.383,76
<b>Custo mensal de energia</b>	R\$ 34.108,80
<b>Custo variável operacional total</b>	<b>R\$ 86.492,32</b>

**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

O preço do esmalte foi estabelecido pelo fornecedor de matéria prima, a quantidade de esmalte por MUP foi extraída do item 4.1.11.4, a tarifa de energia foi retirada do banco de dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) para a região de Curitiba pois é a tarifa com preço mais consistente, a produção mensal foi estipulada a partir da produção de 8 MUP por hora de peças esmaltadas.

O custo mensal do esmalte foi calculado pela multiplicação da quantidade de MUP produzida no mês pela quantidade de esmalte necessário por unidade pelo preço por quilograma. O custo mensal de energia foi calculado a partir da multiplicação da tarifa de energia pela quantidade de energia utilizada em um mês de operação do processo. A quantidade de horas de operação para um mês foi estipulada em 8 horas de operação por dia, 22 dias por mês, totalizando 176 horas.

A Tabela 18 demonstra o custo operacional total, o qual é a soma dos custos fixos e custos variáveis.

<b>Custo variável operacional total</b>	R\$ 86.492,32
<b>Custo fixo operacional total</b>	R\$ 7.789,28
<b>Custo operacional total</b>	R\$ 94.281,60

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

É necessário frisar que este custo total é mensal e com produção plena.

#### 4.2.3 Custo total

O custo total é a somatória entre o custo de implantação e o custo operacional, porém, é necessário entender que o custo de implantação é um custo final enquanto o custo de operação é um custo mensal. Portanto, somado os dois, o que se obtém é o custo de implantação direta, que significa o custo de implantação mais o primeiro mês de funcionamento do processo. A Tabela 19 ilustra, portanto, o custo total do primeiro mês de atividade.

<b>Custo Operacional total</b>	R\$ 94,281.60
<b>Custo de Implantação total</b>	R\$ 865,610.66
<b>Custo total</b>	R\$ 959,892.26

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

#### 4.2.4 Retorno sobre o investimento

$$ROI = \frac{CT}{LRU * QM} \quad (3)$$

A equação acima é a mesma equação apresentada no item 3.2.4. O Custo total utilizado para o cálculo será o custo de implantação total de R\$ 865.610,66, este é o valor cujo estado pode ser referenciado ao longo de meses pelo resultado. O valor operacional não pode ter um ROI dado em meses já que o seu valor se dá mensalmente.



A Tabela 20 mostra a aplicação da Equação (3) em uma faixa de valores de reversão de lucros por MUP os quais são referentes à variável LRU na equação.

**Tabela 20 - Retorno sobre o investimento**

<b>Reversão de lucros parciais por MUP (R\$)</b>	<b>Total revertido mensal</b>	<b>Qntde de meses ROI</b>
R\$ 200.00	R\$ 284,000.00	3,047924754
R\$ 150.00	R\$ 213,000.00	4,063899671
R\$ 100.00	R\$ 142,000.00	6,095849507
R\$ 50.00	R\$ 71,000.00	12,19169901
R\$ 25.00	R\$ 35,500.00	24,38339803

**Fonte: Autoria Própria (2023)**

O Total revertido mensal corresponde ao denominador inteiro da equação e a última coluna indica os meses para o Retorno do Investimento (ROI). Assim, fica a encargo da empresa definir quanto de lucro será revertido para abatimento dos custos, lembrando que esses cálculos foram efetuados para uma produção plena de 1430 MUP por mês.

O Custo de Operação é analisado de maneira diferente, onde não é obtido o ROI, mas sim a reversão do lucro mínimo necessário para equilíbrio das despesas. Dividindo o Custo de Operação pela produção mensal é obtido o valor de R\$ 66,00 como lucro mínimo necessário a ser revertido por MUP. Conseqüentemente, o valor escolhido pela empresa para a reversão dos lucros para o abatimento dos Custos de Implantação terá o acréscimo de R\$ 66,00, totalizando assim o Retorno sobre o Investimento correto.

Todavia, a interpretação do ROI modificado é a seguinte: os meses obtidos pela reversão dos lucros no ROI significam que o Retorno sobre o Investimento até aquele mês é zero, porquanto, após esse período, o valor integral obtido pela venda menos o custo operacional que permanece mensalmente será o Retorno sobre o Investimento propriamente dito.

## 5 CONCLUSÕES

Ao encerrar o projeto foi possível constatar que o ferro fundido fabricado pela empresa estava capacitado a ser submetido a aplicação do esmalte, com uma composição adequada, a qual corroborou para uma boa adesão do esmalte sem que houvesse defeitos visíveis em relação a camada esmaltada. O esmalte utilizado oportunamente também já possuía as características essenciais requeridas pelo cliente, apresentando boa cobertura, uma espessura de camada coerente não sendo fina a ponto de sofrer com danos externos mas também não grossa a ponto de encarecer demais o processo.

O método eletrostático de aplicação apresentou-se como uma boa opção uma vez que já é um processo consolidado no mercado, exibindo bem as suas características positivas, como a facilidade na aplicação, limpeza do processo e baixa necessidade de equipamentos. O local fornecido para implantação do projeto teve um tamanho adequado, tanto para os equipamentos quanto para o processo em geral, sem excedente de espaço e ao mesmo tempo com capacidade suficiente para fluidez do processo.

Os equipamentos utilizados para realização da aplicação não foram de nenhuma forma ideais, o que confere uma segurança sólida aos equipamentos selecionados, os quais sendo topos de linha em suas respectivas áreas acarretarão em uma qualidade de produto final excelente.

Os custos do processo se olhados sobre um prisma de relação com o tempo do retorno sobre o investimento estão adequados, já que mesmo utilizando a faixa mínima de retorno por unidade, o tempo de conversão não passa de dois anos; enquanto processos industriais têm como faixa temporal de retorno do investimento meia década ou mais.

Infelizmente houve problemas técnicos. O forno utilizado para o teste de queima do esmalte era muito aquém do necessário, além de ser estacionário, o que reduz consideravelmente a precisão do estudo. A pistola de aplicação não tinha fluidização e muito menos capacidade de ajustes finos, com potência, tensão e corrente únicas, o que também prejudica a qualidade do produto final.

Contudo, este projeto atingiu o que se esperava dele, apresentando resultados expressivos na parte técnica e econômica, com capacidade suficiente de servir como referência para implantação do processo na empresa.

Para estudos futuros neste campo de revestimentos cerâmicos, podem ser feitos novos testes com a adição de melhores recursos, além de uma quantificação de outros parâmetros essenciais ao processo como a quantificação da ação da gravidade no processo, utilização de várias escalas de campos elétricos e formas de aplicação.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8094: material metálico revestido e não revestido: corrosão por exposição à névoa salina. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ADAIR, S. *et. al.* Shreir's Corrosion. *In*: CURTIS, T. **Degradation of Vitreous Enamel Coatings**. Vol. 3, Elsevier, 2010, p. 2330-2336.

ANDREWS, Andrew I. **Porcelain Enamels: The Preparation, Application and Properties of Enamels**, 2. ed. Campaign, Illinois: The Garrard Press, 1960.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P.P.; BHATTACHARYA, D.K. **Ciência e Engenharia dos materiais Tradução da 3ª edição norte-americana**. [S. l.] Cengage Learning Brasil, 2014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522118014/>. Acesso em: 29 Mar 2022.

BUARQUE, Cristovam.; **Avaliação Econômica de Projetos**. Elsevier, 1ª Ed. São Paulo, 1984.

BRIGHT, A.W; COFFEE, R. A. Electrostatic Powder Coatings. **The International Journal of Surface Engineering and Coatings**, Londres, Reino Unido, v.41, t.1, p. 69-73, 1964.

CORBETT, R. P.; MAKIN, B. Electrostatic Application of Vitreous Enamel in Dry Powder Form. **The International Journal of Surface Engineering and Coatings**, Londres, Reino Unido, v.51, t.1, p. 160-164, 1973

FU, Dechun. Particle size effect on the properties of electrostatic powders. **Ceramic Engineering and Science Proceedings**. Baltimore, Estados Unidos, v. 15, p. 91-103, 1994.

FUSION CERAMICS. **Ceramic Frits**. Disponível em: <http://www.fusionceramics.com/ceramic-frits.cfm>. Acesso em: 22 de Abril de 2022.

Jr., W. D. C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. [S. l.] Grupo GEN, 2020. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 21 Mar 2022.

KELLER, P.; OFLER, H. Planning a Porcelain Enamel Powder Plant. *In*: PROCEEDINGS OF THE 45TH PORCELAIN ENAMEL INSTITUTE TECHNICAL FORUM, 1984, Columbus. **A Collection of Papers Presented at the 45th Porcelain Enamel Institute**. Columbus: The Ohio State University, 1983, p. 192-197.

MERRITT, Christopher. New Enamel Powder Spray and Recovery Technology Offers Greater Production Flexibility and Output. *In*: 24TH INTERNATIONAL ENAMELLERS CONGRESS AND 80TH PORCELAIN ENAMEL INSTITUTE TECHNICAL FORUM, 2018, Chicago. **Collection of Papers Presented at the 24th**

**International Enamellers Congress and 80th Porcelain Enamel Institute Technical Forum**, Chicago, 2018, p. 231-238.

NORDSON CORPORATION. **902 Powder Coating Booth**: Customer Product Manual Part 334 600A. Amherst, Ohio, Estados Unidos, 1999.

PORCELAIN ENAMEL INSTITUTE. MANUAL DE APLICACIÓN DEL ESMALTE ELECTROSTÁTICO EN POLVO. *In*: **PEI BULLETIN P-300**.

ROSSI, S.; RUSSO, F.; COMPAGNONI, A. M. **A brief history of porcelain enamel: from artistic enamel to technical enameling**. MDPI. Basel, Suíça, 2020.

RUSSO, F.; ROSSI, S.; COMPAGNONI, A.M. **Porcelain Enamel Coatings**. MDPI. Basel, Suíça, 2021.

SALÁRIO DAS PROFISSÕES. **Cargos e salários do Mercado de Trabalho**. Disponível em: <https://www.salario.com.br/>. Acesso em: 16 de Março de 2023.

SAURIN, V, *et. al.* Medidas de eficiência e retorno de Investimento: um estudo nas distribuidoras de energia elétrica brasileiras com base em Data Envelopment Analysis, Índice de Malmquist e ROI. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. v. 6, n. 1, Janeiro-Março, pp. 25-38, 2013.

SHCHEPOCHKINA, Y.A. Enamel for cast iron. **Glass and Ceramics**, Ivanovo, Rússia, v.37, p. 104, 1995.

SMITH, W.F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. [S. l.]: Grupo A, 2012 Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551150/>. Acesso em: 29 Mar 2022.

TRINKS W. *et. al.* **Industrial Furnaces**, 6. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

VITRIOUS ENAMEL ASSOCIATION. **History of Vitreous Enamel**. Warrinton, Reino Unido. Disponível em: <https://www.vea.org.uk/history-of-vitreousenamel/>. Acesso em: 14 de Abril de 2022.

WRATIL, J. **Vitreous Enamels**. Borax Holdings Limited, Londres, Reino Unido 1984.